



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

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ  
ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΡΙΑ Ν. ΘΩΜΑ**

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Ιούλιος 2012**





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

## ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΠΤΩΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Θωμά Ν. Μαρία**

**Επιβλέπων :** Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2012

.....  
Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Παπαθανασίου Σταύρος

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεωργιάκης Παύλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....  
Μαρία Ν. Θωμά

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

Copyright © Μαρία Ν. Θωμά, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στη θεία μου Νίκη Παρασκευοπούλου*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των βασικών μεγεθών των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όταν σε αυτά συνδέονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα εξετάζονται τα βασικά μεγέθη που προκύπτουν από τη σύνδεση φωτοβολταϊκών.

Για την πραγματοποίηση χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές γραμμές διανομής: μια αγροτική γραμμή διανομής η οποία ανήκει στο δίκτυο της Ικαρίας και μία αστική γραμμή η οποία ανήκει στο δίκτυο της Κατερίνης και αποτελεί μέρος του διασυνδεδεμένου συστήματος.

Υπολογίστηκε η μέγιστη δυνατή διείσδυση των φωτοβολταϊκών ως μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς να παραβιάζονται τα κριτήρια ορθής λειτουργίας των δικτύων διανομής δηλαδή των τάσεων και της ροής ισχύος των γραμμών στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Μελετήθηκαν δύο ακραίες περιπτώσεις: Αυτή της μέγιστης ζήτησης φορτίου και αυτή της ελάχιστης. Στην περίπτωση της ελάχιστης ζήτησης φορτίου μελετήθηκε το ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιώντας δύο σενάρια. Στο πρώτο τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά ομοιόμορφα σε κάθε υποσταθμό του δικτύου. Στο δεύτερο τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά στην αρχή στη μέση και στο τέλος της γραμμής αυξάνοντας το ποσοστό διείσδυσης κάθε φορά.

Η μελέτη των δικτύων διανομής έγινε με το πρόγραμμα DIgSILENT PowerFactory. Πραγματοποιήθηκε γραφική απεικόνιση των δύο δικτύων. Τοποθετήθηκαν τα φορτία σύμφωνα με τα ακραία σενάρια της μέγιστης και της ελάχιστης ζήτησης και στη συνέχεια εφαρμόστηκαν τα δύο σενάρια διείσδυσης φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής. Προκειμένου να διαπιστωθούν τα κριτήρια ορθής λειτουργίας έγινε ανάλυση της ροής φορτίου μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton – Raphson.

Στα πλαίσια των παραπάνω εκτελείται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη διεσπαρμένη παραγωγή, τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα διάφορα είδη φωτοβολταϊκών καθώς και της σημασίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ενεργειακή παραγωγή. Τέλος, γίνεται παρουσίαση του προγράμματος DIgSILENT PowerFactory.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

DIgSILENT PowerFactory, δίκτυα διανομής, διεσπαρμένη παραγωγή, ΑΠΕ, φωτοβολταϊκά, μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, ποσοστό διείσδυσης.

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study the fundamentals of electricity grids in the permanent mode when connected to these renewable energy sources. More specifically addresses to the fundamentals derived from the connection of photovoltaics.

Two different distribution lines are considered: a rural distribution line owned by the network of Ikaria and an urban line which belongs to the network of Katerini and is part of the inter-connected system.

The maximum possible penetration of PV as dispersed production units was studied, without violating the criteria of good operation of distribution networks: the voltage limits and the thermal limits of lines in permanent mode. Two extreme cases were studied: At first case we considered that the demand of load is maximum and at the second case that the demand of load is minimum. Furthermore, at the second case we applied two different scenarios of PV penetration. In the first scenario PVs were evenly placed in each substation of the network. In the second scenario PVs were placed at the beginning at the middle and at the end of the line. At the second scenario we increased each time the percentage of penetration.

This study of distribution networks has been conducted using program DIgSILENT PowerFactory. Through this program the two networks were graphically illustrated. Loads were placed under extreme scenarios of maximum and minimum demand and then the two PV penetration scenarios were applied in distribution networks. In order to justify whether the criteria of proper functioning are observed a load flow analysis is applied using the Newton – Raphson iterative method.

In addition a review of the literature is performed on dispersed production, electricity distribution networks, the various types of PVs and the importance of renewable energy sources in energy production. Finally, the program DIgSILENT is presented.

## KEY WORDS

DIgSILENT PowerFactory, distribution, dispersed generation, renewable energy, solar panels, permanent mode.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012 υπό την επίβλεψη του κ. Νικολάου Χατζηαργυρίου, καθηγητή του ΕΜΠ, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την διδάκτορα Εριέττα Ζουντουρίδου για τη βοήθεια και τη συνεργασία.

Επίσης, δε θα μπορούσα να παραλείψω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για τη στηριξή και την ενίσχυση που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τα τόσο όμορφα χρόνια της φοιτητικής μας ζωής.

Μαρία Ν. Θωμά  
Ιούλιος 2012



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1. ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>11</b>
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	11
1.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	12
1.2.1. ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	12
1.2.2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	14
1.2.3. ΕΝΑΕΡΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	16
1.3. ΜΟΡΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	18
1.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	25
1.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....	28
<b>2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ</b> .....	<b>30</b>
2.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	30
2.2. Η ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	31
2.2.1. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	32
2.2.2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	32
2.3. ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	34
2.3.1. ΜΕΘΟΔΟΣ GAUSS-SEIDEL.....	35
2.3.2. NEWTON-RAPHSON.....	36
<b>3. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ</b> .....	<b>40</b>
3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	40
3.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	41
3.2.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ.....	41
3.2.2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ.....	42
3.2.3. ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	45
3.2.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	49
3.3. ΤΥΠΟΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ.....	50
3.4. ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	57
3.4.1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΑΡΚΑ.....	57
3.4.2. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	59
3.4.3. ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ.....	60
3.5. ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	60
<b>4. ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗ &amp; ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>63</b>
4.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	63
4.2. ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	64

4.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ.....	65
4.4. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	67
<b>5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ DIgSILENT PowerFactory.....</b>	<b>71</b>
5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	71
5.2. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ EUROSTAG.....	71
<b>6. ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ .....</b>	<b>79</b>
6.1. ΔΙΚΤΥΟ Α .....	79
6.2. ΔΙΚΤΥΟ Β.....	80
<b>7. ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....</b>	<b>85</b>
7.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	85
7.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	85
7.3. ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	87
7.4. ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ .....	95
<b>8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.....</b>	<b>112</b>
<b>9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>114</b>
<b>10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>115</b>

# 1. Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

## 1.1 Γενικά

Με τον παραπάνω όρο εννοούνται οι εγκαταστάσεις που είναι απαραίτητες για την τροφοδοσία των καταναλωτών από τους υποσταθμούς μεταφοράς. Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς που ξεκινούν από τους υποσταθμούς μεταφοράς και καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής και είναι γνωστές σε γραμμές μέσης τάσης, τους υποσταθμούς διανομής όπου μετασχηματίζεται η μέση τάση στη χαμηλή τάση και τέλος στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης που ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής και καταλήγουν στους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών. Τέλος, θα πρέπει να συμπεριληφθούν οι διατάξεις ασφαλείας, χειρισμού και υποσταθμών υποβιβασμού Χ.Τ. (20 ή 15/0.4 kV) που παρεμβάλλονται μεταξύ των υποσταθμών υποβιβασμού Μ.Τ. (150/20 ή 15 kV) και τους καταναλωτές Χ.Τ. και Μ.Τ.

Το σύστημα διανομής, σε συνδυασμό με το σύστημα μεταφοράς που προηγήθηκε, παρατηρείται φυσικά σε μεγάλα δίκτυα, που εξυπηρετούν μεγάλες και διασκορπισμένες περιοχές φορτίων (π.χ. Εθνικά Δίκτυα). Αν όμως υποτεθεί ότι έχουμε απομονωμένη κατανάλωση όπως μια μικρή πόλη σε νησί που εξυπηρετείται από ένα μικρό τοπικό Σταθμό Παραγωγής, τότε δεν υπάρχει φυσικά μεταφορά παρά μόνο διανομή που αρχίζει απευθείας από το σταθμό και τελειώνει στις καταναλώσεις.

Οι γραμμές διανομής πρέπει να εξασφαλίζουν καλή και οικονομική λειτουργία και το βασικό χαρακτηριστικό που επηρεάζει αυτή τη λειτουργία είναι η πτώση τάσης στη γραμμή διανομής που οφείλεται στην αντίστασή της. Τόσο η αντίσταση όσο και η πτώση τάσης πρέπει να είναι ελάχιστες ώστε να εξασφαλίζουν σχετικά σταθερή τάση στους καταναλωτές. Η ελαχιστοποίηση της αντίστασης όμως οδηγεί σε αύξηση του κόστους εγκατάστασης λόγω της απαίτησης για μεγαλύτερη διατομή αγωγών. Η συνεχής τροφοδότηση των καταναλωτών εξασφαλίζεται με τις πολλαπλές συνδέσεις των φορτίων στο δίκτυο, η συνεχής επίβλεψη του δικτύου με κατάλληλες συσκευές και ειδικευμένα εργαλεία άμεσης επισκευής βλαβών.

Η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι τυποποιημένη για την Ελλάδα και την Ευρώπη και γίνεται με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα 50 Hz και τάση 220/380V. Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν μόνο τρεις αγωγούς. Πριν το 1970 λειτουργούσαν στην τάση των 15kV σε όλη την Ελλάδα με εξαίρεση την περιοχή της Αττικής όπου λειτουργούσε το υφιστάμενο δίκτυο υπομεταφοράς 22kV σε συνδυασμό με το ευρύ δίκτυο διανομής 6.6kV, κυρίως υπόγειο, που είχε αναπτύξει η προηγούμενη ηλεκτρική εταιρεία (ΗΕΑΠ). Η τάση των 20kV για τα

δίκτυα Μ.Τ. τυποποιήθηκε τη δεκαετία του '70 τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και για λόγους εναρμόνισης με την ευρωπαϊκή τυποποίηση. Σήμερα η πλειοψηφία των δικτύων διανομής ΜΤ λειτουργεί στα 20kV ενώ τα υπόλοιπα που λειτουργούν ακόμα στα 15kV έχουν εγκατεστημένα υλικά (π.χ. μονωτήρες, μετασχηματιστές κ.λ.π.) τα οποία είναι σχεδιασμένα για τάση λειτουργίας 20kV, με σκοπό τη σταδιακή μεταφορά των δικτύων αυτών στην τάση των 20kV.

Η τυποποίηση της τάσης των 20kV για τα δίκτυα διανομής ΜΤ της χώρας οδήγησε στην υιοθέτηση βασικού επιπέδου μόνωσης (BIL – στάθμη κρουστικής αντοχής) 125kV και στάθμη βραχυκύκλωσης 250MVA (επίπεδο τριφασικού βραχυκυκλώματος 7,2kA και στα 20kV και 10kA στα 15kV. Όλα τα δίκτυα είναι τριφασικά τριών αγωγών, με γειωμένο τον ουδέτερο κόμβο του δευτερεύοντος του Μ/Σ προς Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ μέσω αντιστάσεως για τον προορισμό του ρεύματος σφάλματος προς γη στα 1000Α.

## 1.2 Περιγραφή Δικτύου Διανομής

### 1.2.1 Υποσταθμοί Διανομής

Οι υποσταθμοί διανομής ή υποσταθμοί Μ.Τ./Χ.Τ. μετασχηματίζουν τη μέση τάση σε χαμηλή. Εξοπλίζονται με μετασχηματιστές 20kV/0.4kV ή 20-15/0.4kV των εξής τυποποιημένων μεγεθών ονομαστικής ισχύος: 50, 100, 160, 250, 400, 630, 1000 KVA. Στο παρελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα μεγέθη μετασχηματιστών (75, 200, 500, 750 KVA) σε υποσταθμούς αλλά δεδομένου ότι τα μεγέθη αυτά δεν εγκαθίστανται κατά τα τελευταία έτη, το ποσοστό των αντίστοιχων υποσταθμών μειώνεται συνεχώς. Η παρεχόμενη ισχύς είναι μικρή και κατασκευάζονται μέσα σε πόλεις σε σημεία που εξυπηρετούν καλύτερα τους καταναλωτές.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ενδεικτικά η συνήθης κατανομή των μεγεθών των μετασχηματιστών στους διάφορους τύπους υποσταθμών διανομής καθώς και το αντίστοιχο πλήθος αναχωρήσεων Χ.Τ.

<u>Υποσταθμοί Διανομής</u>	<u>Ισχύς Μ/Σ (kVA)</u>	<u>Πλήθος Αναχωρήσεων Χ.Τ.</u>
Εναέρια	50	2
	100	
	160	4
	250	
	400	5
Εσωτερικού χώρου	630	
	1000	8
Συνεπτυγμένοι -	250	4

Υπαίθριοι	400	5
	630	8

Κατανομή μεγεθών M/Σ στους υποσταθμούς και πλήθος αναχωρήσεων

Οι επίγειοι υποσταθμοί εγκαθίστανται στην επιφάνεια του εδάφους. Κατασκευάζονται για την εξυπηρέτηση μεγάλων σχετικά ισχύων ή όταν υπάρχουν λόγοι αισθητικής και ασφάλειας. Διακρίνονται σε κλειστούς ή στεγασμένους και σε ανοιχτούς επίγειους σταθμούς. Εξυπηρετούν εναέριες αλλά και υπόγειες γραμμές.

Οι στεγασμένοι επίγειοι υποσταθμοί τοποθετούνται σε ειδικά οικήματα ή σε κατάλληλα διαρρυθμισμένους χώρους οικοδομών. Οι χώροι που χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση των υποσταθμών χωρίζονται συνήθως με μεταλλικά πλέγματα σε κυψέλες μέσης και χαμηλής τάσης που σε αριθμό είναι διπλάσιες του αριθμού των μετασχηματιστών του υποσταθμού. Εκτός των μετασχηματιστών οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν τα όργανα μέτρησης, τα αλεξικεύρανα, τους αυτόματους διακόπτες και τις ασφάλειες.

Εκτός των κλασικών μονωτήρων ανάρτησης που αναφέρθηκαν και προηγουμένως στους επίγειους υποσταθμούς χρησιμοποιούνται και οι μονωτήρες διέλευσης. Αυτοί τοποθετούνται στον τοίχο του κτιρίου. Στη μια πλευρά τους συνδέεται η γραμμή ενώ στην άλλη οι ακροδέκτες του μετασχηματιστή αφού προηγηθούν τα όργανα προστασίας. Αποτελούνται από μια πλάκα πορσελάνης στην οποία ενώνονται οι δύο μονωτήρες - ο εσωτερικός και ο εξωτερικός - τα άκρα των οποίων συνδέονται με μεταλλική ράβδο τοποθετημένη εσωτερικά κατά τον άξονα των μονωτήρων.

Η ψύξη είναι πολύ σημαντική και για το σκοπό αυτό πρέπει να υπάρχουν ανοίγματα εξαερισμού ή και ανεμιστήρες αν οι συνθήκες ψύξης δεν είναι καλές. Για την επιθεώρηση των υποσταθμών τα όργανα τοποθετούνται πολλές φορές σε άνοιγμα προσιτό από τον εξωτερικό χώρο και ο μετασχηματιστής μπορεί να βρίσκεται σε ράγες. Τελευταία χρησιμοποιούνται οι τυποποιημένοι υποσταθμοί στους οποίους όλα τα μηχανήματα βρίσκονται σε κιβώτια τα οποία απλά πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους. Οι υπαίθριοι επίγειοι υποσταθμοί εξυπηρετούν υπόγεια αλλά και εναέρια δίκτυα. Οι καταστάσεις είναι περιφραγμένες και τα όργανα προστασίας είναι τοποθετημένα σε ειδικές κυψέλες. Συνήθως η ισχύς τους είναι μεγαλύτερη των εναερίων και το κόστος τους μικρότερο των στεγασμένων.

Οι υπόγειοι υποσταθμοί κατασκευάζονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, συνήθως στα κέντρα των πόλεων, κάτω από πλατείες ή πεζοδρόμια. Το σημαντικότερο εκτός εκείνου της ψύξης είναι αυτό της στεγανότητας. Συνήθως τα όργανα ελέγχου και χειρισμών τοποθετούνται σε μεταλλικό στεγανό κιβώτιο στην επιφάνεια του εδάφους, το οποίο φέρει και τα ανοίγματα εξαερισμού.

Οι γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής και μετατρέπουν τη μέση τάση σε χαμηλή. Από τους υποσταθμούς

διανομής αναχωρούν οι γραμμές χαμηλής τάσης που καταλήγουν στου μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών. Οι υποσταθμοί χωρίζονται σε εναέριους και επίγειους.

Χαρακτηρίζονται από την ισχύ τους – που είναι το άθροισμα των ισχύων των μετασχηματιστών τους – και διακρίνονται ανάλογα με τον τόπο εγκατάστασης σε εναέριους, επίγειους και υπόγειους. Η θέση εγκατάστασης καθορίζεται από τις θέσεις και το μέγεθος των φορτίων που θα εξυπηρετηθούν. Κάθε υποσταθμός χωρίζεται σε τρία κύρια τμήματα που είναι το τμήμα (ή κυψέλες) μέσης τάσης, οι μετασχηματιστές και το τμήμα (ή κυψέλες) χαμηλής τάσης.

Οι εναέριοι υποσταθμοί ονομάζονται έτσι γιατί όλες οι εγκαταστάσεις τους συμπεριλαμβανομένων των μετασχηματιστών, βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε στύλους. Οι εναέριοι υποσταθμοί εξυπηρετούν εναέρια δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, αποτελούνται από ένα και πολύ σπάνια δύο μετασχηματιστές με συνολική ισχύ μέχρι 250KVA. Δεν εντοπίζονται στα αστικά κέντρα και είναι το οικονομικότερο είδος υποσταθμού.

Όλη η κατασκευή στηρίζεται σε ένα, δύο ή το πολύ τέσσερις στύλους ανάλογα με το βάρος της. Οι γραμμές μέσης τάσης σε μονωτήρες τύπου κώδωνα, μια διακλάδωσή τους φτάνει στο μετασχηματιστή μέσω οργάνων προστασίας, δηλαδή αλεξικέραυνα και ασφαλειοδιακόπτες. Μετά το μετασχηματιστή η χαμηλή τάση οδηγείται σε ειδικό κιβώτιο με ασφάλειες και όργανα ελέγχου και στη συνέχεια ακολουθεί η γραμμή χαμηλής τάσης.

Τέλος, υπάρχουν ιδιωτικοί υποσταθμοί διανομής. Πρόκειται για υποσταθμούς που δίνουν ρεύμα σε έναν καταναλωτή. Ο καταναλωτής είναι πελάτης μέσης τάσης και αυτός αναλαμβάνει τη μετατροπή σε χαμηλή τάση. Η ηλεκτρική εταιρεία είναι υπεύθυνη μόνο για τη γραμμή μέσης τάσης που φθάνει στο μετασχηματιστή. Τα τμήματα πρέπει να είναι απομονωμένα μεταξύ τους.

Τέτοιοι υποσταθμοί χρησιμοποιούνται για λόγους οικονομίας διότι το τιμολόγιο μέσης τάσης είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό του τιμολογίου χαμηλής τάσης.

Οι υποσταθμοί διανομής προστατεύονται πάντα με ασφαλειοαποζεύκτη οι οποίοι εγκαθίστανται είτε επί του ικριώματος των Υ/Σ είτε στην αρχή της μικρού μήκους διακλάδωσης η οποία τροφοδοτεί τον Υ/Σ Διανομής.

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε κλειστά και ανοιχτά. Το ανοιχτό δίκτυο τροφοδοτεί τα φορτία του από ένα σημείο με αποτέλεσμα οποιαδήποτε βλάβη σε ένα σημείο του να απομονώνει όλους τους καταναλωτές που βρίσκονται πέρα από το σημείο της βλάβης. Τα ανοιχτά δίκτυα κατασκευάζονται σε αραιοκατοικημένες περιοχές με λίγα φορτία.

Στο κλειστό δίκτυο διανομής κάθε καταναλωτής μπορεί να τροφοδοτηθεί από τουλάχιστον δύο σημεία με αποτέλεσμα τη δυνατότητα εναλλακτικής τροφοδότησης σε περίπτωση βλάβης. Τα κλειστά δίκτυα κατασκευάζονται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και κοστίζουν περισσότερο από τα ανοιχτά δίκτυα.

Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας μέσης τάσης μεταφέρουν ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και μπορεί να είναι είτε εναέριες είτε υπόγειες ανάλογα με τη θέση του υποσταθμού διανομής. Οι γραμμές διανομής μέσης τάσης περνούν συνήθως από τις μεγάλες οδικές αρτηρίες για λόγους άμεσης πρόσβασης σε αυτές για επιθεώρηση και συντήρηση. Τα κύρια εξαρτήματα των γραμμών μέσης τάσης είναι:

- 1) Οι αγωγοί είναι παρόμοιοι με εκείνους των γραμμών υψηλής τάσης και κατασκευάζονται από αλουμίνιο με ή χωρίς χαλύβδινη ενίσχυση και σε διατομές μικρότερες εκείνων της μεταφοράς.
- 2) Οι στύλοι είναι παρόμοιοι με εκείνους των γραμμών υψηλής τάσης χωρίς να χρησιμοποιούνται μεταλλικοί πυλώνες και οι διαστάσεις είναι μικρότερες. Πολλές φορές σε ένα στύλο μέσης τάσης συνυπάρχει και γραμμή χαμηλής τάσης.
- 3) Οι μονωτήρες είναι σταθεροί και όχι σε μορφή αλυσίδας.
- 4) Τα συστήματα ελέγχου και προστασίας που είναι οι αυτόματοι διακόπτες απομόνωσης της γραμμής σε περίπτωση ανωμαλίας και οι ασφάλειες υψηλής τάσης που τοποθετούνται στα σημεία διακλάδωσης και σε είναι κυλινδρικές με σύρμα που τήκεται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Οι ασφάλειες συνοδεύονται από αποζεύκτες.

### 1.2.2 Υπόγεια δίκτυα Μέσης Τάσης

Στα υπόγεια δίκτυα μέσης τάσης οι γραμμές τοποθετούνται μέσα στη γη σε μικρό βάθος. Οι αγωγοί θα πρέπει να βρίσκονται σε ειδικό περίβλημα. Το κόστος τους είναι περίπου τριπλάσιο εκείνου των εναέριων γραμμών για πολλούς λόγους όπως είναι η κατασκευή, η μόνωση, η τοποθέτηση και τα εξαρτήματα. Οι υπόγειες γραμμές είναι ασφαλέστερες και δεν αλλοιώνουν αισθητικά το περιβάλλον.

Το υπόγειο καλώδιο αποτελείται από το αγωγίμο μέρος του, δηλαδή τους αγωγούς του κατασκευασμένοι από χαλκό ή αλουμίνιο συνήθως πολύκλωνοι. Ακόμη, από τα διάφορα μονωτικά και προστατευτικά στρώματα. Κάθε αγωγός είναι μονωμένος από τους άλλους χωριστά και όλοι μαζί προστατεύονται από ένα ή περισσότερα κοινά μονωτικά στρώματα. Το μονωτικό στρώμα κάθε αγωγού είναι διαφορετικού χρώματος, οι αγωγοί τοποθετούνται ελικοειδώς και μερικές φορές γύρω από το τελικό μονωτικό τοποθετείται μολύβδινος μανδύας. Οι απώλειες των υπόγειων καλωδίων διακρίνονται:

1) Στις απώλειες Joule λόγω της ωμικής αντίστασης των αγωγών. Αυτές είναι μικρότερες αντίστοιχες ισοδύναμες εναέριες γραμμές κυρίως λόγω των μεγαλύτερων διατομών των υπόγειων καλωδίων καθώς και λόγω της φύσης των χρησιμοποιούμενων αγωγών. Ενδεικτικά οι απώλειες μια γραμμής MT 95mm<sup>2</sup> ACSR είναι κατά 35% ως 50% υψηλότερες για το ίδιο φορτίο έναντι των καλωδίων MT.

2) Στις απώλειες λόγω ρευμάτων κυκλοφορίας που επάγονται στους μεταλλικούς μανδύες, θωρακίσεις και οπλισμούς καλωδίων. Η ψύξη των αγωγών είναι πολύ δυσκολότερη εκείνης των εναέριων αγωγών και αυτό πρέπει να συνυπολογιστεί, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν πολλοί αγωγοί στο ίδιο αυλάκι.

Τα σημαντικότερα εξαρτήματα των υπόγειων καλωδίων είναι τα εξής:

- 1) Τα κιβώτια διακλαδώσεων που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις διακλαδώσεων. Αποτελούνται από δύο κομμάτια που κλείνουν αεροστεγώς, στο εσωτερικό τους γίνεται η διακλάδωση των καλωδίων και το υπόλοιπο γεμίζεται με ειδική μονωτική ουσία.
- 2) Τα κιβώτια ενώσεων χρησιμοποιούνται για την σύνδεση δύο κομματιών με όμοιο τρόπο.
- 3) Τα ακροκιβώτια τοποθετούνται στα άκρα των υπόγειων καλωδίων και χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική σύνδεση της υπόγειας γραμμής με μια εναέρια.

Τα υπόγεια καλώδια τοποθετούνται μέσα στη γη σε μικρό βάθος από 50 έως 70cm. Ειδική μέριμνα θα πρέπει να λαμβάνεται σε περιπτώσεις διαβρωτικών εδαφών καθώς και στο ξετύλιγμα των καλωδίων ιδιαίτερα στις στροφές και σε ειδικά εδάφη.

### 1.2.3 Εναέριες γραμμές Μέσης Τάσης

Σήμερα χρησιμοποιούνται τα εξής είδη αγωγών και τυποποιημένων διατομών:

Γυμνοί αγωγοί

- Αγωγοί ACSR 16 mm<sup>2</sup>, 35 mm<sup>2</sup>, 95 mm<sup>2</sup> (Διατομές ισοδύναμες χαλκού)
- Αγωγοί Cu 16 mm<sup>2</sup>, 35 mm<sup>2</sup>, 95 mm<sup>2</sup>

Συνεστραμμένα καλώδια (θωρακισμένου τύπου)

- 3 x 50 mm<sup>2</sup> Al + 50mm<sup>2</sup>St
- 3 x 150 mm<sup>2</sup> Al + 50mm<sup>2</sup>St

Η επιλογή της διατομής των αγωγών μια εναέριας γραμμής υπόκειται στην τήρηση τεχνικών περιορισμών που σχετίζονται:

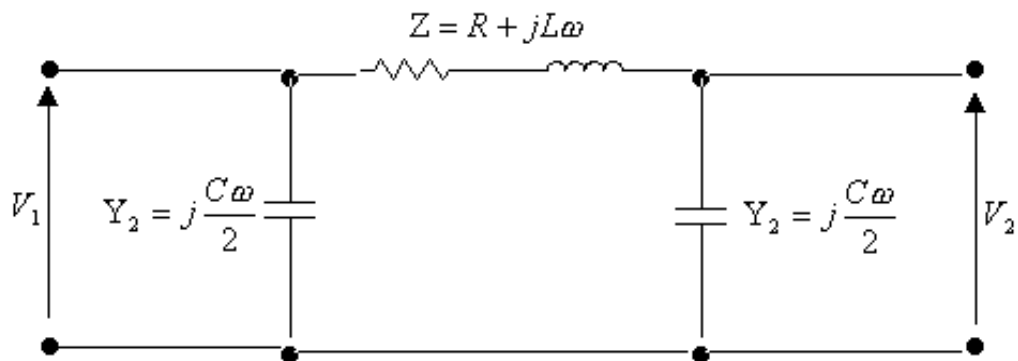
- 1) Με τη μέγιστη επιτρεπτή ένταση (θερμικό όριο) που είναι αποδεκτή για κάθε διατομή και είδος αγωγού.
- 2) Με τη μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης.
- 3) Με τη μηχανική αντοχή της γραμμής.

Επομένως, η βέλτιστη διατομή είναι εκείνη για την οποία το κόστος της γραμμής θεωρούμενο στο σύνολο των ετών λειτουργίας της και ανηγμένο στο έτος κατασκευής ελαχιστοποιείται.

Η επιλογή του είδους των αγωγών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται τόσο από το κόστος όσο και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και φυσικά από την επιφόρτιση. Έτσι οι αγωγοί ACSR χρησιμοποιούνται σε όλες τις περιπτώσεις τυποποιημένων επιφορτίσεων σε περιοχές φυσιολογικής



διάβρωσης. Σε περιοχές έντονης διάβρωσης κυρίως παραθαλάσσιες περιοχές και περιοχές με έντονη βιομηχανική ρύπανση γίνεται χρήση αγωγών Cu. Τα συνεστραμμένα καλώδια χρησιμοποιούνται σε δασώδεις περιοχές, σε παραθαλάσσιες περιοχές με συχνές υπερπηδήσεις στις γραμμές με γυμνούς αγωγούς Cu, σε ορεινές περιοχές στις οποίες λόγω χιονιού επικάθεται πάγος και σε ειδικές περιπτώσεις που σχετίζονται με την τήρηση αποστάσεων ασφαλείας σε περιοχές εναέριου δικτύου και την προστασία του περιβάλλοντος. Παρακάτω παρουσιάζεται η ισοδύναμη μονοφασική παράσταση, ανά μονάδα μήκους, μια εναέριας γραμμής MT:



Σχήμα 1.1 Μονοφασική παράσταση εναέριας γραμμής MT.

Η απεικόνιση αυτή ισχύει για συμμετρικό ισοζυγισμένο τριφασικό σύστημα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα περιλαμβάνει έναν αγωγό φάσης με σύνθετη αντίσταση  $Z$  και τις σύνθετες εγκάρσιες αγωγιμότητες  $Y$  μεταξύ του αγωγού φάσης και του ουδέτερου, κατανομημένες στα δύο άκρα (Οι τάσεις είναι φασικές). Γενικά η χωρητικότητα και η αυτεπαγωγή όλων των εναέριων γραμμών εξαρτώνται κυρίως από τη γεωμετρία της γραμμής και τις αποστάσεις των αγωγών μεταξύ τους και πολύ λίγο από τη διατομή των αγωγών.

Για τις τυποποιημένες διατάξεις εναέριων γραμμών MT με γυμνούς αγωγούς, η χωρητικότητα των γραμμών είναι της τάξης των 10nF/km. Λόγω όμως του σχετικά μικρού μήκους των γραμμών MT η ολική χωρητικότητα έχει χαμηλή τιμή και δεν αποτελεί ουσιαστική παράμετρο των γραμμών. Επομένως, η αντίστοιχη μονοφασική απεικόνιση των γραμμών MT περιορίζεται σε μια σύνθετη αντίσταση  $Z$ . Η αυτεπαγωγή ανά φάση είναι της τάξης των 1,2mH/km και χαρακτηριστική αντίσταση της τάξης των 350Ω. Έτσι η χαρακτηριστική ισχύς των συνήθων εναέριων γραμμών MT είναι της τάξης του 1 MVA για δίκτυα 20kV και των 600 KVA για δίκτυα 15kV.

Οι απώλειες ισχύος των εναέριων γραμμών συνίστανται:

Στα δίκτυα με γυμνούς αγωγούς στις απώλειες Joule των αγωγών,

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R$$

Όπου P και Q η ενεργός και η άεργος τριφασική ισχύς αντίστοιχα που μεταφέρεται από τη γραμμή. Υπενθυμίζεται ότι η κυκλοφορία άεργου ισχύος σε μια γραμμή συνεπάγεται αύξηση των ενεργών απωλειών.

Στα δίκτυα με συνεστραμμένα καλώδια στις απώλειες Joule των αγωγών καθώς επίσης και στις απώλειες που δημιουργούνται στη μεταλλική θωράκιση κάθε φάσης από τα επαγόμενα σε αυτές ρεύματα κυκλοφορίας. Οι απώλειες αυτές λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλη προσαύξηση της ωμικής αντίστασης των αγωγών.

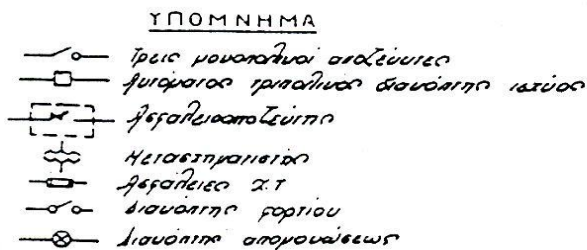
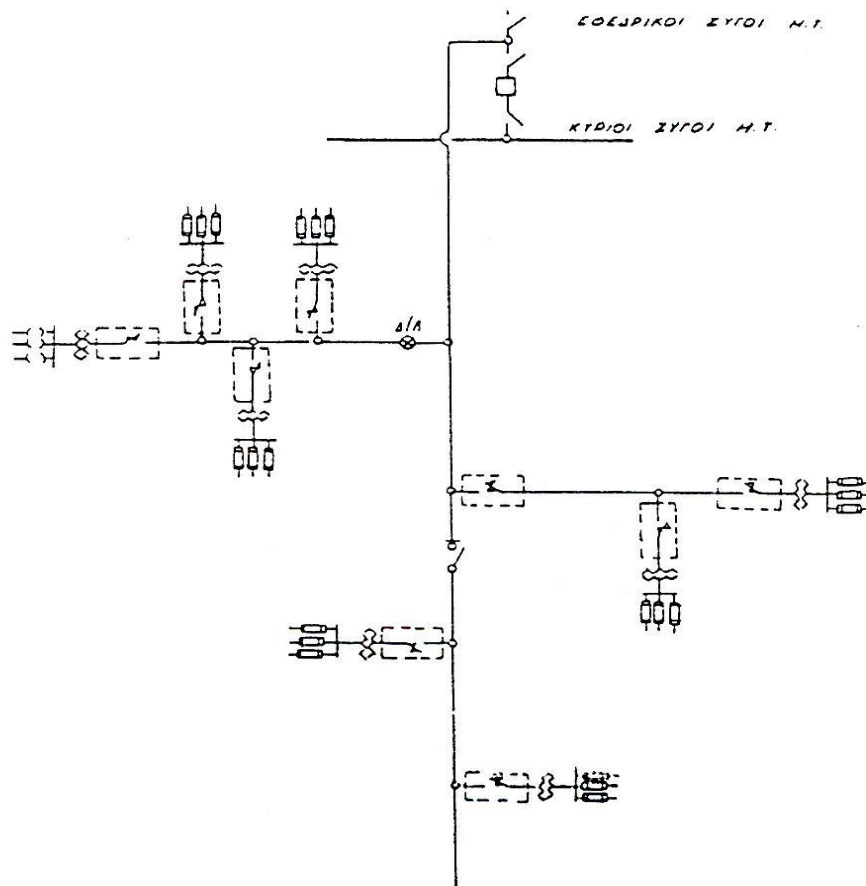
Οι βλάβες των εναέριων γραμμών είναι συχνότερες λόγω καιρικών φαινομένων και γι' αυτό το λόγο χρειάζονται συχνά επιθεώρηση και συντήρηση.

### 1.3 Μορφή Συστημάτων Διανομής Μ.Τ.

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια παρουσίαση των τρόπων ανάπτυξης των συστημάτων διανομής Μ.Τ. Επίσης, δίνονται ορισμένα στοιχεία που θεωρούνται σημαντικά για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Τα πέντε συστήματα είναι:

#### 1) Ακτινικό σύστημα

Αυτό εφαρμόζεται συνήθως σε εναέρια δίκτυα που τροφοδοτούν αγροτικές περιοχές και φορτία που δεν απαιτούν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Αποτελείται από μια κεντρική γραμμή, τον κορμό, με τις διακλαδώσεις του. Ο κορμός ελέγχεται από ένα διακόπτη ισχύος που εκτελεί αυτόματες επαναφορές. Οι διακλαδώσεις ελέγχονται από ασφαλειοαποζεύκτες και από διακόπτες απομόνωσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις τοποθετούνται στον κορμό διακόπτες αυτόματης επαναφοράς, προκειμένου να εξυπηρετηθούν λειτουργικές ανάγκες του δικτύου ή να ελεγχθούν τα σφάλματα σε περιπτώσεις δικτύων με μεγάλα μήκη.



Σχήμα 1.2 : Εναέριο ακτινικό σύστημα Μ.Τ.

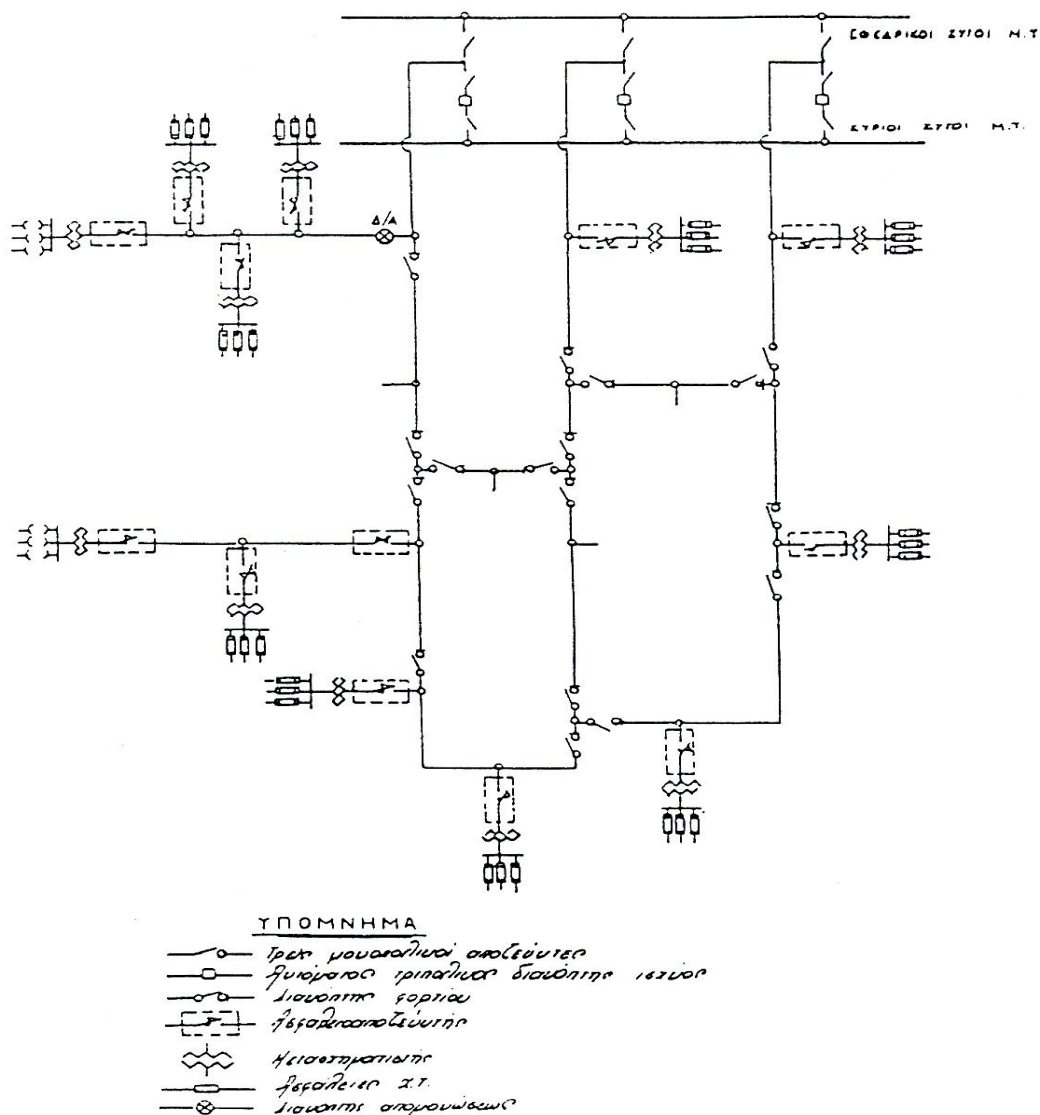
## 2) Βροχοειδές Σύστημα

- Εναέριο Δίκτυο : Το σύστημα αυτό είναι όμοιο με το ακτινικό με τη διαφορά ότι τροφοδοτείται από δυο σημεία του ίδιου ή διαφορετικού Υ/Σ. Η κεντρική γραμμή διαχωρίζεται από διακόπτη φορτίου ή τριπολικό αποζεύκτη.
- Υπόγειο Δίκτυο: Και σε αυτό το σύστημα ο βρόχος τροφοδοτείται από δυο διακόπτες που ανήκουν στον ίδιο ή σε διαφορετικούς Υ/Σ. Σε κάθε Υ/Σ Διανομής υπάρχουν δυο διακόπτες φορτίου για τις αφίξεις των καλωδίων. Ο βρόχος παραμένει λειτουργικά

ανοικτός σε ένα διακόπτη φορτίου των Υ/Σ Διανομής. Για να αξιοποιηθεί ο βρόχος πρέπει η κάθε αναχώρηση να φορτίζεται στην κανονική της λειτουργία μέχρι το 50% της ικανότητάς της.

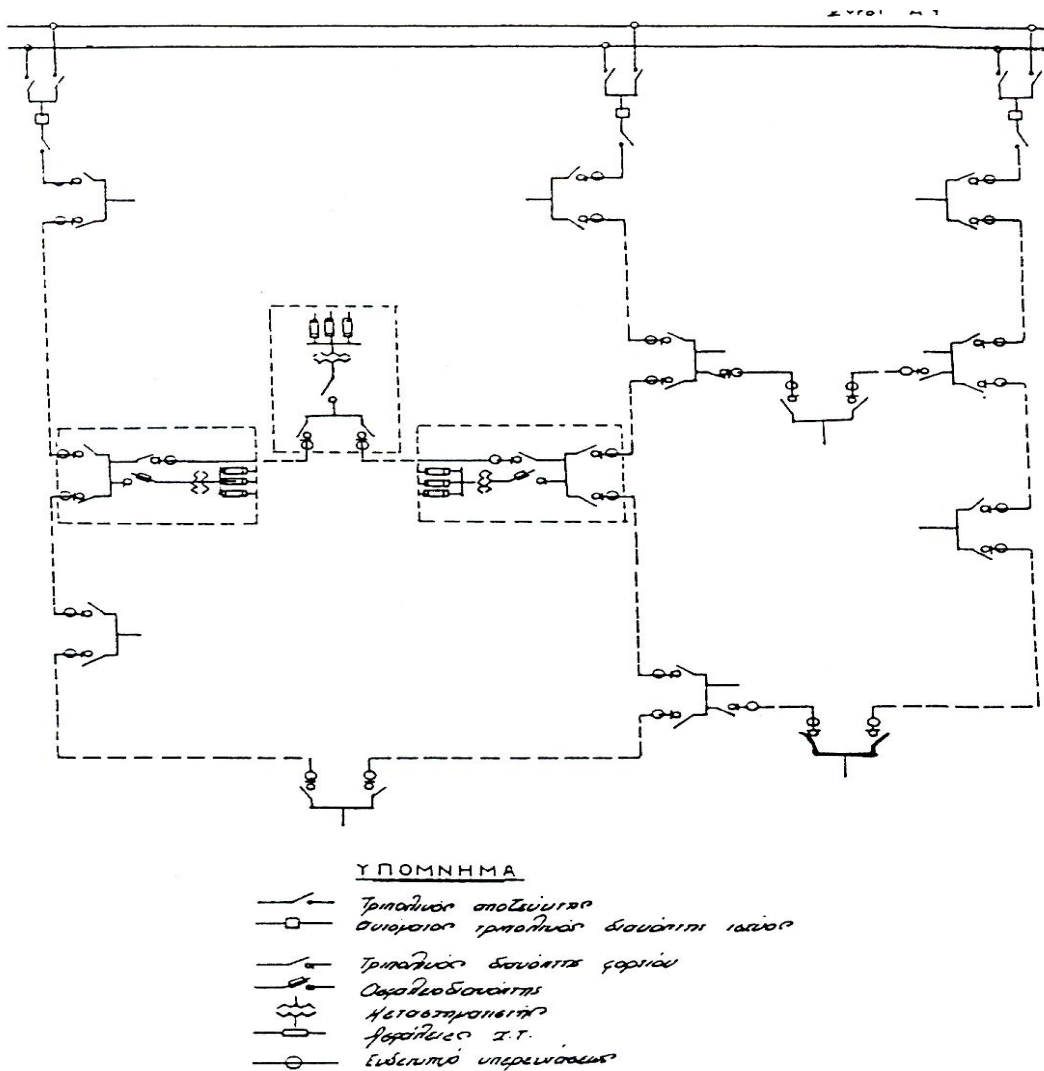
### 3) Αραχνοειδές Σύστημα

- Εναέριο Δίκτυο : Είναι στην ουσία βροχοειδές με τη διαφορά ότι οι συνεργαζόμενες γραμμές είναι τρεις και υπάρχουν πλευρικές συνδέσεις. Σε περίπτωση βλάβης μιας των γραμμών οι άλλες δυο αναλαμβάνουν την κάλυψη των φορτίων. Έτσι κάθε αναχώρηση επιτρέπεται να φορτίζεται στην κανονική λειτουργία μέχρι το 66% της ικανότητάς της. Σε κατάλληλες θέσεις του δικτύου προβλέπονται για τη μεταφορά φορτίων, ειδικοί διακόπτες φορτίου.



Σχήμα 1.3 : Εναέριο αραχνοειδές σύστημα Μ.Τ.

- Υπόγειο Δίκτυο: Η βασική δομή του δικτύου είναι ίδια με αυτήν του εναέριου δικτύου με τις παρακάτω διαφορές:
  - i. Δεν πρέπει να γίνονται ακτινικές διακλαδώσεις για τροφοδοσία Υ/Σ δηλαδή όλοι οι Υ/Σ εντάσσονται στο βρόχο.
  - ii. Οι χειρισμοί για τη μεταφορά φορτίων γίνονται με τη βοήθεια των διακοπών φορτίου των Υ/Σ.

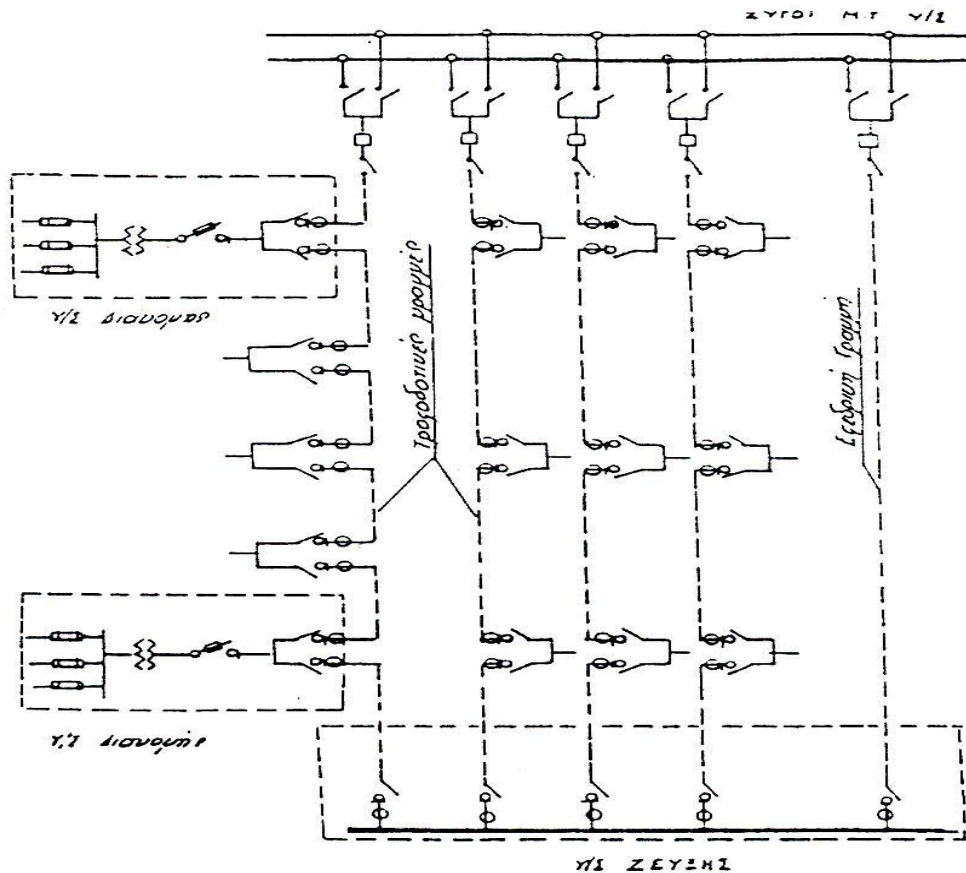


Σχήμα 1.4 : Υπόγειο αραχνοειδές σύστημα Μ.Τ.

#### 4) Ατρακτοειδές Σύστημα

Αποτελείται από ομάδα γραμμών που αναχωρούν από τον Υ/Σ 150/20 kV και απολήγουν σε ένα Υ/Σ ζεύξης. Μια από την ομάδα των γραμμών είναι εφεδρική και πρέπει να είναι απαλλαγμένη από φορτία για να μπορεί να παραλάβει όλα τα φορτία μιας των άλλων γραμμών. Ο αριθμός των συνεργαζόμενων γραμμών συμπεριλαμβανομένης και της εφεδρικής δεν πρέπει να υπερβαίνει τις έξι (6) αλλιώς μειώνεται ο βαθμός αξιοπιστίας του συστήματος. Ο βαθμός χρησιμοποίησης των γραμμών είναι πολύ υψηλός και

κυμαίνεται γύρω στο 80-85% της ικανότητάς τους. Το σύστημα εφαρμόζεται επί το πλείστον σε υπόγεια δίκτυα πόλεων.

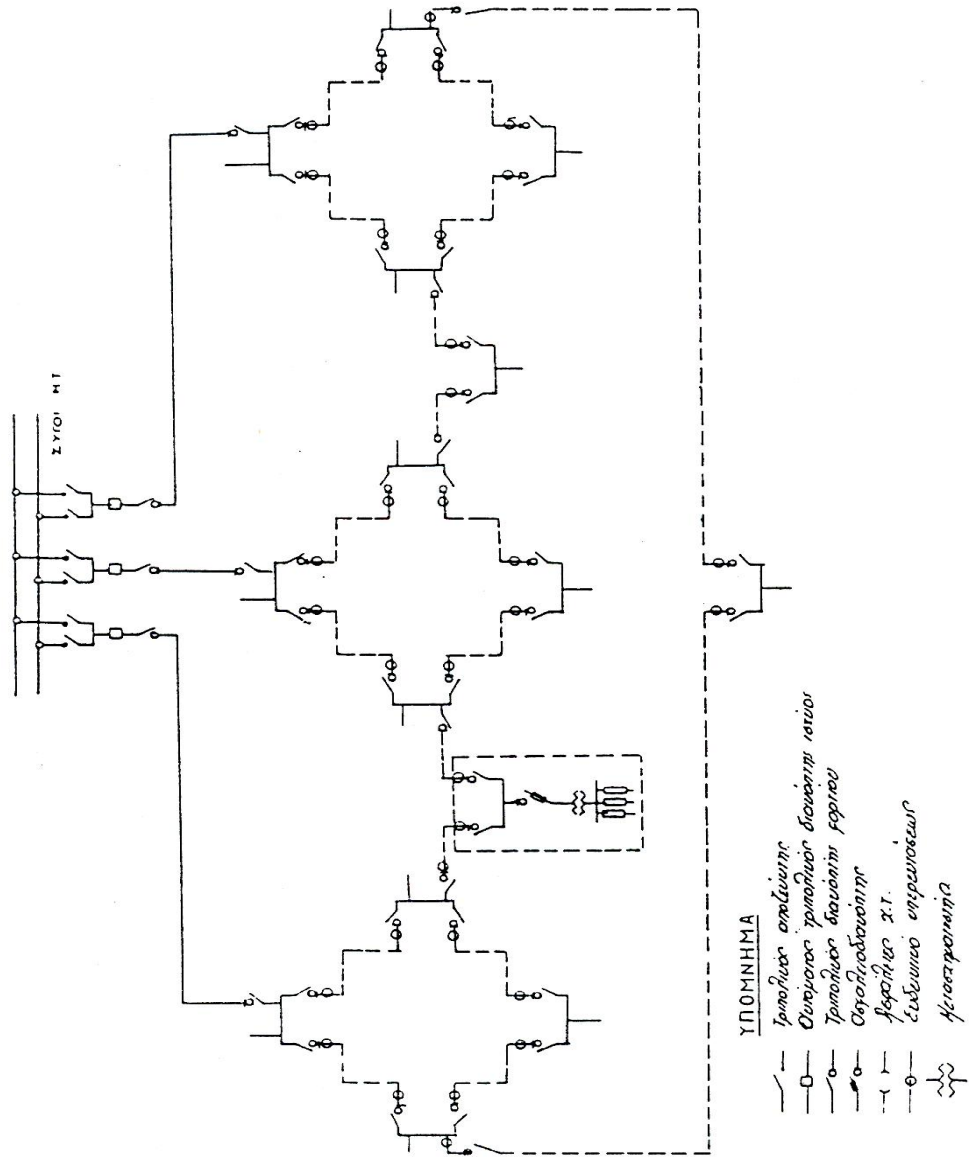


- Υ Π Ο Μ Ν Η Μ Α**
- — — — — τροφοδοτική απολήπιση
  - □ — — — — — φυσίματα τροφοδοτικής διακλάσης ιστίου
  - ○ — — — — — τροφοδοτική διακλάση φορτίου
  - ○ — — — — — φοροληιοδιακλάση
  - □ — — — — — ημισεπημισίτης
  - □ — — — — — φασάκιας Χ.Τ.
  - ○ — — — — — ενδεικτικό υπερεισόδου

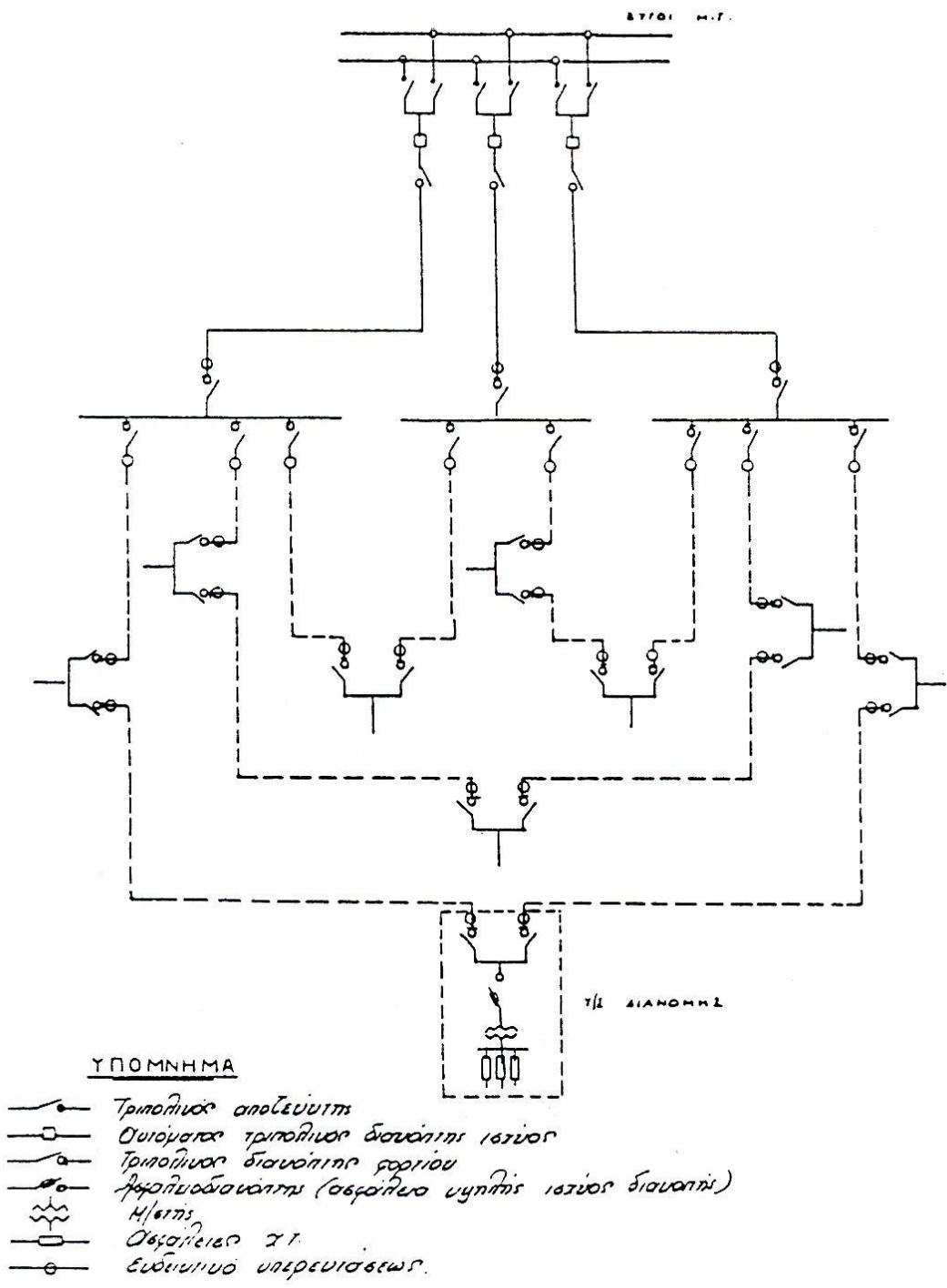
Σχήμα 1.5 : Υπόγειο ατρακτοειδές σύστημα Μ.Τ.

### 5) Σύστημα Μικρών Βρόχων

Κάθε κύρια γραμμή διαχωρίζεται σε δυο δευτερεύουσες που σχηματίζουν βρόχο μεταξύ τους ή με δευτερεύουσες άλλης αναχώρησης. Οι βρόχοι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με πλευρικές συνδέσεις. Το σύστημα παρέχει πολλές δυνατότητες επανατροφοδότησης ελαττωματικών τμημάτων. Οι γραμμές βρόχων πρέπει να έχουν ικανότητα φόρτισης μέχρι το 50% των κύριων γραμμών γεγονός που επιτρέπει την ένταξη στο σύστημα παλιών καλωδίων μικρότερης διατομής.



Σχήμα 1.6 : Εναέριο σύστημα μικρών βρόχων Μ.Τ.



Σχήμα 1.7 : Υπόγειο σύστημα μικρών βρόχων Μ.Τ.



## 1.4 Επιλογή συστήματος Μέσης Τάσης

Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι εφόσον πρόκειται για αρχική μελέτη που δεν επηρεάζεται από υφιστάμενα δίκτυα μικρών διατομών, η επιλογή πρέπει να περιορίζεται μεταξύ των τριών βασικών συστημάτων δηλαδή του ατρακτοειδούς, του αραχνοειδούς και του βροχοειδούς. Τα κριτήρια επιλογής του συστήματος Μ.Τ. είναι τα εξής:

### I. Απλότητα του συστήματος

Είναι σημαντική τόσο για την κατασκευή όσο και για τη εκμετάλλευση όπου η πολυπλοκότητα μπορεί να οδηγήσει σε λάθη χειρισμών και ατυχήματα. Με το κριτήριο της απλότητας τα συστήματα κατατάσσονται ως εξής: Βροχοειδές - Ατρακτοειδές-Αραχνοειδές.

### II. Αξιοπιστία του συστήματος

Χαρακτηρίζεται από το μέγεθος του διακοπτόμενου φορτίου και από το χρόνο επανατροφοδότησής του. Η βλάβη ενός καλωδίου στην αρχή της αναχώρησης θέτει εκτός τάσης φορτία 100%, 67% και 50% της ικανότητας της γραμμής αντίστοιχα για το ατρακτοειδές, αραχνοειδές και βροχοειδές σύστημα. Η επανατροφοδότηση των φορτίων επιτυγχάνεται με χειρισμούς σε δυο Υ/Σ στα βροχοειδή και ατρακτοειδή συστήματα ενώ στα αραχνοειδή απαιτούνται τουλάχιστον τρεις χειρισμοί. Με βάση το κριτήριο αυτό τα συστήματα κατατάσσονται ως εξής: Ατρακτοειδές - Αραχνοειδές - Βροχοειδές.

### III. Κόστος εγκατάστασης του συστήματος

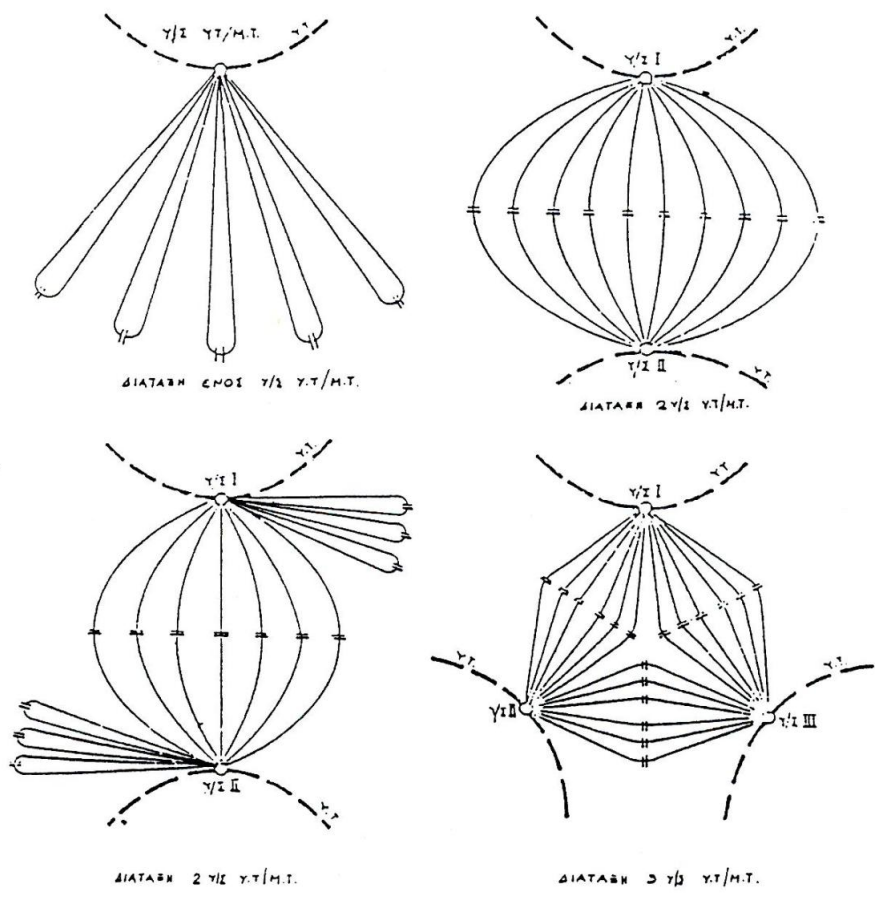
Δεν είναι δυνατό να καθοριστεί εκ των προτέρων το κόστος του κάθε συστήματος αφού εξαρτάται από τη μορφή του πολεοδομικού συγκροτήματος που θα εξυπηρετήσει.

### IV. Κόστος λειτουργίας του συστήματος

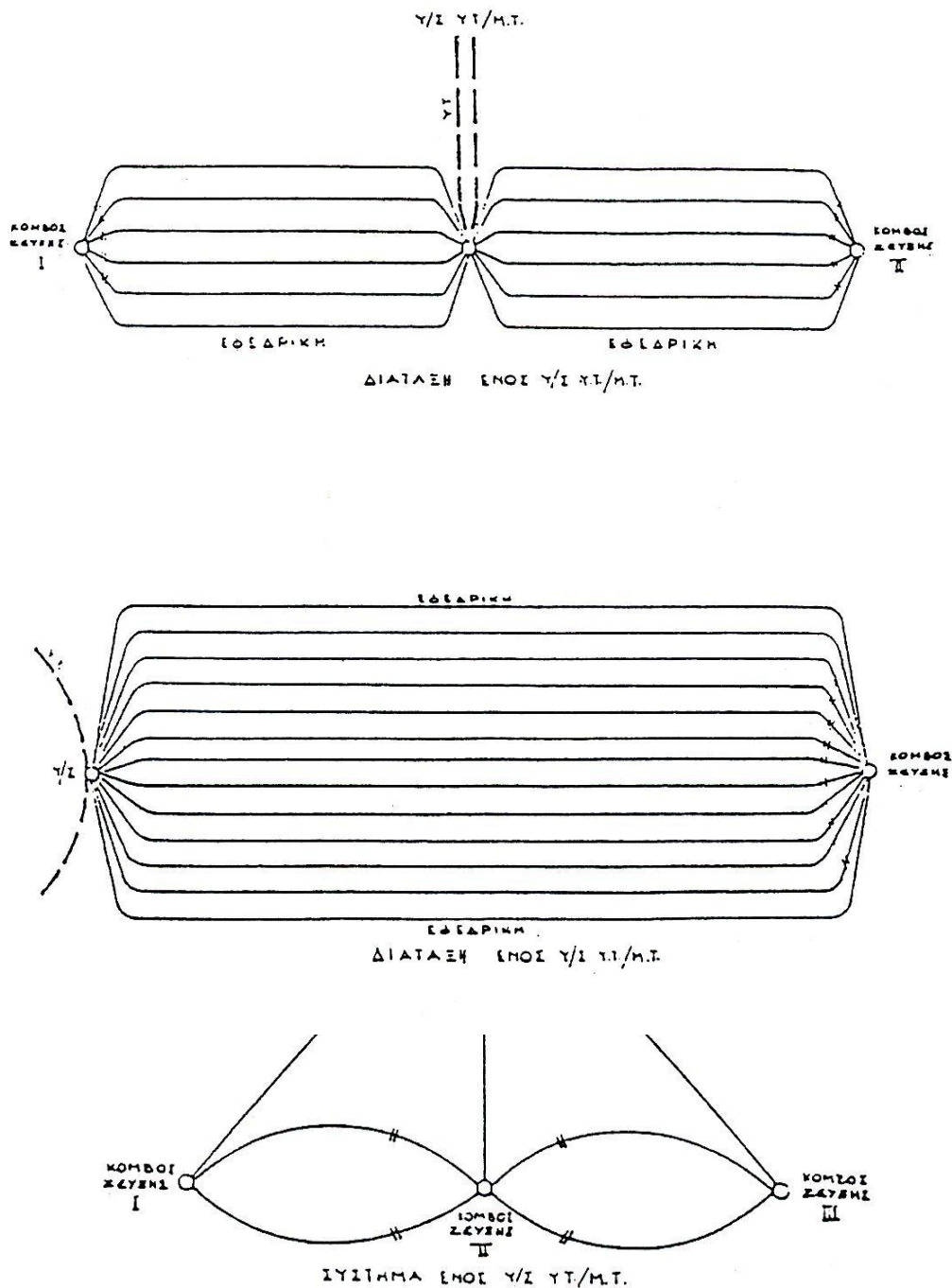
Το κόστος αυτό θα έχει άμεση σχέση με το βαθμό αξιοπιστίας του και την απλότητά του.

### V. Δυνατότητα μελλοντικής προσαρμογής του συστήματος.

Ο σχεδιασμός του συστήματος πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μπορούν να ενταχθούν σε αυτό μελλοντικά αξιόλογα έργα. Ενδεικτικά αναφέρεται η ένταξη νέου Υ/Σ 150 kV στη θέση ενός Υ/Σ ζεύξης ενός ατρακτοειδούς συστήματος οπότε το σύστημα μετατρέπεται σε βροχοειδές με μια επιπλέον διαθέσιμη γραμμή. Οι γενικές διατάξεις των τριών συστημάτων δίνονται στα παρακάτω σχήματα:

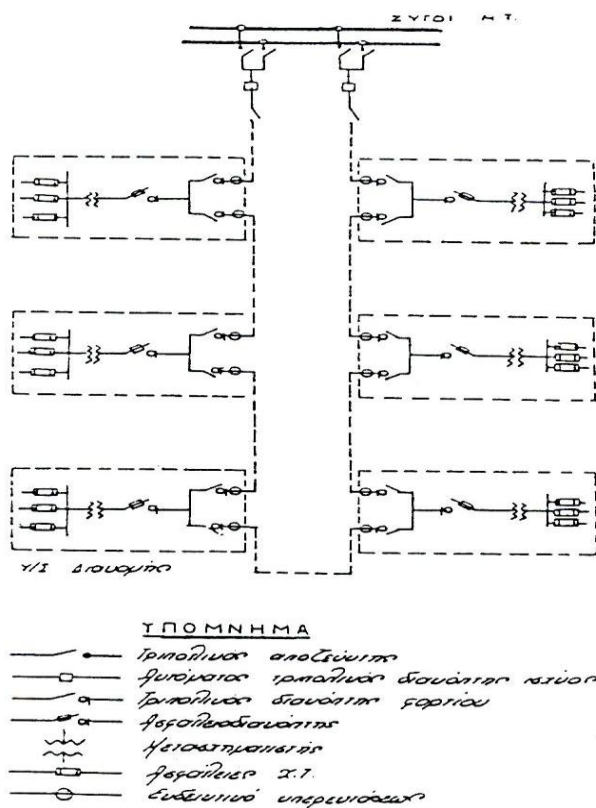


Σχήμα 1.8 : Γενική Διάταξη Βροχοειδούς Συστήματος



Σχήμα 1.9 : Γενική Διάταξη Αραχνοειδούς Συστήματος

Γενικά το βροχοειδές κρίνεται προσφορότερο αφού συνδυάζει απλότητα και ικανοποιητική αξιοπιστία και θα πρέπει να επιλέγεται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Το αραχνοειδές δεν ενδείκνυται σαν οριστική λύση σε αρχικές μελέτες γιατί καθιστά δύσκολη την εκμετάλλευση. Το ατρακτοειδές επιλέγεται όταν δίνει αισθητά χαμηλότερο αρχικό κόστος με την προοπτική να μετατραπεί στο μέλλον σε βροχοειδές. Το σύστημα μικρών βρόχων είναι μια λύση ανάγκης και εφαρμόζεται για την αξιοποίηση καλωδίων μικρότερων διατομών.



Σχήμα 1.10 : Γενική Διάταξη Ατρακτοειδούς Συστήματος

## 1.5 Συμπεράσματα – παρατηρήσεις – προτάσεις

Τα δίκτυα διανομής, ως ο τελευταίος κόμβος πριν από τον καταναλωτή και με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και λόγω της αύξησης των αναγκών και του εκσυγχρονισμού της ζωής, επεκτείνονται συνέχεια προς όλες τις κατευθύνσεις, τροφοδοτούν αδιάλειπτα, αξιόπιστα γρήγορα και φθηνά με ηλεκτρική ενέργεια και ισχύ μέσα σε στενά όρια ανοχών ( $\pm 5\%$  για την τάση και  $\pm 0,5\%$  για τη συχνότητα) και με όση ποσότητα είναι αναγκαίο για τους καταναλωτές – πελάτες.

Τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης είναι μέσα σε πόλεις καλωδιακά υπόγεια, στην ύπαιθρο και στα περίχωρα των πόλεων εναέρια. Σε μεγάλα αστικά κέντρα η μόνη λύση που δίνεται συνήθως είναι αυτή του υπογείου δικτύου, επειδή δεν επιτρέπεται να περάσουν εναέρια γραμμές (το επιβάλλουν λόγοι καλαισθησίας και ασφάλειας) και ακόμη και αν περάσει μια εναέρια γραμμή ανά δρόμο δε φτάνει για να τροφοδοτήσει τη μεγάλη πυκνότητα του φορτίου. Οι καλωδιακές (υπόγειες γραμμές) έχουν κόστος που είναι 3 – 10

φορές μεγαλύτερο από ότι το κόστος των εναέριων γραμμών, κόστος που μπορεί να υποπολαπλασιαστεί με τη σωστή συνεργασία όλων των φορέων.

Τα δίκτυα Μ.Τ. κατασκευάζονται πάντα με δυνατότητα εφεδρείας εκτός κάποιων μεμονωμένων περιπτώσεων. Τα δίκτυα μπορούν να τροφοδοτηθούν από πολλούς Υ/Σ εναλλακτικά. Δεν ενδείκνυται ο παραλληλισμός των υποσταθμών, δηλαδή η ταυτόχρονη τροφοδότηση από δύο Μ/Σ. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο είδος των φορτίων που τροφοδοτούν τα δίκτυα Μ.Τ. Ο λόγος είναι ότι αν συνδεθούν βιομηχανικοί και οικιακοί καταναλωτές μαζί, τότε οι βιομηχανικοί θα προκαλούν παράσιτα και στιγμιαία μεγάλη πτώση τάσης στους οικιακούς. Για αυτό θα πρέπει τα δίκτυα να τροφοδοτούν ανεξάρτητα τα ομοειδή φορτία.

## 2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

### 2.1 Γενικά

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από δύο μεγέθη. Τη δομή και τη λειτουργία. Η δομή της εγκατάστασης αποτελεί τον φορέα των ηλεκτρικών μεγεθών. Περιλαμβάνει τις αντιστάσεις, τις επαγωγικές αντιδράσεις και τις χωρητικότητες. Τα παραπάνω συνιστούν τη σταθερή ηλεκτρική δομή του συστήματος και αντιστοιχούν στους συντελεστές ή τη μήτρα συντελεστών εξισώσεων λειτουργίας. Τα ηλεκτρικά μεγέθη τάση, ρεύμα, ισχύς αποτελούν τις μεταβλητές των εξισώσεων και αφορούν τη λειτουργία του συστήματος. Οι απαιτήσεις λειτουργίας προδιαγράφουν σε μεγάλο βαθμό τα μεγέθη και τις ιδιότητες των σταθερών.

Δομή και λειτουργία είναι δυο διαφορετικές πλευρές της τεχνικής των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού οι δραστηριότητες των υπηρεσιών μελετών και κατασκευών εξυπηρετούν τη συγκρότηση ή δομή, ενώ οι δραστηριότητες των υπηρεσιών εκμετάλλευσης τη λειτουργία του συστήματος.

Από άποψη λειτουργίας του συστήματος διακρίνουμε τη μόνιμη ή κανονική κατάσταση λειτουργίας και τη μεταβατική ή ασύμμετρη κατάσταση λειτουργίας.

Ο κύριος προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να προμηθεύει την πραγματική και άεργο ισχύ τις οποίες ζητούν τα διάφορα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Η ροή της ισχύος ή του φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης, αποτελεί τη χαρακτηριστική εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του ΣΗΕ. Η συχνότητα και η τάση στους ζυγούς πρέπει να διατηρούνται σε προδιαγεγραμμένα όρια παρόλο που τα φορτία μεταβάλλονται μερικές φορές απρόβλεπτα. Στα ακτινικά δίκτυα η ροή ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα. Στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς η κατανομή των ροών ισχύος έχει πολύ μεγάλη τεχνική και οικονομική σημασία.

Με τον όρο Μελέτη Ροής Φορτίου εννοούμε τον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού και άεργου ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή μοντελοποιημένες συνθήκες φορτίσεως και λειτουργίας. Οι μελέτες αυτές είναι αναγκαίες τόσο κατά τη διάρκεια της καθημερινής λειτουργίας όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται επίσης για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς. Η μελέτη ροών φορτίου είναι μάλλον η πιο κοινή υπολογιστική ανάλυση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούνται σε μελέτες

σχεδιασμού για να εξακριβωθεί εάν και πότε συγκεκριμένα στοιχεία θα υπερφορτωθούν. Σημαντικές επενδυτικές αποφάσεις παίρνονται με τη βοήθεια των στρατηγικών ενίσχυσης με βάση την ανάλυση ροής φορτίου. Σε μελέτες λειτουργίας η ανάλυση της ροής φορτίου χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι κάθε γεννήτρια λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.

Την ανάλυση ροών φορτίου έχουν διευκολύνει οι υπολογιστές. Επιτρέπουν την ανάλυση δικτύων με πολλές εκατοντάδες κόμβων χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος – ισχύς, ρεύμα, τάση – σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, παραγόμενης ισχύος και ροών στο δίκτυο.

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 ρέει σε κάθε στοιχείο.
- Την άεργο ισχύ φόρτισης κάθε γεννήτριας.

## 2.2 Η μελέτη των ροών φορτίου

### 2.2.1 μεταβλητές συστήματος

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο που εκφράζονται ως ισχύες διακρίνονται τα ακόλουθα έξι μεγέθη:

- $P_G$  : παραγόμενη ενεργός ισχύς
- $Q_G$  : παραγόμενη άεργος ισχύς
- $P_D$  : ενεργός ισχύς φορτίου
- $Q_D$  : άεργος ισχύς φορτίου
- $V$  : τάση ζυγού (μέτρο)
- $\delta$  : γωνία (τάσεως) ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι έξι ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με  $N$  ζυγούς υπάρχουν συνολικά  $6N$  μεταβλητές οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία ή μεταβλητές ζήτησης ( $P_D, Q_D$ ) χαρακτηρίζονται και σα *μεταβλητές διαταραχής*. Οι ισχύες παραγωγής ( $P_G, Q_G$ ) χαρακτηρίζονται και σα *μεταβλητές ελέγχου*. Τέλος, οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών είναι εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες ονομάζονται *μεταβλητές καταστάσεως*.

Η συνιστάμενη ισχύς ζυγού είναι:

$$\tilde{S} = \tilde{S}_G - \tilde{S}_D = P_G - P_D + j(Q_G - Q_D) = P + jQ \quad (3.1)$$

Αντίστοιχα, ορίζεται το ρεύμα ζυγού:

$$\tilde{j} = \frac{\tilde{S}^*}{\tilde{V}^*} = \frac{\tilde{S}_G^* - \tilde{S}_D^*}{\tilde{V}^*} = \tilde{J}_G - \tilde{J}_D = \frac{P_G - P_D - j(Q_G - Q_D)}{\tilde{V}^*} = \frac{P - jQ}{\tilde{V}^*} \quad (3.2)$$

### 2.2.2 Εξισώσεις ροής φορτίου

Μέσω των εξισώσεων ροής φορτίου αυτό που εξετάζεται είναι η διακινούμενη ισχύς μεταξύ των βασικών στοιχείων ενός διασυνδεδεμένου δικτύου –ζυγών και γραμμών – προς τα φορτία ανάλογα με τις διαθέσιμες γραμμές αλλά και τις τάσεις των γραμμών.

Προκειμένου να γίνει η μελέτη ροών φορτίου ορίζονται τρεις τύποι ζυγών:

- *Ζυγοί Φορτίου (PQ)*, στους οποίους είναι γνωστές οι ισχύες ζήτησης και άγνωστη είναι η τάση
- *Ζυγοί Παραγωγής (PV)*, όπου είναι γνωστά η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσης και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης.
- *Ζυγός Ταλαντώσεως ή Αναφοράς (slack bus)*, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίζει τις απώλειες του δικτύου που δεν είναι γνωστές από την αρχή και για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία και προσδιορίζονται οι ισχύες παραγωγής.

Η μαθηματική ανάλυση του προβλήματος ροών ισχύος οδηγεί σε ένα σύστημα  $2N$  μη γραμμικών εξισώσεων όπου  $N$  ο αριθμός των διαθέσιμων κόμβων – ζυγών του δικτύου. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο  $\Pi$  με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά.

Για τον προσδιορισμό των εξισώσεων ροών φορτίου θεωρούμε έναν αντιπροσωπευτικό ζυγό του συστήματος με ισχύ ζυγού και συμβολή γραμμών μεταφοράς. Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες προς γη των γραμμών μεταφοράς συγκεντρώνονται στους ζυγούς, οπότε για το θεωρούμενο ζυγό θα έχω:

$$Y_{i0} = \sum_{j=1}^N Y_{ij0} \quad (3.3)$$

Η εξίσωση των ρευμάτων στο ζυγό γράφεται:

$$\begin{aligned} \tilde{J}_i &= \tilde{V}_i Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) Y_{ij} = \\ &= \tilde{V}_i Y_{i0} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_1) Y_{i1} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_2) Y_{i2} + \dots + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_N) Y_{iN} = \\ &= \left( Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij} \right) \tilde{V}_i - Y_{i1} \tilde{V}_1 - Y_{i2} \tilde{V}_2 - \dots - Y_{iN} \tilde{V}_N \quad (3.4) \end{aligned}$$

Και εισάγοντας τις ακόλουθες νέες παραμέτρους ,

$$y_{ii} = Y_{i0} + \sum_{j \neq i}^N Y_{ij} \quad (3.5)$$

$$y_{ij} = -Y_{ij} = -Y_{ji} \quad (3.6)$$

η εξίσωση γίνεται :



$$\tilde{J}_i = y_{i1}\tilde{V}_1 + y_{i2}\tilde{V}_2 + \dots + y_{ii}\tilde{V}_i + \dots + y_{iN}\tilde{V}_N = \sum_{j=1}^N y_{ij}\tilde{V}_j \quad (3.7)$$

Έχουμε συνεπώς για τους N ζυγούς, ένα σύστημα N εξισώσεων ρευμάτων – τάσεων, το οποίο σε μητρική μορφή γράφεται:

$$\begin{bmatrix} \tilde{J}_1 \\ \vdots \\ \tilde{J}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{1N} & \dots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \vdots \\ \tilde{V}_N \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$[\tilde{J}_Z] = [Y_Z] \cdot [\tilde{V}_Z] \quad (3.9)$$

Και δεδομένου ότι,

$$\tilde{J}_i = \frac{P_i - Q_i}{\tilde{V}_i^*} \quad (3.10)$$

η εξίσωση ροών φορτίου γράφεται:

$$P_i - Q_i = y_{i1}\tilde{V}_1\tilde{V}_i^* + y_{i2}\tilde{V}_2\tilde{V}_i^* + \dots + y_{ii}\tilde{V}_i\tilde{V}_i^* + \dots + y_{iN}\tilde{V}_N\tilde{V}_i^* = \tilde{V}_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij}\tilde{V}_j \quad (3.11)$$

Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση δύο νέες εξισώσεις, και συνεπώς, για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας N ζυγών, έχουμε 2N εξισώσεις ροών φορτίων της μορφής

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| [g_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) - b_{ji} \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (3.12)$$

$$-Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| [g_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i) - b_{ji} \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (3.13)$$

Όπου:

$$y_{ij} = g_{ji} + jb_{ji} \quad (3.14)$$

Η αντίστροφη της εξίσωσης (3.9) δίνει την εξίσωση:

$$[\tilde{V}_Z] = [Z_Z] \cdot [\tilde{J}_Z] \quad (3.15)$$

Όπου,

$$[Z_Z] \triangleq [Y_Z]^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1N} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις αυτές συνδέουν ισχύες, τάσεις και γωνίες δηλαδή τις τρεις χαρακτηριστικές μεταβλητές του προβλήματος. Τα ρεύματα δεν ενδιαφέρουν ποτέ απευθείας και υπολογίζονται εύκολα μετά την απόκτηση των τάσεων και των γωνιών. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές και μη γραμμικές.

Η μελέτη ροών φορτίου αποτελεί η εύρεση της καταλληλότερης για το σύστημα λύσης βάσει ορισμένων κριτηρίων και υπό ορισμένους περιορισμούς που πρέπει να τηρηθούν σε κάθε περίπτωση.

Είναι γνωστή η ζήτηση φορτίου των ζυγών δηλαδή οι 2N μεταβλητές διαταραχής που αποτελούν τα βασικά δεδομένα του προβλήματος. Ορίζονται

μετά,  $2N$  μεταβλητές από τις ισχύες παραγωγής και τις τάσεις και προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων οι υπόλοιπες  $2N$  άγνωστες μεταβλητές. Η προδιαγραφή των  $2N$  πιο πάνω μεταβλητών διευκολύνεται από τις ακόλουθες συνθήκες και περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος:

A) Η οικονομική λειτουργία των μονάδων

B) Για τους ζυγούς φορτίου είναι πάντοτε  $P_G = 0$ . Η  $Q_G$  είναι είτε μηδενική ή έχει ορισμένη τιμή αν προέρχεται από χωρητική αντιστάθμιση.

Γ) Τα επίπεδα τάσης ορισμένων ζυγών έχουν στενά όρια τιμών.

Δ) Οι διασυνδέσεις με γειτονικά συστήματα επιβάλλουν ορισμένες υποχρεώσεις ανταλλαγών. Από τις τάσεις ζυγών προδιαγράφονται οι πιο σημαντικές και αφήνονται οι πιο άγνωστες οι λιγότερο περιορισμένες. Γενικά, οι περισσότερες από τις απομένουσες  $2N$  άγνωστες μεταβλητές είναι γωνίες  $\delta$ , οι οποίες προσδιορίζονται από την επίλυση των εξισώσεων. Οι λύσεις που θα προκύψουν θα πρέπει να ικανοποιούν τα παρακάτω όρια και τους εξής περιορισμούς:

i. Οι τάσεις των ζυγών

$$|V_i|_{min} < |V| < |V_i|_{max}$$

ii. Οι γωνιακές διαφορές ορισμένων ζυγών,

$$|\delta_j - \delta_i| < |\delta_j - \delta_i|_{max}$$

iii. Οι ισχείς παραγωγής,

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max}$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max}$$

iv. Οι γραμμές μεταφοράς έχουν όρια ευστάθειας και όρια απωλειών ισχύος.

### 2.3 Ψηφιακές μέθοδοι χρησιμοποιούμενες για την επίλυση του προβλήματος των ροών φορτίου

Παλιότερα για τη μελέτη των ροών φορτίου χρησιμοποιούνταν ομοιώματα δικτύου EP, δηλαδή ειδικοί αναλογικοί υπολογιστές, στους οποίους τα διάφορα τμήματα του συστήματος εξομοιώνονταν αναλογικά με αντίστοιχα ηλεκτρικά στοιχεία σε μικρογραφία.

Οι ψηφιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς των ροών φορτίου μπορούν να λύσουν της μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις ροών φορτίου για μεγάλα συστήματα με εκατοντάδες ζυγούς, με απώλειες, με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι δύο βασικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στις ροές φορτίου είναι:

A) Η μέθοδος Gauss – Seidel

B) Η μέθοδος Newton – Raphson

Και οι δύο μέθοδοι ξεκινούν από μια αρχική λύση και με διαδοχικές ανακυκλώσεις προσεγγίζουν την τελική ως εξής: Η αρχική λύση χρησιμοποιείται

στις εξισώσεις του προβλήματος για να βρεθεί μια καινούρια καλύτερη λύση. Η δεύτερη λύση χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να βρεθεί μια τρίτη καλύτερη λύση. Μια τέτοια συγκλίνουσα διαδικασία λέγεται μέθοδος ή διαδικασία ανακυκλώσεως και η ποιότητά της κρίνεται από την ταχύτητα συγκλίσεώς της.

### 2.3.1 Η μέθοδος Gauss - Seidel

Υποθέτουμε γνωστή μια αρχική σειρά τιμών όλων των τάσεων των ζυγών και έστω  $\widetilde{V}_k$  αρχική αυτή τιμή για το ζυγό k. Η τάση του ζυγού ταλάντωσης είναι επιβεβλημένη. Θεωρώντας τη γενική μορφή των εξισώσεων ροών φορτίου (3.11) συστήματος N ζυγών, για το ζυγό k και λύνοντας ως προς  $\widetilde{V}_k$  έχουμε:

$$\widetilde{V}_k = \frac{1}{y_{kk}} \left\{ \frac{P_k - jQ_k}{\widetilde{V}_k^*} - \sum_{j=1, j \neq k}^N y_{kj} \widetilde{V}_j \right\}, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.17)$$

Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται επαναληπτικά σύμφωνα με τη διαδικασία Gauss - Seidel. Για τον προσδιορισμό της  $\widetilde{V}_k$  στο βήμα (n+1) των τάσεων  $\widetilde{V}_1 = \widetilde{V}_{k-1}$ . Με τον τρόπο αυτό κατά τη (n+1) επανάληψη θα είναι:

$$V_k^{(n+1)} = \frac{1}{y_{kk}} \left\{ \frac{P_k^{(n)} - jQ_k^{(n)}}{V_k^{(n)*}} - \sum_{j=1}^{k-1} y_{kj} V_j^{(n+1)} - \sum_{j=k+1}^N y_{kj} V_j^{(n)} \right\} \quad (3.18)$$

Ο τύπος (3.18) εφαρμόζεται απευθείας στους ζυγούς φορτίου δεδομένου ότι τα  $P_k, Q_k$  είναι γνωστά.

Στους ζυγούς παραγωγής όμως δεν είναι γνωστό το  $Q_k$  και χρειάζεται να υπολογιστεί από τον τύπο

$$Q_k^{(n)} = -Im \left\{ V_k^{(n)*} \left[ \sum_{j=1}^{k-1} y_{kj} V_j^{(n+1)} - \sum_{j=k+1}^N y_{kj} V_j^{(n)} \right] \right\}, \quad (3.19)$$

Στη συνέχεια αφού υπολογίσουμε την τιμή αυτή την αντικαθιστούμε στην εξίσωση (3.18) από την οποία υπολογίζεται η  $V_k^{(n+1)}$ . Από την τιμή που θα προκύψει όμως κρατάμε μόνο τη γωνία  $\delta_k^{(n+1)}$  γιατί το μέτρο  $|\widetilde{V}_k|$  είναι καθορισμένο όπως και το  $P_k$  για τους ζυγούς παραγωγής. Η μέθοδος Gauss - Seidel συγκλίνει γρηγορότερα αν χρησιμοποιηθεί συντελεστής επιτάχυνσεως. Η διαφορά δηλαδή μεταξύ των δύο βημάτων της μεθόδου πολλαπλασιάζεται με ένα αριθμό α γύρω στο 1.6 συνήθως.

$$V_k^{(n+1)} = V_k^{(n)} + a \left( V_k^{(n+1)'}, V_k^{(n)} \right), \quad (3.20)$$

Στους ζυγούς παραγωγής ο συντελεστής επιτάχυνσης εφαρμόζεται στη γωνία δ του ζυγού. Δηλαδή:

$$\delta_k^{(n+1)} = \delta_k^{(n)} + a \left( \delta_k^{(n+1)'}, \delta_k^{(n)} \right), \quad (3.21)$$

### 2.3.2 Μέθοδος Newton – Raphson

Η μέθοδος αυτή είναι πιο σύνθετη αλλά και ασφαλέστερη. Στις περιπτώσεις δεν έχει πρόβλημα σύγκλισης και κατά κανόνα συγκλίνει ταχύτερα από τη μέθοδο Gauss – Seidel.

Έστω προς επίλυση το σύστημα εξισώσεων,

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned}$$

Και  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$  η αρχική λύση. Υποθέτουμε ότι  $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ , οι διαφορές οι οποίες προστιθέμενες στην αρχική λύση δίνουν την τελική λύση, η οποία στην περίπτωση αυτή θα είναι:  $x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}$ .

Παίρνοντας το ανάπτυγμα Taylor των εξισώσεων του συστήματος έχουμε:

$$\begin{aligned} &f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = \\ &= f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} + \dots + \\ &\Delta x_n^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \quad (3.22) \end{aligned}$$

Γράφοντας τα αναπτύγματα (3.22) για όλες τις εξισώσεις του συστήματος διαμορφώνουμε το γενικό σύστημα εξισώσεων:

$$[\Delta f] = [J][\Delta x] \quad , \quad (3.23)$$

Όπου,

$$[\Delta f] \triangleq \begin{bmatrix} f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \dots \\ f_n(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} \quad , \quad (3.24)$$

Το διάνυσμα των διαφορών των συναρτήσεων ,

$$[\Delta x] \triangleq \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad , \quad (3.25)$$

Το διάνυσμα των διαφορών  $\Delta x_i^{(0)}$  και των εκάστοτε τιμών των  $\Delta x_i^{(0)}$  και των εκάστοτε τιμών των  $\Delta x_i$  και ,

$$[J] \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \ddots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad , \quad (3.26)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα του συστήματος.

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

$$[x] = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \vdots \\ \delta_n \\ | \tilde{V}_i | \\ \vdots \\ | \tilde{V}_n | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \\ | \tilde{V}_1 | \\ \vdots \\ | \tilde{V}_n | \end{bmatrix}, \quad (3.27) \text{διάνυσμα καταστάσεως (τελική λύση)}$$

$$[x_0] = \begin{bmatrix} \delta_{0i} \\ \vdots \\ |V|_{0i} \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

Διάνυσμα αρχικών τιμών (και επομένων προσεγγίσεων):

$$[f(x)] = \begin{bmatrix} P_{si} \\ \vdots \\ Q_{si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{s1} \\ \vdots \\ P_{sk} \\ Q_{s1} \\ \vdots \\ Q_{sk} \end{bmatrix}, \quad (3.29)$$

Διάνυσμα που περιέχει τις προσδιορισμένες τιμές των ισχύων  $P_s$  και  $Q_s$  καθαρές ισχείς.

$$[f(x_0)] = \begin{bmatrix} P_i \\ \vdots \\ Q_i \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

Τα  $P, Q$  υπολογίζονται με βάση τις προσεγγίσεις  $\delta_0, |V_0|$

Τα  $P_s, Q_s$  είναι δεδομένα του προβλήματος ροής φορτίου.

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \vdots \\ \Delta |V|_i \end{bmatrix}, \quad (3.31)$$

Διορθώσεις μεταβλητών κατάστασης.

$$[\Delta f] = \begin{bmatrix} P_{si} - P_i \\ \vdots \\ Q_{si} - Q_i \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

Σφάλματα ζυγών

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix}, \quad (3.33)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα.

Οι ισχύες των ζυγών δίνονται συναρτήσει των μεταβλητών καταστάσεως από τις σχέσεις:

$$P_i - jQ_i = \tilde{V}_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} \tilde{V}_j = |\tilde{V}_i|^2 y_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{V}_i^* y_{ij} \tilde{V}_j, \quad (3.34)$$

Θεωρούμε ότι

$$\tilde{V}_i = |\tilde{V}_i| \angle \delta_i$$

$$\tilde{y}_{ij} = |\tilde{y}_{ij}| \angle -\theta_{ij}$$

Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη θα έχω:

$$P_i = |\tilde{V}_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |\tilde{V}_i y_{ij} \tilde{V}_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad (3.35)$$

$$Q_i = |\tilde{V}_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |\tilde{V}_i y_{ij} \tilde{V}_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad (3.36)$$

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, λόγω της μορφής των (3.35), (3.36).

$$J1_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |\tilde{V}_i \tilde{V}_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.37)$$

$$J1_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = - \sum_{j \neq i} |\tilde{V}_i \tilde{V}_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = -Q_i + |\tilde{V}_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii}, \quad (3.38)$$

$$J2_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} J2_{ii} &= \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2|\tilde{V}_i y_{ii}| \cos \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |y_{ij} \tilde{V}_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \\ &= |\tilde{V}_i y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|}, \quad (3.40) \end{aligned}$$

$$J3_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|\tilde{V}_i y_{ij} \tilde{V}_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.40)$$

$$J3_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |\tilde{V}_i \tilde{V}_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = P_i - |\tilde{V}_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii}, \quad j \neq i \quad (3.41)$$

$$J4_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = |\tilde{V}_i y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j), \quad j \neq i \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} J4_{ii} &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = \sum_{j \neq i} |y_{ij} \tilde{V}_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) + 2|\tilde{V}_i y_{ii}| \sin \theta_{ii} \\ &= \frac{Q_i}{|V_i|} + |V_i y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (3.43) \end{aligned}$$

Τα  $Q_i, P_i$  υπολογίζονται με βάση τις μέχρι στιγμής προσεγγίσεις των  $|\tilde{V}|$  και  $\delta$  και δεν είναι οι προσδιορισμένες τιμές  $Q_{si}, P_{si}$ .

Οι πλήρεις διαστάσεις της Ιακωβιανής μήτρας για ένα σύστημα  $N$  ζυγών είναι  $2N \times 2N$ . Στην πραγματικότητα δε χρειάζεται να υπολογιστούν όλες οι παράγωγοι γιατί:

- Στο ζυγό αναφοράς είναι τα  $|\tilde{V}|$  και  $\delta$  γνωστά και δε χρειάζεται να υπολογιστούν.
- Στους ζυγούς παραγωγής τα  $|\tilde{V}|$  είναι γνωστά ενώ δεν είναι γνωστά τα  $Q_S$ .

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

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\Delta \delta] \\ [\Delta V] \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

ή

$$[\Delta P] = \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V] \quad (3.45)$$

$$[\Delta Q] = \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] + \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V] \quad (3.46)$$

Από την (3.45) βρίσκονται τα  $[\Delta \delta]$  δηλαδή οι γωνίες όλων των ζυγών,

$$[\Delta \delta] = \left( [\Delta P] - \left[ \frac{\partial P}{\partial V} \right] \cdot [\Delta V] \right) \cdot \left[ \frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \quad (3.46)$$

Για τους ζυγούς φορτίου που είναι γνωστά τα P, Q το  $[\Delta V]$  βρίσκεται:

$$[\Delta V] = \left( [\Delta Q] - \left[ \frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] \cdot [\Delta \delta] \right) \cdot \left[ \frac{\partial Q}{\partial V} \right]^{-1} \quad (3.47)$$

Συνοπτικά ο αλγόριθμος της Newton - Raphson μπορεί να δοθεί παρακάτω:

1. Δίνονται αρχικές τιμές στα  $|\tilde{V}|$  και  $\delta$ , όπου αυτά δεν είναι καθορισμένα (διάνυσμα  $[x_0]$ ).
2. Υπολογίζονται οι ισχείς των ζυγών από τις εξισώσεις (3.35) και (3.36). Είναι γνωστά τα P για όλους τους ζυγούς (εκτός από 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  $[\Delta Q]$  που χρειάζεται η (3.44).
3. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή από τις σχέσεις (3.38) - (3.43).
4. Επιλύεται η (3.44) και υπολογίζονται οι αποκλίσεις  $[\Delta \delta]$ ,  $[\Delta V]$ , δηλαδή οι διορθώσεις  $[\Delta x]$ .
5. Αν οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από τα όρια ανοχής εναπερχόμαστε στο βήμα 2.
6. Μετά τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται τα  $P_1$ ,  $Q_1$  του ζυγού αναφοράς και κατόπιν οι ροές φορτίου στις γραμμές.

Η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται οπωσδήποτε από την αρχική λύση. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας.

## 3. Φωτοβολταϊκά

### 3.1 Εισαγωγή

Με τον όρο ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζουμε το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Το φως και η θερμότητα που ακτινοβολούνται απορροφούνται από στοιχεία και ενώσεις στη γη και μετατρέπονται σε άλλες μορφές ενέργειας. Η τεχνολογία σήμερα αξιοποιεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της καταφθάνουσας στην επιφάνεια του πλανήτη μας ηλιακής ενέργειας με τριών ειδών συστήματα: τα θερμικά ηλιακά, τα παθητικά ηλιακά και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τα *Θερμικά Ηλιακά Συστήματα* αποτελούν την απλούστερη και πιο διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων και είναι οι γνωστοί σε όλους μας ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια, τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό όπως για παράδειγμα το νερό. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών σκουρόχρωμων δηλαδή επιφανειών καλά προσανατολισμένων στον ήλιο, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή με νερό και του μεταδίδουν μέρος της θερμότητας που παρέλαβαν. Το παραγόμενο ζεστό νερό χρησιμοποιείται για απλή οικιακή ή πιο σύνθετη βιομηχανική χρήση, τελευταία δε ακόμη και για τη θέρμανση και ψύξη χώρων μέσω κατάλληλων διατάξεων.

Τα *παθητικά ηλιακά συστήματα* αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτιρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούν την αρχή της Βιοκλιματικής Αρχιτεκτονικής και μπορούν να εφαρμοσθούν σε όλους σχεδόν τους τύπους κτιρίων.

Και τέλος τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα που μας ενδιαφέρουν και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Φωτοβολταϊκά συστήματα συναντώνται σε μικρούς υπολογιστές και ρολόγια. Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που, εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων. Δορυφόροι, φάροι και απομονωμένα σπίτια χρησιμοποιούν παραδοσιακά τα φωτοβολταϊκά για την ηλεκτροδότησή τους. Στην Ελλάδα, η προοπτική ανάπτυξης και εφαρμογής των Φ/Β συστημάτων είναι τεράστια, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά έχει ένα τεράστιο πλεονέκτημα : αποδίδει την μέγιστη ισχύ της κατά τη διάρκεια της ημέρας που παρουσιάζεται η μέγιστη ζήτηση.

Ανάλογα με τη χρήση του παραγόμενου ρεύματος, τα Φ/Β κατατάσσονται σε:

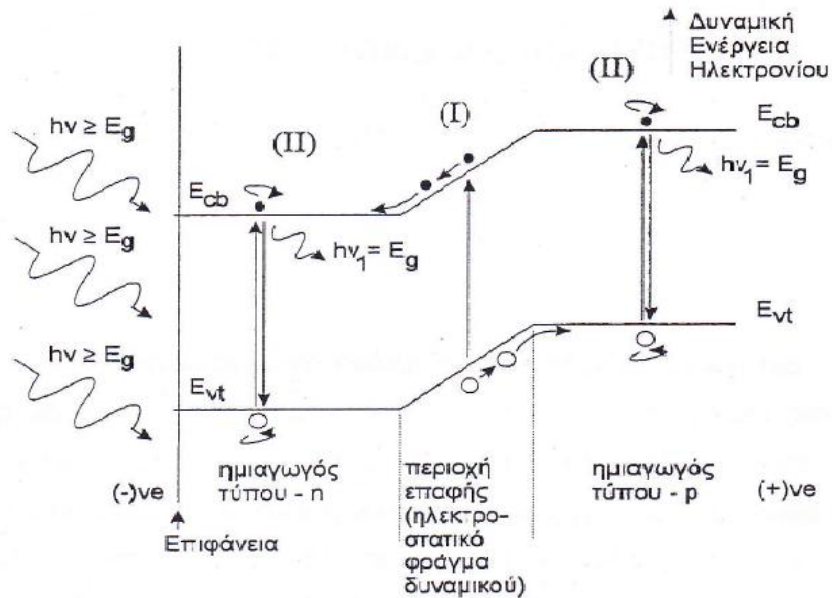


- Αυτόνομα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων καταναλώνεται επιτόπου και εξολοκλήρου από την παραγωγή στην κατανάλωση
- Διασυνδεδεμένα συστήματα, η παραγόμενη ενέργεια των οποίων διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να μεταφερθεί και να καταναλωθεί αλλού.

## 3.2 Τεχνολογία

### 3.2.1. Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια εκμεταλλευόμενες το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Τα ηλιακά στοιχεία βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ενός ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού το οποίο εκτείνεται σε όλο το πλάτος του στοιχείου που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό το φράγμα δυναμικού βρίσκεται κατανομημένο σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και τοποθετείται από την πλευρά από την οποία προσπίπτει το φως. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ελεύθερων φορέων: δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και μια οπή στη ζώνη σθένους. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού πηγάζει από την απαίτηση για διαχωρισμό των θετικών και αρνητικών φορέων φορτίου και τη συγκέντρωσή τους πάνω στις δύο όψεις του ηλιακού στοιχείου – δηλαδή τη φωτιζόμενη και την πίσω όψη τους -. Συγκεκριμένα επειδή μερικά από τα ζεύγη των φορέων αυτών δημιουργούνται μέσα ή και δίπλα από την περιοχή του ηλεκτροστατικού φράγματος δυναμικού διαχωρίζονται προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια. Για την κατανόηση του μηχανισμού μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται σα σφαίρες μάζας  $m_e$  που κυλούν πάνω σε κεκλιμένο επίπεδο ενώ οι οπές συμπεριφέρονται σα φυσαλίδες – θέσεις στις οποίες απουσιάζει η μάζα ενός ηλεκτρονίου – που αιωρούνται μέσα σε ένα υγρό. Στο μοντέλο αυτό το ηλεκτρόνιο (σφαίρα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική του ενέργεια κινούμενο προς τα κάτω, ενώ η οπή (φυσαλίδα) ελαχιστοποιεί τη δυναμική της ενέργεια κινούμενη προς τα άνω σε ένα διάγραμμα δυναμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε μια δίοδο p-n τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δύο αντικρινές επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δυο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



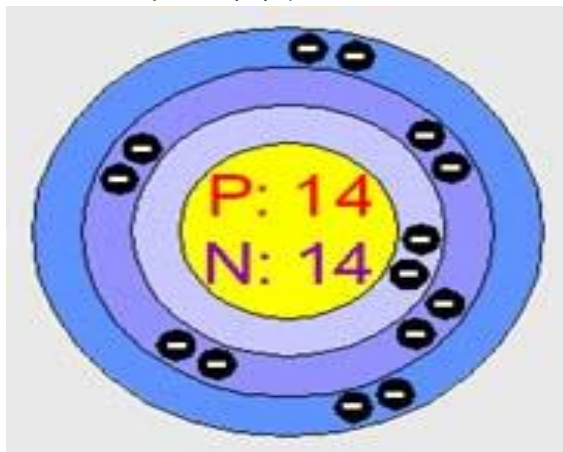
**Σχήμα 3.1:** το ηλιακό στοιχείο που αποτελείται από την επαφή του ημιαγωγού τύπου-n και τύπου - p. Το σχήμα παρουσιάζει το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια.

Στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής  $E = h \cdot \nu \geq E_g$ . Όπου  $E_g = E_{cb} - E_{vt}$  η τιμή του ενεργειακού διακένου  $E_{cb}=0$  πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και  $E_{vt}$ =κορυφή ζώνης σθένους.

Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει ένα ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας με τον τρόπο αυτό ωφέλιμη ισχύ.

### 3.2.2 Αρχές λειτουργίας των ημιαγωγών

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) για αυτό και θα επικεντρωθούμε σε αυτό.



Εικόνα 3.1 : Πυρίτιο (Si)

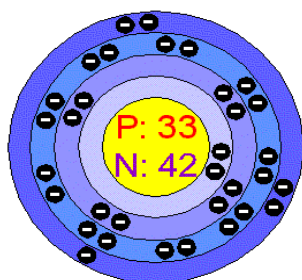
Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα η περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) ψάχνουν άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να μοιραστούν κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

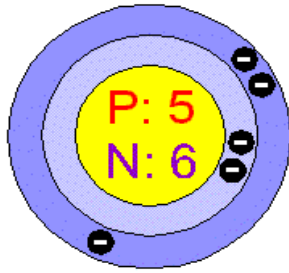
Τις ημιαγωγικές ιδιότητές του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμειξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους. Αυτή η πρόσμειξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n)

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου n ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμειξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το Αρσενικό (As).



Εικόνα 3.2 : Αρσένιο (As)

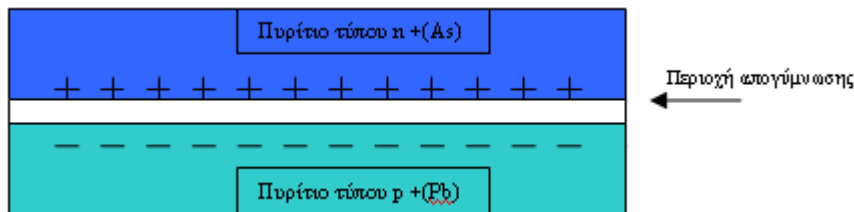
Αντίστοιχα για να δημιουργηθεί ένας ημιαγωγός τύπου p η αλλιώς θετικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.



Εικόνα 3.3 : Βόριο (B)

Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου).

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια διόδος ή αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο.



Εικόνα 3.4: Δημιουργία της επαφής (ηλεκτρικού πεδίου)

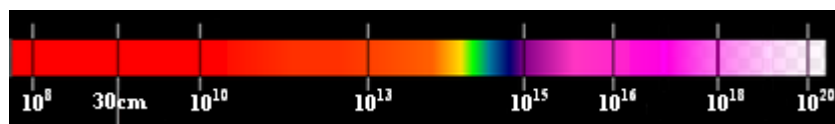
Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με την μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη φωτοβολταϊκού κελιού περνούν την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν να κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.

Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής n πλέον υπάρχει μια περίσσεια ηλεκτρονίων. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετηθεί μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Όμως, δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί όλη η προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια διότι το κάθε ημιαγωγό υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος

της ακτινοβολίας. Κάποια υλικά αντιδρούν σε ευρύτερα φάσματα ακτινοβολίας από κάποια άλλα.



Εικόνα 3.5

Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιείται αξιοποιείται μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το συγκεκριμένο υλικό.

### Ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

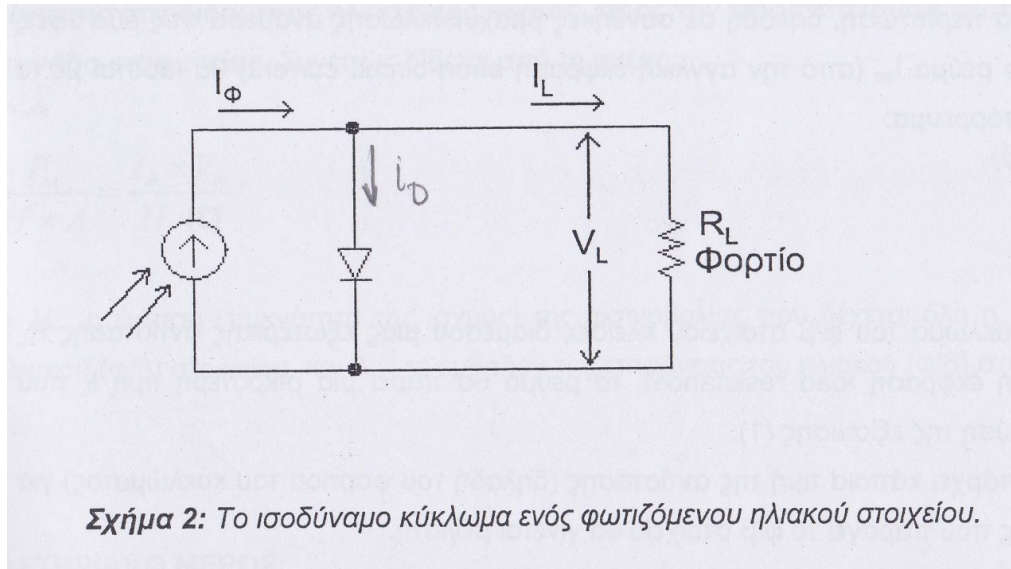
Περιοχή του φάσματος	Περιοχή συχνοτήτων	Ενέργεια φωτονίων
Ραδιοκύματα	0-300 MHz	$0-10^{-5} \text{eV}$
Μικροκύματα	300 MHz - 300GHz	$10^{-5} - 10^{-3} \text{eV}$
υπέρυθρη ακτινοβολία	300GHz - 400THz	$10^{-3} - 1,6 \text{eV}$
ορατή ακτινοβολία	400-800THz	$1,6 - 3,2 \text{eV}$
υπεριώδης ακτινοβολία	800THz - $3 \cdot 10^{17} \text{Hz}$	$3 \text{eV} - 2000 \text{eV}$
ακτίνες X	$3 \cdot 10^{17} \text{Hz} - 5 \cdot 10^{19} \text{Hz}$	$1200 \text{eV} - 2,4 \cdot 10^5 \text{eV}$
ακτίνες γ	$5 \cdot 10^{19} \text{Hz} - 3 \cdot 10^{22} \text{Hz}$	$10^5 \text{eV} - 10^7 \text{eV}$
Κοσμικές ακτίνες	$3 \cdot 10^{22} \text{Hz}$	$10^7 \text{eV}$

Πίνακας 3.1

Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια συμβολίζει τον συντελεστή απόδοσης του υλικού. Οι δύο βασικοί παράγοντες για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού υλικού είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού και ο συντελεστής μετατροπής.

### 3.2.3. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η περιγραφή κάθε διάταξης και η κατανόηση της λειτουργίας της μπορεί να γίνει μέσα από το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου περιγράφεται στο σχήμα 3.2. Αποτελείται από μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μια δίοδο.



Σχήμα 3.2

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchoff στο σχήμα 3.2, προκύπτει ότι ισχύει η σχέση  $I_\phi = I_L + I_D$ , όπου  $I_\phi$  είναι το φωτόρευμα που είναι ανάλογο προς τα φωτόνια που απορροφά το ηλιακό στοιχείο,  $I_D$  το ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο της διόδου και  $I_L$  το ρεύμα που διαρρέει το εξωτερικό φορτίο.

$$I_L = I_\phi - I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{eV_L}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Όπου:

$I_0$  = το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου

$e$  = το φορτίο του ηλεκτρονίου =  $1,602 \times 10^{-19}$  coulomb

$k$  = η σταθερά Boltzmann =  $1,38 \times 10^{-23}$  joules/kelvin

$T$  = η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin

$V_L$  = η τάση που δημιουργείται στα άκρα της διόδου από την πρόσπτωση του φωτός

Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος ( $R_L \rightarrow \infty$ ) βρίσκουμε ότι η τιμή της τάσης του στοιχείου θα είναι  $V_{oc}$  :

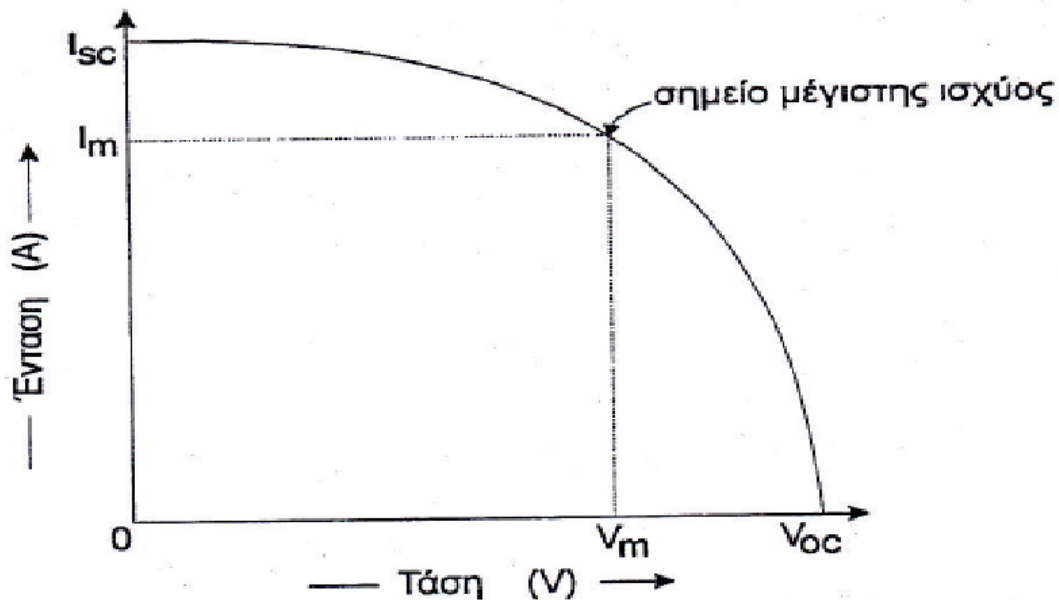
$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \quad (2)$$

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα  $I_{sc}$  θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα:  $I_{sc} = I_\phi$  (3).

Όταν όμως το κύκλωμα του φ/β στοιχείου κλείσει, διαμέσου μια εξωτερικής αντίστασης  $R_L$  το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή  $I_L$  που βρίσκεται από τη λύση της εξίσωσης (1).

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φ/β στοιχείο θα είναι μέγιστη:

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (4)$$



Σχήμα 3.3: Το διάγραμμα I-V ενός ηλιακού στοιχείου και τα κυριότερα ηλεκτρικά μεγέθη που το προσδιορίζουν. Το σημείο μέγιστης ισχύος αντιστοιχεί στη θέση λειτουργίας (τιμή αντίστασης φορτίου) που το γινόμενο  $I_m \cdot V_m$  μεγιστοποιείται. Η αποδιδόμενη μέγιστη ισχύς αντιστοιχεί σχηματικά στη μεγιστοποίηση του γραμμοσκιασμένου εμβαδού, του παραλληλόγραμμου.

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή οι  $P_m$ ,  $I_{sc}$  και  $V_{oc}$  είναι από τις κυριότερες παραμέτρους αξιολόγησης της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Ο συντελεστής απόδοσης  $\eta$  ορίζεται από το λόγο μεταξύ της μέγιστης αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος, προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Συνεπώς προκύπτει η σχέση:

$$\eta = \frac{P_m}{H \times A} = \frac{I_m \times V_m}{H \times A} \quad (5)$$

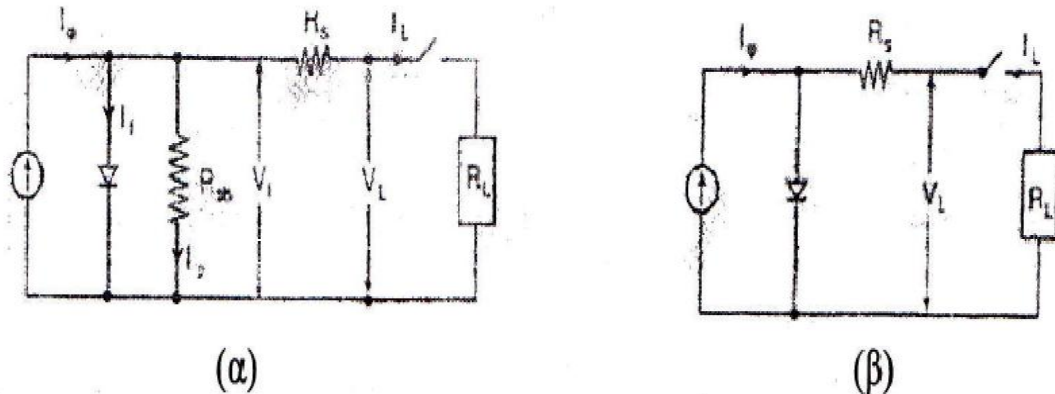
Όπου  $H$ , η ένταση (πυκνότητα της ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου και  $A$  = το εμβαδόν της επιφάνειας του ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Ορίζεται επιπλέον ο συντελεστής συμπλήρωσης:

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (6)$$



Η παραπάνω εξιδανικευμένη παράσταση του φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν έλαβε υπόψη τις απώλειες που συμβαίνουν εντός του στοιχείου και εκδηλώνονται με τη μορφή υπερθέρμανσής του έναντι της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Στο σχήμα 4 (α) φαίνεται ένα πληρέστερο ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου: Η ισχύς  $R_{sh}I_p^2$  εκφράζει τις απώλειες που υπερθερμαίνουν το Φ/Β στοιχείο ακόμη και όταν είναι ανοιχτοκυκλωμένο ενώ η  $R_s \cdot I_L^2$  τις πρόσθετες απώλειες και τη μείωση της τάσης που παρατηρούνται όταν συνδέεται εξωτερικό φορτίο και αυξάνεται η ένταση  $I_L$ .



Σχήμα 3.4 : (α) πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου.  
(β) το ισοδύναμο κύκλωμα όταν αγνοούνται οι απώλειες κενής λειτουργίας

Στο σχήμα 4 προκύπτει ότι :  $I_\phi - I_1 - I_p = I_L$  (7) και αντικαθιστώντας στη σχέση (1) προκύπτει:

$$I_L = I_\phi - I_0[\exp[(V_L + R_s I_L)/\mu] - 1] - \frac{(V_L + R_s I_L)}{R_{sh}} \quad (8)$$

Οι απώλειες που παρατηρούνται κατά την κενή (χωρίς φορτίο) λειτουργία είναι πολύ μικρότερες από εκείνες που παρατηρούνται κατά την κανονική λειτουργία. Συνεπώς, η  $R_{sh}$  μπορεί να θεωρηθεί ως «απείρου μεγέθους» οπότε η σχέση απλοποιείται στην:

$$I_L = I_\phi - I_0[\exp[(V_L + R_s I_L)/\mu] - 1] \quad (9)$$

Επομένως προκύπτει:

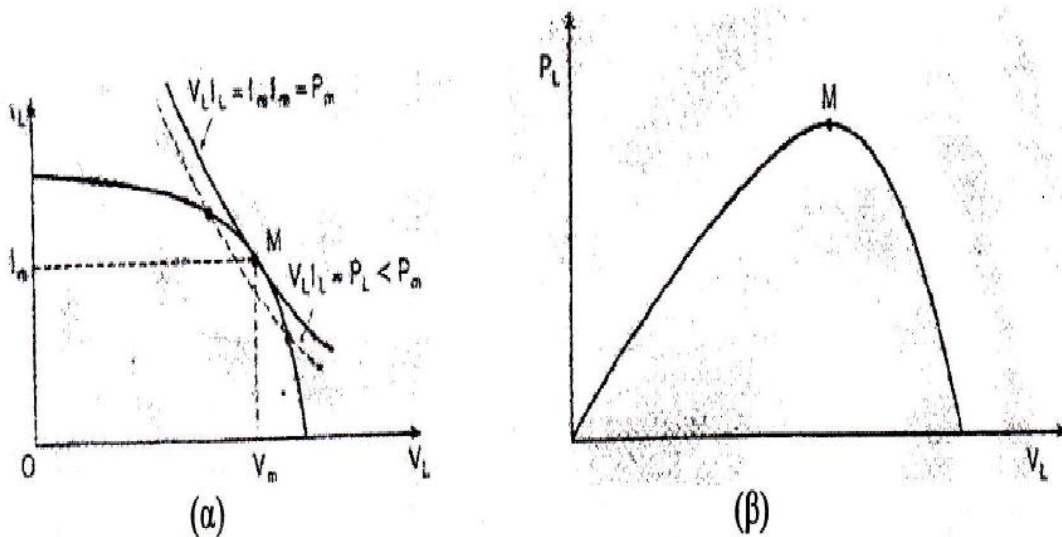
$$V_L = -R_s I_L + \mu \ln[(I_\phi - I_L + I_0)/\mu] \quad (10)$$

Η σχέση (10) παρέχει την χαρακτηριστική  $V_L - I_L$  και περιγράφει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού στοιχείου ως μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο από τη σχέση (10) είναι:

$$P_L = V_L I_L = -R_s \cdot I_L^2 + I_L \mu \ln[(I_\phi - I_L + I_0)/\mu] \quad (11)$$





Σχήμα 3.5: (α)  $I_L - V_L$  (β)  $P_L - V_L$

Είναι προφανές ότι παρουσιάζει ενδιαφέρον το να επιτυγχάνεται συνεχώς και για τις διάφορες τιμές της εντάσεως της ακτινοβολίας, η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο σημείο μέγιστης απόδοσης M στο οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της διατιθέμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σχήμα 5 (α) δείχνεται ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατόν να προσδιορίζεται γραφικά το σημείο M ως το σημείο επαφής της καμπύλης  $P_m = I_m \cdot V_m$  με την  $V_L - I_L$ . Επίσης στο σχήμα 5 (β) φαίνεται η καμπύλη  $P_L(V_L)$  σύμφωνα με την (11) στην οποία προφανώς το σημείο M είναι το μέγιστό της. Το σημείο M μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με μηδενισμό της παραγώγου  $dP_L/dV_L = 0$

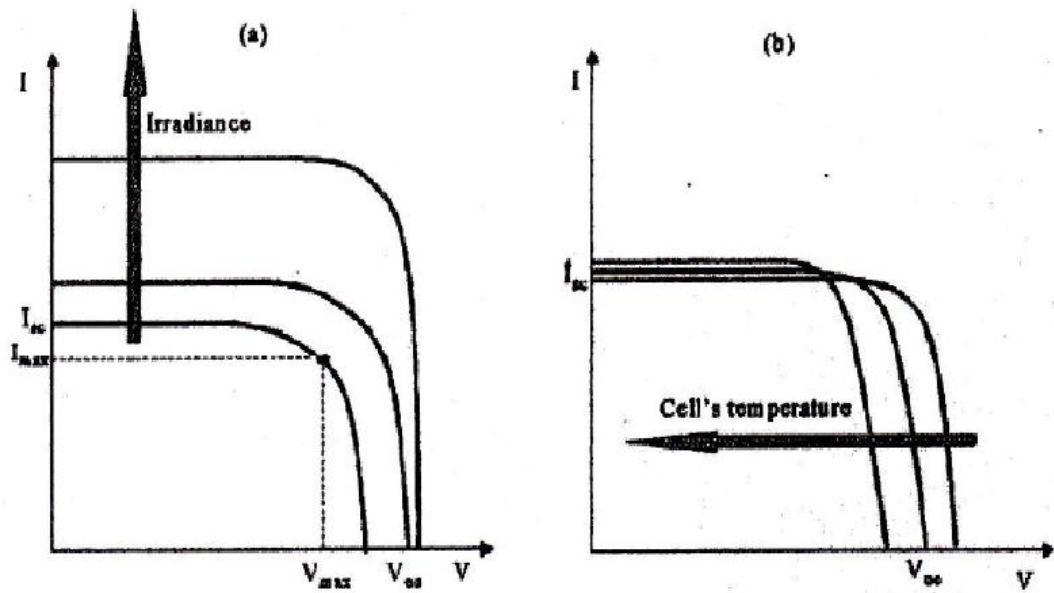
οπότε με βάση τις (1) και (2) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση στην οποία έχει τεθεί:  $I_L = I_m$

$$\ln \frac{I_\phi - I_m + I_0}{I_0} = \frac{2}{\mu} R_S I_m + \frac{I_m}{I_\phi - I_m + I_0} \quad (12)$$

Λύνοντας τη (12) αριθμητικά ως προς  $I_m$  προκύπτει και το αντίστοιχο  $V_m$

3.2.4. Επίδραση των μεταβολών της εντάσεως της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας.

Στο σχήμα 6 (α) δείχνεται σχηματικά η επίδραση των μεταβολών της εντάσεως της ηλιακής ακτινοβολίας  $G$  και στο σχήμα 6 (β) η επίδραση της θερμοκρασίας  $T$ .



Σχήμα 3.6: Επίδραση (α) της ακτινοβολίας και (β) της θερμοκρασίας

Τα βέλη δείχνουν την αύξηση των αντίστοιχων μεγεθών. Στο σχήμα 6 (α) φαίνεται ότι τη τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνει λογαριθμικά με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ η ένταση βραχυκύκλωσης γραμμικά. Στο σχήμα 6 (β) φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως κύριο αποτέλεσμα τη γραμμική μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος ενώ το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται πολύ λίγο.

### 3.3 Τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών

Οι βάσεις για τη σύγχρονη τεχνολογία Φ/Β κυψελών εντοπίζονται στις αρχές του δεκαετίας του 1950 όταν οι ερευνητές στα Bell Telephone Laboratories ανακάλυψαν και ανέπτυξαν ηλιακές κυψέλες. Το 1958 παρόμοιες κυψέλες χρησιμοποιήθηκαν με επιτυχία στο διάστημα όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στο δορυφόρο Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς.

Το 1962 η μεγαλύτερη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wr.

Λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως

προχωρούσε και η απόδοση των φωτοβολταϊκών συνεχώς βελτιωνόταν. Κυριότερος πελάτης τους τις δεκαετίες που ακολούθησαν είναι η NASA.

Οι υψηλές τιμές τους ήταν ο σημαντικότερος λόγος που δεν υπήρχε μεγαλύτερη αποδοχή από την αγορά. Ενδεικτικά η τιμή των φωτοβολταϊκών ξεκινάει από τα 500\$ ανά εγκατεστημένο Watt το 1956, ενώ μετά από 14 χρόνια , το 1970 αγγίζει τα 100\$/Watt. Το 1973 οι βελτιώσεις στις μεθόδους παραγωγής φέρνουν το κόστος των φωτοβολταϊκών στα 50\$/Watt.

Η πρώτη εγκατάσταση PV που φτάνει στα επίπεδα του 1MW γίνεται στην Καλιφόρνια το 1980 από την ARCO Solar χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα και σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ηλίου 2 αξόνων.

Η εξέλιξη αρχίζει πλέον να γίνεται με ταχύτερους ρυθμούς. Το 1983 η παγκόσμια παραγωγή φτάνει τα 22MW και ο συνολικός τζίρος τα 250.000.000\$.

Σήμερα σε οικονομίες μεγάλης κλίμακας έχουν επιτευχθεί μεγάλες αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν ήδη επενδύσει τεράστια κονδύλια με σκοπό την ευρύτερη εκμετάλλευση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Ήδη βέβαια οι χώρες αυτές έχουν αρχίσει και απολαμβάνουν τους καρπούς της εξελιγμένης τεχνογνωσίας τους.

Τίποτα από αυτά δεν θα γινόταν πραγματικότητα εάν δεν είχε επικυρωθεί το πρωτόκολλο του Κιότο και άλλες διεθνείς συμφωνίες που ακολούθησαν κάτω από την πίεση των περιβαλλοντικών προβλημάτων.

Η ουσιαστική ώθηση για τα φωτοβολταϊκά όπως και για τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δόθηκε μέσα από κυβερνητικά προγράμματα με την μορφή επιδοτήσεων των δραστηριοτήτων παραγωγής ενέργειας (κυρίως ηλεκτρικής) με την χρήση "πράσινων" τεχνολογιών (ΑΠΕ). Η περισσότερο γνωστή από αυτές είναι η ευνοϊκή τιμολόγηση της ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γνωστή και ως feed - in - tariff.

Η Ελλάδα έχει υιοθετήσει και αυτή με την σειρά της κίνητρα για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα οποία μάλιστα ήταν ιδιαίτερα ελκυστικά για τους υποψήφιους επενδυτές.

Σήμερα οι εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες πυριτίου είναι οι εξής:

1) *Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου ( SingleCrystalline Silicon, m-Si)*



Εικόνα 3.6

Οι μονοκρυσταλλικές κυψέλες κατασκευάζονται τεμαχίζοντας έναν ενιαίο κρύσταλλο, (πάχος κυψέλης 1/3 έως 1/2 του χιλιοστού), από ένα μεγάλο

πλίνθωμα ενιαίου κρυστάλλου που έχει επεξεργαστεί σε θερμοκρασίες περίπου 1400°C, κάτι που είναι μια πολύ ακριβή διαδικασία. Το πυρίτιο πρέπει να είναι πολύ υψηλής καθαρότητας και να έχει τέλεια δομή κρυστάλλου. Αυτού του είδους τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν και την μεγαλύτερη απόδοση, δηλαδή μετατρέπουν μεγαλύτερο ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η απόδοση τους κυμαίνεται γύρω στο 15%-18%, δηλαδή αν η ηλιακή ακτινοβολία είναι 700 Wh/μ<sup>2</sup> την ημέρα τότε αυτά θα παράγουν για την συγκεκριμένη μέρα 120 Wh/μ<sup>2</sup> με 160 Wh/μ<sup>2</sup>. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, είναι της SunPower με απόδοση πλαισίου 18,5%. Είναι μάλιστα το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.

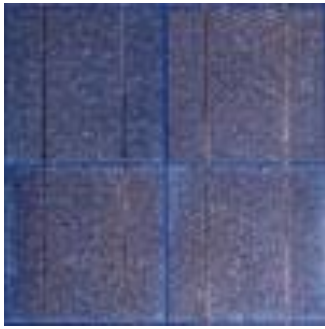
2) Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, p-Si)



Εικόνα 3.7

Οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες γίνονται με μια διαδικασία χύτευσης στην οποία το λειωμένο βιομηχανικό πυρίτιο χύνεται σε μια φόρμα όπου και μορφοποιείται. Κατόπιν τεμαχίζεται στις γκοφρέτες. Δεδομένου ότι οι πολυκρυσταλλικές κυψέλες γίνονται από χύτευση είναι σημαντικά φτηνότερη η παραγωγή τους, αλλά όχι τόσο αποδοτικές όσο και οι μονοκρυσταλλικές. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

### 3) Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (*Ribbon Silicon*)



Εικόνα 3.8

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Αναπτύσσεται από την Evergreen Solar. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

### 4) Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (*Amorphous ή Thin Film Silicon a-Si*)



Εικόνα 3.9

Το άμορφο πυρίτιο, μια από τις τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης (*thin film technology*), γίνεται με την εναπόθεση του πυριτίου επάνω σε ένα υπόστρωμα γυαλιού από ένα αντιδραστικό αέριο όπως το σιλάνιο ( $\text{SiH}_4$ ). Δεν έχει κρυσταλλική δομή, και το πάχος του (2-3  $\mu\text{m}$ ) είναι ιδιαίτερα μικρότερο από το κρυσταλλικής μορφής πυρίτιο (200-500  $\mu\text{m}$ ). Από κατασκευαστική άποψη είναι το απλούστερο και επομένως το πιο φθηνό, αλλά η απόδοσή του είναι συγκριτικά μικρότερη. Τα ηλιακά στοιχεία άμορφου πυριτίου έχουν μια κοκκινωπή-καφέ απόχρωση, σχεδόν μαύρη, και επιφάνεια αποτελούμενη από στενές, μεγάλου μήκους λωρίδες. Η αποδοτικότητα των φωτοβολταϊκών άμορφου πυριτίου κυμαίνεται μεταξύ 6% και 8%, ανάλογα με την τεχνολογία

και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών.

5) Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός ( $CuInSe_2$  ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)



**Εικόνα 3.10**

Ο Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.

### 6) Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)



**Εικόνα 3.11**

Το Τελουριούχο κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%.

Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe είναι η First Solar. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό (BIPV Building Integrated Photovoltaic).

### 7) Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs).



**Εικόνα 3.12**

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσενικό δεν είναι σπάνιο αλλά έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV που είναι



ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.

### *7) Υβριδικά Φωτοβολταϊκά Στοιχεία*

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών - HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer). Τα πιο γνωστά εμπορικά υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.

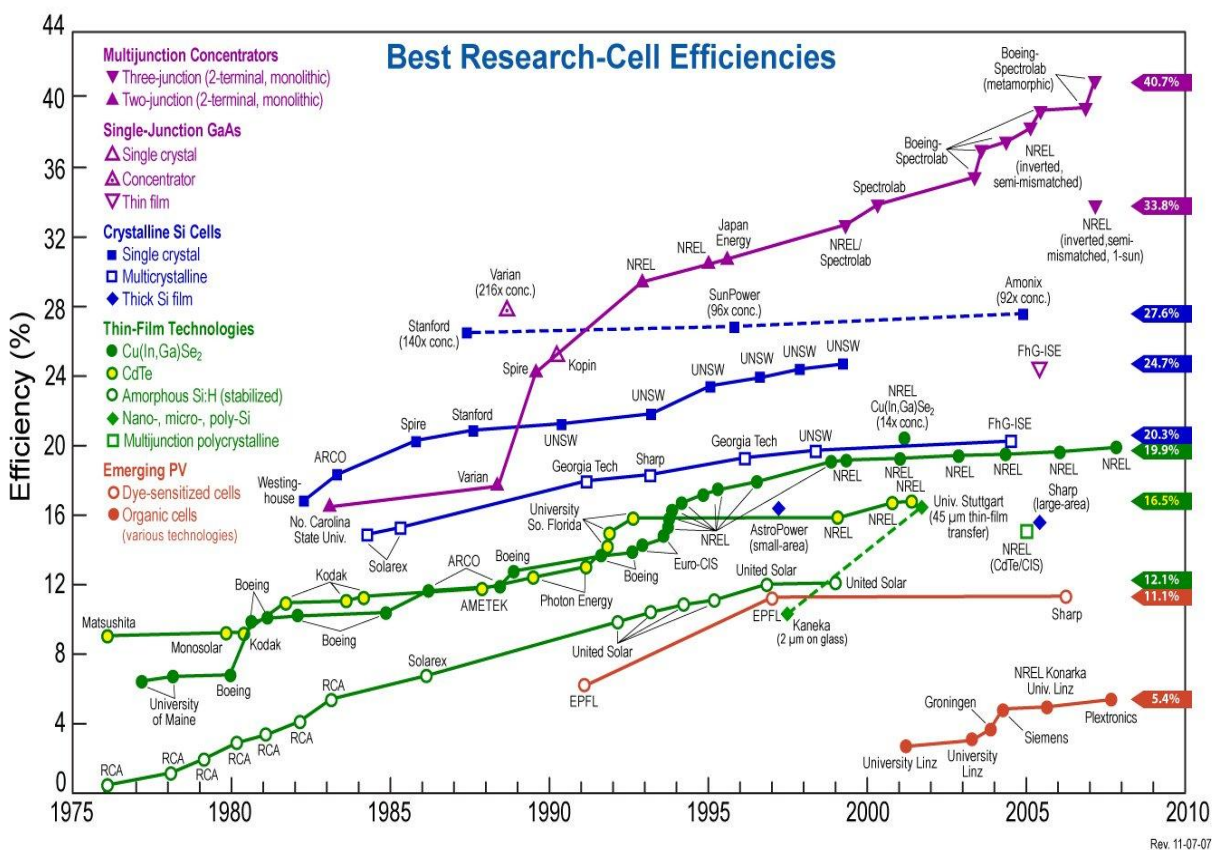
Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα υβριδικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το υβριδικό φωτοβολταϊκό είναι ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Εκτός από τους παραπάνω τρεις τύπους φωτοβολταϊκών κυψελών από πυρίτιο που διατίθενται στην παγκόσμια αγορά, γίνονται έρευνες και προσπάθειες για τη χρησιμοποίηση και άλλων στοιχείων (είτε μόνα τους ή σε συνδυασμό) όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs), θειούχο κάδμιο (CdS), φωσφορούχο ίνδιο (InP). Επίσης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πολύ λεπτής μεμβράνης από χαλκό-ίνδιο-γάλλιο-diselenide, που έχουν μεγαλύτερη απόδοση (8-13%) από αυτή του άμορφου πυριτίου. Τέλος, μια τελείως νέα τεχνολογία αποτελεί το πρωτοποριακό προϊόν spherical solar, που βασίζεται σε υλικό που άρχισε να κατασκευάζεται το 2004. Αντίθετα με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, το νέο υλικό δεν επικάθεται σε άκαμπτη βάση πυριτίου, αλλά είναι φτιαγμένο από χιλιάδες πάμφθινα σφαιρίδια πυριτίου (κατασκευάζονται από υπολείμματα πυριτίου που προκύπτουν από τη βιομηχανία των chips των ηλεκτρονικών υπολογιστών), εγκλωβισμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα αλουμινίου. Κάθε σφαιρίδιο λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο, απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα αλουμινίου



προσδίδουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, του επιτρέπουν να είναι εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο ηλεκτρικής επαφής. Η γεμάτη φυσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια επιτρέπει πολύ μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακού φωτός, χαρίζοντας στο υλικό αποδοτικότητα της τάξης του 11%. Οι εφευρέτες του υποστηρίζουν ότι μπορεί να καλύψει οποιουδήποτε σχήματος επιφάνειες, αυξάνοντας κατά πολύ τους χώρους όπου μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και δίνοντας στους αρχιτέκτονες τη δυνατότητα να σχεδιάσουν κτίρια με καμπύλες που θα μπορούν να είναι εξοπλισμένα με φωτοβολταϊκά χωρίς μάλιστα να απαιτούνται ενισχυμένες κατασκευές για την στήριξή τους.

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα νέο φωτοβολταϊκό στοιχείο, από ερευνητές του MIT το οποίο απορροφά φως υπέρυθρων συχνοτήτων και το μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Το νέο είδος φωτοβολταϊκών με βάση το άνθρακα, έρχεται να αλλάξει τα δεδομένα, ενώ ένας μελλοντικός συνδυασμός άνθρακα και πυριτίου ίσως να είναι σε θέση να εκμεταλλεύεται το μέγιστο δυνατό κομμάτι της ηλιακής ακτινοβολίας. Αποτελείται από δύο εξωτικές μορφές του άνθρακα.



Σχήμα 3.7 Απόδοση φωτοβολταϊκών κατά την διάρκεια των ετών

Ένα χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται από την θερμοκρασία που αναπτύσσονται κατά την διάθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Η επιρροή αυτή διαφέρει με τον τύπο του

φωτοβολταϊκού. Σε γενικές γραμμές η αποδοτικότητα μεταβάλλεται σε σχέση με την θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού όπως στο παρακάτω σχήμα.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέγιστη απόδοση των φωτοβολταϊκών μπορεί να φθάσει το 18-23%. Μπορούν να χρησιμοποιούν όχι μόνο την άμεση συνιστώσα του ηλιακού φωτός, αλλά και την έμμεση (διάχυτο φως). Όσο μεγαλύτερη η ένταση της φωτεινής δέσμης που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια μετατροπής τόσο μεγαλύτερο και το ποσοστό της ωφέλιμης ενέργειας που παράγεται από το  $\Phi/B$ .

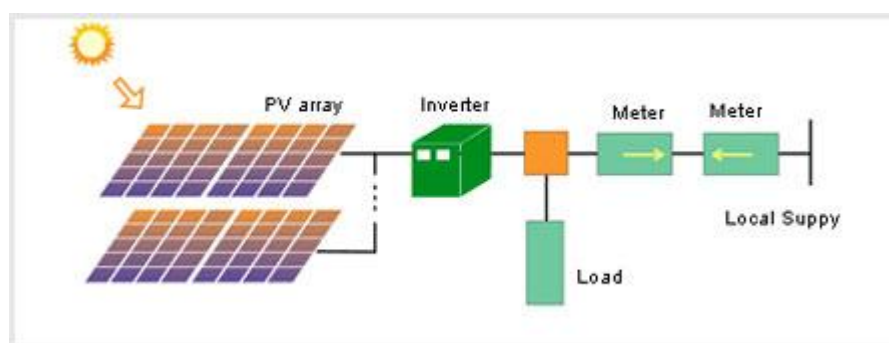
### 3.4 Διασυνδεδεμένα Συστήματα

#### 3.4.1 Φωτοβολταϊκά Πάρκα

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα ή φωτοβολταϊκά πάρκα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό το γεγονός ότι υπάρχει φυσική ένωση με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (για την Ελλάδα με την ΔΕΗ (ΔΕΣΜΗΕ)). Η σχέση μιας εγκατεστημένης μονάδας με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι αμφίδρομη. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να απορροφά ενέργεια αλλά και να διαχέει ενέργεια προς το δίκτυο.

Οι επενδύσεις σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωστά και ως φωτοβολταϊκά πάρκα έχουν τραβήξει την προσοχή χιλιάδων επενδυτών. Οι επενδύσεις αυτές είναι επιλέξιμες από τον Αναπτυξιακό Νόμο ενώ επίσης η ΔΕΗ είναι υποχρεωμένη να αγοράζει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τέτοιου είδους εγκαταστάσεις σε ιδιαίτερα ελκυστική τιμή σύμφωνα με τον νόμο 3486/2006.

Ένα διασυνδεδεμένο σύστημα είναι σε μόνιμη σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ με σκοπό να διοχετεύει την ενέργεια που παράγει στο σύστημα. Δεν υπάρχουν αποθηκευτικοί μηχανισμοί και μια τέτοια εγκατάσταση πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο που να αποδίδει την μέγιστη ετήσια ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 3.13

Όταν μια εγκατάσταση έχει ως αποκλειστικό στόχο την έγχυση ενέργειας προς το δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις στόχος είναι η μέγιστη ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η πώληση της σε κάποιον προμηθευτή (καταναλωτή). Τέτοιου είδους μονάδες ονομάζονται και Φ/Β σταθμοί. Η ισχύς σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να είναι από μερικά KW έως και αρκετά MW. Στην Ελλάδα η συνηθέστερη επένδυση σε αυτά τα επίπεδα είναι αυτή των 100KW (γιατί συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της υψηλής επιδότησης της KWh και της ευκολότερης αδειοδότησης του φωτοβολταϊκού σταθμού).

Κατηγοριοποίηση διασυνδεδεμένων συστημάτων με κριτήριο τα συστήματα στήριξης

- Στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικλινή στέγη.
- Στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου.
- Στήριξη με σύστημα ηλιοστατών στο έδαφος (πολύ σπάνια σε οροφές αν επαρκούν τα κριτήρια στατικότητας)

Πώληση/αγορά ενέργειας προς/από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Όταν μια εγκατάσταση χρησιμοποιεί το δίκτυο ως εναλλακτική πηγή τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας σε περίπτωση που η παραγωγή του τοπικού φωτοβολταϊκού σταθμού δεν επαρκεί κάποιες ώρες της ημέρας (ή γενικότερα δεν επαρκεί) για να τροφοδοτήσει την ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης.

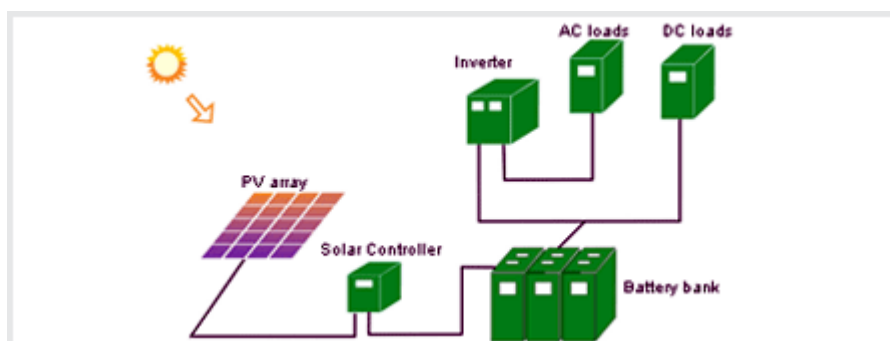
Στις πιο πάνω περιπτώσεις η εγκατάσταση μπορεί να απορροφά ενέργεια από το δίκτυο για να πληρώσει τις ενεργειακές τις ανάγκες. Επίσης μπορεί να συμβαίνει και το αντίστροφο. Δηλαδή όταν η ενέργεια που παράγεται από την μονάδα είναι περισσότερη από αυτήν που καταναλώνεται, η περίσσεια της ενέργειας μπορεί να διοχετεύεται (πωλείται) στο δίκτυο. Ένα τέτοιο σύστημα θα πρέπει να διαθέτει δύο μετρητικά συστήματα, το ένα από τα οποία θα μετρά την εξερχόμενη ενέργεια και το άλλο την εισερχόμενη. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται και grid interactive.

#### *Χρήση του ηλεκτρικού δικτύου ως BACK-UP*

Όταν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποκλειστικό στόχο την απορρόφηση ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο γιατί η ποσότητα ενέργειας που παράγει εξ ορισμού δεν καλύπτει τις ενεργειακές τις ανάγκες. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται και grid back up. Ουσιαστικά σε αυτήν την περίπτωση ο σχεδιασμός του συστήματος γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι το σύνολο της ενέργειας που παράγεται θα απορροφάται από τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της εγκατάστασης.

### 3.4.2 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Σε ένα απομακρυσμένο από το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο σύστημα οι ενεργειακές ανάγκες μιας εγκατάστασης μπορούν να τροφοδοτούνται από ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα. Παρόλα αυτά θα μπορούσαμε να διακρίνουμε και μια ακόμη κατηγορία τα υβριδικά συστήματα στα οποία συνεισφέρουν ενέργεια, τα φωτοβολταϊκά και άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας όπως η αιολική ή κάποια γεννήτρια πετρελαίου.



Εικόνα 3.14

Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά από φωτοβολταϊκές γεννήτριες. Επιπρόσθετα, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που έχουν κάποια αποθηκευτική διάταξη ενέργειας (συνήθως μπαταρίες) και σε αυτά που είναι άμεσα συνδεδεμένα μόνο με τα φορτία που τροφοδοτούν χωρίς αποθηκευτική διάταξη (παράδειγμα: εξοχικό σπίτι με μια μικρή dc αντλία νερού συνδεδεμένη απ' ευθείας με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ).

Τα βασικά μέρη ενός αυτόνομου συστήματος είναι:

- i. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ
- ii. οι συσσωρευτές
- iii. ο ρυθμιστής φόρτισης
- iv. ο αντιστροφέας dc/ac (για τις καταναλώσεις των 230Volt)
- v. ασφάλειες
- vi. διακόπτες dc .όργανα μέτρησης χωρητικότητας
- vii. συσσωρευτών

Το κύκλωμα dc συνήθως έχει τάση λειτουργίας 12,24 ή 48 volt.

### 3.4.3 Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα

- Συνήθως ένα τέτοιο σύστημα επιβάλλεται από το κόστος. Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να τροφοδοτήσουν οποιαδήποτε εγκατάσταση (όπως

ένα εξοχικό σπίτι) αλλά το κόστος μπορεί να είναι μεγάλο. Για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά μπορούν να συνδυαστούν και με άλλες πηγές ενέργειας.

Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές με καλό αιολικό δυναμικό και μάλιστα συνήθως όταν υπάρχει συννεφιά ο αέρας είναι ισχυρότερος. Έτσι μπορεί μια ανεμογεννήτρια και μια φωτοβολταϊκή συστοιχία να αλληλοσυμπληρώνονται σε μια εγκατάσταση.

Σε αυτήν την περίπτωση οι δύο πηγές ενέργειας τροφοδοτούν τις συστοιχίες των συσσωρευτών μέσω ρυθμιστών φόρτισης και από εκεί η ενέργεια διοχετεύεται στις καταναλώσεις της εγκατάστασης.

Γενικότερα οι τεχνολογίες που μπορεί να συμμετέχουν σε μια υβριδική εγκατάσταση είναι συνήθως οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες, οι ανεμογεννήτριες, και οι πετρελαιοκινητήρες Η/Ζ. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενεργειακές πηγές μπαίνουν παράλληλα στο τοπικό δίκτυο με σκοπό την αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή ενός τέτοιου συστήματος προέρχεται από έναν συγκερασμό μετεωρολογικών και οικονομοτεχνικών δεδομένων.

### 3.5 Σύνδεση στο δίκτυο διανομής

Η διαμόρφωση και η σύνθεση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης συναρτάται με το μέγεθος και τη θέση στην οποία εγκαθίσταται (ανεξάρτητη ή ενσωματωμένη σε κτίριο). Οποσδήποτε, δεδομένου ότι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει ΣΡ η σύνδεσή της στο δίκτυο γίνεται πάντοτε μέσω μετατροπέα DC/AC και κατάλληλων διατάξεων ζεύξεων και προστασίας, κατάλληλα ελεγχόμενων ώστε να επιτυγχάνονται οι λειτουργίες που περιγράφονται παρακάτω. Ειδικότερα, κατά γενικό κανόνα στις διατάξεις ελέγχου περιλαμβάνονται και αυτές με τις οποίες επιτυγχάνεται η λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο σημείο μέγιστης απόδοσής της ανάλογα με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.

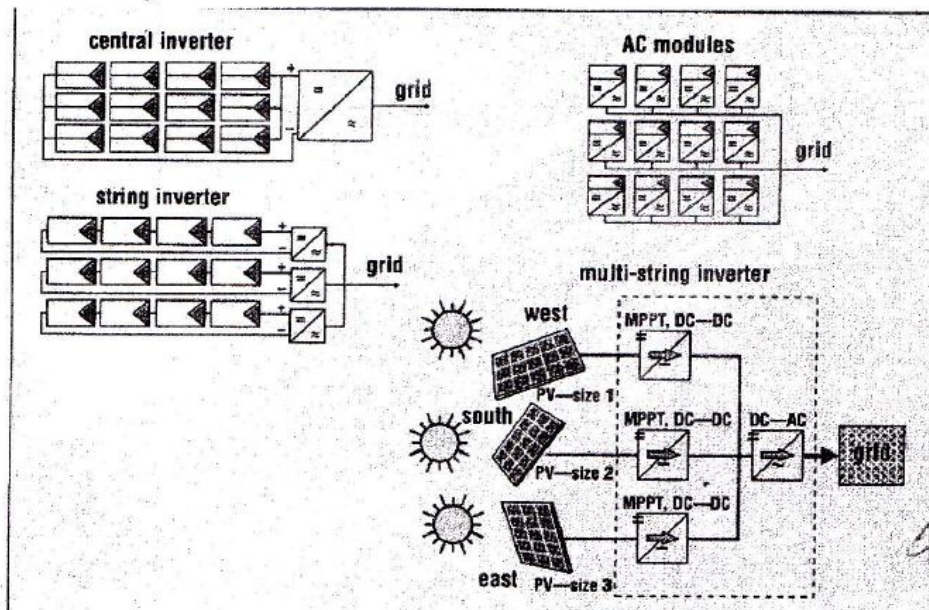
Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις διακρίνονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

A) τις μικρής ισχύος , 100MW έως 10kW που σχετίζονται κυρίως με την ηλεκτροδότηση μονοκατοικιών. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκαθίστανται συχνά στη στέγη ή και τις προσόψεις του κτηρίου.

B) Τις μέσης ισχύος ,10 kW έως 100 kW που σχετίζονται με την ηλεκτροδότηση συγκροτημάτων κατοικιών ή καταστημάτων και γραφείων, στις οποίες συχνά τα Φ/Β πλαίσια ενσωματώνονται και στην οικοδομή.

Γ) Τις μεγάλης ισχύος άνω των 100 kW μέχρι και μερικά MW οι οποίες αποτελούν κατά κανόνα ειδικές εγκαταστάσεις σε ιδιαίτερα διαμορφούμενες εκτάσεις.

Η όλη διαμόρφωση συναρτάται άμεσα με τον τύπο του αντιστροφέα DC/AC που χρησιμοποιείται. Στο σχήμα φαίνονται διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των αντιστροφέων:



Εικόνα 3.15

- Με κεντρικό αντιστροφέα που κυρίως εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος.
- Με αντιστροφείς κατά ομάδες από 1 έως 35 kW.
- Με αντιστροφείς ανά Φ/Β πλαίσιο οπότε εκμηδενίζονται οι καλωδιώσεις ΣΡ

Βασικό ρόλο στην επιλογή παίζει το κόστος των αντιστροφέων και η επιθυμητή αξιοπιστία στη λειτουργία της εγκατάστασης.

Στο σχήμα φαίνεται η βασική διάταξη των κυριότερων στοιχείων για τη σύνδεση φωτοβολταϊκής γεννήτριας στο δίκτυο. Αφορά κυρίως στις συνήθεις εγκαταστάσεις μικρής και μέσης ισχύος που συνδέονται στο δημόσιο δίκτυο ΧΤ. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων θα πρέπει αφενός να εξασφαλίζουν την ικανοποιητική λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας αφετέρου να ικανοποιούν τις απαιτήσεις που τίθενται από την πλευρά των Ηλεκτρικών Επιχειρήσεων ώστε να αποφεύγεται η πρόκληση ανωμαλιών στη λειτουργία του Δικτύου. Η κατασκευαστική διαμόρφωση των επί μέρους στοιχείων διαφέρει προφανώς ανάλογα με την ισχύ της εγκατάστασης την πρακτική κάθε χώρας ή και τον κατασκευαστή υπάρχει όμως ήδη η τάση για μια τυποποίηση των διατάξεων σύνδεσης σε διεθνές επίπεδο.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες από τις λειτουργικές απαιτήσεις που τίθενται στις ηλεκτρικές επιχειρήσεις αλλά και τους χρήστες για τη σύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών μικρής και μέσης ισχύος στα δίκτυα ΧΤ.

1) Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα πρέπει να μπορεί να παρέχει στο δίκτυο τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παραχθεί για δεδομένη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, όταν η τάση του δικτύου  $V_t$  κυμαίνεται εντός των επιτρεπτών



ορίων π.χ.  $\pm 10\%$  της ονομαστικής. Εάν ως συνήθως είναι επιθυμητό η ισχύς να παρέχεται στο δίκτυο με  $\cos\varphi=1$  περίπου, τότε η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά μέτρο και να προηγείται της τάσης του δικτύου, όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων γεννητριών. Η απαίτηση αυτή εξασφαλίζεται με κατάλληλο έλεγχο του αντιστροφέα.

2) Εάν η τάση του δικτύου διατηρείται εκτός των επιτρεπόμενων ορίων πάνω από ένα χρονικό διάστημα π.χ. άνω του  $\pm 15\%$  της ονομαστικής επί 1sec συνήθως η εγκατάσταση αποσυνδέεται από το δίκτυο για λόγους ασφαλείας. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη το ενδεχόμενο της ταχείας μεταφοράς της τάσης μετά από διακοπή ή και άλλες μη ομαλές συνθήκες. Τα αντίστοιχα ισχύουν σε περίπτωση που συμβεί απόκλιση της συχνότητας της τάσεως πέραν ορισμένου μεγέθους και χρόνου, π.χ. πέραν του  $\pm 1\%$  για περισσότερι από 1sec.

3) Όπως όλες οι συσκευές που περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά ισχύος δε θα πρέπει να εκπέμπουν αρμονικές και να δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές πέραν ορισμένων ορίων.

4) Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος είτε εντός της εγκαταστάσεως είτε στο δίκτυο θα πρέπει η  $\varphi/\beta$  γεννήτρια να αποσυνδέεται από το δίκτυο.

5) Σε περιπτώσεις απομόνωσης τμήματος του δικτύου χωρίς να έχει προηγηθεί βραχυκύκλωμα σε αυτό (π.χ. για την εκτέλεση εργασιών) υπάρχει το ακραίο αλλά πιθανό ενδεχόμενο να παραμείνει το τμήμα αυτό αυτό τροφοδοτούμενο μόνο από τις συνδεδεμένες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με τάση και συχνότητα εντός των ανεκτών ορίων (νησιδοποίηση). Επομένως και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να πραγματοποιείται απομόνωση της εγκατάστασης για λόγους ασφάλειας του προσωπικού. Η χειροκίνητη απομόνωση δεν είναι ευχερής όταν υπάρχουν πολλές εγκαταστάσεις.

## 4. Διανεμημένη & Διεσπαρμένη παραγωγή

### 4.1 Γενικά

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της εποχής μας που αφορά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας και παγκοσμίως είναι η διείσδυση διανεμημένης παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο με πηγές ενέργειας που ποικίλουν σε μέγεθος (από μερικά kW έως περίπου 10MW). Η διανεμημένη παραγωγή, οι διανεμημένες πηγές ενέργειας καθώς και η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχουν αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί κοντά στο σημείο χρήσης της.

Συμβατικά οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγάλες συγκεντρωμένες μονάδες. Τον προηγούμενο αιώνα η ενέργεια παραγόταν κυρίως σε μεγάλες μονάδες και μεταφερόταν στους καταναλωτές μέσω γραμμών μεταφοράς και δικτύων διανομής. Χαρακτηριστικό ενός συγκεντρωμένου συστήματος είναι ότι ένας μεγάλος αριθμός καταναλωτών μπορούν να εντοπιστούν σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται μια καινούρια τάση η οποία είναι η διανεμημένη παραγωγή. Αυτό σημαίνει ότι οι μονάδες μετατροπής ενέργειας τοποθετούνται εγγύτερα στους καταναλωτές και οι μεγάλες μονάδες αντικαθίστονται από μικρότερες. Η διανεμημένη θα μπορούσε να θεωρηθεί το αντίθετο της συγκεντρωμένης περιοχής.

Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε κεντρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (στην Ελλάδα οι μεγαλύτεροι βρίσκονται στη Μεγαλόπολη και στην Πτολεμαΐδα) οι οποίοι έχουν σχεδιασθεί να παράγουν ενέργεια με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Παρά την καθολική επιτυχία, η μέθοδος αυτή έχει κάποια μειονεκτήματα. Το παραδοσιακό σύστημα χρειάζεται εκτενές σύστημα διανομής και εξοπλισμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο χρησιμοποιεί 6-7% της συνολικής μεταδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Μόνο το 40% της θερμικής ενέργειας του ορυκτού καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το υπόλοιπο 60% διαχέεται ως θερμότητα. Ένα μεγάλο ποσοστό της εκλυόμενης ενέργειας είναι δυνητικά αξιοποιήσιμη αλλά λόγω της κεντρικής τοποθέτησης της παραγωγής δεν είναι πρακτικό.

Ο όρος διανεμημένη παραγωγή ή ΔΠ (distributed generation, DG), αναφέρεται στη χρήση γεννητριών μικρού και μεσαίου μεγέθους, οι οποίες είτε απευθύνονται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο διανομής μέσω ιδιωτικών προμηθευτών είτε κατευθείαν στον τελικό αποδέκτη. Στην τελευταία περίπτωση μιλάμε για διάσπαρτη παραγωγή (distributed generation), η οποία περιλαμβάνει γεννήτριες πολύ μικρού μεγέθους οι οποίες είναι ικανές να καλύψουν οικιακές ανάγκες ή πολύ μικρές επιχειρήσεις της τάξης των 10 ή 250kW.



## 4.2 Μορφές διεσπαρμένης παραγωγής

Οι διάφοροι τύποι τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:

### Μικροτουρμπίνες

Οι μικροτουρμπίνες είναι μικρές τουρμπίνες που παράγουν ισχύ μεταξύ 25 και 500kW. Οι μικροτουρμπίνες προήλθαν από τεχνολογίες που υπήρχαν σε μεγάλα φορτηγά ή στις τουρμπίνες των αεροσκαφών.

### Τουρμπίνες εσωτερικής καύσης

Οι παραδοσιακές τουρμπίνες παράγουν ισχύ μεταξύ 500kW και 25MW για διεσπαρμένη παραγωγή μέχρι και 250MW για κεντρική παραγωγή ισχύος. Χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο ή συνδυασμό καυσίμων. Οι σύγχρονες τουρμπίνες έχουν αποδόσεις που κυμαίνονται από 20 έως 45% στο πλήρες φορτίο.

### Μηχανές εσωτερικής καύσης

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης μετατρέπει την ενέργεια που περιέχεται σε κάποιο καύσιμο σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για την περιστροφή ενός άξονα μέσα στη μηχανή. Μια γεννήτρια συνδέεται με τη μηχανή εσωτερικής καύσης για τη μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι διαθέσιμες από μικρά μεγέθη μέχρι μεγάλες γεννήτριες. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν διαθέσιμα καύσιμα όπως βενζίνη, φυσικό αέριο και diesel.

### Μηχανές stirling

Οι μηχανές stirling έχουν κατηγοριοποιηθεί ως μηχανές εξωτερικής καύσης. Είναι σφραγισμένα συστήματα με αδρανές αέριο που θέτει σε λειτουργία τη μηχανή, συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Συνήθως είναι διαθέσιμες σε μικρά μεγέθη (1-25 kW) και προς το παρόν παράγονται σε μικρές ποσότητες για εξειδικευμένες εφαρμογές στη διαστημική και τη θαλάσσια βιομηχανία.

### Κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα, καθαρά και αποδοτικά τοπικά συστήματα παραγωγής που χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διεργασία για τη μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό. Επιπροσθέτως της παροχής ενέργειας μπορούν να προσφέρουν μια πηγή θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού ή για την ψύξη της απορρόφησης. Σε κάποιες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου μειώνουν το κόστος για τις υπηρεσίες ηλεκτρισμού 20 με 40%.

### Αποθήκευση ενέργειας/Συστήματα UPS

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας δεν παράγουν καθαρή ενέργεια αλλά μπορούν να προμηθεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μικρά χρονικά διαστήματα. Χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση πτώσεων τάσης, flicker και έντονης κυμάτωσης που συμβαίνουν όταν η εταιρεία παροχής ή οι πελάτες αλλάζουν προμηθευτές ή φορτία. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως

Συστήματα Αδιαλείπτου Τροφοδοσίας (UPS). Σαν τέτοια, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας θεωρούνται τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.

#### Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά κελιά (PV) μετατρέπουν απευθείας το φως του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεντρώνονται σε επίπεδα πάνελ τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε ταράτσες ή άλλες ηλιόλουστες περιοχές. Παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς να έχουν κινούμενα μέρη, λειτουργούν αθόρυβα και χωρίς εκπομπές.

#### Αιολικά συστήματα

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν τον άνεμο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια τουρμπίνα με πτερωτές τοποθετείται στην κορυφή ενός ψηλού πύργου. Ο πύργος είναι ψηλός για να μπορούμε να εκμεταλλευόμαστε τη μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου, απαλλαγμένη από τις αναταράξεις που προέρχονται από τη μεσολάβηση εμποδίων όπως δέντρα, λόφοι και κτίρια. Όπως περιστρέφεται η τουρμπίνα με τον άνεμο μια γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Μια ανεμογεννήτρια ποικίλει σε μέγεθος από λίγα kW σε οικιακές εφαρμογές έως πάνω από 5MW.

#### Υβριδικά συστήματα

Παραγωγοί και κατασκευαστές τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής αναζητούν τρόπους να συνδυάσουν τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις και την απόδοση του εξοπλισμού διεσπαρμένης παραγωγής.

Παραδείγματα υβριδικών συστημάτων είναι:

- Μηχανή Stirling συνδυασμένη σε ένα ηλιακό πιάτο
- Κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου συνδυασμένη με μια τουρμπίνα αερίου ή μικροτουρμπίνα.
- Ανεμογεννήτριες με μπαταρία αποθήκευσης και εφεδρικές γεννήτριες diesel.

### 4.3 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στη χρήση της διανεμημένης παραγωγής και ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα έχει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη χρήση της διανεμημένης παραγωγής μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η κατάλληλη τοποθέτηση στα κατά τόπους σημεία οδηγεί σε αποφυγή απωλειών μετάδοσης και διανομής.
- Η παραγωγή γειτονικά των φορτίων επιτρέπει την εύκολη χρήση της θερμικής ενέργειας (συνδυασμένη θερμότητα και ισχύς (CHP) ).

- Η κατάλληλη τοποθέτηση στα κατά τόπους σημεία επιτρέπει τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Για παράδειγμα απόβλητα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να ενισχύσουν τα ορυκτά καύσιμα.
- Η κατάλληλη τοποθέτηση στα κατά τόπους σημεία επιτρέπει τη χρήση της διαθέσιμης μονοφασικής ή τριφασικής παραγωγής.
- Τέλος όσον αφορά στην αειφόρο ανάπτυξη προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές για κάποιες τεχνολογίες όπως για παράδειγμα οι τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια και τον άνεμο και τις κυψέλες καυσίμου. Μειώνει τις αναβαθμίσεις των έργων υποδομής και επιτρέπει την οικονομικότερη διαχείριση ενέργειας και φορτίου.
- Σε οικονομικό επίπεδο οδηγεί σε μείωση του κόστους μειώνοντας τη ζήτηση αιχμής σε μια εγκατάσταση και συνεπώς μειώνει τις χρεώσεις ζήτησης ενώ, προφέρει πιο προβλέψιμο ενεργειακό κόστος (μικρότερο ρίσκο) εισάγοντας τις ΑΠΕ.
- Όσον αφορά στο λειτουργικό κομμάτι προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές ή όπου η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη.
- Ταυτόχρονα, προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής δεν είναι δυνατή. Τέτοιες περιοχές όπως πύργοι κεραιών, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου και επωφελούνται από τη διεσπαρμένη παραγωγή ως βασική πηγή ενέργειας.
- Παράλληλα, προσφέρει κάποια δευτερεύοντα οφέλη όπως σταθερότητα, διασφάλιση από απρόοπτα και δυνατότητα “black start”. Black start είναι η δυνατότητα μιας μονάδας παραγωγής κατά τη διάρκεια της αποκατάστασης του συστήματος να μεταβεί από απενεργοποιημένη κατάσταση σε κατάσταση λειτουργίας και να αρχίσει να παράγει ενέργεια χωρίς να υποβοηθηθεί από το ηλεκτρικό σύστημα.
- Σε επίπεδο κατεύθυνσης παραγωγής η διεσπαρμένη παραγωγή ανταποκρίνεται γρηγορότερα σε νέες απαιτήσεις ισχύος και οι αυξομειώσεις στην εγκατεστημένη ισχύ μπορούν να γίνουν με μικρές προσαυξήσεις σε πλήρη συμφωνία με τη ζήτηση σε αντίθεση με την κατασκευή μεγάλων, κεντρικών εργοστασίων ενέργειας κατασκευασμένων για την κάλυψη μελλοντικής κυρίως κι όχι τρέχουσας ζήτησης.
- Η διεσπαρμένη παραγωγή ενδυναμώνει την ενεργειακή ασφάλεια και την εφεδρική ενέργεια.

- Η λήψη άδειας για τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής είναι ταχύτερη συγκριτικά με την αναβάθμιση των γραμμών διανομής.

Ένα παράδειγμα χρήσης των κατά τόπους παραγωγών είναι η χρήση μεθανίου σε δημοτικές εγκαταστάσεις για τη συμπλήρωση του φυσικού αερίου. Τόσο το μεθάνιο όσο και το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα στη γεννήτρια ενός κινητήρα που μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να ενισχύσουμε το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας.

Μειονεκτήματα από τη χρήση της διανεμημένης παραγωγής είναι:

- Τα συμβατικά συστήματα διανομής χρειάζονται επαρκή προστασία προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις ανταλλαγές ενέργειας. Σημαντική επίδραση είναι η τροποποίηση των μηχανισμών προστασίας του δικτύου.
- Η ειδοποίηση για σύνδεση/αποσύνδεση πηγών μπορεί να γίνει εξαιρετικά πολύπλοκη.
- Οι διαδικασίες σύνδεσης καθώς και τα έσοδα που προκύπτουν είναι δύσκολο να καθοριστούν.
- Παρατηρούνται αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων καθώς και στην ποιότητα της παραγόμενης ισχύος.
- Παρατηρείται αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος.
- Διαπιστώνονται μεταβολές των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου και αλλαγή στο επίπεδο βραχυκύκλωσης.
- Η παραγωγή ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ροής ισχύος στα δίκτυα διανομής επηρεάζοντας ολόκληρη τη λειτουργία του συστήματος.

#### 4.4 Επιπτώσεις διεσπαρμένης παραγωγής

Η διεσπαρμένη παραγωγή έχει διάφορες επιπτώσεις στην παραγωγή ισχύος.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή από τις συγκεντρωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής στους πελάτες μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

Όπως προαναφέρθηκε παρατηρούνται μεταβολές τάσης και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές για τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά όρια. Κυρίως ρυθμίζεται ο λόγος μέσης/χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού ώστε να διατηρείται η τάση στα επιθυμητά όρια. Η αντίστροφη ροή ισχύος και η προκαλούμενη ανύψωση της τάσης μπορεί να περιοριστεί είτε αναστρέφοντας τη ροή άεργου ισχύος χρησιμοποιώντας ασύγχρονες γεννήτριες ή υποδιεγείροντας τις σύγχρονες γεννήτριες. Σε πολλά

δίκτυα χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές ελέγχου της τάσης μέσω ρύθμισης των λήψεων του αυτομετασχηματιστή σύμφωνα με την εκτίμηση της πτώσης τάσης από μετρήσεις ρεύματος.

Για την ποιότητα ισχύος λαμβάνονται υπόψη δύο παράγοντες: οι μεταβατικές διακυμάνσεις της τάσης και η παρουσία αρμονικών στο δίκτυο. Ένα σημαντικό ζήτημα για την ποιότητα ισχύος είναι οι βυθίσεις της τάσης που ορίζονται ως μειώσεις της τάσης -από 10% έως και το 90% της ονομαστικής τιμής - σε χρονικά διαστήματα μεταξύ μισού κύκλου μέχρι και αρκετών λεπτών. Παράλληλα, εάν κατά τη ζεύξη/απόζευξη των γεννητριών επιτρέπεται η ανταλλαγή μεγάλων ρευμάτων με το δίκτυο τότε μπορεί να εμφανιστούν μεταβατικές διαταραχές στην τάση του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να περιοριστούν με τη χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών διατάξεων και το σωστό συγχρονισμό των σύγχρονων γεννητριών κατά τη ζεύξη τους με το σύστημα.

Μερικές από τις σχετικές επιπτώσεις στη λειτουργία του συστήματος λόγω της ύπαρξης διεσπαρμένων γεννητριών στο δίκτυο είναι:

Η συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης θα μπορούσε να προκαλέσει την αποσύνδεση υγιών γραμμών στις οποίες συνδέονται διεσπαρμένες γεννήτριες λόγω της γρήγορης αντίδρασης των υπέργειων γραμμών μέσης τάσης σε σφάλματα του δικτύου. Σε μερικές περιπτώσεις στις οποίες οι διεσπαρμένες γεννήτριες παραμένουν συνδεδεμένες σε μια ελαττωματική γραμμή, θα μπορούσαν να διατηρήσουν τη γραμμή διεγερμένη και να αποτρέψουν την αυτοαπόσβεση σφαλμάτων με τη μορφή τόξου. Τέλος, μπορεί να γίνει αυτόματη επανάζευξη της γραμμής ενώ οι γεννήτριες έχουν χάσει το συγχρονισμό τους με το δίκτυο, με ενδεχόμενες καταστροφικές συνέπειες για τις γεννήτριες.

Φυσικά παρατηρούνται και μειονεκτήματα στη λειτουργία της διεσπαρμένης παραγωγής. Ένα από τα σημαντικότερα είναι το υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα, το σημαντικότερο είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος συγκριτικά με τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής. Όμως, διαφορές υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και μπορούν να ποικίλλουν από 1000€/kW έως 2000€/kW στις τουρμπίνες καύσης και στις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα.

Συχνά τίθενται ερωτήματα για το πώς θα γίνει η μετάβαση από το σήμερα στο αύριο. Δηλαδή, σε πιο σύγχρονες μορφές παραγωγής όπως η διεσπαρμένη παραγωγή. Είναι γνωστό ότι τα υπάρχοντα δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής που συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης τα οποία με τη σειρά τους συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης. Η διανομή και η μεταφορά ενέργειας γίνεται κατά κύριο λόγο μονοπωλιακά από δημόσιους φορείς ενώ αντίθετα στον τομέα παραγωγής είναι δυνατόν να υπάρχει μεγάλος ανταγωνισμός. Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται στα σημερινά δίκτυα από κεντρικές εγκαταστάσεις. Υπάρχει λίγο έως καθόλου συμμετοχή του καταναλωτή και

απουσιάζει εντελώς η επικοινωνία. Οι διασυνδέσεις αναπτύχθηκαν κυρίως για αμοιβαίες υποστηρίξεις μεταξύ χωρών και περιφερειών σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

Τα μελλοντικά δίκτυα διανομής θα έχουν ενεργητικό ρόλο και πρέπει να εξασφαλίζουν αμφίδρομη ροή ισχύος. Τα ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν πλέον σε ένα πλαίσιο μοντέλου αγοράς στο οποίο οι μονάδες παραγωγής διανέμονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε αγοράς και το κέντρο ελέγχου του δικτύου αναλαμβάνει ένα γενικό ρόλο εποπτείας. Μια μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται από μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ΑΠΕ. Παράλληλα, είναι δυνατό να χρειασθεί η ύπαρξη εφεδρείας σε περίπτωση ελλιπούς παραγωγής από ΑΠΕ. Αυτό φυσικά προϋποθέτει πολλές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα διανομής και μεταφοράς αφού πολλές διασυνδέσεις και η καλή επικοινωνία είναι απαραίτητη.

Μια σύγχρονη μορφή διεσπαρμένης παραγωγής είναι το μικροδίκτυο. Πρόκειται για τη διασύνδεση μικρών μονάδων παραγωγής σε συστήματα διανομής χαμηλής τάσης και αποτελούν ένα νέο τύπο συστήματος ισχύος. Τα μικροδίκτυα μπορούν να συνδέονται στο κύριο δίκτυο ισχύος ή μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα. Πρόκειται για μια ιδέα που βασίζεται στην ύπαρξη ενός συνόλου ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων τοποθετημένων μαζί με πηγές ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας μικρής κλίμακας. Οι πηγές ισχύος ποικίλλουν. Συμπεριλαμβάνονται ΑΠΕ όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες αλλά και γεννήτριες που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Το μικροδίκτυο διασυνδέεται με τον τοπικό πάροχο ηλεκτρισμού έτσι ώστε να μοιάζει με ένα καλά συμπεριφερόμενο φορτίο ή γεννήτρια.

Μέσω των μικροδικτύων η συνολική απόδοση της ενέργειας αυξάνεται με τις εφαρμογές συμπαραγωγής, που αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των μικροδικτύων. Έτσι, ενώ μέχρι τη δημιουργία των μικροδικτύων είχαμε μεγάλη κεντρική παραγωγή ισχύος και τοπική παραγωγή θερμότητας, με τη δημιουργία των μικροδικτύων τόσο η παραγωγή ισχύος όσο και η θερμότητα γίνεται τοπικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κατανάλωση της ενέργειας που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα να μειώνεται κατά το 1/3. Πραγματοποιείται ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, παρατηρούνται βελτιωμένες περιβαλλοντικές επιδράσεις και αυξημένη αξιοπιστία και προσαρμοστικότητα του συστήματος ενέργειας. Ακόμη δημιουργούνται οφέλη για το δίκτυο όπως δυνατότητα τοπικής παραγωγής ελέγχου τάσης και συχνότητας. Ένα πιλοτικό μικροδίκτυο υπάρχει στην Κύθνο.

Μια ακόμη μορφή διεσπαρμένης παραγωγής είναι τα έξυπνα-δίκτυα. Στόχος των έξυπνων δικτύων είναι η αειφόρος ανάπτυξη με τη δημιουργία ενός αποδοτικού δικτύου διανομής δίνοντας έμφαση στις ΑΠΕ και στη διεσπαρμένη παραγωγή. Έτσι θα διευκολυνθεί η διασύνδεση περιοχών που διαθέτουν διαφορετικές μεν συμπληρωματικές δε ΑΠΕ. Τα έξυπνα δίκτυα είναι ηλεκτρικά δίκτυα που μπορούν να ενσωματώσουν ευφυώς τη συμπεριφορά και τις δράσεις

των όλων των χρηστών (παραγωγών και καταναλωτών) με σκοπό να διασφαλιστεί αποτελεσματικά η σταθερότητα, η οικονομία και η ασφάλεια της παροχής ηλεκτρική ενέργειας. Περιλαμβάνουν συνδυασμό λογισμικού και υλικού και επιτρέπουν αποτελεσματικότερη ροή ισχύος ενώ δίνει τη δυνατότητα στους καταναλωτές να ελέγχουν τη ζήτηση ενέργειας.

## 5. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ DIgSILENT

### PowerFactory

#### 5.1 Εισαγωγή

Το μέγεθος καθώς και η πολυπλοκότητα των σημερινών δικτύων διανομής καθιστά ολοένα και πιο δύσκολη τη μελέτη τους καθώς υπάρχει πληθώρα περιορισμών –οικονομικοί, περιβαλλοντικοί, ασφαλείας - . Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πρόγραμμα PowerFactory. Είναι ένα πρόγραμμα της εταιρείας DIgSILENT GmbH το οποίο χρησιμοποιείται για βιομηχανικά, εμπορικά και δημόσια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδιάστηκε ως ένα προηγμένο ολοκληρωμένο και διαδραστικό πακέτο λογισμικού το οποίο προορίζεται για την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και ελέγχου προκειμένου να επιτευχθούν οι βασικοί στόχοι σχεδιασμού και βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους.

Το όνομα DIgSILENT προέρχεται από τις λέξεις DIgital SImuLation and Electrical NeTwork calculation program και είναι το πρώτο πρόγραμμα λογισμικού ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον διασύνδεσης γραμμής.

Πρόκειται για ένα πρόγραμμα φιλικό προς το χρήστη. Μπορούν με ευκολία να πραγματοποιηθούν αναλύσεις ροών φορτίου ή βραχυκυκλώσεως χωρίς να πρέπει να ελέγχουν τους περίπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς.

Η ακρίβεια και η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που έχουν συμπεριληφθεί στο πρόγραμμα έχουν επιβεβαιωθεί από ένα μεγάλο αριθμό εκτελέσεων από οργανισμούς που συμμετέχουν στο σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπαραστάθηκαν γραφικά οι γραμμές μεταφοράς των δικτύων διανομής της Ικαρίας και της Κατερίνης και στη συνέχεια πραγματοποιώντας ανάλυση ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton – Raphson εξετάστηκαν τα κριτήρια ορθής λειτουργίας του συστήματος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και εκτείνονται πέρα από την ανάλυση ροών φορτίου.

#### 5.2 Δομή και Λειτουργία

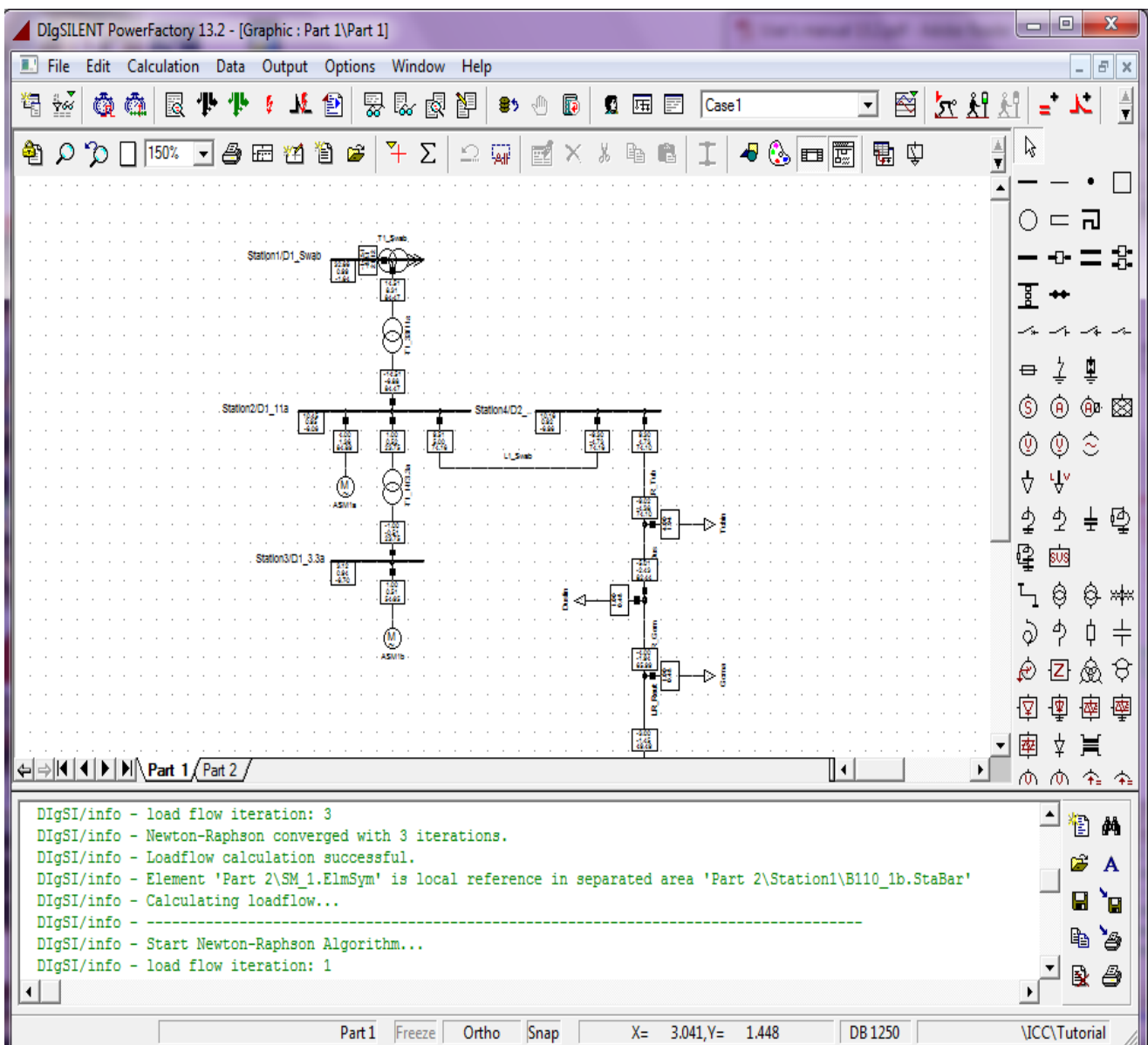
Το PowerFactory χρησιμοποιεί μόνο μία βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τον εξοπλισμό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (δεδομένα γραμμών, γεννητριών, προστασίας, αρμονικών και ελέγχου). Είναι εύκολο στη χρήση του και μπορεί εύκολα να εκτελέσει όλες τις διαθέσιμες ενέργειες που περιλαμβάνει. Κάποιες από αυτές τις ενέργειες



είναι η ροή φορτίου, η ανάλυση βραχυκυκλώσεως, ο συντονισμός της προστασίας και ο υπολογισμός της ευστάθειας.

Το PowerFactory πρόκειται να χρησιμοποιηθεί καθώς και να λειτουργεί σε γραφικό περιβάλλον. Η καταχώρηση δεδομένων επιτυγχάνεται με τη χάραξη του υπό μελέτη δικτύου και στη συνέχεια με την επεξεργασία των στοιχείων στην περιοχή σχεδίασης.

Η εικόνα δείχνει το περιβάλλον του PowerFactory όταν ένα project είναι ενεργό. Φαίνεται το παράθυρο σχεδίασης (επάνω) και το παράθυρο δεδομένων εξόδου (κάτω).



Εικόνα 5.1

Στα δεξιά φαίνονται τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα στο χρήστη για την υλοποίηση του δικτύου (γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές, μηχανές, υποσταθμοί). Ο χρήστης επιλέγει το στοιχείο που επιθυμεί και το τοποθετεί στην περιοχή σχεδίασης συνδέοντάς το κατάλληλα. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί, μετασχηματιστές και φορτία. Ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ δε σχεδιάζεται, αλλά ο ζυγός Μέσης Τάσης του υποσταθμού ορίζεται ως ο ζυγός αναφοράς του δικτύου (slack bus), με τάση 1p.u. και γωνία  $\theta = 0^\circ$ . Τα φωτοβολταϊκά αντιμετωπίζονται ως παραγωγή στους ζυγούς ( $Q=0$ ,  $\cos\varphi=1$ ). Τα φωτοβολταϊκά μπορούν με μικρό σφάλμα να θεωρήσουμε ότι έχουν μηδενική άεργο ισχύ και συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα.

Το παράθυρο εξόδου επιτρέπει την επικοινωνία του προγράμματος με το χρήστη. Υπάρχουν τρία είδη μηνυμάτων που μπορούν να εμφανιστούν στο παράθυρο εξόδου: προειδοποίησης, σφάλματος και μηνύματα που απλά πληροφορούν το χρήστη για διάφορες ενέργειες του προγράμματος ή για αποτελέσματα που προκύπτουν. Όσον αφορά τα σφάλματα αυτά δίνονται και ως ενεργοί σύνδεσμοι εάν πρόκειται για λανθασμένη παραμετροποίηση στοιχείων. Ο χρήστης μπορεί να μεταβεί με διπλό κλικ απευθείας στο ελαττωματικό στοιχείο. Με πράσινο χρώμα εμφανίζονται οι έγκυρες ενέργειες στις οποίες υποβάλλεται το πρόγραμμα. Οι ενέργειες αυτές μπορεί να είναι για παράδειγμα η ροή φορτίου, η ανάλυση αρμονικών ή η ανάλυση βραχυκύκλωσης.

Η απεικόνιση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο πρόγραμμα είναι μονογραμμική. Ο χρήστης μπορεί μέσω της επεξεργασίας δεδομένων να ορίσει αν το σύστημα θα είναι μονογραμμικό ή τριφασικό ωστόσο ο τρόπος που απεικονίζεται είναι μονογραμμικός.

Ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει τα στοιχεία του δικτύου κάνοντας διπλό κλικ στο στοιχείο που τον ενδιαφέρει στο παράθυρο σχεδίασης. Για παράδειγμα στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς το παράθυρο εισαγωγής στοιχείων που ανοίγει είναι το παρακάτω:

Line - Part1\Line(6).ElmLine

RMS-Simulation | EMT-Simulation | Harmonics | Optimization | State Estimator | Reliability | Description

Basic Data | Load Flow | VDE/IEC Short-Circuit | Full Short-Circuit | ANSI Short-Circuit

Name: Line(6)

Type: Library\ACSR 95

Terminal i: Part1\N4\Cub\_2 N4

Terminal j: Part1\Station5\Cub\_0.0 KT-D11-2

Zone: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters

Length of Line: 0.11 km

Derating Factor: 1.

Type of Line: Overhead Line

Resulting Values

Rated Current	1.34 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0.04369382 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	57.23011 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0.02365 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0.03674 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0.03993 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0.17116 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0.00257591 A
Earth Factor, Magnitude	1.032963
Earth Factor, Angle	25.86427 deg

Line Model

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Routes/Cubicles/Sections

OK

Cancel

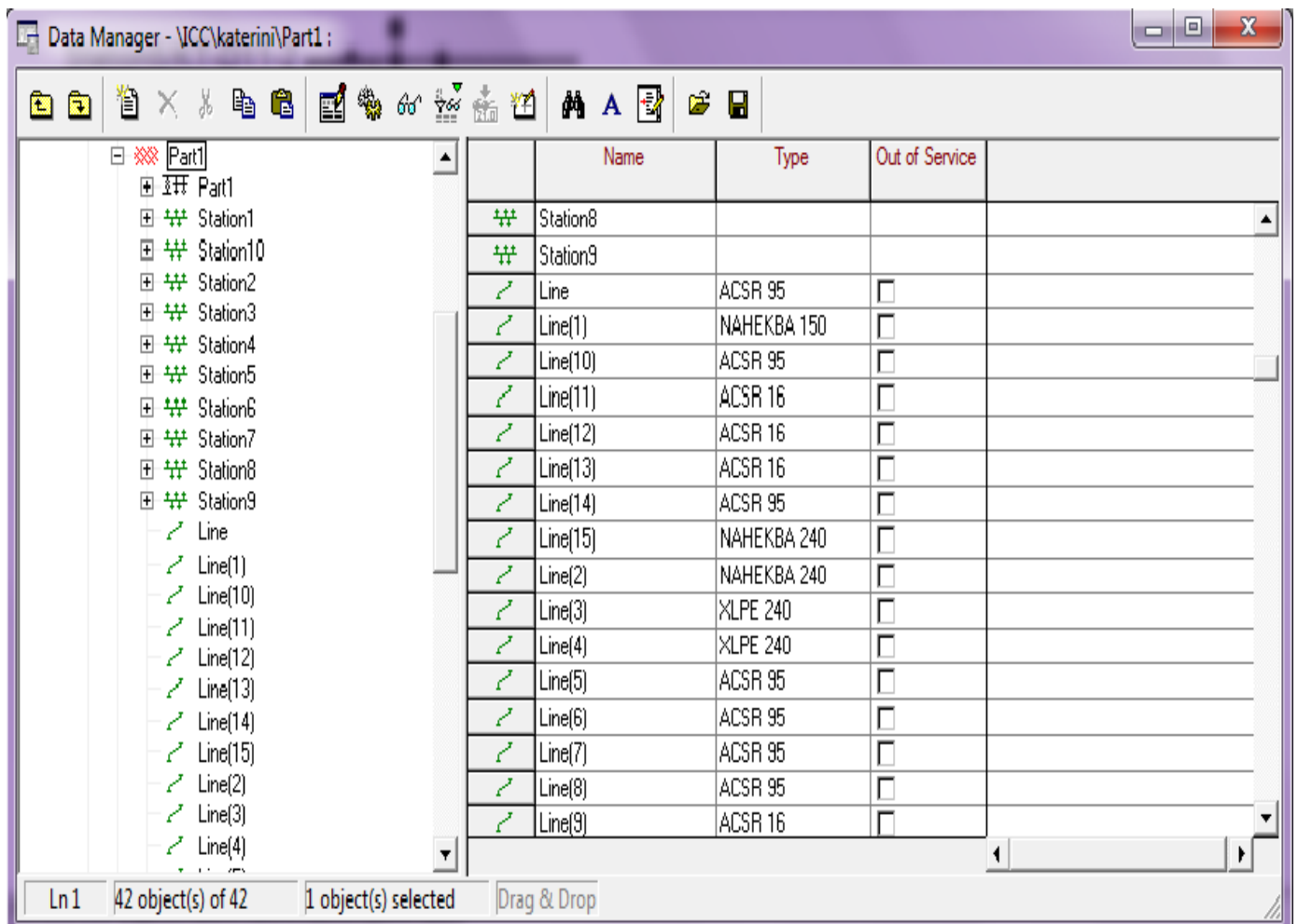
Figure >>

Jump to ...

Εικόνα 5.2

Ένας μεγάλος αριθμός τυποποιημένων στοιχείων είναι αποθηκευμένα στις γενικές βιβλιοθήκες του συστήματος. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε ρελέ, ασφάλειες, IEC καλώδια (110kV – 6kV), μετασχηματιστές (50-60Hz), κινητήρες. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα στο χειριστή του προγράμματος να παραμετροποιήσει τα στοιχεία όπως αυτός επιθυμεί. Τα στοιχεία αυτά αποθηκεύονται σε τοπικές βιβλιοθήκες του προγράμματος προκειμένου να μπορούν εύκολα να επιλεγθούν εκ νέου.

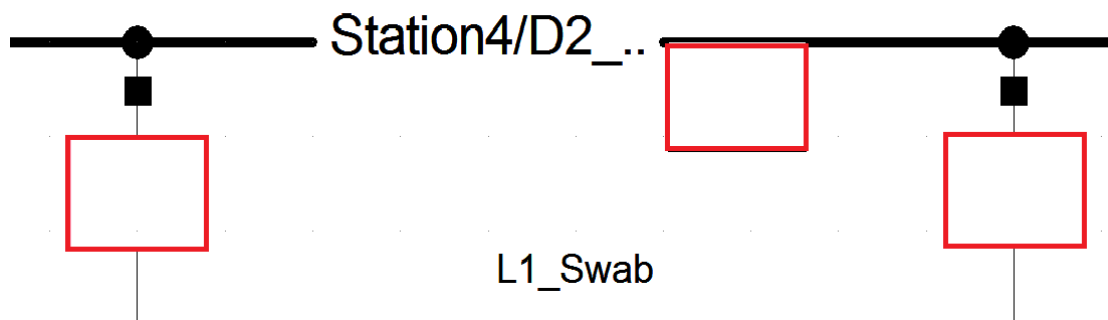
Όλα τα δεδομένα που εισάγονται δομούνται σε φακέλους προκειμένου να είναι εύκολη η πλοήγηση σε αυτά. Για να δει κανείς αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιεί τον “Data Manager” ο οποίος φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.3

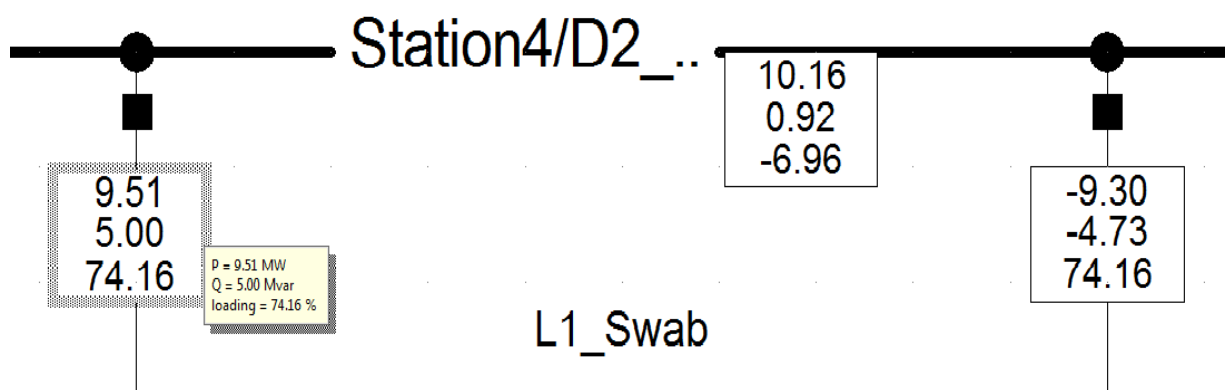
Με την αποθήκευση του δικτύου δημιουργούνται το αρχείο .dz. Στο αρχείο αυτό αποθηκεύονται όλα τα στοιχεία του δικτύου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις διάφορες ενέργειες που υποβάλλει στο πρόγραμμα ο χρήστης εμφανίζονται στο παράθυρο σχεδίασης. Τοποθετώντας οποιοδήποτε στοιχείο στην επιφάνεια σχεδίασης εμφανίζεται στην άκρη του και το παράθυρο αποτελεσμάτων. Το κουτί αποτελεσμάτων είναι μια μικρή αναφορά αποτελεσμάτων. Από προεπιλογή, στα κουτιά αποτελεσμάτων η ροή ισχύος που ρέει προς τα στοιχεία είναι θετική ενώ η ροή ισχύος που ρέει έξω από τα στοιχεία είναι αρνητική. Τα αποτελέσματα μέσω στα κουτιά αποτελεσμάτων μπορούν να αλλάξουν από το χρήστη. Παρακάτω φαίνονται μαρκαρισμένα με κόκκινα χρώμα τα κουτιά αποτελεσμάτων σε μια γραμμή μεταφοράς και έναν υποσταθμό.



Εικόνα 5.4

Ενώ εδώ φαίνονται τα κουτιά αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα ροής φορτίου σε ένα δίκτυο:

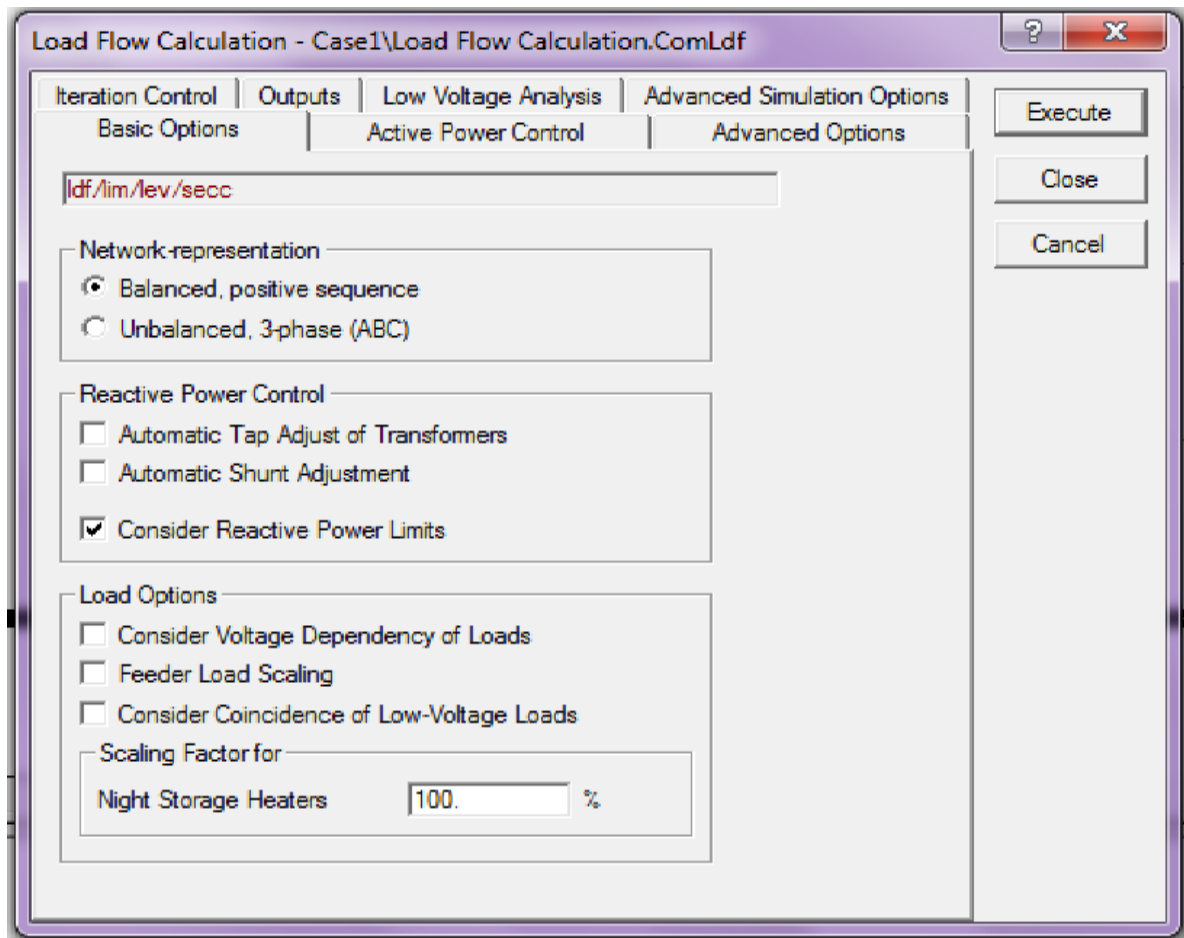


Εικόνα 5.5

Παρατηρείται ότι στο ένα άκρο της γραμμής φαίνεται η ροή ισχύος που ρέει προς τη γραμμή ενώ στο άλλο ακριβώς με αρνητικό πρόσημο φαίνεται η ροή ισχύος που βγαίνει από τη γραμμή μεταφοράς. Παράλληλα, φαίνεται και η τάση σε kV, ρυ καθώς και η γωνία σε deg στον υποσταθμό.

#### 5.2.1 Εκτέλεση ανάλυση ροής φορτίου με τη βοήθεια του PowerFactory.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση ροής φορτίου. Πιο αναλυτικά επιλέγοντας την εκτέλεση: “Load Flow Calculation” είναι διαθέσιμες στο χρήστη οι παρακάτω επιλογές:



Εικόνα 5.6.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 6 είναι δυνατή η εκτέλεση ροής φορτίου στη μια φάση, θετικής ακολουθίας αναπαράστασης του δικτύου σε συμμετρικά δίκτυα. Μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί ροή φορτίου σε πολυφασικά δίκτυα που παρουσιάζουν ασυμμετρίες.

Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του tap changer των μετασχηματιστών. Επιλέγοντας “Consider Reactive Power Limits” σε περίπτωση παραβίασης της ονομαστικής ισχύος των γεννητριών θα τυπώνονται μηνύματα προειδοποίησης από το πρόγραμμα.

Ακόμη ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποια μέθοδος ροής φορτίου επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Μπορεί να διαλέξει ανάμεσα στη Newton – Raphson (εξισώσεις ισχύος, εξισώσεις ρευμάτων) και στη μέθοδο μη γραμμικών εξισώσεων. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα επιλογής του αριθμού των επαναλήψεων που θα χρησιμοποιηθούν (συνήθως 25 επαναλήψεις) καθώς και το όριο των επαναλήψεων προκειμένου να υπολογιστεί η Ιακωβιανή μήτρα. Τέλος, με την επιλογή “consider protection devices” δίνεται η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς οι χρόνοι ενεργοποίησης των ασφαλειοαποζευκτών και των ασφαλειών που χρησιμοποιούνται.

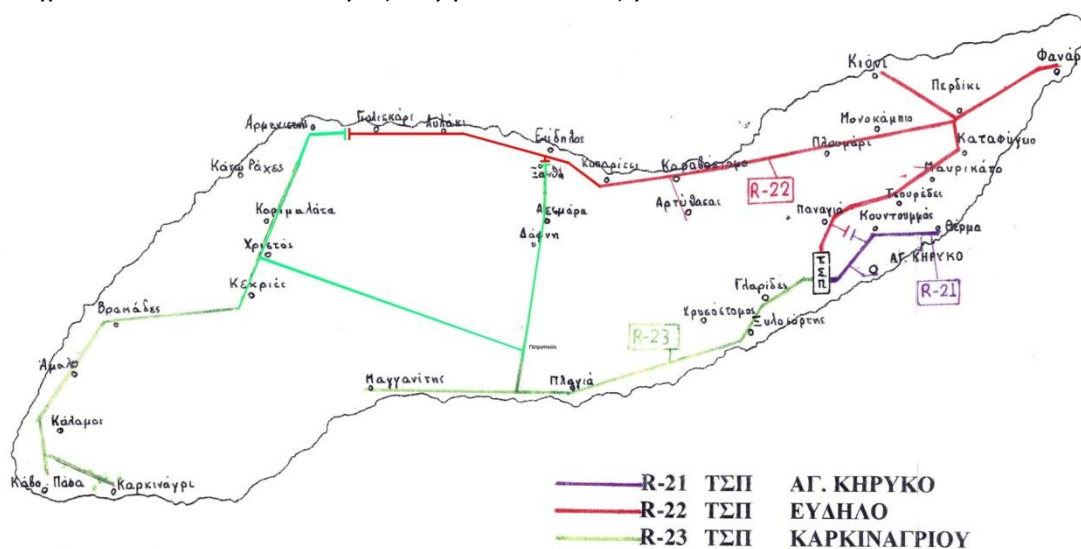
Οι δυνατότητες του προγράμματος –εάν και είναι εκτός του αντικειμένου μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας – εκτείνονται και πέρα από την ανάλυση ροής φορτίου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης ανάλυσης βραχυκύκλωσης, ανάλυσης αρμονικών, δημιουργίας συσκευών προστασίας, ανάλυση ευστάθειας και ανάλυση αξιοπιστίας. Τέλος, το PowerFactory δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με matlab Simulink σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να υλοποιήσει πολύ δύσκολες συναρτήσεις μεταφοράς.

## 6. ΔΙΚΤΥΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

### 6.1 Δίκτυο Α

Το πρώτο δίκτυο που εξετάζεται είναι μια *αγροτική γραμμή διανομής* ονομαστικής τάσης 15kV, η οποία διαθέτει 57 υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ κι έχει συνολικό μήκος 50km. Η εγκατεστημένη ισχύς του κάθε υποσταθμού φαίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα (Π2). Η γραμμή είναι η μια από τις 3 γραμμές του δικτύου της Ικαρίας. Επιλέχθηκε διότι είναι μια γραμμή μεγάλου μήκους. Η αιχμή της ζήτησης της γραμμής είναι 2,39MW κι εμφανίζεται στις 12/8 και ώρα 9μ.μ, ενώ η ελάχιστη ζήτηση είναι 0,46MW κι εμφανίζεται στις 25/2 κι ώρα 4π.μ. Η συνολική ετήσια ζήτηση της ανέρχεται στις 9.220MWh. Η προς μελέτη γραμμή είναι η R22 του ακόλουθου σχήματος. Το αναλυτικό διάγραμμα της γραμμής σημειώνεται στο Παράρτημα (Π2). Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου που εξυπηρετεί ο κάθε υποσταθμός λαμβάνεται ίσος με 0.8.



Εικόνα 6.1

Ο κορμός της γραμμής αποτελείται από τους παρακάτω τύπους αγωγών, για καθέναν από τους οποίους φαίνεται η αντίσταση/αντίδραση ανά μονάδα μήκους και το θερμικό όριο ισχύος του:

Τύπος γραμμής	R ( $\Omega/km$ )	X ( $\Omega/km$ )	$R_0$ ( $\Omega/km$ )	$X_0$ ( $\Omega/km$ )	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
AAAC-70	0,562	0,370	0,710	1,592	6,2
ACSR-35	0,576	0,397	0,724	1,595	5,8
ACSR-95	0,215	0,334	0,363	1,556	11,6

Πίνακας 6.1: Τύποι και χαρακτηριστικά αγωγών που αποτελούν τον κορμό της γραμμής



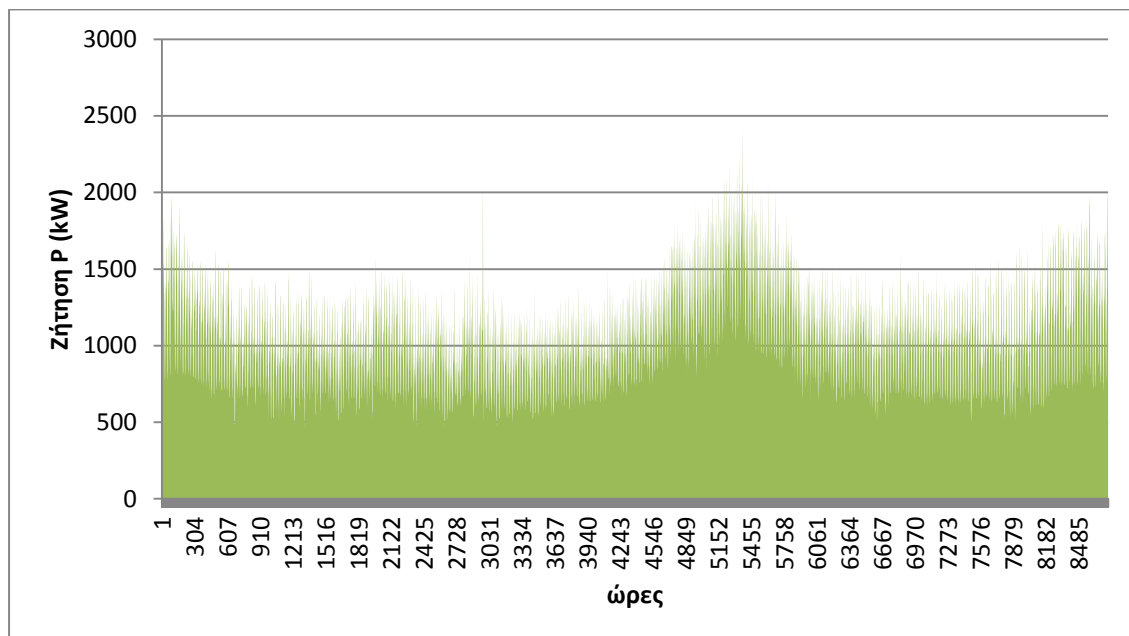
Οι διακλαδώσεις αποτελούνται από τους παρακάτω τύπους αγωγών:

Τύπος γραμμής	R ( $\Omega/\text{km}$ )	X ( $\Omega/\text{km}$ )	$R_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
ACSR-16	1,268	0,422	1,416	1,620	3,5
CU-16	1,274	0,417	1,422	1,639	3
CU-35	0,596	0,393	0,744	1,615	4,8
AAAC-35	1,071	0,393	1,219	1,616	4,2
AAAC-185	0,204	0,337	0,352	1,559	12

Πίνακας 6.2: Τύποι και χαρακτηριστικά αγωγών που αποτελούν τις διακλαδώσεις της γραμμής

Στο δίκτυο συνδέθηκαν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Συνδέθηκαν κατά μήκος της γραμμής φωτοβολταϊκά πάνελ. Για τη σύνδεση των πάνελ χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο συνδέθηκαν φωτοβολταϊκά πάνελ συμμετρικά σε όλο το μήκος της γραμμής. Και στη συνέχεια συνδέθηκαν συμμετρικά (αρχή, μέση, τέλος της γραμμής) μέχρις ότου σταματήσουν να ικανοποιούνται τα κριτήρια ομαλής λειτουργίας των δικτύων διανομής.

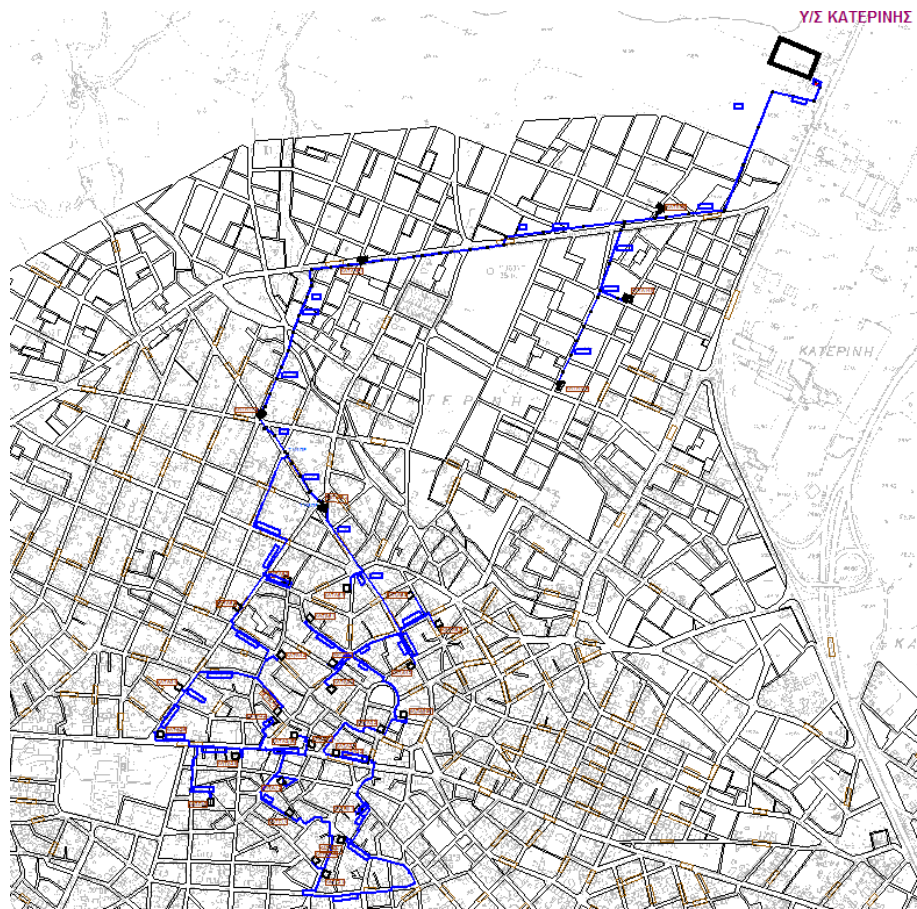
Η ετήσια καμπύλη φορτίου για το σύνολο της γραμμής είναι:



Διάγραμμα 6.1

## 6.2 Δίκτυο Β

Το δεύτερο δίκτυο που εξετάζεται είναι μια *διασυνδεδεμένη αστική γραμμή διανομής* μέσης τάσης (20kV), η οποία περιλαμβάνει 35 Υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ με εγκατεστημένη ισχύ για τον καθένα που φαίνεται στο Παράρτημα (Π2). Η γραμμή αποτελεί τμήμα του δικτύου της Κατερίνης και σχεδιάζεται στο ακόλουθο σχήμα με μπλε χρώμα. Το αναλυτικό της διάγραμμα βρίσκεται στο Παράρτημα (Π2).

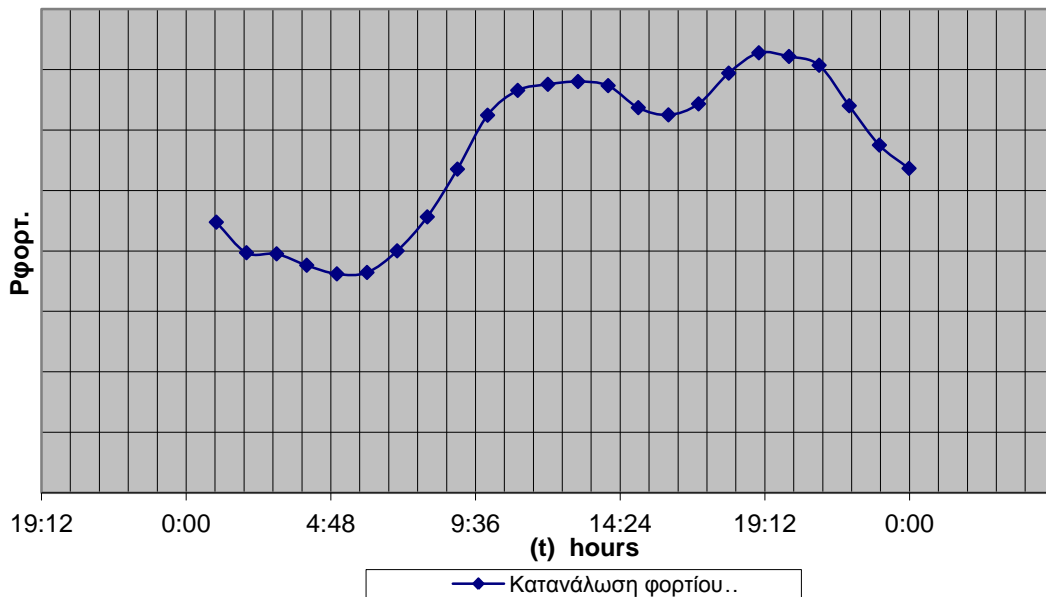


Εικόνα 6.2: Διάγραμμα αστικής γραμμής διανομής, μέρους του δικτύου της Κατερίνης

Η μέγιστη ζήτηση φορτίου είναι ίση με 11.17MVA και παρατηρείται το καλοκαίρι κατά τις μεσημεριανές ώρες, ενώ η ελάχιστη ζήτηση είναι 4.65MVA και παρατηρείται το χειμώνα κατά τις πρώτες πρωινές ώρες. Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου που εξυπηρετεί ο κάθε υποσταθμός λαμβάνεται ίσος με 0.8. Και στο δίκτυο αυτό συνδέθηκαν φωτοβολταϊκά με τον ίδιο τρόπο.

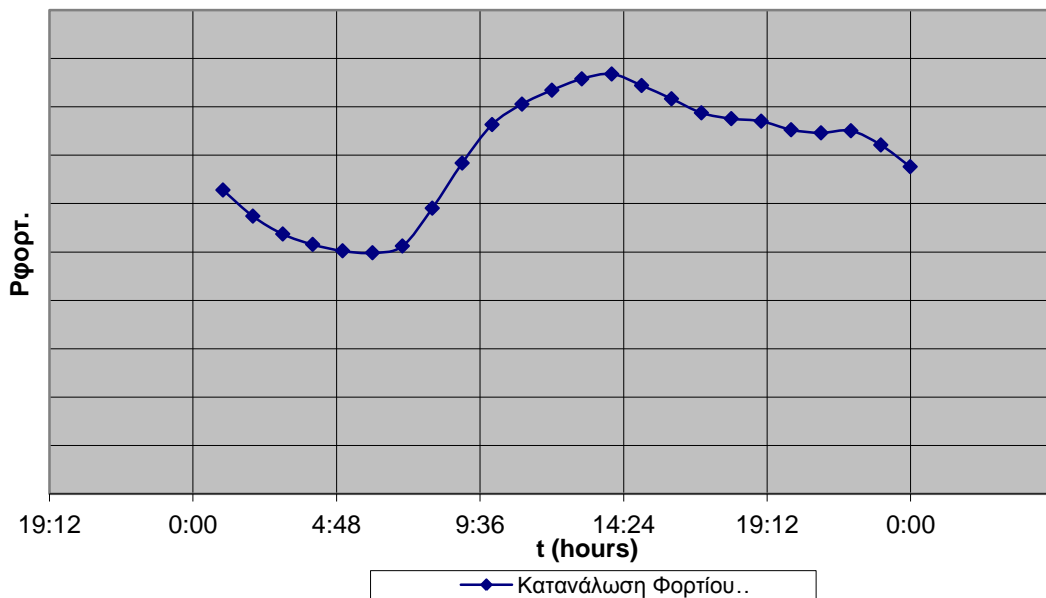
Η προσεγγιστική μορφή των καμπυλών ζήτησης φορτίου για τη χειμερινή και την καλοκαιρινή ημέρα που εξετάζονται φαίνεται στη συνέχεια:

Χειμώνας:



Διάγραμμα 6.2: Χειμερινή καμπύλη ζήτησης φορτίου (ποιοτική) για κάθε ζυγό της διασυνδεδεμένης γραμμής διανομής

Καλοκαίρι:



Διάγραμμα 6.3: Θερινή καμπύλη ζήτησης φορτίου (ποιοτική) για κάθε ζυγό της διασυνδεδεμένης γραμμής διανομής

Η αιχμή της καλοκαιρινής μέρας είναι μεγαλύτερη από αυτή της χειμερινής. Ειδικότερα, η αιχμή το καλοκαίρι είναι 8.67MW στις 2μ.μ. και το χειμώνα είναι 7.2MW στις 7μ.μ.

Το δίκτυο διανομής που εξετάζεται περιλαμβάνει 5 διαφορετικούς τύπους γραμμών διανομής, που φαίνονται στη συνέχεια μαζί με τα χαρακτηριστικά τους:

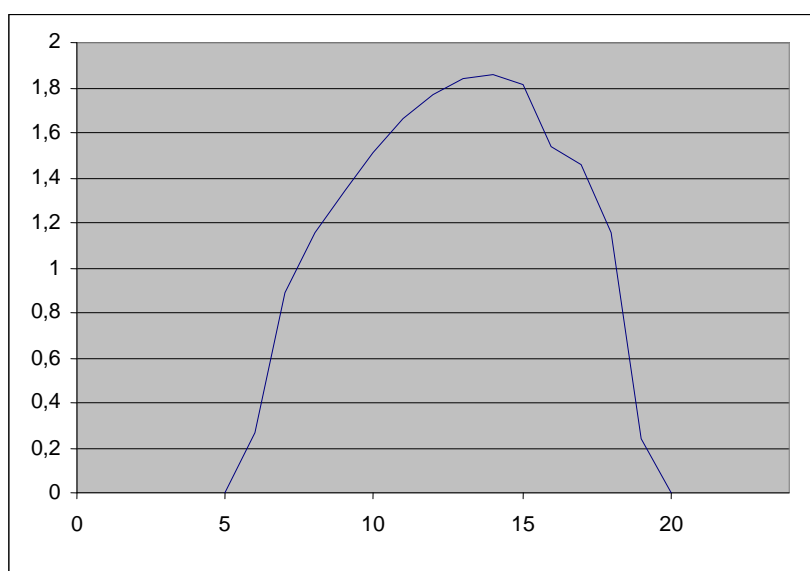
Τύπος γραμμής	R ( $\Omega/km$ )	X ( $\Omega/km$ )	$R_0$ ( $\Omega/km$ )	$X_0$ ( $\Omega/km$ )	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
ACSR-95	0,215	0,334	0,363	1,556	15,5
ACSR-16	1,268	0,422	1,416	1,620	4
ΝΑΗΕΚΒΑ-240	0,15	0,108	1,083	0,585	15
ΝΑΗΕΚΒΑ-150	0,245	0,116	1,117	0,616	15
XLPE-240	0,162	0,115	1,092	0,800	10

Πίνακας 6.2: Τύποι και χαρακτηριστικά αγωγών που αποτελούν τη γραμμή διανομής

Η γραμμή τύπου ACSR-95 χρησιμοποιείται για τον κύριο κορμό του δικτύου, δηλαδή μεταξύ των υποσταθμών (MV)-(N1)-(N2)-(KT-A15-1)-(KT-D11-2)-(N4)-(KT-D8-1). Η γραμμή ACSR-16 χρησιμοποιείται για τις διακλαδώσεις χαμηλής ισχύος και ειδικότερα στις διαδρομές (N2)-(N3)-(KT-A12-6), (N3)-(KT-A14-9) και (N1)-(KT-0180). Οι υπόλοιπες γραμμές χρησιμοποιούνται στη διαδρομή από το N4 και κάτω.

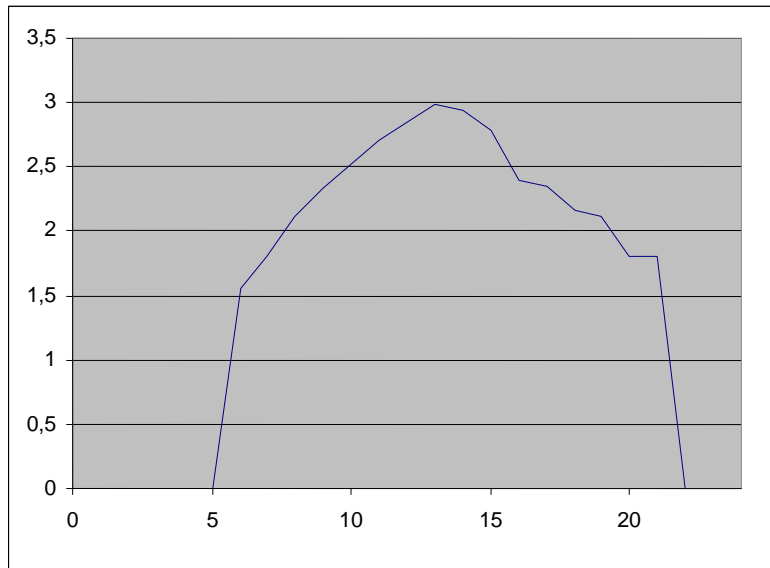
Ο αρχικός ζυγός με την ονομασία MV αποτελεί το ζυγό Μέσης Τάσης, ο οποίος αποτελεί το ζυγό αναφοράς (slack bus) με την τάση του να κρατείται σταθέρη στο 1p.u. (δηλ. στα 20kV).

Χειμώνας:



Διάγραμμα 6.4: Χειμερινή καμπύλη εξόδου φωτοβολταϊκών (για 5kW εγκατ. ισχύ)

### Καλοκαίρι:



*Διάγραμμα 6.5: Θερινή καμπύλη εξόδου φωτοβολταϊκών (για 5kW εγκατεστημένη ισχύ)*

Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι ώρες της ημέρας και στον κατακόρυφο η ισχύς εξόδου σε kW.

## 7. Αύξηση της Διείσδυσης ΑΠΕ στα Δίκτυα Διανομής

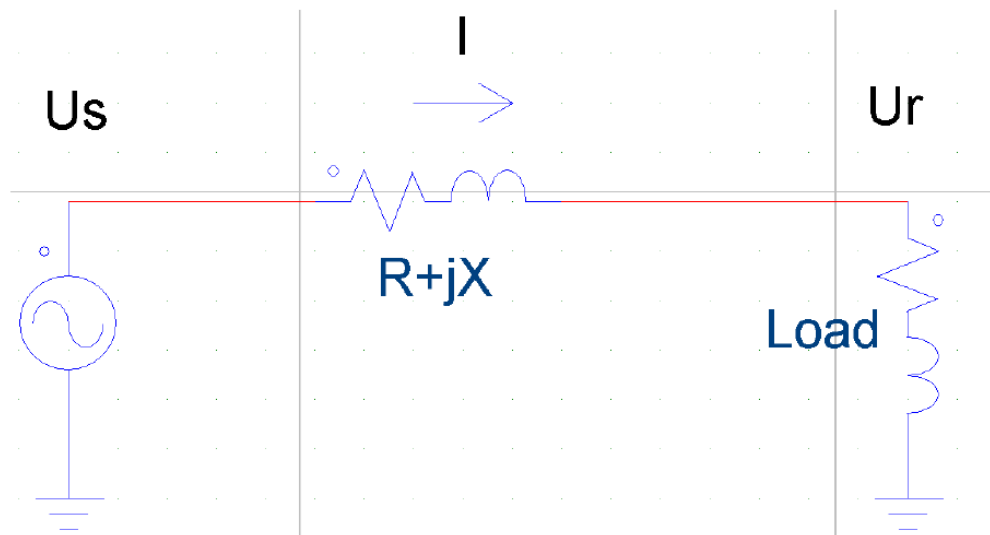
### 7.1 Εισαγωγή

Χρησιμοποιώντας τα δίκτυα διανομής που αναφέρθηκαν παραπάνω εξετάζεται κατά πόσο είναι εφικτή η διείσδυση των φωτοβολταϊκών σε αυτά. Όπως είναι γνωστό ένα από τα βασικότερα προβλήματα που προκύπτουν από τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο είναι η ανύψωση τάσης που προκύπτει από την έγχυση ισχύος στο δίκτυο. Αυτή η ανύψωση παρατηρείται γενικά σε κάθε σημείο του δικτύου που υπάρχει παραγωγή ισχύος.

Αυτό αποδεικνύεται μαθηματικά ως εξής: Έστω το κύκλωμα του σχήματος. Η πτώση τάσης  $\Delta V = V_s - V_R$  με βάση τα στοιχεία του φορτίου ως:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

Στην περίπτωση που το φορτίο εγχύει ενεργό ισχύ στο δίκτυο, το ρεύμα έχει αντίθετη φορά, επομένως  $I < 0 \Rightarrow \Delta V < 0 \Rightarrow U_r > U_s$ . Δηλαδή υπάρχει ανύψωση τάσης.



Εικόνα 7.1

Το φαινόμενο αυτό καθώς και τις επιπτώσεις του στα δίκτυα μέσης τάσης ήταν το αντικείμενο μελέτης.

## 7.2 Περιγραφή προσομοίωσης

Αρχικά εκτελέστηκε ανάλυση ροής φορτίου στα δίκτυα έχοντας στους υποσταθμούς τη μέγιστη ζήτηση φορτίου που μπορεί να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια ενός έτους. Με τον τρόπο αυτό θέλαμε να παρατηρήσουμε τη μέγιστη πτώση τάσης που μπορεί να παρατηρηθεί στους υποσταθμούς. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε δύο σενάρια:

*A Σενάριο:* Η ζήτηση του φορτίου στους υποσταθμούς ισούται με την ελάχιστη ζήτηση φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους. Στη συνέχεια τοποθετήσαμε φωτοβολταϊκά στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να σηκώσει ο κάθε υποσταθμός. Επομένως, η ισχύς των φωτοβολταϊκών σε κάθε υποσταθμό ήταν ίση με την ισχύ του αντίστοιχου μετασχηματιστή προκειμένου να ισχύει:  $P_{pv} - P_{min_{load}} \leq P_{max_{MS}} \Rightarrow P_{pv} \leq P_{max_{MS}} + P_{min_{load}}$ . Δεν επιλέχθηκε τιμή ίση με  $P_{max_{MS}} + P_{min_{load}}$  για λόγους ασφαλείας του συστήματος. Λάβαμε υπόψη μας δηλαδή την περίπτωση που ένα φορτίο αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Άρα, είχαμε:  $P_{pv} = P_{max_{MS}}$ . Το αρχικό ποσοστό διείσδυσης ήταν 100%. Δηλαδή, τοποθετήσαμε ομοίομορφα σε κάθε υποσταθμό φωτοβολταϊκά.

*B Σενάριο:* Η ζήτηση του φορτίου στους υποσταθμούς διατηρήθηκε και πάλι ίση την ελάχιστη ζήτηση φορτίου κατά τη διάρκεια του έτους. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά στους υποσταθμούς που βρίσκονταν στην αρχή στη μέση και στο τέλος της γραμμής και πάλι με τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να σηκώσει ο κάθε υποσταθμός όπως ακριβώς και στο σενάριο 1. Στη συνέχεια αυξήσαμε σταδιακά το ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών τοποθετώντας φωτοβολταϊκά και στους υποσταθμούς που βρίσκονταν γύρω από τον κεντρικό υποσταθμό της γραμμής.

Ο τύπος υπολογισμού της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών είναι:

$$P = \frac{\sum P_{PV}}{\sum S_{ni}}$$

Αυτό που θέλαμε να διαπιστώσουμε είναι κατά πόσο τηρούνται τα κριτήρια ορθής λειτουργίας των δικτύων διανομής.

Τα κριτήρια τα οποία πρέπει να ικανοποιούνται στη μόνιμη κατάσταση προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία ενός δικτύου διανομής είναι τα εξής:

Κριτήρια ορθής λειτουργίας δικτύων διανομής

α) Η μέση τάση κάθε κόμβου,  $V_{med,j}$ , δεν πρέπει να αποκλίνει άνω του  $\pm 5\%$  από την ονομαστική:

$$0.95 * V_n \leq V_{med,j} = \frac{V_{min,j} + V_{max,j}}{2} \leq 1.05 * V_n$$

β) Η διασπορά  $\Delta V_j$ , περί τη μέση τιμή  $V_{med,j}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει το  $\pm 3\%$  της ονομαστικής τάσης:

$$\Delta V_j = \frac{V_{max,j} - V_{min,j}}{2} \leq 0.03 * V_n$$

γ) Η ροή ισχύος στις γραμμές πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων ισχύος που προβλέπονται από τον κατασκευαστή.

Ο συντελεστής ισχύος Φ/Β για διασυνδεδεμένο σύστημα ισούται με 1.

### 7.3 Εκτέλεση προσομοίωσης

## ***ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ***

### Δίκτυο χωρίς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Στην περίπτωση αυτή εκτελέστηκε ροή φορτίου έχοντας συνδεδεμένο στη γραμμή το μέγιστο φορτίο των ζυγών που μπορεί να παρατηρηθεί κατά τη διάρκεια ενός έτους. Θέλαμε να διαπιστώσουμε τη μέγιστη πτώση που μπορεί να παρατηρηθεί στους υποσταθμούς. Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και που μετρήθηκαν είναι οι τάσεις των ζυγών και το ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν τηρούνται τα θερμικά όρια των γραμμών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Ονομασία Υ/Σ</b>	<b>Τάση (kV)</b>	<b>Τάση (pu)</b>
KAT-0180	19,9752	0,9987
KAT-A12-6	19,9658	0,9982
KAT-A14-9	17,9658	0,9982
KAT-A15-1	19,9315	0,9965
KAT-Δ11-2	19,9157	0,9957
KAT-Δ8-1	19,8806	0,9940
KAT-Δ6-2	19,8486	0,9924
KAT-Δ6-3	19,8174	0,9908
KAT-Δ4-2	19,7817	0,9890
KAT-Δ3-2	19,7597	0,9879
KAT-Δ3-4	19,7157	0,9857
KAT-Δ2-5	19,6964	0,9848
KAT-Γ1-3	19,6567	0,9828
KAT-Δ2-3	19,6181	0,9809
KAT-Δ2-2	19,6007	0,9800
KAT-Δ2-1B	19,5717	0,9785
KAT-Δ2-1	19,5667	0,9783
KAT-Δ1-2	19,5407	0,9770
KAT-Γ1-1	19,5186	0,9759
KAT-Γ2-1B	19,4788	0,9739
KAT-Γ2-1	19,4747	0,9737
KAT-B2-2	19,4401	0,9720
KAT-B2-1	19,4261	0,9713
KAT-B1-1	19,4135	0,9706
KAT-A2-2	19,4019	0,9701
KAT-A2-1	19,3827	0,9691



KAT-A3-2	19,3682	0,9684
KAT-A3-2Γ	19,3636	0,9681
KAT-A3-1	19,3481	0,9674
KAT-Δ5-1	19,3411	0,9670
KAT-A4-1	19,3370	0,9668
KAT-A4-3	19,3325	0,9663
KAT-A5-3	19,3307	0,9665
KAT-A6-3	19,3301	0,9665
KAT-A6-1	19,3304	0,9665

Πίνακας 7.1

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα θερμικά όρια των γραμμών. Υπενθυμίζεται ότι οι γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

Τύπος γραμμής	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
ACSR-95	15,5
NAHEKBA-240	15
NAHEKBA-150	15
XLPE-240	10

Πίνακας 7.2

Ο τύπος κάθε γραμμής του δικτύου υποδηλώνεται με το αντίστοιχο χρώμα σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα. Η θερμική ισχύς της κάθε γραμμής υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:  $S_{\theta} = \sqrt{3} \cdot I \cdot V = \sqrt{3} \cdot 20 \cdot I$ .

Αριθμός γραμμής	Ρεύμα γραμμής (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)
1	0,23204	8,038101
3	0,23038	7,980597
4	0,22705	7,865243
5	0,22284	7,719404
6	0,2202	7,627952
7	0,00421	0,145839
8	0,21599	7,482113
9	0,21599	7,482113
10	0,20274	7,02312
11	0,20274	7,02312
12	0,19852	6,876935
13	0,19852	6,876935
14	0,19191	6,647957
15	0,18528	6,418287
16	0,18528	6,418287
17	0,17199	5,957908

18	0,17199	5,957908
19	0,16536	5,728238
20	0,15873	5,498568
21	0,15873	5,498568
22	0,1521	5,268899
23	0,1521	5,268899
24	0,14543	5,037843
25	0,14543	5,037843
26	0,14543	5,037843
27	0,13879	4,807827
28	0,13214	4,577464
29	0,13214	4,577464
30	0,13214	4,577464
31	0,1255	4,347448
32	0,1255	4,347448
33	0,12018	4,163157
34	0,12018	4,163157
35	0,12018	4,163157
36	0,12018	4,163157
37	0,11352	3,932448
38	0,10687	3,702085
39	0,10687	3,702085
40	0,1002	3,47103
41	0,09354	3,240321
42	0,09354	3,240321
43	0,09354	3,240321
44	0,08687	3,009265
45	0,08687	3,009265
46	0,0802	2,778209
47	0,0802	2,778209
48	0,07352	2,546808
49	0,07352	2,546808
50	0,06012	2,082618
51	0,06012	2,082618
52	0,05344	1,851216
53	0,05344	1,851216
54	0,05344	1,851216
55	0,05344	1,851216
56	0,04003	1,38668
57	0,04003	1,38668
58	0,04003	1,38668
59	0,03335	1,155278
60	0,03335	1,155278
61	0,02667	0,923876
62	0,02667	0,923876
63	0,01999	0,692474
64	0,01999	0,692474

65	0,01999	0,692474
66	0,01731	0,599636
67	0,01063	0,368234
68	0,01063	0,368234

Πίνακας 7.3

### Σενάριο 1

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε το σενάριο 1 δηλαδή ομοιόμορφη κατανομή φορτίου κατά μήκος της γραμμής. Ποσοστό διείσδυσης 100%. Στην πρώτη στήλη έχουμε την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής έχοντας συνδεδεμένο σε κάθε ζυγό το μέγιστο φορτίο ζήτησής τους. Στη δεύτερη στήλη μπορούμε να δούμε τις αντίστοιχες τιμές της τάσης στο ανά μονάδα σύστημα. Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται η τιμή της τάσης κάθε υποσταθμού με 100% διείσδυση των φωτοβολταϊκών. Στην τέταρτη στήλη φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές της τάσης στο ανά μονάδα σύστημα. Στην πέμπτη και έκτη στήλη παρατηρείται αντίστοιχα ότι η μέση τιμή καθώς και η διακύμανση της τάσης κάθε υποσταθμού βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Στην περίπτωση του δικτύου της Κατερίνης 20kV τα επιτρεπόμενα όρια ορθής λειτουργίας είναι τα εξής:

$$\text{Μέση τιμή: } 19 \leq \bar{V} \leq 21 \text{ ή } 0,95 \leq \bar{V} \leq 1,05$$

$$\text{Διακύμανση: } \Delta V \leq 0,6$$

Όνομασία Υ/Σ	Τάση (kV) - Max Load	Τάση (pu) - Max Load	Τάση (kV) - Min Load & 100% $P_{PV}$	Τάση (kV) - Min Load & 100% $P_{PV}$	Μέση τιμή	Διακύμανση
KAT-0180	19,9752	0,9987	20,0140	1,0007	19,9946	0,0194
KAT-A12-6	19,9658	0,9982	20,0134	1,0007	19,9896	0,0238
KAT-A14-9	17,9658	0,9982	20,0134	1,0007	19,9896	0,0238
KAT-A15-1	19,9315	0,9965	20,0255	1,0012	19,9785	0,0470
KAT-Δ11-2	19,9157	0,9957	20,0315	1,0015	19,9736	0,0579
KAT-Δ8-1	19,8806	0,9940	20,0446	1,0022	19,9626	0,0820
KAT-Δ6-2	19,8486	0,9924	20,0624	1,0031	19,9555	0,1069
KAT-Δ6-3	19,8174	0,9908	20,0846	1,0042	19,9510	0,1336
KAT-Δ4-2	19,7817	0,9890	20,1111	1,0055	19,9464	0,1647
KAT-Δ3-2	19,7597	0,9879	20,1267	1,0063	19,9432	0,1835
KAT-Δ3-4	19,7157	0,9857	20,1568	1,0078	19,9363	0,2205
KAT-Δ2-5	19,6964	0,9848	20,1701	1,0085	19,9333	0,2368

KAT-Γ1-3	19,6567	0,9828	20,1990	1,0099	19,9279	0,2711
KAT-Δ2-3	19,6181	0,9809	20,2243	1,0112	19,9212	0,3031
KAT-Δ2-2	19,6007	0,9800	20,2364	1,0118	19,9186	0,3178
KAT-Δ2-1B	19,5717	0,9785	20,2565	1,0128	19,9141	0,3424
KAT-Δ2-1	19,5667	0,9783	20,2601	1,0130	19,9134	0,3467
KAT-Δ1-2	19,5407	0,9770	20,2795	1,0139	19,9101	0,3694
KAT-Γ1-1	19,5186	0,9759	20,2979	1,0149	19,9083	0,3896
KAT-Γ2-1B	19,4788	0,9739	20,3288	1,0164	19,9038	0,4250
KAT-Γ2-1	19,4747	0,9737	20,3317	1,0165	19,9032	0,4285
KAT-B2-2	19,4401	0,9720	20,3588	1,0179	19,8995	0,4593
KAT-B2-1	19,4261	0,9713	20,3690	1,0184	19,8976	0,4714
KAT-B1-1	19,4135	0,9706	20,3801	1,0190	19,8968	0,4833
KAT-A2-2	19,4019	0,9701	20,3887	1,0194	19,8953	0,4934
KAT-A2-1	19,3827	0,9691	20,4055	1,0202	19,8941	0,5114
KAT-A3-2	19,3682	0,9684	20,4186	1,0209	19,8934	0,5252
KAT-A3-2Γ	19,3636	0,9681	20,4222	1,0211	19,8929	0,5293
KAT-A3-1	19,3481	0,9674	20,4363	1,0218	19,8922	0,5441
KAT-Δ5-1	19,3411	0,9670	20,4425	1,0221	19,8918	0,5507
KAT-A4-1	19,3370	0,9668	20,4467	1,0223	19,8919	0,5548
KAT-A4-3	19,3325	0,9663	20,4525	1,0226	19,8925	0,5600
KAT-A5-3	19,3307	0,9665	20,4549	1,0227	19,8928	0,5621
KAT-A6-3	19,3301	0,9665	20,4559	1,0228	19,8930	0,5629
KAT-A6-1	19,3304	0,9665	20,4581	1,0229	19,8943	0,5638

Πίνακας 7.4

Άρα, οι τεχνικοί περιορισμοί της μέσης τιμής καθώς και της διακύμανσης της τάσης των υποσταθμών δεν παραβιάζονται.

Όσον αφορά το θερμικό όριο των γραμμών έχουμε:

Αριθμός γραμμής	Ρεύμα γραμμής (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)
1	0,42715	14,79691
3	0,42403	14,68883
4	0,41780	14,47302
5	0,40992	14,20005
6	0,40502	14,03030
7	0,00788	0,27297
8	0,39714	13,75733
9	0,39714	13,75733
10	0,37257	12,90620
11	0,37257	12,90620
12	0,36470	12,63358
13	0,36470	12,63358
14	0,35233	12,20507
15	0,33995	11,77621
16	0,33995	11,77621
17	0,31544	10,92716

18	0,31544	10,92716
19	0,30309	10,49935
20	0,29076	10,07222
21	0,29076	10,07222
22	0,27843	9,64510
23	0,27843	9,64510
24	0,26607	9,21694
25	0,26607	9,21694
26	0,26607	9,21694
27	0,26376	9,13691
28	0,24144	8,36373
29	0,24144	8,36373
30	0,24144	8,36373
31	0,22913	7,93730
32	0,22913	7,93730
33	0,22014	7,62587
34	0,22014	7,62587
35	0,22014	7,62587
36	0,22014	7,62587
37	0,20785	7,20014
38	0,19556	6,77440
39	0,19556	6,77440
40	0,18328	6,34901
41	0,17100	5,92361
42	0,17100	5,92361
43	0,17100	5,92361
44	0,15873	5,49857
45	0,15873	5,49857
46	0,14646	5,07352
47	0,14646	5,07352
48	0,13420	4,64882
49	0,13420	4,64882
50	0,10988	3,80635
51	0,10988	3,80635
52	0,09762	3,38166
53	0,09762	3,38166
54	0,09762	3,38166
55	0,09762	3,38166
56	0,07331	2,53953
57	0,07331	2,53953
58	0,07331	2,53953
59	0,06106	2,11518
60	0,06106	2,11518
61	0,04881	1,69083
62	0,04881	1,69083
63	0,03657	1,26682
64	0,03657	1,26682

65	0,03657	1,26682
66	0,03172	1,09881
67	0,01947	0,67446
68	0,01947	0,67446

Πίνακας 7.5

Άρα και το θερμικό όριο των παρακάτω γραμμών βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

### Σενάριο 2

Στο σενάριο αυτό αρχικά τοποθετήθηκαν φωτοβολταϊκά σε ποσοστό 20%, στη συνέχεια σε ποσοστό 60% και τέλος σε ποσοστό 80%. Όπως ήταν αναμενόμενο οι τεχνικοί περιορισμοί ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων αφού πληρούνταν και στο ακραίο σενάριο της 100% διείσδυσης. Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Ονομασία Υ/Σ	Ποσοστό διείσδυσης 20%			Ποσοστό διείσδυσης 60%			Ποσοστό διείσδυσης 80%		
	Τάση (pu)	Μέση τιμή (pu)	Διακύμαν ση	Τάση (pu)	Μέση τιμή (pu)	Διακύμαν ση	Τάση (pu)	Μέση τιμή (pu)	Διακύμαν ση
KAT-0180	1,000	0,999	0,011	1,000	0,999	0,013	1,000	0,999	0,015
KAT-A12-6	0,999	0,999	0,011	1,000	0,999	0,014	1,000	0,999	0,016
KAT-A14-9	0,999	0,999	0,011	1,000	0,999	0,014	0,999	0,999	0,011
KAT-A15-1	0,999	0,998	0,019	0,999	0,998	0,028	1,000	0,998	0,033
KAT-Δ11-2	0,998	0,997	0,023	0,999	0,998	0,035	1,000	0,998	0,041
KAT-Δ8-1	0,997	0,996	0,032	0,999	0,996	0,049	1,000	0,997	0,058
KAT-Δ6-2	0,997	0,994	0,041	0,999	0,996	0,064	1,000	0,996	0,076
KAT-Δ6-3	0,996	0,993	0,050	0,999	0,995	0,080	1,000	0,996	0,095
KAT-Δ4-2	0,995	0,992	0,060	0,999	0,994	0,098	1,001	0,995	0,117
KAT-Δ3-2	0,995	0,991	0,067	0,999	0,993	0,108	1,001	0,995	0,131
KAT-Δ3-4	0,994	0,990	0,080	0,999	0,992	0,129	1,002	0,994	0,158
KAT-Δ2-5	0,993	0,989	0,086	0,999	0,992	0,138	1,002	0,993	0,169
KAT-Γ1-3	0,993	0,988	0,098	0,998	0,991	0,156	1,002	0,992	0,193
KAT-Δ2-3	0,992	0,986	0,111	0,998	0,990	0,174	1,003	0,992	0,216
KAT-Δ2-2	0,992	0,986	0,116	0,998	0,989	0,181	1,003	0,991	0,226
KAT-Δ2-1B	0,991	0,985	0,124	0,998	0,988	0,194	1,003	0,991	0,243
KAT-Δ2-1	0,991	0,985	0,126	0,998	0,988	0,196	1,003	0,991	0,246
KAT-Δ1-2	0,990	0,984	0,132	0,998	0,987	0,206	1,003	0,990	0,262
KAT-Γ1-1	0,990	0,983	0,137	0,997	0,987	0,215	1,003	0,990	0,275
KAT-Γ2-1B	0,989	0,981	0,146	0,997	0,985	0,230	1,004	0,989	0,299
KAT-Γ2-1	0,988	0,981	0,147	0,997	0,985	0,232	1,004	0,989	0,301
KAT-B2-2	0,987	0,980	0,155	0,996	0,984	0,243	1,004	0,988	0,321

KAT-B2-1	0,987	0,979	0,158	0,996	0,984	0,247	1,004	0,988	0,329
KAT-B1-1	0,987	0,979	0,161	0,996	0,983	0,251	1,004	0,987	0,336
KAT-A2-2	0,986	0,978	0,163	0,995	0,983	0,254	1,004	0,987	0,342
KAT-A2-1	0,986	0,978	0,168	0,995	0,982	0,258	1,004	0,987	0,353
KAT-A3-2	0,986	0,977	0,171	0,995	0,981	0,262	1,004	0,986	0,360
KAT-A3-2Γ	0,985	0,977	0,172	0,994	0,981	0,263	1,004	0,986	0,362
KAT-A3-1	0,985	0,976	0,176	0,994	0,981	0,267	1,004	0,986	0,369
KAT-Δ5-1	0,985	0,976	0,178	0,994	0,980	0,269	1,004	0,986	0,371
KAT-A4-1	0,985	0,976	0,179	0,994	0,980	0,270	1,004	0,985	0,372
KAT-A4-3	0,985	0,976	0,181	0,994	0,980	0,272	1,004	0,985	0,374
KAT-A5-3	0,985	0,976	0,182	0,994	0,980	0,272	1,004	0,985	0,374
KAT-A6-3	0,985	0,976	0,182	0,994	0,980	0,273	1,004	0,985	0,375
KAT-A6-1	0,985	0,976	0,183	0,994	0,980	0,274	1,004	0,985	0,375

Πίνακας 7.6

Το ίδιο διαπιστώθηκε και για το θερμικό όριο των γραμμών:

Αριθμός γραμμής	Ποσοστό διείσδυσης 20%		Ποσοστό διείσδυσης 60%		Ποσοστό διείσδυσης 80%	
	Ρεύμα γραμμής (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)	Ρεύμα γραμμής (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)	Ρεύμα γραμμής (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)
1	0,2356	8,1625	0,2402	8,3194	0,3429	11,8767
2	0,2360	8,1749	0,2375	8,2259	0,3398	11,7700
3	0,2317	8,0253	0,2372	8,2165	0,3411	11,8161
4	0,2262	7,8358	0,2369	8,2065	0,3428	11,8742
5	0,2228	7,7177	0,2368	8,2033	0,3379	11,7055
6	0,0058	0,2002	0,0058	0,1999	0,0077	0,2660
7	0,2173	7,5289	0,2368	8,2016	0,3301	11,4343
8	0,2173	7,5289	0,2368	8,2016	0,3301	11,4343
9	0,2003	6,9396	0,2145	7,4291	0,3057	10,5887
11	0,2003	6,9396	0,2145	7,4291	0,3057	10,5887
12	0,1950	6,7533	0,2074	7,1859	0,2979	10,3182
13	0,1950	6,7533	0,2074	7,1859	0,2977	10,3119
14	0,1866	6,4644	0,1966	6,8087	0,2856	9,8935
15	0,1783	6,1758	0,1858	6,4363	0,2733	9,4681
16	0,1783	6,1758	0,1858	6,4363	0,2733	9,4681
17	0,1619	5,6073	0,1651	5,7206	0,2490	8,6263
18	0,1619	5,6073	0,1651	5,7206	0,2490	8,6263
19	0,1539	5,3302	0,1552	5,3773	0,2368	8,2037
20	0,1456	5,0434	0,1457	5,0468	0,2246	7,7814
21	0,1456	5,0434	0,1457	5,0468	0,2246	7,7814
22	0,1452	5,0295	0,1366	4,7323	0,2125	7,3602
23	0,1452	5,0295	0,1366	4,7323	0,2125	7,3602
24	0,1454	5,0365	0,1280	4,4347	0,2003	6,9382
25	0,1454	5,0365	0,1280	4,4347	0,2003	6,9382

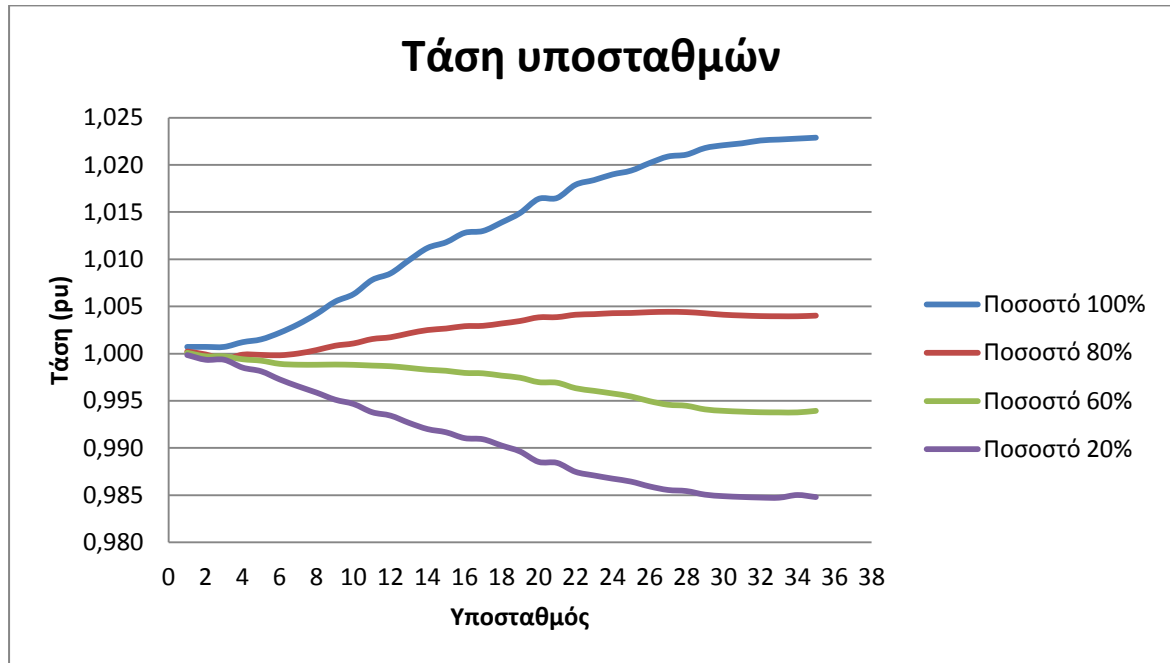
26	0,1454	5,0365	0,1280	4,4347	0,2003	6,9382
27	0,1467	5,0825	0,1202	4,1625	0,1882	6,5191
28	0,1491	5,1650	0,1131	3,9186	0,1761	6,1006
29	0,1491	5,1650	0,1131	3,9186	0,1761	6,1006
30	0,1491	5,1650	0,1131	3,9186	0,1761	6,1006
31	0,1525	5,2814	0,1071	3,7090	0,1641	5,6839
32	0,1525	5,2814	0,1071	3,7090	0,1641	5,6839
33	0,1433	4,9644	0,1019	3,5282	0,1550	5,3676
34	0,1433	4,9644	0,1019	3,5282	0,1550	5,3676
35	0,1433	4,9644	0,1019	3,5282	0,1550	5,3676
36	0,1433	4,9644	0,1019	3,5282	0,1550	5,3676
37	0,1343	4,6509	0,0978	3,3889	0,1430	4,9533
38	0,1252	4,3374	0,0953	3,3002	0,1311	4,5411
39	0,1252	4,3374	0,0953	3,3002	0,1311	4,5411
40	0,1162	4,0242	0,0943	3,2660	0,1193	4,1323
41	0,1071	3,7114	0,0949	3,2885	0,1076	3,7277
42	0,1071	3,7114	0,0949	3,2885	0,1076	3,7277
43	0,1071	3,7114	0,0949	3,2885	0,1076	3,7277
44	0,0981	3,3993	0,0972	3,3664	0,0961	3,3290
45	0,0981	3,3993	0,0972	3,3664	0,0961	3,3290
46	0,0892	3,0882	0,0883	3,0585	0,0848	2,9383
47	0,0892	3,0882	0,0883	3,0585	0,0848	2,9383
48	0,0802	2,7786	0,0794	2,7515	0,0739	2,5589
49	0,0802	2,7786	0,0794	2,7515	0,0739	2,5589
50	0,0624	2,1619	0,0618	2,1408	0,0538	1,8637
51	0,0624	2,1619	0,0618	2,1408	0,0538	1,8637
52	0,0537	1,8609	0,0532	1,8422	0,0454	1,5741
53	0,0537	1,8609	0,0532	1,8422	0,0454	1,5741
54	0,0537	1,8609	0,0532	1,8422	0,0454	1,5741
55	0,0537	1,8609	0,0532	1,8422	0,0454	1,5741
56	0,0369	1,2783	0,0365	1,2651	0,0361	1,2509
57	0,0369	1,2783	0,0365	1,2651	0,0361	1,2509
58	0,0369	1,2783	0,0365	1,2651	0,0361	1,2509
59	0,0293	1,0139	0,0290	1,0036	0,0287	0,9925
60	0,0293	1,0139	0,0290	1,0036	0,0287	0,9925
61	0,0228	0,7905	0,0256	0,8865	0,0223	0,7735
62	0,0228	0,7905	0,0256	0,8865	0,0223	0,7735
63	0,0188	0,6509	0,0186	0,6443	0,0184	0,6370
64	0,0188	0,6509	0,0186	0,6443	0,0184	0,6370
65	0,0188	0,6509	0,0186	0,6443	0,0184	0,6370
66	0,0183	0,6322	0,0181	0,6260	0,0179	0,6190
67	0,0200	0,6939	0,0198	0,6873	0,0196	0,6800
68	0,0200	0,6939	0,0198	0,6873	0,0196	0,6800

Πίνακας 7.7

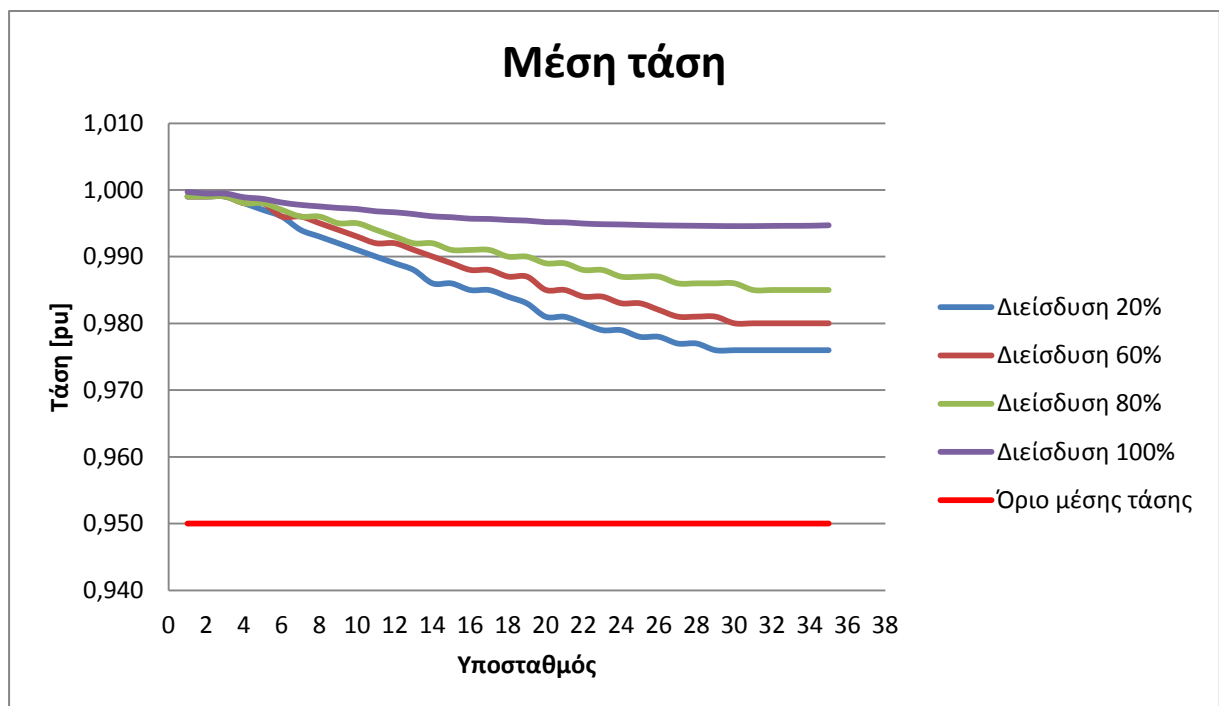


## 7.4 Γραφική απεικόνιση μεγεθών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα παραπάνω μεγέθη της τάσης, της μέσης τιμής της τάσης, της διακύμανσης και της θερμικής ισχύος στις περιπτώσεις που μελετήθηκαν έτσι ώστε να είναι ευκολότερα συγκρίσιμα:

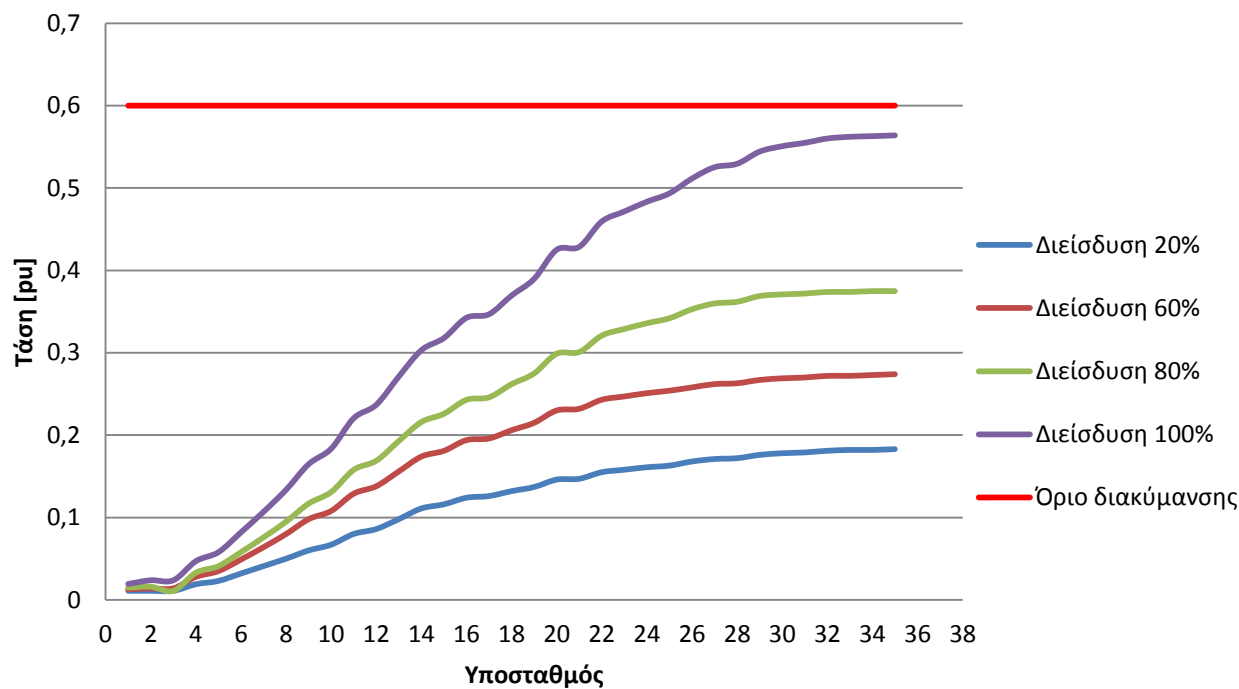


Διάγραμμα 7.1



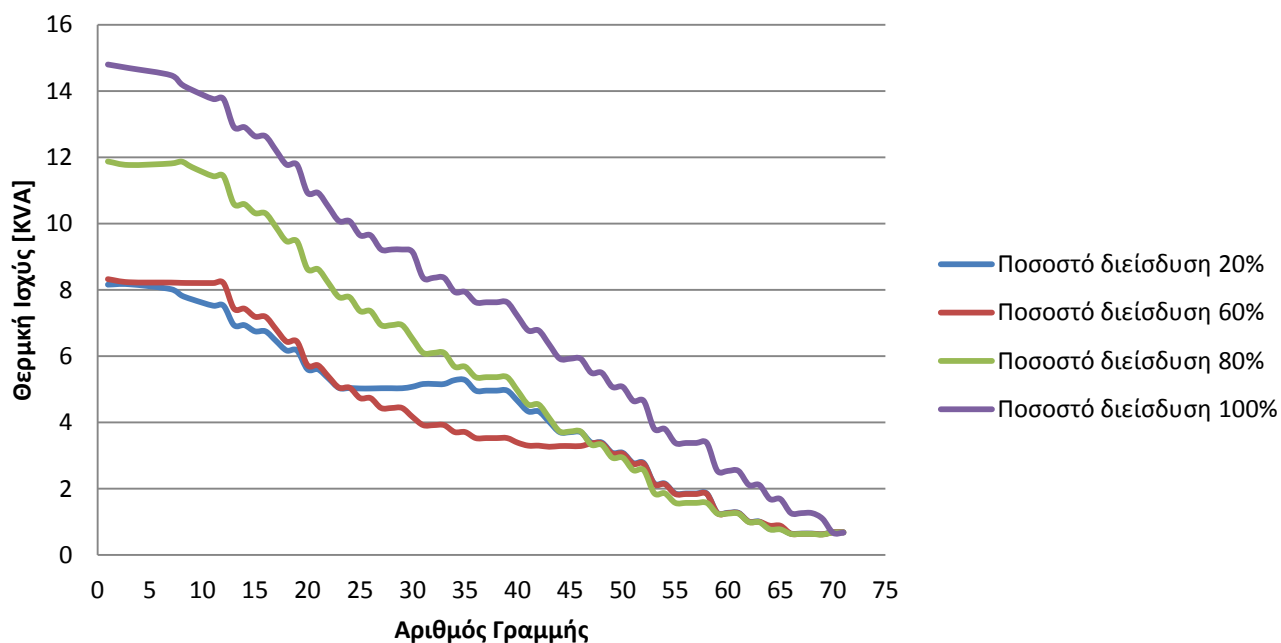
Διάγραμμα 7.2

## Διακύμανση



Διάγραμμα 7.3

## Θερμική Ισχύς



Διάγραμμα 7.4

Παρατηρούμε ότι η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά προκαλεί μείωση της ισχύος που εισέρχεται στο δίκτυο καθώς οι ανάγκες των φορτίων ικανοποιούνται τοπικά (δισπαρμένη παραγωγή).

## ΔΙΚΤΥΟ ΙΚΑΡΙΑΣ

### Σενάριο 1

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ανάλυση ροής φορτίου έχοντας στους υποσταθμούς τη μέγιστη ζήτηση φορτίου που παρατηρείται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Στη συνέχεια έχοντας την ελάχιστη ζήτηση φορτίου του έτους τοποθετήσαμε στους υποσταθμούς φωτοβολταϊκά με ενεργό ισχύ ίση με την ισχύ του μετασχηματιστή του κάθε υποσταθμού. Τα αποτελέσματα ήταν τα παρακάτω:

Υποσταθμός	Τάση (kV) - max Load	Τάση (pu) - min Load	Τάση (kV) - min Load & max PV	Τάση (pu) - min Load & max PV	Μέση τάση	Διακύμανση
Άγιος Κήρυκος 6	14,92	0,99	15,06	1,00	14,99	0,07
Άγιος Κήρυκος 16	14,89	0,99	15,09	1,01	14,99	0,10
Ελικοδρόμιο	14,87	0,99	15,1	1,01	14,99	0,12
Άγιος Κήρυκος 7	14,87	0,99	15,1	1,01	14,99	0,12
Άγιος Κήρυκος 22	14,87	0,99	15,1	1,01	14,99	0,12
Άγιος Κήρυκος 8	14,77	0,98	15,18	1,01	14,98	0,21
Άγιος Κήρυκος 10	14,65	0,98	15,26	1,02	14,96	0,31
Άγιος Κήρυκος 20	14,65	0,98	15,26	1,02	14,96	0,31
Μαυράτο 3	14,56	0,97	15,33	1,02	14,95	0,39
Μαυράτο 2	14,57	0,97	15,33	1,02	14,95	0,38
Μαυράτο 1	14,56	0,97	15,33	1,02	14,95	0,39
Τσουρεδές 1	14,55	0,97	15,34	1,02	14,95	0,40
Οξέα 1	14,41	0,96	15,44	1,03	14,93	0,52
Μαυρικάτο 1	14,4	0,96	15,44	1,03	14,92	0,52
Οξέα 2	14,37	0,96	15,46	1,03	14,92	0,55
Καταφύγιο 2	14,3	0,95	15,52	1,03	14,91	0,61
καταφύγιο 1	14,3	0,95	15,52	1,03	14,91	0,61
Αιολικό Πάρκο 2	13,34	0,89	15,57	1,04	14,46	1,12
Περδίκι 6	13,34	0,89	16,09	1,07	14,72	1,38
Περδίκι 7	13,55	0,90	16,09	1,07	14,82	1,27
Περδίκι 1	13,54	0,90	16,15	1,08	14,85	1,31
Φανάρι 3	13,54	0,90	16,13	1,08	14,84	1,30
φανάρι 2	13,51	0,90	16,15	1,08	14,83	1,32
Φανάρι 5	13,5	0,90	16,15	1,08	14,83	1,33

Φανάρι 4	13,5	0,90	16,15	1,08	14,83	1,33
Φανάρι 1	13,36	0,89	16,25	1,08	14,81	1,45
Περδίκι 9	13,35	0,89	16,26	1,08	14,81	1,46
Περδίκι 10	13,35	0,89	16,27	1,08	14,81	1,46
Κιόνιο	13,35	0,89	16,27	1,08	14,81	1,46
Περδίκι 5	13,35	0,89	16,27	1,08	14,81	1,46
Περδίκι 4	13,51	0,90	16,16	1,08	14,84	1,33
αιολικό Πάρκο 1	13,51	0,90	16,17	1,08	14,84	1,33
Περδίκι 8	13,51	0,90	16,17	1,08	14,84	1,33
ΥΕΝΕΔ	13,54	0,90	16,09	1,07	14,82	1,28
ΟΤΕ	13,48	0,90	16,22	1,08	14,85	1,37
Μονοκάμπι	13,3	0,89	16,25	1,08	14,78	1,48
Πλωμάρι	13,23	0,88	16,3	1,09	14,77	1,54
Μηλέωπο 1	13,15	0,88	16,32	1,09	14,74	1,59
Μηλέωπο 2	13,11	0,87	16,37	1,09	14,74	1,63
Αντλιοστάσιο	13,01	0,87	16,39	1,09	14,70	1,69
Καραβόσταμο 4	12,97	0,86	16,39	1,09	14,68	1,71
Καραβόσταμο 2	12,97	0,86	16,4	1,09	14,69	1,72
Καραβόσταμο 3	12,96	0,86	16,4	1,09	14,68	1,72
Καραβόσταμο 1	12,95	0,86	16,42	1,09	14,69	1,74
Αρεθούσα 2	12,93	0,86	16,42	1,09	14,68	1,75
Αρεθούσα 1	12,93	0,86	16,41	1,09	14,67	1,74
Λαζανάς	12,93	0,86	16,42	1,09	14,68	1,75
Φουσκάς	12,91	0,86	16,43	1,10	14,67	1,76
Κυπαρίσσι	12,9	0,86	16,43	1,10	14,67	1,77
Κυπαρίσσι 2	12,9	0,86	16,44	1,10	14,67	1,77
Δροτσούλας	12,88	0,86	16,44	1,10	14,66	1,78
Κεραμείο	12,88	0,86	16,44	1,10	14,66	1,78
Αγία Κυριακή	12,88	0,86	16,44	1,10	14,66	1,78
Έυδηλος 4	12,87	0,86	16,45	1,10	14,66	1,79
Έυδηλος 7	12,87	0,86	16,45	1,10	14,66	1,79
Έυδηλος 5	12,87	0,86	16,45	1,10	14,66	1,79
Έυδηλος 1	12,85	0,86	16,47	1,10	14,66	1,81

Πίνακας 7.8

Τα όρια της μέσης τιμής της τάσης και της διακύμανσης είναι:

$$\text{Μέση τιμή: } 14,25 \leq \bar{V} \leq 15,08$$

$$\text{Διακύμανση: } \Delta V \leq 0,45$$

Παρατηρούμε ότι σε αυτό το σενάριο η μέση τιμή της τάσης βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων ενώ η διακύμανση της τάσης στους υποσταθμούς που έχουν επισημανθεί ξεπερνά τα τεχνικά όρια.

Το θερμικό όριο ισχύος των γραμμών είναι:

Τύπος γραμμής	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
AAAC-70	6,2
ACSR-35	5,8
ACSR-95	11,6

Πίνακας 7.9: Θερμικό όριο ισχύος αγωγών που αποτελούν τον κορμό της γραμμής

Τύπος γραμμής	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
CU-16	3
CU-35	4,8
AAAC-35	4,2
AAAC-185	12

Πίνακας 7.10: Θερμικό όριο αγωγών που αποτελούν τις διακλαδώσεις της γραμμής

Αριθμός γραμμής	Ρεύμα (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)
1	0,118	3,0657
2	0,118	3,0657
3	0,114	2,9618
4	0,113	2,9358
5	0,109	2,8319
6	0,104	2,7020
7	0,101	2,6241
8	0,003	0,0779
9	0,005	0,1299
10	0,002	0,0520
11	0,003	0,0779
12	0,002	0,0520
13	0,003	0,0779
14	0,003	0,0779
15	0,101	2,6241
16	0,101	2,6241
17	0,007	0,1819
18	0,002	0,0520
19	0,094	2,4422

20	0,007	0,1819
21	0,002	0,0520
22	0,005	0,1299
23	0,087	2,2603
24	0,002	0,0520
25	0,002	0,0520
26	0,085	2,2084
27	0,002	0,0520
28	0,002	0,0520
29	0,084	2,1824
30	0,003	0,0779
31	0,08	2,0785
32	0,002	0,0520
33	0,079	2,0525
34	0,002	0,0520
35	0,077	2,0005
36	0,002	0,0520
37	0,001	0,0260
38	0,001	0,0260
39	0,075	1,9486
40	0,075	1,9486
41	0,019	0,4936
42	0,001	0,0260
43	0,001	0,0260
44	0,001	0,0260
45	0,019	0,4936
46	0,001	0,0260
47	0,001	0,0260
48	0,002	0,0520
49	0,018	0,4677
50	0,006	0,1559
51	0,001	0,0260
52	0,005	0,1299
53	0,005	0,1299
54	0,005	0,1299
55	0,002	0,0520
56	0,003	0,0779
57	0,012	0,3118
58	0,009	0,2338
59	0,009	0,2338
60	0,009	0,2338
61	0,001	0,0260
62	0,001	0,0260
63	0,008	0,2078
64	0,008	0,2078
65	0,002	0,0520
66	0,006	0,1559

67	0,00028	0,0073
68	0,007	0,1819
69	0,002	0,0520
70	0,005	0,1299
71	0,003	0,0779
72	0,003	0,0779
73	0,002	0,0520
74	0,001	0,0260
75	0,00028	0,0073
76	0,002	0,0520
77	0,056	1,4549
78	0,001	0,0260
79	0,055	1,4289
80	0,002	0,0520
81	0,054	1,4030
82	0,054	1,4030
83	0,003	0,0779
84	0,05	1,2990
85	0,05	1,2990
86	0,05	1,2990
87	0,002	0,0520
88	0,049	1,2731
89	0,003	0,0779
90	0,046	1,1951
91	0,046	1,1951
92	0,001	0,0260
93	0,045	1,1691
94	0,045	1,1691
95	0,003	0,0779
96	0,042	1,0912
97	0,005	0,1299
98	0,037	0,9613
99	0,005	0,1299
100	0,032	0,8314
101	0,001	0,0260
102	0,031	0,8054
103	0,005	0,1299
104	0,026	0,6755
105	0,026	0,6755
106	0,002	0,0520
107	0,001	0,0260
108	0,002	0,0520
109	0,023	0,5976
110	0,001	0,0260
111	0,023	0,5976
112	0,002	0,0520
113	0,021	0,5456

114	0,002	0,0520
115	0,019	0,4936
116	0,002	0,0520
117	0,002	0,0520
118	0,002	0,0520
119	0,018	0,4677
120	0,002	0,0520
121	0,016	0,4157
122	0,003	0,0779
123	0,013	0,3377
124	0,001	0,0260
125	0,012	0,3118
126	0,012	0,3118
127	0,012	0,3118
128	0,003	0,0779
129	0,009	0,2338
130	0,009	0,2338
131	0,008	0,2078

Πίνακας 7.11

Διαπιστώνουμε ότι ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

### Σενάριο 2

Στο σενάριο αυτό ξεκινήσαμε με ποσοστό διείσδυσης 11% και στη συνέχεια αυξήσαμε το ποσοστό διείσδυσης σε 20%, 30% και τέλος 62% προσθέτοντας φωτοβολταϊκά γύρω από το κέντρο της γραμμής. Τα αποτελέσματα ήταν τα παρακάτω:

Υποσταθμός	Διείσδυση 11%			Διείσδυση 20%		
	Τάση (kV)	Μέση τιμή	Διακύμανση	Τάση (kV)	Μέση τάση	Διακύμανση
Άγιος Κήρυκος 6	15	14,96	0,04	15	14,96	0,04
Άγιος Κήρυκος 16	15	14,95	0,05	15,01	14,95	0,06
Ελικοδρόμιο	15	14,94	0,07	15,01	14,94	0,07
Άγιος Κήρυκος 7	15	14,94	0,07	15,01	14,94	0,07
Άγιος Κήρυκος 22	15	14,94	0,07	15,01	14,94	0,07
Άγιος Κήρυκος 8	14,99	14,88	0,11	15,01	14,89	0,12
Άγιος Κήρυκος 10	14,99	14,82	0,17	15,02	14,84	0,19
Άγιος Κήρυκος 20	14,99	14,82	0,17	15,02	14,84	0,19
Μαυράτο 3	14,98	14,77	0,21	15,02	14,79	0,23
Μαυράτο 2	14,98	14,78	0,21	15,02	14,80	0,23
Μαυράτο 1	14,99	14,78	0,22	15,03	14,80	0,23



Τσουρεδέες 1	14,99	14,77	0,22	15,03	14,79	0,24
Οξέα 1	14,99	14,70	0,29	15,04	14,73	0,32
Μαυρικάτο 1	14,99	14,70	0,30	15,04	14,72	0,32
Οξέα 2	14,99	14,68	0,31	15,04	14,71	0,34
Καταφύγιο 2	14,99	14,65	0,35	15,05	14,68	0,38
καταφύγιο 1	14,99	14,65	0,35	15,05	14,68	0,38
Αιολικό Πάρκο 2	14,99	14,17	0,83	15,06	14,20	0,86
Περδίκι 6	15	14,17	0,83	15,15	14,25	0,91
Περδίκι 7	15,02	14,29	0,73	15,15	14,35	0,80
Περδίκι 1	15,04	14,29	0,75	15,2	14,37	0,83
Φανάρι 3	15,02	14,28	0,74	15,19	14,37	0,83
φανάρι 2	15	14,26	0,75	15,18	14,35	0,84
Φανάρι 5	15	14,25	0,75	15,18	14,34	0,84
Φανάρι 4	15	14,25	0,75	15,18	14,34	0,84
Φανάρι 1	15,01	14,19	0,83	15,29	14,33	0,97
Περδίκι 9	15,01	14,18	0,83	15,3	14,33	0,98
Περδίκι 10	15,01	14,18	0,83	15,3	14,33	0,98
Κιόνιο	15,01	14,18	0,83	15,3	14,33	0,98
Περδίκι 5	15,01	14,18	0,83	15,3	14,33	0,98
Περδίκι 4	15	14,26	0,75	15,31	14,41	0,90
αιολικό Πάρκο 1	15	14,26	0,75	15,3	14,41	0,90
Περδίκι 8	15	14,26	0,75	15,18	14,35	0,84
ΥΕΝΕΔ	14,99	14,27	0,73	15,18	14,36	0,82
ΟΤΕ	14,98	14,23	0,75	15,14	14,31	0,83
Μονοκάμπι	14,97	14,14	0,84	15,13	14,22	0,92
Πλωμάρι	14,96	14,10	0,87	15,12	14,18	0,94
Μηλέωπο 1	14,95	14,05	0,90	15,11	14,13	0,98
Μηλέωπο 2	14,95	14,03	0,92	15,1	14,11	1,00
Αντλιοστάσιο	14,94	13,98	0,97	15,1	14,06	1,05
Καραβόσταμο 4	14,94	13,96	0,98	15,09	14,03	1,06
Καραβόσταμο 2	14,94	13,96	0,98	15,09	14,03	1,06
Καραβόσταμο 3	14,94	13,95	0,99	15,09	14,03	1,07
Καραβόσταμο 1	14,93	13,94	0,99	15,09	14,02	1,07
Αρεθούσα 2	14,93	13,93	1,00	15,09	14,01	1,08
Αρεθούσα 1	14,94	13,94	1,01	15,09	14,01	1,08
Λαζανάς	14,93	13,93	1,00	15,09	14,01	1,08
Φουσκάς	14,93	13,92	1,01	15,09	14,00	1,09
Κυπαρίσσι	14,93	13,92	1,02	15,09	14,00	1,10
Κυπαρίσσι 2	14,93	13,92	1,02	15,09	14,00	1,10
Δροτσούλας	14,93	13,91	1,03	15,09	13,99	1,11
Κεραμείο	14,94	13,91	1,03	15,09	13,99	1,11
Άγια Κυριακή	14,94	13,91	1,03	15,09	13,99	1,11
Έυδηλος 4	14,94	13,91	1,04	15,09	13,98	1,11
Έυδηλος 7	14,94	13,91	1,04	15,09	13,98	1,11
Έυδηλος 5	14,94	13,91	1,04	15,09	13,98	1,11
Έυδηλος 1	14,94	13,90	1,05	15,1	13,98	1,13

Πίνακας 7.12

Υποσταθμός	Διείσδυση 30%			Διείσδυση 62%		
	Τάση (kV)	Μέση τιμή	Διακύμανση	Τάση (kV)	Μέση τάση	Διακύμανση
Άγιος Κήρυκος 6	15,01	14,97	0,04	15,04	14,98	0,06
Άγιος Κήρυκος 16	15,02	14,96	0,06	15,05	14,97	0,08
Ελικοδρόμιο	15,02	14,95	0,08	15,06	14,97	0,10
Άγιος Κήρυκος 7	15,02	14,95	0,08	15,06	14,97	0,10
Άγιος Κήρυκος 22	15,03	14,95	0,08	15,06	14,97	0,10
Άγιος Κήρυκος 8	15,03	14,90	0,13	15,11	14,94	0,17
Άγιος Κήρυκος 10	15,05	14,85	0,20	15,16	14,91	0,26
Άγιος Κήρυκος 20	15,07	14,86	0,21	15,16	14,91	0,26
Μαυράτο 3	15,09	14,83	0,27	15,2	14,88	0,32
Μαυράτο 2	15,09	14,83	0,26	15,2	14,89	0,32
Μαυράτο 1	15,1	14,83	0,27	15,22	14,89	0,33
Τσουρεδές 1	15,1	14,83	0,27	15,22	14,89	0,34
Οξέα 1	15,14	14,78	0,37	15,31	14,86	0,45
Μαυρικάτο 1	15,14	14,77	0,37	15,31	14,86	0,46
Οξέα 2	15,15	14,76	0,39	15,33	14,85	0,48
Καταφύγιο 2	15,17	14,74	0,44	15,37	14,84	0,53
καταφύγιο 1	15,17	14,74	0,44	15,37	14,84	0,53
Αιολικό Πάρκο 2	15,19	14,27	0,93	15,41	14,38	1,04
Περδίκι 6	15,43	14,39	1,05	15,83	14,59	1,25
Περδίκι 7	15,43	14,49	0,94	15,83	14,69	1,14
Περδίκι 1	15,49	14,52	0,98	15,89	14,72	1,18
Φανάρι 3	15,48	14,51	0,97	15,88	14,71	1,17
φανάρι 2	15,5	14,51	1,00	15,89	14,70	1,19
Φανάρι 5	15,5	14,50	1,00	15,9	14,70	1,20
Φανάρι 4	15,5	14,50	1,00	15,9	14,70	1,20
Φανάρι 1	15,61	14,49	1,13	16	14,68	1,32
Περδίκι 9	15,61	14,48	1,13	16,01	14,68	1,33
Περδίκι 10	15,62	14,49	1,14	16,01	14,68	1,33
Κιόνιο	15,62	14,49	1,14	16,01	14,68	1,33
Περδίκι 5	15,62	14,49	1,14	16,01	14,68	1,33
Περδίκι 4	15,62	14,57	1,06	15,91	14,71	1,20
αιολικό Πάρκο 1	15,51	14,51	1,00	15,92	14,72	1,21
Περδίκι 8	15,52	14,52	1,01	15,91	14,71	1,20
ΥΕΝΕΔ	15,51	14,53	0,99	15,82	14,68	1,14
ΟΤΕ	15,41	14,45	0,97	15,84	14,66	1,18
Μονοκάμπι	15,41	14,36	1,06	15,9	14,60	1,30
Πλωμάρι	15,39	14,31	1,08	15,92	14,58	1,35
Μηλέωπο 1	15,38	14,27	1,12	15,94	14,55	1,40
Μηλέωπο 2	15,38	14,25	1,14	15,95	14,53	1,42
Αντλιοστάσιο	15,37	14,19	1,18	15,98	14,50	1,49
Καραβόσταμο 4	15,36	14,17	1,20	15,99	14,48	1,51
Καραβόσταμο 2	15,36	14,17	1,20	15,98	14,48	1,51
Καραβόσταμο 3	15,36	14,16	1,20	15,99	14,48	1,52

Καραβόσταμο 1	15,36	14,16	1,21	15,99	14,47	1,52
Αρεθούσα 2	15,36	14,15	1,22	15,99	14,46	1,53
Αρεθούσα 1	15,36	14,15	1,22	15,98	14,46	1,53
Λαζανάς	15,36	14,15	1,22	15,98	14,46	1,53
Φουσκάς	15,36	14,14	1,23	15,98	14,45	1,54
Κυπαρίσσι	15,36	14,13	1,23	15,98	14,44	1,54
Κυπαρίσσι 2	15,36	14,13	1,23	15,98	14,44	1,54
Δροτσούλας	15,36	14,12	1,24	15,98	14,43	1,55
Κεραμείο	15,36	14,12	1,24	15,99	14,44	1,56
Αγία Κυριακή	15,36	14,12	1,24	15,99	14,44	1,56
Έυδηλος 4	15,36	14,12	1,25	15,99	14,43	1,56
Έυδηλος 7	15,36	14,12	1,25	15,99	14,43	1,56
Έυδηλος 5	15,36	14,12	1,25	15,99	14,43	1,56
Έυδηλος 1	15,37	14,11	1,26	15,99	14,42	1,57

Πίνακας 7.13

Στους υποσταθμούς που έχουν επισημανθεί παρατηρείται υπέρβαση των τεχνικών ορίων της μέσης τιμής της τάσης και της διακύμανσης.

Για το θερμικό όριο ισχύος των γραμμών παρατηρήσαμε:

Αριθμός γραμμής	Διείσδυση 11%		Διείσδυση 20%		Διείσδυση 30%		Διείσδυση 62%	
	Ρεύμα (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)	Ρεύμα (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)	Ρεύμα (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)	Ρεύμα (kA)	Θερμική ισχύς (KVA)
1	0,02379	0,61808	0,03164	0,82203	0,06014	1,56248	0,09817	2,55053
2	0,02379	0,61808	0,03164	0,82203	0,06014	1,56248	0,09817	2,56196
3	0,02379	0,61808	0,03164	0,82203	0,06014	1,56248	0,09817	2,51416
4	0,02297	0,59678	0,03034	0,78826	0,05867	1,52429	0,09861	2,52273
5	0,02289	0,59470	0,03039	0,78956	0,05878	1,52715	0,09677	2,53546
6	0,02274	0,59080	0,03048	0,79189	0,05900	1,53286	0,09710	2,54170
7	0,02254	0,58561	0,03063	0,79579	0,05935	1,54196	0,09759	0,01091
8	0,02245	0,58327	0,03071	0,79787	0,05952	1,54637	0,09783	0,02260
9	0,00043	0,01117	0,00043	0,01117	0,00043	0,01117	0,00042	0,00779
10	0,00088	0,02286	0,00088	0,02286	0,00088	0,02286	0,00087	0,01507
11	0,00058	0,01507	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779
12	0,00030	0,00779	0,00058	0,01507	0,00058	0,01507	0,00058	0,04131
13	0,00159	0,04131	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	2,54170
14	0,02245	0,58327	0,00159	0,04131	0,00159	0,04131	0,00159	2,54170
15	0,02245	0,58327	0,03071	0,79787	0,00595	0,15464	0,09783	0,03196
16	0,02245	0,58327	0,03071	0,79787	0,00595	0,15464	0,09783	0,00779
17	0,00124	0,03222	0,00124	0,03222	0,00124	0,03222	0,00123	2,56066
18	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,03014
19	0,02226	0,57833	0,03101	0,80569	0,06000	1,55885	0,09856	0,00753
20	0,00118	0,03066	0,00117	0,03040	0,00117	0,03040	0,00116	0,02260
21	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00029	2,57911
22	0,00088	0,02286	0,00088	0,02286	0,00088	0,02286	0,00087	0,00753
23	0,02216	0,57573	0,03134	0,81424	0,06000	1,55885	0,09927	0,00753

24	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00029	0,00753	0,00029	2,58379
25	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00029	0,00753	0,00029	0,00753
26	0,02214	0,57521	0,03134	0,81424	0,06074	1,57807	0,09945	0,00753
27	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00029	2,58846
28	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00029	0,08548
29	0,02213	0,57495	0,03152	0,81891	0,06100	1,58483	0,09963	2,50429
30	0,00057	0,01481	0,00057	0,01481	0,00058	0,01507	0,00329	0,04313
31	0,02211	0,57443	0,03171	0,82385	0,06115	1,58872	0,09639	2,46168
32	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00166	0,04313
33	0,02211	0,57443	0,03181	0,82645	0,06129	1,59236	0,09475	2,41933
34	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00166	0,04261
35	0,02211	0,57443	0,03191	0,82905	0,06144	1,59626	0,09312	0,02130
36	0,00028	0,00727	0,00028	0,00727	0,00028	0,00727	0,00164	0,02130
37	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00082	2,37776
38	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00082	2,37776
39	0,02211	0,57443	0,03200	0,83138	0,06157	1,59964	0,09152	1,54508
40	0,02379	0,57495	0,03201	0,83164	0,06157	1,59964	0,09152	0,02052
41	0,02213	0,53962	0,03271	0,84983	0,06036	1,56820	0,05947	0,02052
42	0,02077	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00079	0,02052
43	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00079	1,52481
44	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00079	0,53053
45	0,00014	0,54092	0,03278	0,85165	0,06044	1,57028	0,05869	0,49026
46	0,02082	0,52507	0,01990	0,51702	0,02110	0,54819	0,02042	0,04157
47	0,02021	0,52897	0,02005	0,52091	0,01952	0,50714	0,01887	0,99636
48	0,02036	0,00779	0,00029	0,00753	0,00164	0,04261	0,00160	0,16524
49	0,00030	0,07015	0,01307	0,33957	0,03943	1,02442	0,03835	0,04157
50	0,00270	0,03014	0,00119	0,03092	0,00652	0,16939	0,00636	0,12393
51	0,00116	0,00779	0,00029	0,00753	0,00164	0,04261	0,00160	0,12393
52	0,00030	0,02260	0,00131	0,03403	0,00489	0,12705	0,00477	0,12393
53	0,00087	0,02260	0,00131	0,03403	0,00489	0,12705	0,00477	0,08236
54	0,00087	0,02260	0,00131	0,03403	0,00489	0,12705	0,00477	0,04131
55	0,00087	0,01481	0,00057	0,01481	0,00325	0,08444	0,00317	0,83138
56	0,00057	0,00779	0,00167	0,04339	0,00164	0,04261	0,00159	0,26682
57	0,00030	0,05014	0,01200	0,31177	0,03299	0,85711	0,03200	0,26682
58	0,00193	0,04365	0,01075	0,27929	0,01053	0,27358	0,01027	0,26682
59	0,00168	0,04365	0,01075	0,27929	0,01053	0,27358	0,01027	0,03637
60	0,00168	0,04365	0,01075	0,27929	0,01053	0,27358	0,01027	0,03637
61	0,00168	0,01507	0,00148	0,03845	0,00143	0,03715	0,00140	0,23071
62	0,00058	0,01507	0,00148	0,03845	0,00143	0,03715	0,00140	0,23071
63	0,00058	0,04573	0,00929	0,24136	0,00910	0,23642	0,00888	0,04105
64	0,00176	0,04573	0,00929	0,24136	0,00910	0,23642	0,00888	0,18940
65	0,00176	0,00779	0,00166	0,04313	0,00162	0,04209	0,00158	0,01793
66	0,00030	0,04858	0,00764	0,19849	0,00748	0,19434	0,00729	0,17173
67	0,00187	0,01923	0,00072	0,01871	0,00072	0,01871	0,00069	0,04105
68	0,00074	0,03040	0,00692	0,17979	0,00678	0,17615	0,00661	0,02416
69	0,00117	0,04391	0,00166	0,04313	0,00162	0,04209	0,00158	0,56976
70	0,00169	0,02416	0,00093	0,02416	0,00093	0,02416	0,00093	0,56976

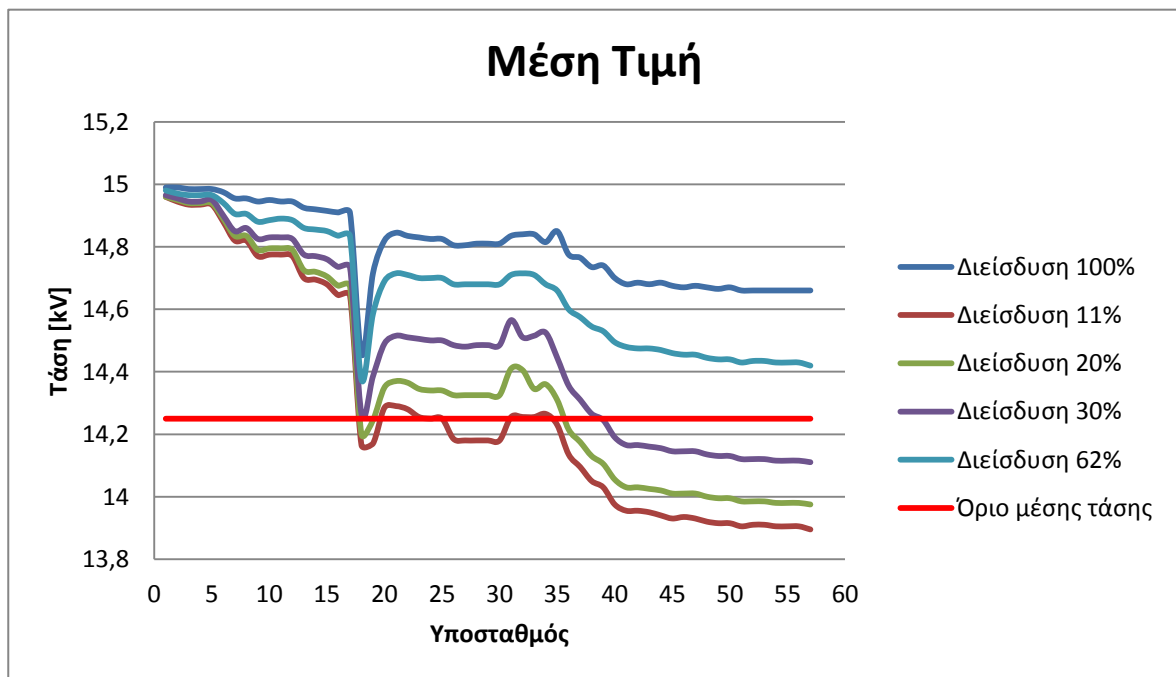
71	0,00093	0,02312	0,00130	0,03377	0,02263	0,58794	0,02193	0,04131
72	0,00089	0,02312	0,00130	0,03377	0,02263	0,58794	0,02193	0,52923
73	0,00089	0,00779	0,00167	0,04339	0,00167	0,04339	0,00159	0,48922
74	0,00030	0,01533	0,00059	0,01533	0,02105	0,54690	0,02037	0,04131
75	0,00059	0,00779	0,00029	0,00753	0,01947	0,50585	0,01883	0,83450
76	0,00030	0,00779	0,00029	0,00753	0,00163	0,04235	0,00159	0,02078
77	0,00030	0,18602	0,00709	0,18420	0,00600	0,15588	0,03212	0,80886
78	0,00716	0,00364	0,00014	0,00364	0,00082	0,02130	0,00080	0,04157
79	0,00014	0,18264	0,00696	0,18083	0,00610	0,15848	0,03113	0,77267
80	0,00703	0,00779	0,00029	0,00753	0,00165	0,04287	0,00160	0,77267
81	0,00030	0,17563	0,00669	0,17381	0,00657	0,17069	0,02974	0,08236
82	0,00676	0,17563	0,00669	0,17381	0,00657	0,17069	0,02974	0,69057
83	0,00676	0,01481	0,00057	0,01481	0,00058	0,01507	0,00317	0,69057
84	0,00057	0,16238	0,00618	0,16056	0,00607	0,15770	0,02658	0,69057
85	0,00625	0,16238	0,00618	0,16056	0,00607	0,15770	0,02658	0,04131
86	0,00625	0,16238	0,00618	0,16056	0,00607	0,15770	0,02658	0,64952
87	0,00625	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00159	0,08496
88	0,00030	0,15536	0,00592	0,15381	0,00581	0,15095	0,02500	0,56534
89	0,00598	0,01091	0,00042	0,01091	0,00042	0,01091	0,00327	0,56534
90	0,00042	0,14575	0,00555	0,14419	0,00545	0,14160	0,02176	0,02052
91	0,00561	0,14575	0,00555	0,14419	0,00545	0,14160	0,02176	0,54508
92	0,00561	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00079	0,54508
93	0,00014	0,14263	0,00543	0,14108	0,00533	0,13848	0,02098	0,08210
94	0,00549	0,14263	0,00543	0,14108	0,00533	0,13848	0,02098	0,46376
95	0,00549	0,01481	0,00057	0,01481	0,00057	0,01481	0,00316	0,13068
96	0,00057	0,12990	0,00495	0,12860	0,00486	0,12627	0,01785	0,33489
97	0,00500	0,02442	0,00094	0,02442	0,00091	0,02364	0,00503	0,13900
98	0,00094	0,11068	0,00421	0,10938	0,00413	0,10730	0,01289	0,20317
99	0,00426	0,01273	0,00049	0,01273	0,00049	0,01273	0,00535	0,03144
100	0,00049	0,10158	0,00386	0,10029	0,00379	0,09847	0,00782	0,17199
101	0,00391	0,02416	0,00092	0,02390	0,00091	0,02364	0,00121	0,13068
102	0,00093	0,08600	0,00327	0,08496	0,00321	0,08340	0,00662	0,07015
103	0,00331	0,02442	0,00093	0,02416	0,00091	0,02364	0,00503	0,07015
104	0,00094	0,07560	0,00287	0,07456	0,00282	0,07327	0,00270	0,01065
105	0,00291	0,07560	0,00287	0,07456	0,00282	0,07327	0,00270	0,00338
106	0,00291	0,01143	0,00043	0,01117	0,00043	0,01117	0,00041	0,00727
107	0,00044	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00013	0,06781
108	0,00014	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00028	0,00182
109	0,00030	0,07301	0,00278	0,07223	0,00272	0,07067	0,00261	0,06755
110	0,00281	0,00208	0,00008	0,00208	0,00008	0,00208	0,00007	0,00073
111	0,00008	0,07249	0,00276	0,07171	0,00270	0,07015	0,00260	0,06703
112	0,00279	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00003	0,00727
113	0,00030	0,07223	0,00274	0,07119	0,00269	0,06989	0,00258	0,06729
114	0,00278	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00028	0,00727
115	0,00030	0,07223	0,00275	0,07145	0,00270	0,07015	0,00259	0,00727
116	0,00278	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00028	0,00727
117	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00028	0,06833

118	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00030	0,00779	0,00028	0,00727
119	0,00030	0,07353	0,00280	0,07275	0,00274	0,07119	0,00263	0,07015
120	0,00283	0,00779	0,00029	0,00753	0,00029	0,00753	0,00028	0,01403
121	0,00030	0,07534	0,00287	0,07456	0,00282	0,07327	0,00270	0,07534
122	0,00290	0,01481	0,00057	0,01481	0,00056	0,01455	0,00054	0,00338
123	0,00057	0,08080	0,00308	0,08002	0,00302	0,07846	0,00290	0,07664
124	0,00311	0,00364	0,00014	0,00364	0,00014	0,00364	0,00013	0,07664
125	0,00014	0,08236	0,00314	0,08158	0,00300	0,07794	0,00295	0,07664
126	0,00773	0,08236	0,00314	0,08158	0,00300	0,07794	0,00295	0,01455
127	0,00014	0,08236	0,00314	0,08158	0,00300	0,07794	0,00295	0,08496
128	0,00782	0,01559	0,00059	0,01533	0,00059	0,01533	0,00056	0,08496
129	0,00782	0,09093	0,00347	0,09015	0,00340	0,08833	0,00327	0,08963
130	0,00782	0,09093	0,00347	0,09015	0,00340	0,08833	0,00327	2,55053
131	0,00060	0,09587	0,00347	0,09015	0,00359	0,09327	0,00345	2,56196

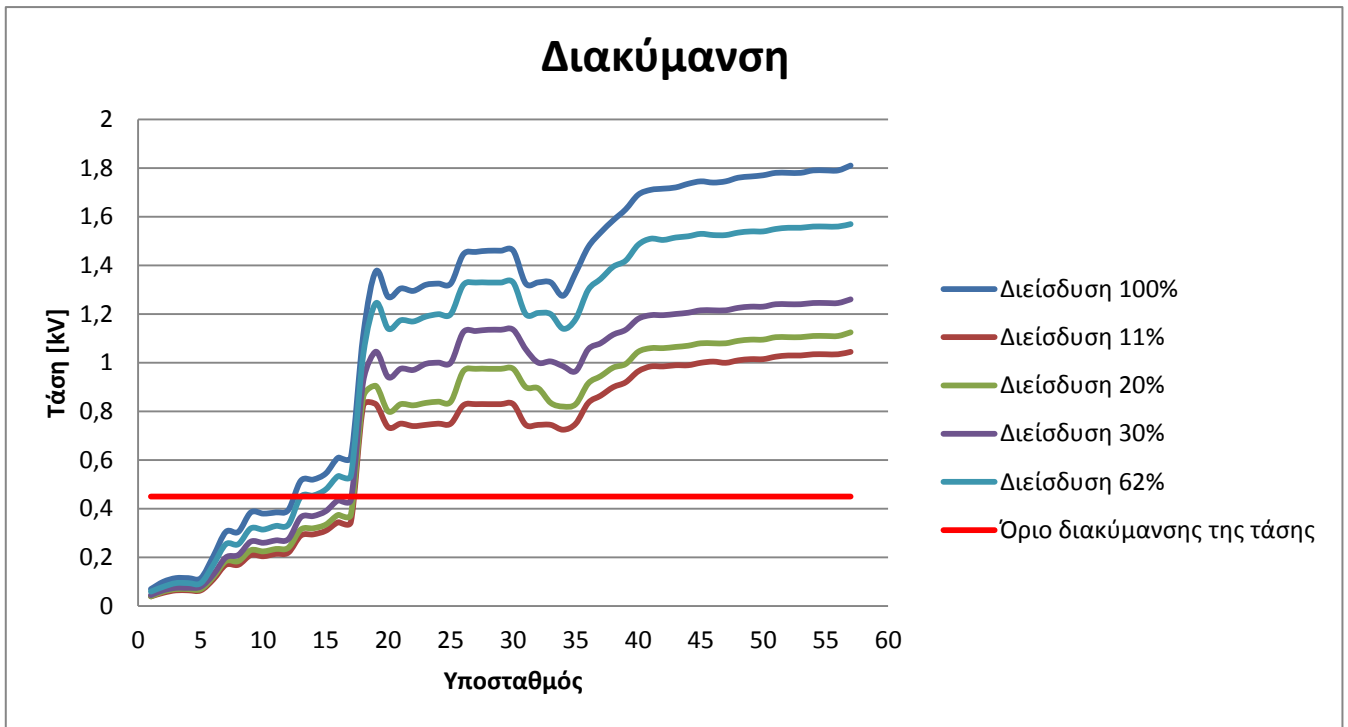
Πίνακας 7.14

Το θερμικό όριο των γραμμών ωστόσο βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων.

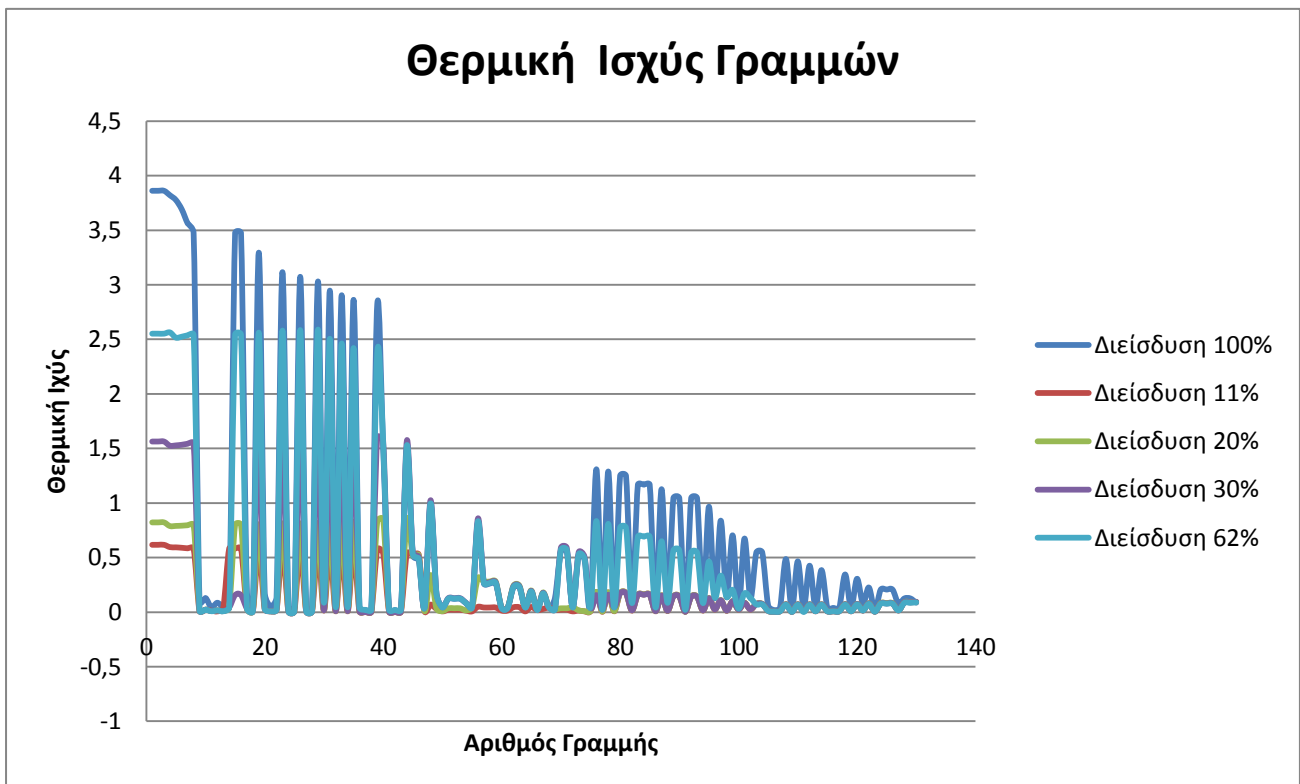
Γραφική απεικόνιση μεγεθών



Διάγραμμα 7.5



Διάγραμμα 7.6



Διάγραμμα 7.7

## 8. Συμπεράσματα - Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν οι επιπτώσεις της σύνδεσης φωτοβολταϊκών στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ως διεσπαρμένη παραγωγή, εξετάζοντας τη μεταβολή χαρακτηριστικών μεγεθών όπως οι τάσεις των ζυγών και η ροή ισχύος στις γραμμές. Για την πραγματοποίηση της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δυο γραμμές διανομής με πολύ διαφορετικά χαρακτηριστικά: μια αγροτική γραμμή διανομής, μέρος ενός νησιωτικού δικτύου και μια αστική γραμμή, μέρος του διασυνδεδεμένου συστήματος.

Για την εκτέλεση των ροών φορτίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DIgSILENT PowerFactory. Πραγματοποιήθηκαν 2 Σενάρια. Στο πρώτο σενάριο είχαμε ομοιόμορφη διείσδυση των φωτοβολταϊκών σε ποσοστό 100% ενώ στο δεύτερο σενάριο είχαμε διείσδυση των φωτοβολταϊκών στους υποσταθμούς που βρίσκονταν στην αρχή στη μέση και στο τέλος της γραμμής. Θεωρήσαμε για τη διείσδυση των φωτοβολταϊκών ότι το φορτίο των ζυγών ήταν το ελάχιστο φορτίο που παρατηρείται κατά τη διάρκεια του έτους. Για να βρούμε τη μέγιστη πτώση τάσης στους υποσταθμούς τοποθετήσαμε το μέγιστο φορτίο που παρατηρείται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Με τον τρόπο αυτό μπορέσαμε να μελετήσουμε ακραίες περιπτώσεις.

Παρατηρήσαμε ότι στο δίκτυο της Κατερίνης η οποία είναι αστική γραμμή και αποτελεί μέρος του διασυνδεδεμένου συστήματος υπάρχει πολύ μεγάλη δυνατότητα διείσδυσης φωτοβολταϊκών. Τα όρια τόσο των τάσεων όσο και της θερμικής ισχύος των γραμμών διατηρούνται εντός των επιτρεπόμενων ορίων ακόμα και στο πιο ακραίο σενάριο της ομοιόμορφης διείσδυσης φωτοβολταϊκών και μάλιστα σε ποσοστό ακόμη και 100%.

Από την άλλη στο δίκτυο της Ικαρίας παρατηρούνται παραβιάσεις των τεχνικών περιορισμών της τάσης. Αρχικά, διαπιστώνεται ότι υπάρχει μεγάλη διακύμανση. Οι πιο απομακρυσμένοι υποσταθμοί υπόκεινται στη μεγαλύτερη καταπόνηση. Η μέση τιμή της τάσης παρουσιάζει προβλήματα επίσης. Παρατηρούμε ότι η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά προκαλεί μείωση της ισχύος που εισέρχεται στο δίκτυο καθώς οι ανάγκες των φορτίων ικανοποιούνται τοπικά (διεσπαρμένη παραγωγή).



## Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η αύξηση της διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και η αλληλεπίδρασή τους παρουσιάζει ιδιαίτερα αυξανόμενο ενδιαφέρον. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αναμένεται να διαδραματίσουν καταλυτικό ρόλο στα επόμενα χρόνια τόσο σε ενεργειακό όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάστηκαν δυο δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Μια επόμενη έρευνα θα μπορούσε να διευρύνει την ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής προσθέτοντας κι άλλες μονάδες όπως για παράδειγμα κυψέλες καυσίμου, παραγωγή από βιομάζα ή σύνδεση αιολικών πάρκων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διαπιστώθηκε ότι οι αγροτικές γραμμές παρουσιάζουν προβλήματα που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο περισσότερης μελέτης.

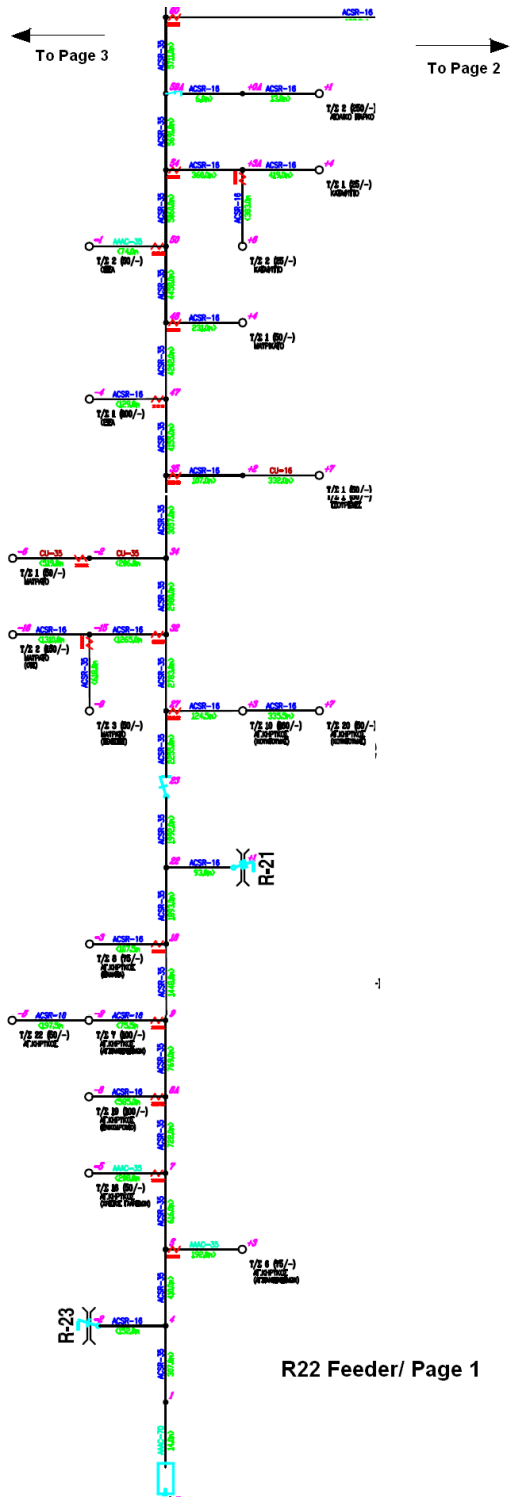
Παράλληλα, στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε μόνο η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε δυο γραμμές διανομής ηλεκτρισμού. Επόμενες ερευνητικές εργασίες θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στη μελέτη δυναμικών φαινομένων για αυτόνομα συστήματα. Το λογισμικό DIgSILENT PowerFactory αποτελεί την ιδανική λύση για τέτοιου είδους εφαρμογές.

## Βιβλιογραφία

- [1] Μιχ. Π. Παπαδόπουλος, 1994, *Δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*, Τόμος Ι , εκδόσεις ΕΜΠ
- [2] Σ. Παπαθανασίου, 2008, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [3] Β.Κ. Παπαδιάς, 1985, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*, Εκδόσεις ΕΜΠ
- [4] «Ηλεκτρική Οικονομία»
- [5] DigSILENT PowerFactory, User's Manual 13.2
- [6] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), [www.cres.gr](http://www.cres.gr), τελευταία πρόσβαση στις 13/3/2012
- [7] <http://artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Display/artemis.ntua.ece/DT2008-0223>, τελευταία πρόσβαση στις 14/3/2012
- [8] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07000461>, τελευταία πρόσβαση στις 14/3/2012
- [9] <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=286>, τελευταία πρόσβαση στις 15/3/2012
- [10] <http://www.selasenergy.gr/>, τελευταία πρόσβαση στις 15/3/2012
- [11] <http://www.rglsolutions>, τελευταία πρόσβαση στις 16/3/2012
- [12] <http://www.eng.ucy.acy>, τελευταία πρόσβαση στις 16/3/2012

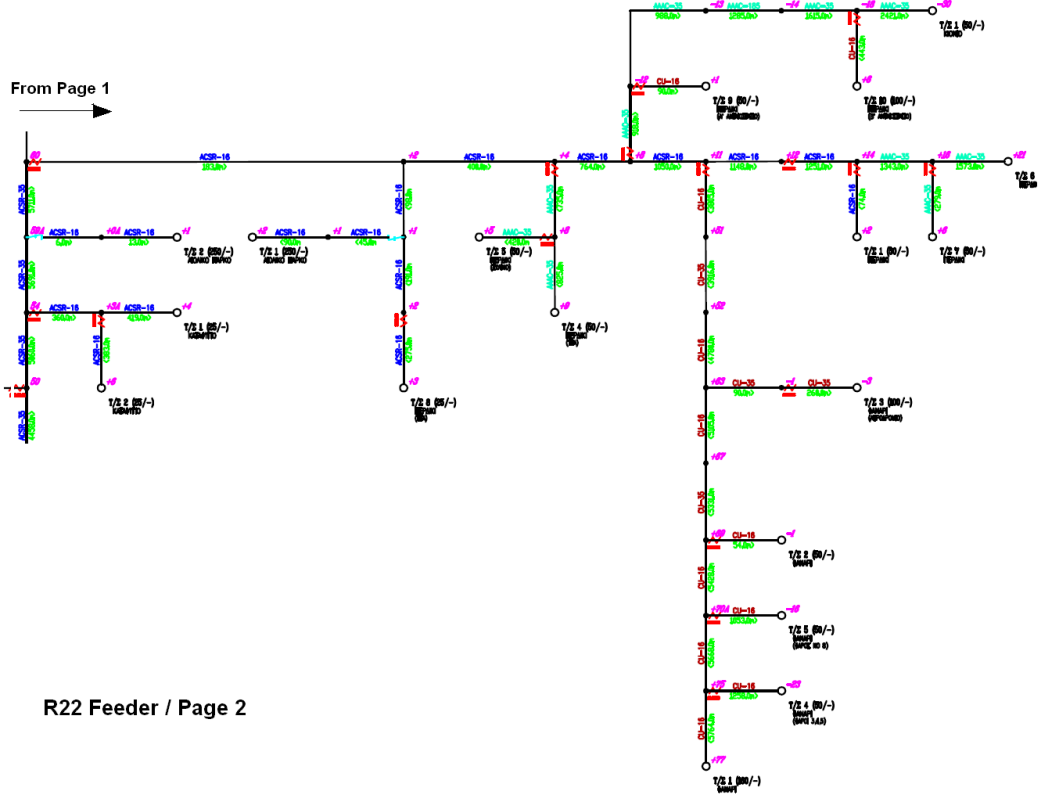
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΔΙΚΤΥΟ Α

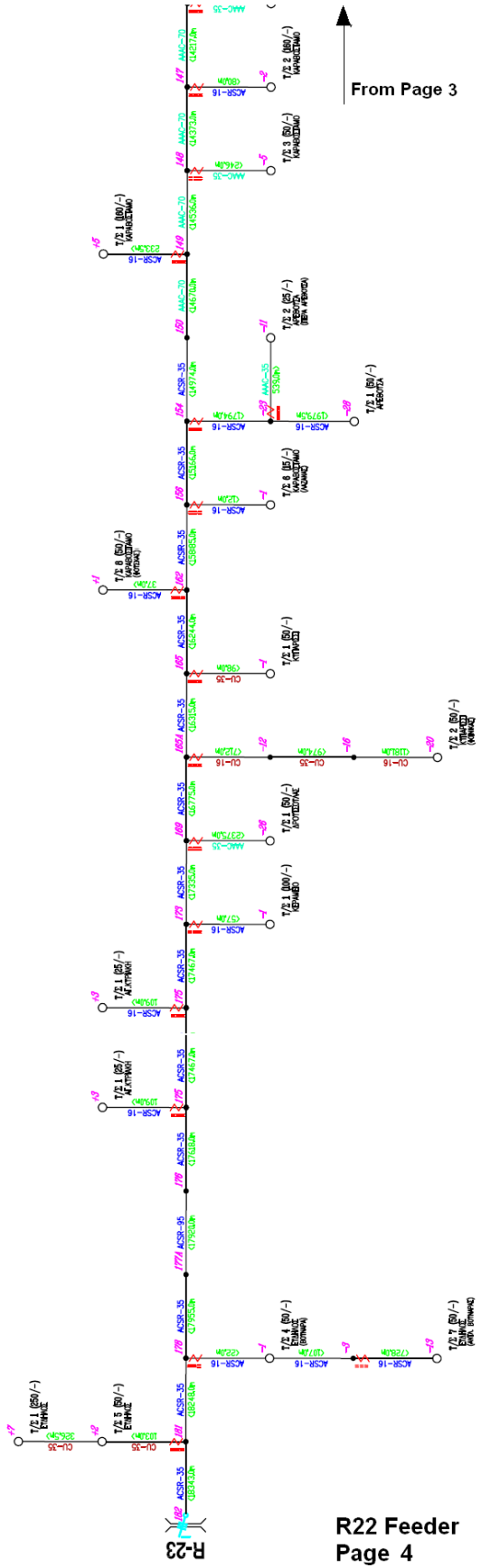




From Page 1



R22 Feeder / Page 2



From Page 3

R22 Feeder  
Page 4



