



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*Μοντελοποίηση έξυπνων δικτύων διανομής με
κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους και έξυπνα
φορτία*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Χατζής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αναπληρωτής Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Χανιά, Αύγουστος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή Φώτιο Κανέλλο για την βοήθεια, την καθοδήγηση και τις συμβουλές του κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το έξυπνο δίκτυο. Τα κύρια στοιχεία του έξυπνου δικτύου είναι: το σύστημα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μπαταρίες, τα έξυπνα φορτία και το δίκτυο διανομής ενέργειας. Επίπλέον, γίνεται η μοντελοποίηση και προσομοίωση λειτουργίας ενός έξυπνου δικτύου διασυνδεδεμένου με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετικά σενάρια παραγωγής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το δίκτυο αντίστοιχα.

ABSTRACT

This thesis presents and analyses, the structural elements that make up the smart grid. The main components of the smart grid are: the renewable energy generation system, the battery electricity storage system, the smart loads and the energy distribution network. What is more, the operation of a smart grid, interconnected with power grid, is modeled and simulated in different scenarios of electricity generation and supply from renewable energy sources and the grid respectively.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Παραγωγή ενέργειας με φωτοβολταϊκές συστοιχίες στο έξυπνο δίκτυο	
1.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου.....	14
1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	15
1.3 Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) και τεχνικές διαμόρφωσης παλμών..	18
1.4 Εναλλακτικοί αλγόριθμοι MPPT.....	20
1.5 Εξάρτηση MPP από καιρικές συνθήκες.....	23
1.6 Αντιστροφέας.....	25
1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων....	29
1.8 Διατάξεις φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	31
2. Παραγωγή ενέργειας με ανεμογεννήτριες στο έξυπνο δίκτυο.....	34
2.1 Χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας.....	34
2.2 Ταχύτητα του ανέμου.....	34
2.3 Μεταβολή της ταχύτητας ανέμου ανάλογα το ύψος.....	35
2.4 Ριπή ανέμου.....	36
2.5 Κατανομή Weibull.....	36
2.6 Η ενέργεια ανέμου.....	37
2.7 Τοποθεσία εγκατάστασης ανεμογεννητριών.....	38
2.8 Ανεμογεννήτριες.....	39
2.8.1 Δομικά στοιχεία.....	39
2.8.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	43
3. Αποθήκευση ενέργειας στο έξυπνο δίκτυο.....	49
3.1 Δομή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.....	49
3.2 Χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.....	52
3.3 Σημεία τοποθέτησης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες.....	54
3.4 Επίλυση προβλημάτων στην ποιότητα ισχύος.....	55
3.5 Λειτουργίες της αποθηκευτικής μονάδας ενέργειας.....	59
4. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στο έξυπνο δίκτυο.....	61
4.1 Δομή του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	61
4.2 Τύποι συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	78
5. Έξυπνα φορτία στο έξυπνο δίκτυο.....	82
6. Περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών του έξυπνου δικτύου.....	84
7. Μοντέλο και έλεγχος των συστημάτων του έξυπνου δικτύου.....	88
7.1 Περιγραφή του μοντέλου του έξυπνου δικτύου.....	88
7.2 Έλεγχος της ανεμογεννήτριας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.....	89
7.3 Έλεγχος του BESS.....	91
7.4 Έλεγχος του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.....	92
8. Αποτελέσματα προσομοίωσης του έξυπνου δικτύου.....	93
8.1 Σενάρια λειτουργίας του έξυπνου δικτύου.....	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου (Si – solar cell)

Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος διόδου πυριτίου

Σχήμα 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου με προσπίπτουσα ακτινοβολία

Σχήμα 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς προσπίπτουσα ακτινοβολία

Σχήμα 1.5 Μοντέλο μιας διόδου

Σχήμα 1.6 Pulse Width Modulation

Σχήμα 1.7 On-time Pulse Frequency Modulation

Σχήμα 1.8 Απόδοση PWM και PFM σε συνάρτηση με το φορτίο

Σχήμα 1.9 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Perturb and Observe

Σχήμα 1.10 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Incremental Conductance

Σχήμα 1.11 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Fractional Open – Circuit Voltage

Σχήμα 1.12 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Fractional Short – Circuit Current

Σχήμα 1.13 Καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία

Σχήμα 1.14 Καμπύλες P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία

Σχήμα 1.15 Καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία

Σχήμα 1.16 Καμπύλες P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία

Σχήμα 1.17 Central Inverter

Σχήμα 1.18 String Inverter

Σχήμα 1.19 Micro Inverter

Σχήμα 1.20 Square Wave, Sine Wave and Modified Sine Wave Inverter

Σχήμα 1.21 Current Source Inverter

Σχήμα 1.22 Voltage Source Inverter

Σχήμα 1.23 Καμπύλη ρεύματος - τάσης (I-V)

Σχήμα 1.24 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Σχήμα 1.25 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Σχήμα 2.1 Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull

Σχήμα 2.2 Δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

Σχήμα 2.3 Τομή γεννήτριας συνεχούς ρεύματος

Σχήμα 2.4 Τομή σύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος

Σχήμα 2.5 Τομή ασύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος

Σχήμα 2.6 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Σχήμα 2.7 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Σχήμα 2.8 Ανεμογεννήτρια με τον δρομέα τοποθετημένο προς την κατεύθυνση του ανέμου

Σχήμα 2.9 Ανεμογεννήτρια με τον δρομέα τοποθετημένο προς την κατεύθυνση αντίθετη του ανέμου

Σχήμα 2.10 Ανεμογεννήτρια με ένα πτερύγιο

Σχήμα 2.11 Ανεμογεννήτρια με δύο πτερύγια

Σχήμα 2.12 Ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια

Σχήμα 3.1 Δομή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Σχήμα 3.2 Δομή του συστήματος μπαταριών

Σχήμα 3.3 Λειτουργίες του Controller

Σχήμα 3.4 Δομή SCADA

Σχήμα 3.5 Δομή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Σχήμα 3.6 Voltage Dip

Σχήμα 3.7 Voltage Swells

Σχήμα 3.8 Transients

Σχήμα 3.9 Balanced and Unbalanced Voltage

Σχήμα 3.10 Harmonics

Σχήμα 3.11 Voltage Interruption

Σχήμα 3.12 Voltage fluctuations

Σχήμα 4.1 Δομικά στοιχεία μετασχηματιστή

Σχήμα 4.2 Buchholz Relay

Σχήμα 4.3 Διακόπτης κυκλώματος κενού

Σχήμα 4.4 Απαγωγέας κεραυνών

Σχήμα 4.5 Αποζεύκτης

Σχήμα 4.6 Μονωτήρας

Σχήμα 4.7 Ζυγός

Σχήμα 4.8 Συστοιχία πυκνωτών

Σχήμα 4.9 Γείωση

Σχήμα 4.10 Πίνακας Διανομής

Σχήμα 4.11 Διάταξη περίφραξης

Σχήμα 4.12 Πύργοι μέσης και χαμηλής τάσης

Σχήμα 4.13 Διαφορετικοί τύποι πύργων χαμηλής και μέσης τάσης

Σχήμα 4.14 Αγωγός χαλκού

Σχήμα 4.15 Αγωγός αλουμινίου

Σχήμα 4.16 Αγωγός ACSR

Σχήμα 4.17 Τριπολικά καλώδια NAEBA/NAEKEBA

Σχήμα 4.18 Μονοπολικά καλώδια N2XS2Y/NA2XS2Y

Σχήμα 4.19 Σύνδεσμος καλωδίων

Σχήμα 4.20 Δομή ακροκιβώτιου

Σχήμα 4.21 Ακτινικό δίκτυο διανομής

Σχήμα 4.22 Κυκλικό δίκτυο διανομής

Σχήμα 4.23 Βροχοειδές δίκτυο διανομής

Σχήμα 7.1 Μοντέλο του έξυπνου δικτύου

Σχήμα 7.2 Κύκλωμα d άξονα

Σχήμα 7.3 Κύκλωμα q άξονα

Σχήμα 7.4 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization

Σχήμα 8.1 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.2 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.3 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.4 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.5 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.6 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.7 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (1ο Σενάριο)

Σχήμα 8.8 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.9 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.10 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.11 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.12 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.13 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.14 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (2ο Σενάριο)

Σχήμα 8.15 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.16 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.17 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.18 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.19 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.20 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (3ο Σενάριο)

Σχήμα 8.21 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (3ο Σενάριο)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Μεταβλητές ισοδύναμου κυκλώματος

Πίνακας 4.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού ACSR

Πίνακας 4.2 Θερμικά χαρακτηριστικά αγωγού ACSR

Πίνακας 4.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού CU

Πίνακας 4.4 Θερμικά χαρακτηριστικά αγωγού CU

Πίνακας 4.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού AL

Πίνακας 4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των καλωδίων NA2XS2Y και
NAEKEBA

Πίνακας 4.7 Θερμικά χαρακτηριστικά των καλωδίων NA2XS2Y και
NAEKEBA

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ – ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPP	Maximum Power Point
PWM	Pulse Width Modulation
PFM	Pulse Frequency Modulation
P&O	Perturb & Observe
IC	Incremental Conductance
MPWM	Multiple Pulse Width Modulation
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
MSPWM	Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation
SC	Short Circuit
OC	Open Circuit
BESS	Battery Energy Storage System
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
FSIG	Fixed-Speed Induction Generator
DFIG	Double-Fed Induction Generator
EESG	Electrically Excited Synchronous Generator
PCS	Power Conversion System
EMS	Energy Management System
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HMI	Human Machine Interface
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition System
SOC	State of Charge
THD	Total Harmonic Distortion
ACSR	Aluminium conductor steel-reinforced
CU	Copper
AL	Aluminium

PVC	Polyvinyl Chloride
PE	Polyethylene
XLPE	Cross Linked Polyethylene
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
PSO	Particle Swarm Optimization
PLL	Phase-Locked Loop

Περιγραφή του Έξυπνου Δικτύου

Τα έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν την πιο εξελιγμένη μορφή δικτύων διανομής. Μέσω των προηγμένων τεχνολογιών και ηλεκτρονικών διατάξεων, διαχειρίζονται και διανέμουν την ενέργεια στο δίκτυο κατά βέλτιστο τρόπο. Αποτελούνται, από διαφορετικά συστήματα, με το κάθε ένα να εκτελεί μια ξεχωριστή λειτουργία. Ο συνδυασμός όλων των συστημάτων απαρτίζει το έξυπνο δίκτυο.

Το σύστημα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές συνιστά ένα υβριδικό σύστημα που αποτελείται από το φωτοβολταϊκό σύστημα και την ανεμογεννήτρια. Στο εν λόγω δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σύνδεση, των φωτοβολταϊκών πλαισίων με έναν μετατροπέα ανύψωσης, με σκοπό την σύνδεση τους στο DC δίκτυο. Για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος MPPT με Incremental Conductance. Στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας η τάση εξόδου είναι AC, οπότε απαραίτητη είναι η χρήση ενός μετατροπέα για την σύνδεση στο DC δίκτυο. Για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος MPPT Perturb and Observe.

Το σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες ιόντων λιθίου. Το σύστημα μπαταριών είναι συνδεδεμένο με ένα αμφίδρομο μετατροπέα, για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο στην περίπτωση εκφόρτισης ή απορρόφησης στην περίπτωση φόρτισης.

Τα έξυπνα φορτία είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζουν την κατανάλωση ενέργειας, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Αλληλοεπιδρούν με το δίκτυο ενέργειας στέλνοντας και λαμβάνοντας δεδομένα σχετικά με την ζήτηση και την διαθεσιμότητα ενέργειας, προσαρμόζοντας ανάλογα την λειτουργία τους.

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κομβικό στοιχείο στην δημιουργία του έξυπνου δικτύου. Επιτρέπει την αποτελεσματική, αξιόπιστη και εντός των κατάλληλων προδιαγραφών τροφοδοσία των φορτίων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Μιας και το έξυπνο δίκτυο είναι DC, χρησιμοποιείται αντιστροφέας σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας για την σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

1. Παραγωγή ενέργειας με φωτοβολταϊκές συστοιχίες στο έξυπνο δίκτυο

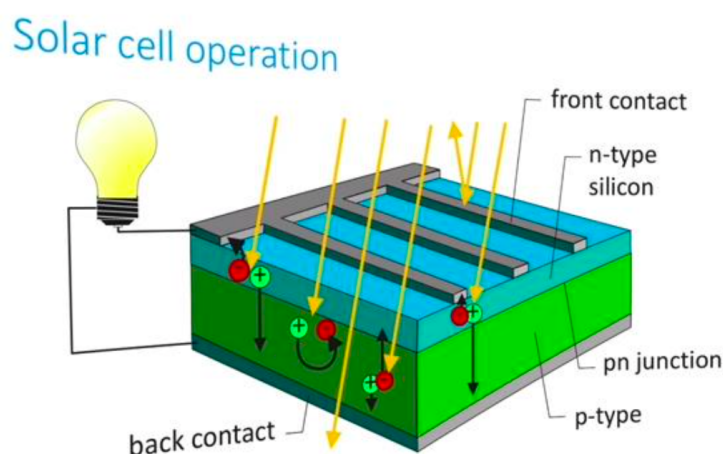
Στο τρέχον κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, με σκοπό να αναλυθεί η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων που αποτελούν βασικό μέρος του έξυπνου δικτύου.

1.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η διαδικασία κατά την οποία μετατρέπεται το φως σε ηλεκτρική ενέργεια ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει μέρος στα φωτοβολταϊκά κύτταρα (Solar cells). Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούνται από p-τύπου και n-τύπου ημιαγωγούς που κατά την σύνδεση τους δημιουργούν μια p-n ένωση. Στην περιοχή της p-n ένωσης σχηματίζεται

ένα ηλεκτρικό πεδίο, καθώς τα ηλεκτρόνια μετακινούνται στην p-πλευρά και οι οπές στην n-πλευρά.

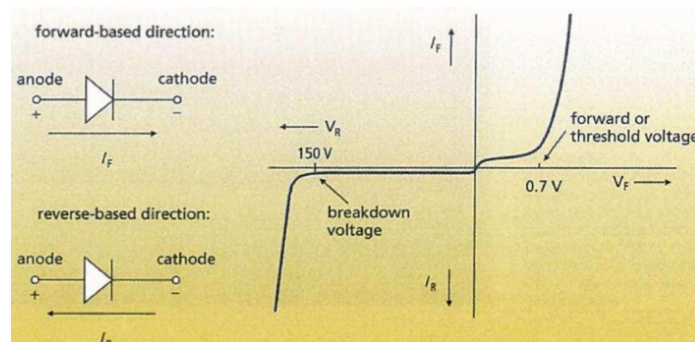
Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν την δυνατότητα να απορροφούν την κβαντισμένη ενέργεια του φωτός του ηλίου. Όταν η ενέργεια αυτή είναι υψηλότερη από το ενεργειακό χάσμα, μεταφέρεται ενέργεια στα ηλεκτρόνια που με την σειρά τους μεταβαίνουν στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω μια οπή. Κατά την διαδικασία αυτή δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Βέβαια, λόγω της ύπαρξης του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια τείνουν να μετακινηθούν προς την n-πλευρά και οι οπές προς την p-πλευρά. Έτσι, με αυτή την κατευθυνόμενη κίνηση των ηλεκτρονίων και οπών δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα στο φωτοβολταϊκό κύτταρο.



Σχήμα 1.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου (Si – solar cell)

1.2 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί σαν μια δίοδο. Όπως και στην δίοδο υπάρχουν δύο τρόποι πολώσεων: η ορθή και η ανάστροφη πόλωση. Στην πρώτη περίπτωση η άνοδος έχει θετικό δυναμικό και η κάθοδος αρνητικό δυναμικό και η χαρακτηριστική της βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Αν η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, δεν γίνεται η διέλευση του ρεύματος με την χαρακτηριστική της να είναι τρίτο τεταρτημόριο.



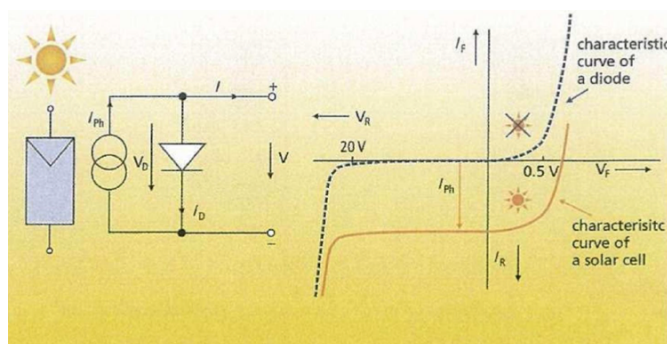
Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – ρεύματος διόδου πυριτίου

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

V	Τάση ηλιακού συσσωρευτή
V_D	Τάση διόδου
V_t	Τάση θερμοκρασίας
I	Ρεύμα ηλιακού συλλέκτη
I_D	Ρεύμα διόδου
I_0	Ρεύμα κορεσμού διόδου στην ανάστροφη πόλωση
I_{ph}	Φωτόρευμα
I_p	Ρεύμα της παράλληλης αντίστασης
m	Σταθερά διόδου
c_0	Συντελεστής φωτορεύματος
G	Ηλιακή ακτινοβολία
R_p	Παράλληλη αντίσταση
R_s	Αντίσταση σε σειρά

Πίνακας 1.1 Μεταβλητές ισοδύναμου κυκλώματος

Στην περίπτωση που το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, το ισοδύναμο κύκλωμα περιλαμβάνει την πηγή ισχύος που παράγει το φωτόρευμα και την διόδο. Η τιμή της έντασης του φωτορεύματος είναι ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας.

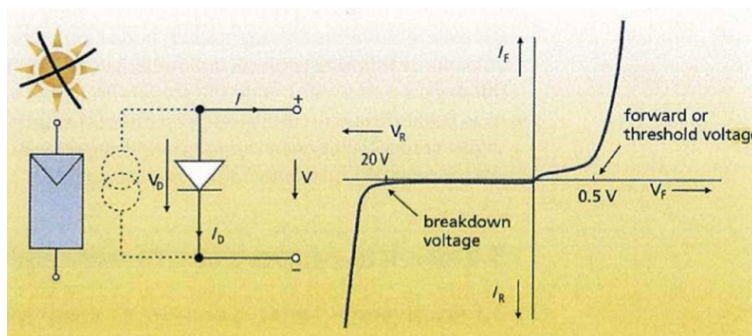


Σχήμα 1.3 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου με προσπίπτουσα ακτινοβολία

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα σε αυτή την περίπτωση είναι οι παρακάτω.

$$\begin{aligned}
 V &= V_D \\
 I_{ph} &= c_0 G \\
 I &= I_{ph} - I_D
 \end{aligned}$$

Αν το φωτοβολταϊκό στοιχείο δεν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία, το ισοδύναμο κύκλωμα περιλαμβάνει μόνο την διόδο, χωρίς την πηγή ισχύος.



Σχήμα 1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου χωρίς προσπίπτουσα ακτινοβολία

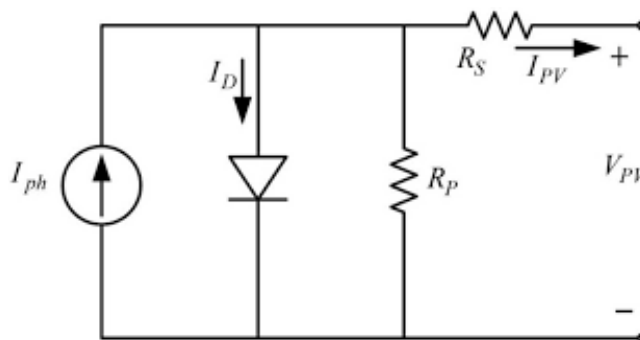
Οι εξισώσεις που περιγράφουν το κύκλωμα στην περίπτωση χωρίς την προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι το εξής:

$$V = V_D$$

και

$$I = -I_D = -I_0(e^{\frac{V}{mV_t}} - 1)$$

Ένα από τα πιο διαδεδομένα και πιο απλοποιημένα μοντέλα για τη περιγραφή ενός ισοδύναμου κυκλώματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου, είναι το μοντέλο μιας διόδου. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται για υπολογισμούς, αλλά και την κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για ακριβέστερες προσομοιώσεις της λειτουργίας, γίνεται χρήση περίπλοκων μοντέλων.



Σχήμα 1.5 Μοντέλο μιας διόδου

Εκτός από την παρουσία της πηγής ρεύματος και της διόδου, περιλαμβάνονται και δύο αντιστάσεις, η R_p και R_s αντίστοιχα. Η πτώση τάσης στην έξοδο, οφείλεται στην σε σειρά αντίσταση R_s , η τιμή της οποίας είναι μερικά mΩ, και στην παράλληλη αντίσταση R_p , η τιμή της οποίας είναι υψηλή συγκριτικά με την R_s , ενώ χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών των ρευμάτων διαρροής. Επιπλέον, με την τιμή της R_s μπορεί να γίνει υπολογισμός των χαρακτηριστικών τάσης – ρεύματος για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

1.3 Εύρεση σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) και τεχνικές διαμόρφωσης παλμών

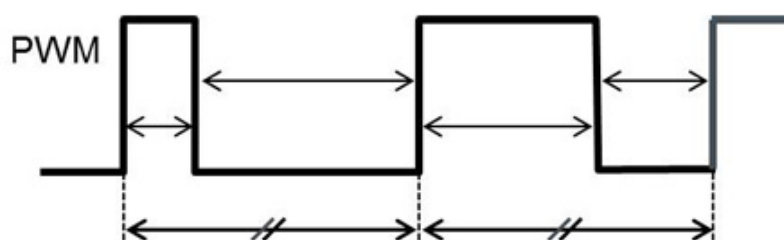
Τα τελευταία χρόνια, καθώς παρουσιάστηκε μεγάλη αύξηση στις απαιτήσεις της ενέργειας ανά τον κόσμο, δημιουργήθηκε η ανάγκη για τη ανάπτυξη μεθόδων, όπου τα φωτοβολταϊκά να παράγουν την μέγιστη ισχύ. Οι τεχνικές ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος ονομάζονται Maximum Power Point Tracking (MPPT). Η λειτουργία των τεχνικών αυτών γίνεται με την μεταβολή της τάσης λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, ώστε η ισχύς που αποδίδεται να είναι τελικά μέγιστη. Βέβαια, για την δημιουργία των μεθόδων MPPT απαραίτητη ήταν η ανάπτυξη ισοδύναμων κυκλωματικών μοντέλων για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με κύριο σκοπό την προσέγγιση της φυσικής τους λειτουργίας με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Όσο καλύτερη είναι ακρίβεια ενός μοντέλου, τόσο ακριβέστερες είναι οι μετρήσεις που λαμβάνονται και έτσι καλύτερος ο προσδιορισμός του σημείου μέγιστης ισχύος MPP (Maximum Power Point) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας.

Για την σύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το έξυπνο δίκτυο απαιτείται ένας Boost Converter, ώστε να επιτυγχάνεται στην έξοδο η κατάλληλη τάση δικτύου. Οι μέθοδοι MPPT μεταβάλλουν κατάλληλα το Duty Cycle, ώστε η τάση λειτουργίας στην είσοδο να ρυθμιστεί κατάλληλα για να αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Έτσι, προκειμένου να ελέγχεται κατάλληλα η λειτουργία του κυκλώματος, χρησιμοποιείται είτε η διαμόρφωση πλάτους (PWM) του παλμού είτε διαμόρφωση συχνότητας παλμού (PFM) ανάλογα τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής:

Pulse Width Modulation (PWM)

Αποτελεί την πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδο ελέγχου τάσης. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στην παραγωγή παλμών σε σταθερούς κύκλους και αλλαγή του πλάτους ανάλογα με την επιθυμητή τιμή εξόδου. Αποτελείται από δύο τμήματα, το τμήμα Off όπου η τιμή της κυματομορφή είναι μηδέν και το τμήμα On όπου η κυματομορφή παίρνει την μέγιστη τιμή. Ο έλεγχος της απαιτούμενης ισχύς εξόδου γίνεται με την ρύθμιση του λόγου On και Off, που ονομάζεται κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle).



The cycle remains constant with a variable on/off time ratio

Σχήμα 1.6 Pulse Width Modulation

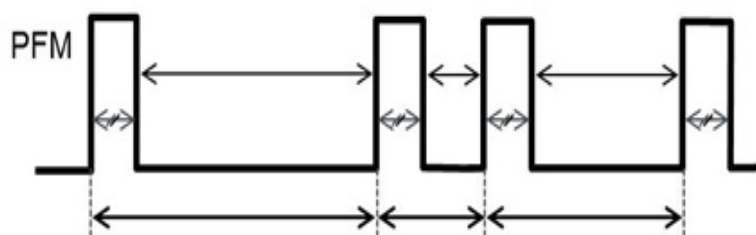
Η σταθερή συχνότητα προσδίδει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα στον έλεγχο με PWM. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ο έλεγχος με PWM είναι ότι λόγω της σταθερής συχνότητας μπορεί να προβλεφθεί ο θόρυβος μεταγωγής (Switching Noise), διευκολύνοντας την διαδικασία φιλτραρίσματος του. Όμως, εξαιτίας της σταθερής συχνότητας ο αριθμός των μεταγωγών (Switching Operations)

παραμένει σταθερός ανεξάρτητα το μέγεθος του φορτίου. Ως αποτέλεσμα, όταν η ισχύς κατανάλωσης του φορτίου είναι χαμηλή, επικρατούν οι απώλειες μεταγωγής (Switching Losses) με την απόδοση του ελέγχου να μειώνεται σημαντικά.

Pulse Frequency Modulation (PFM)

Στην εν λόγω μέθοδο το πλάτος παραμένει σταθερό, ενώ αλλάζει η συχνότητα των παλμών, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ του φορτίου. Διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ο χρόνος λειτουργίας (On time) παραμένει σταθερός και ο χρόνος εκτός λειτουργίας (Off time) μεταβάλλεται. Στην δεύτερη κατηγορία ο χρόνος απενεργοποίησης παραμένει σταθερός, ενώ ο χρόνος λειτουργίας μεταβάλλεται.

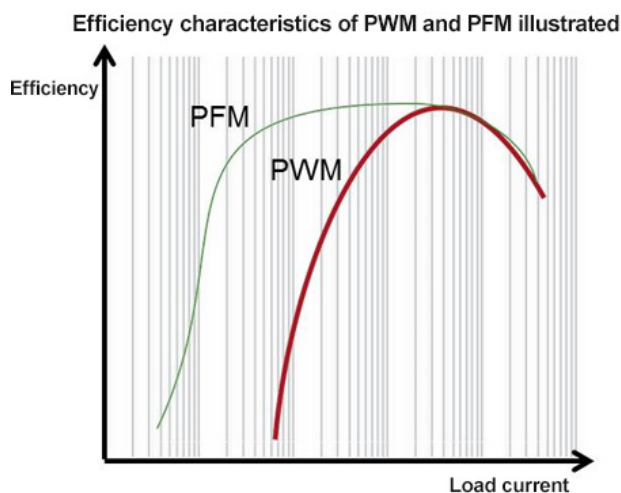
Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι λόγω της μεταβλητής συχνότητας που προσφέρει η συγκεκριμένη μέθοδος, κατά την διάρκεια λειτουργία με μικρό φορτίο, η συχνότητα μεταγωγής μειώνεται με αποτέλεσμα να έχουμε λιγότερες απώλειες μεταγωγής. Επιτυγχάνεται με το τρόπο αυτό υψηλή απόδοση σε μικρά φορτία. Βέβαια, λόγω της μεταβλητής συχνότητας, καθίσταται αρκετά δύσκολη η διαδικασία φιλτραρίσματος του θορύβου.



On-time is constant with a variable off-time = cycle also fluctuates

Σχήμα 1.7 On-time Pulse Frequency Modulation

Η επιλογή της μεθόδου απαιτεί την λεπτομερή κατανόηση λειτουργίας και των δύο μεθόδων, της τιμής του ρεύματος που καταναλώνει το φορτίο, ενώ περιλαμβάνει και συμβιβασμούς (trade-offs). Βέβαια, πλέον υπάρχουν ολοκληρωμένα κυκλώματα που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση. Πιο συγκεκριμένα, σε σταθερή λειτουργία επιλέγεται η μέθοδος PWM, ενώ σε λειτουργία χαμηλού φορτίου η μέθοδος PFM.



Σχήμα 1.8 Απόδοση PWM και PFM σε συνάρτηση με το φορτίο

Η απόδοση με έλεγχο PFM είναι ιδιαίτερα υψηλή σε μικρά φορτία, καθώς στην περίπτωση αυτή η συχνότητα είναι μειωμένη, με αποτέλεσμα και οι απώλειες μεταγωγής να είναι μειωμένες. Στην περίπτωση όπου ο έλεγχος γίνεται με PWM η απόδοση είναι υψηλή, όταν η τιμή του ρεύματος του φορτίου είναι υψηλή, ενώ παραμένει χαμηλή για φορτία που απαιτούν μικρές εντάσεις ρεύματος.

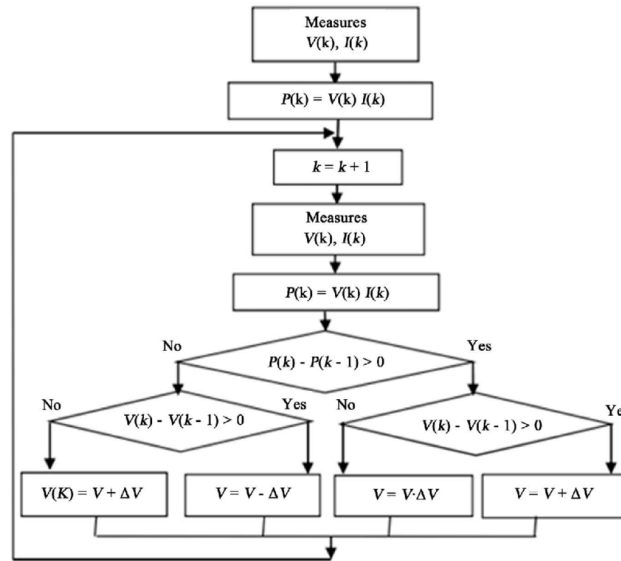
Για τις περιπτώσεις ομοιόμορφης πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, υπάρχουν αρχές λειτουργίας αλγόριθμοι MPPT που περιγράφονται παρακάτω.

1.4 Εναλλακτικοί αλγόριθμοι MPPT

Αλγόριθμος *Perturb & Observe* (P&O)

Αποτελεί ένα από τους πιο συνηθισμένους αλγόριθμους MPPT, λόγω της εύκολης εφαρμογής του. Αρχικά μετράται το ρεύμα, η τάση και υπολογίζεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Το αποτέλεσμα της συγκρίνεται με την προηγούμενη μέτρηση και ανάλογα την διαφορά που παρουσιάζεται, αλλάζει το Duty Cycle και προσαρμόζεται, με σκοπό να αυξηθεί η ισχύς. Πιο συγκεκριμένα η κατεύθυνση για το Duty Cycle παραμένει η ίδια, εάν η ισχύς που υπολογίστηκε είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη. Σε αντίθετη περίπτωση, ο ελεγκτής αλλάζει την κατεύθυνση του Duty Cycle και η περιγραφόμενη διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στο σημείο μέγιστης ισχύος ο λόγος της διαφοράς ισχύος προς διαφοράς τάσης ισούται με μηδέν, δηλαδή ισχύει $\frac{dP}{dV} = 0$, ανεξάρτητα της τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας. Βέβαια, η απόδοση του P&O ελεγκτή είναι υψηλή σε περιβάλλον χωρίς διαταραχές, ενώ όταν παρουσιάζονται γρήγορα μεταβαλλόμενες συνθήκες η απόδοση είναι σημαντικά μειωμένη. Για τον λόγο αυτό, η μέθοδος συνδυάζεται με άλλες μεθόδους με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης σε περιβάλλον με παρουσία διαταραχών.



Σχήμα 1.9 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Perturb and Observe

Αλγόριθμος Incremental Conductance (IC)

Η μέθοδος Incremental Conductance βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση στην καμπύλη του φωτοβολταϊκού είναι μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος, ενώ στα αριστερά είναι θετική και στα δεξιά αρνητική. Με τον συγκεκριμένο αλγόριθμο δεν πραγματοποιείται κάποια διαταραχή στο σύστημα και για τον λόγο αυτό, αντιμετωπίζονται περιορισμοί που συναντώνται στην μέθοδο P&O. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο γρήγορος χρόνος ανίχνευσης και καλή απόκριση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, επιτυγχάνοντας μικρές ταλαντώσεις γύρω από το MPP συγκριτικά με την μέθοδο P&O. Βέβαια για να επιτευχθεί ο αλγόριθμος IC αυξάνεται η πολυπλοκότητα του κυκλώματος ελέγχου.

Ο περιγραφόμενος αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί και μαθηματικά ως:

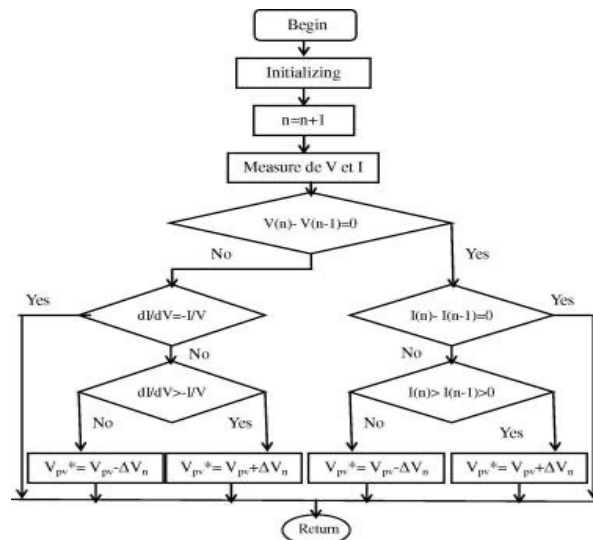
$$\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{\partial (I_{pv} * V_{pv})}{\partial V_{pv}} = I_{pv} + \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} V_{pv} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

Άρα θα ισχύει ότι:

$$\text{MPP: } \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

$$\text{Αριστερά του MPP: } \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$

$$\text{Δεξιά του MPP: } \frac{\partial I_{pv}}{\partial V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$$



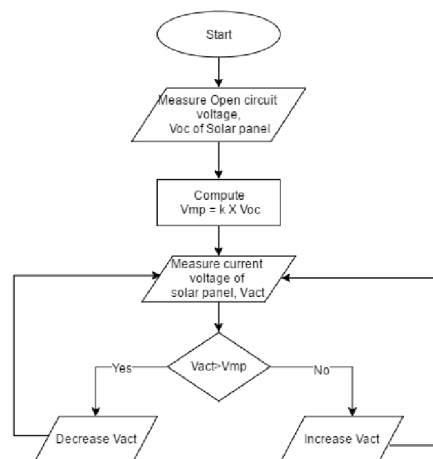
Σχήμα 1.10 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Incremental Conductance

Αλγόριθμος Fractional Open – Circuit Voltage

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στο γεγονός ότι παρατηρείται γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στο σημείο μέγιστης ισχύος με την τάση ανοικτού κυκλώματος για διαφορετικά επίπεδα προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η αναλογία μεταξύ των τάσεων εκφράζεται με την σταθερά k_{oc} και εξαρτάται από τον συντελεστή πλήρωσης του φωτοβολταϊκού, τις κλιματικές συνθήκες και την εκάστοτε τεχνολογία του φωτοβολταϊκού. Βασικό μειονέκτημα της περιγραφόμενης μεθόδου είναι ότι πρέπει να γίνεται αποσύνδεση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με το φορτίο ανά τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να γίνεται δειγματοληψία της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Έτσι, το MPP ανανεώνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση και η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται να είναι στην βέλτιστη τιμή της.

$$V_{MPP} = k_{oc} \cdot V_{oc}$$

Μίας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται τακτικά παρατηρούνται αυξημένες απώλειες ισχύος. Αν και ο αλγόριθμος δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη δυσκολία, η επιλογή της τιμής της σταθεράς k_{oc} είναι απαιτητική, αλλά συνήθως επιλέγεται από 0.73 έως 0.80.



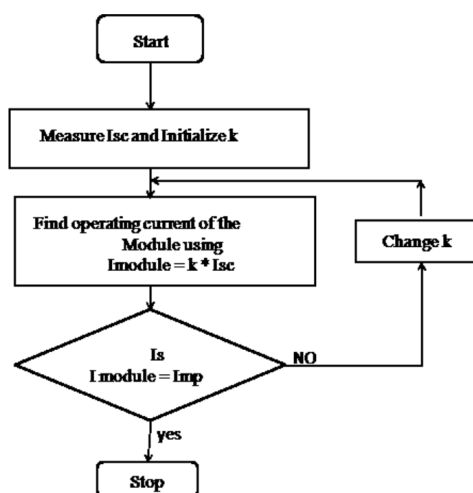
Σχήμα 1.11 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Fractional Open – Circuit Voltage

Αλγόριθμος *Fractional Short – Circuit Current*

Ο αλγόριθμος βασίζεται στο γεγονός ότι υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ ανάμεσα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού στο σημείο μέγιστης ισχύος και το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η σχέση που συνδέει τα εν λόγω ρεύματα είναι η παρακάτω.

$$I_{MPP} = k_{SC} \cdot I_{SC}$$

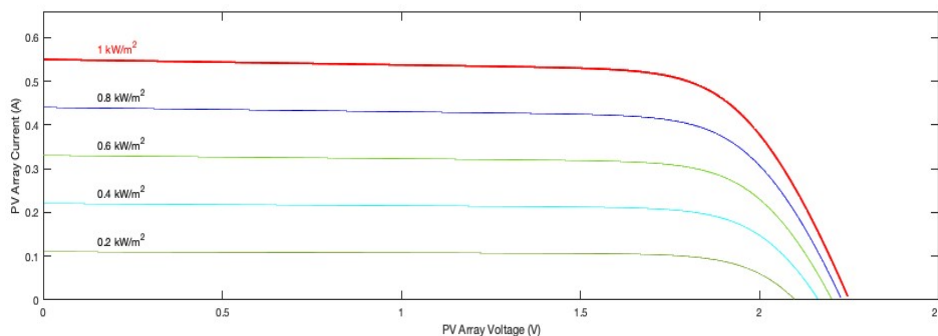
Η αναλογία μεταξύ των ρευμάτων εκφράζεται με την σταθερά k_{SC} και εξαρτάται από τον συντελεστή πλήρωσης του φωτοβολταϊκού, τις κλιματικές συνθήκες και την εκάστοτε τεχνολογία του φωτοβολταϊκού. Συνήθως η σταθερά k_{SC} κυμαίνεται από 0.72 έως 0.85. Όμως, είναι δυνατό να γίνει προσδιορισμός της σταθεράς, από μετρήσεις που γίνονται στο φωτοβολταϊκό ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.



Σχήμα 1.12 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου *Fractional Short – Circuit Current*

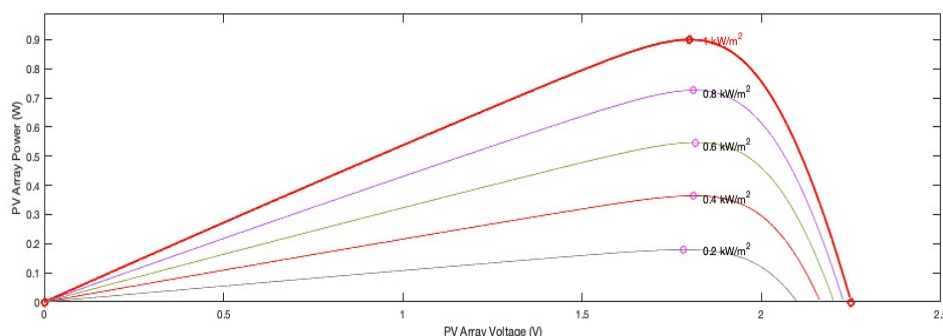
1.5 Εξάρτηση MPP από καιρικές συνθήκες

Η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ποικίλει ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Μεταβολές στην θερμοκρασία, την προσπίπτουσα ακτινοβολία αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες μεταβολής του σημείου μέγιστης ισχύος. Με την μεταβολή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας προκύπτει μικρή αλλαγή στην τάση του σημείου μέγιστης ισχύος V_{MPP} , ενώ με την μεταβολή της θερμοκρασίας η αλλαγή που προκύπτει στην V_{MPP} είναι αισθητή.



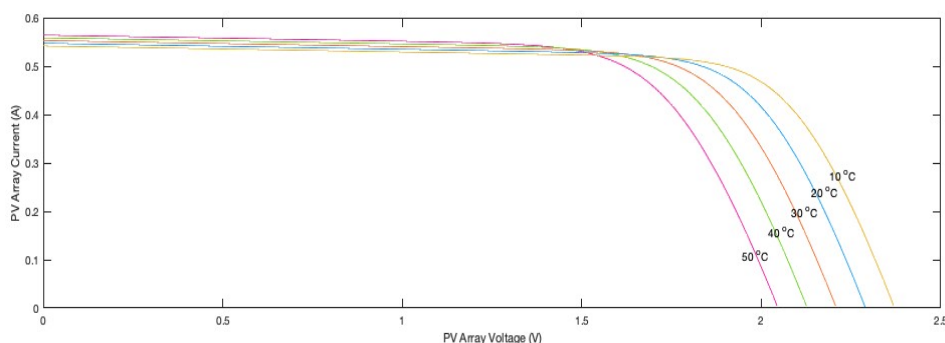
Σχήμα 1.13 Καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία

Στο Σχήμα 1.13 φαίνεται η μεταβολή του ρεύματος συναρτήσει της τάσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου, για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Παρατηρείται ότι η μεταβολή της τάσης είναι μικρή σε αντίθεση με αυτή του ρεύματος.



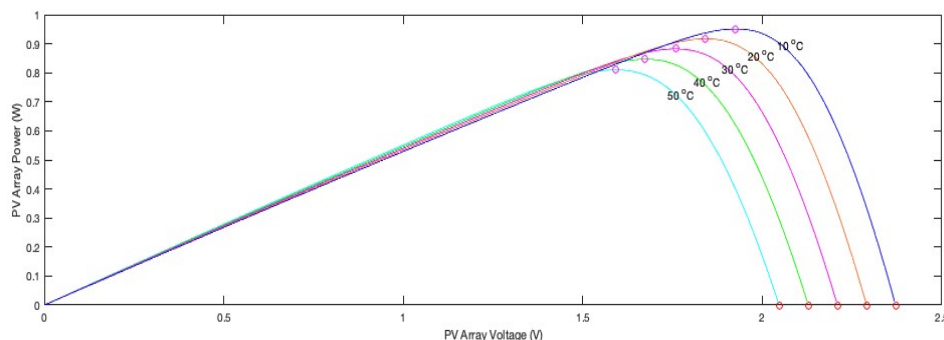
Σχήμα 1.14 Καμπύλες P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία

Στο Σχήμα 1.14 παρατηρείται ότι για υψηλότερες τιμές προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας υψηλότερη είναι και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να επιτευχθεί για σταθερή θερμοκρασία. Βέβαια, εμφανές είναι ότι το σημείο όπου σημειώνεται το MPP για τις διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας, βρίσκεται σχεδόν στην ίδια τιμή τάσης.



Σχήμα 1.15 Καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία

Με την αύξηση της θερμοκρασίας η τιμή του ρεύματος έχει κάποιες μικρές διακυμάνσεις, αλλά η τάση μειώνεται αισθητά. Δηλαδή, η καμπύλη I-V προς μετατοπίζεται προς τα αριστερά. Με την μείωση της θερμοκρασίας γίνεται μετατόπιση της καμπύλης προς τα δεξιά.



Σχήμα 1.16 Καμπύλες P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και σταθερή προσπίπτουσα ακτινοβολία

Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος έχει μικρότερη τιμή και ταυτόχρονα και η τάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μικρότερη. Δηλαδή, η καμπύλη P-V μετατοπίζεται προς τα αριστερά. Με μείωση της θερμοκρασίας η χαρακτηριστική καμπύλη μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Έτσι, η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όπως είναι αναμενόμενο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Θεωρητικά η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου μειώνεται περίπου κατά 0,5% για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου.

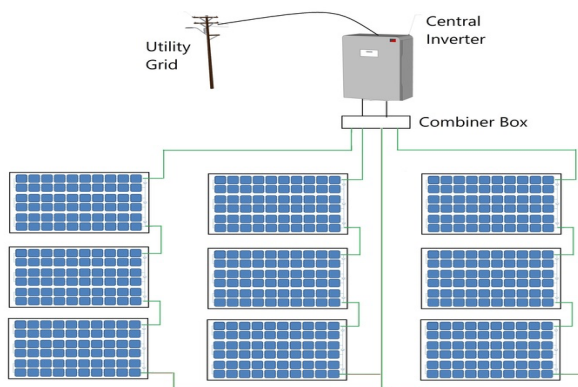
1.6 Αντιστροφέας

Ο αντιστροφέας είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η τάση εξόδου μπορεί να έχει διαφορετική συχνότητα και πλάτος ανάλογα με τις απαιτήσεις του συνδεδεμένου φορτίου. Οι αντιστροφείς έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών, τόσο σε επίπεδο υψηλής ισχύος όσο και σε επίπεδο χαμηλής ισχύος. Τα τελευταία χρόνια η ταχεία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει συμβάλει στην απόδοση, την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τους. Οι αντιστροφείς μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές κατηγορίες ανάλογα την τοπολογία διαμόρφωσης, την χαρακτηριστική εξόδου, το είδος της πηγής, τον τύπο του φορτίου και την τεχνική ελέγχου.

Οι αντιστροφείς που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο ταξινομούνται ανάλογα και με την τοπολογία διαμόρφωσης. Υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες που εντάσσονται σε αυτό το πλαίσιο ταξινόμησης.

Central Inverter

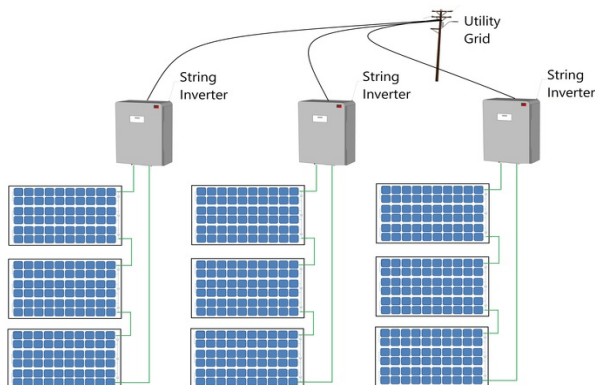
Συνδέεται με τον συνολικό αριθμό φωτοβολταϊκών πλαίσιο. Πιο συγκεκριμένα μια συστοιχία φωτοβολταϊκών συνδέεται σε σειρά και πολλές συστοιχίες συνδέονται παράλληλα. Χρησιμοποιείται για εγκατεστημένη ισχύς από μερικά kW έως 100 MW. Ο κεντρικός αντιστροφέας συνδέεται απευθείας με το δίκτυο.



Σχήμα 1.17 Central Inverter

String Inverter

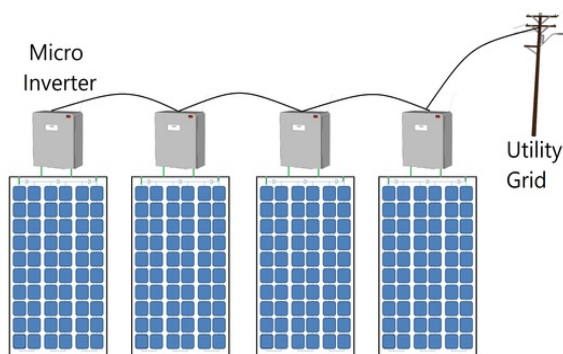
Η κάθε σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων έχει τον δικό της αντιστροφέα. Χρησιμοποιείται για εγκατεστημένη ισχύς από μερικά W έως μερικά kW. Κάθε αντιστροφέας συνδέεται απευθείας με το δίκτυο.



Σχήμα 1.18 String Inverter

Micro-converter

Κάθε μονάδα έχει ένα αντιστροφέα στο πίσω μέρος της μονάδας. Χρησιμοποιείται για εγκατεστημένη ισχύς από 50 έως 500 W. Όλα τα καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος των αντιστροφών συνδέονται μεταξύ τους και στην συνέχεια συνδέονται με το δίκτυο.



Σχήμα 1.19 Micro Inverter

Οι αντιστροφείς ανάλογα με την χαρακτηριστική εξόδου διακρίνονται σε τρεις περιπτώσεις.

Square Wave Inverter

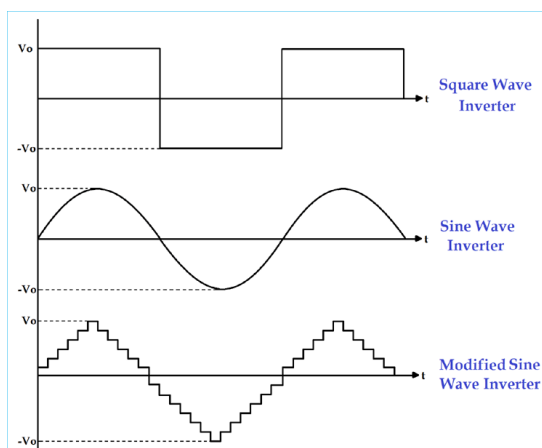
Η κυματομορφή εξόδου για τον συγκεκριμένο μετατροπέα είναι ένα τετραγωνικό κύμα. Η χρήση του είναι σπάνια μιας και οι συσκευές έχουν σχεδιαστεί να τροφοδοτούνται με ημιτονοειδές ρεύμα. Στην περίπτωση που γίνει τροφοδοσία τετραγωνικού παλμού σε συσκευή που λειτουργεί με ημιτονοειδή κυματομορφή, μπορεί η συσκευή μπορεί να υπολειτουργεί, να υποστεί βλάβη ή οι απώλειες να είναι υψηλές.

Sine Wave Inverter

Η κυματομορφή εξόδου είναι ημιτονοειδής και αρκετά παρόμοια με αυτή του δικτύου. Αποτελεί την πιο κατάλληλη επιλογή για την ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών.

Modified Sine Wave Inverter

Η κυματομορφή εξόδου δεν είναι ούτε καθαρό ημιτονοειδές σήμα, αλλά ούτε τετραγωνικό κύμα. Η κατασκευή του είναι πιο απλή από το αντιστροφέα ημιτόνου και χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ωμικών φορτίων.

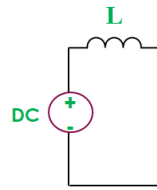


Σχήμα 1.20 Square Wave, Sine Wave and Modified Sine Wave Inverter

Οι αντιστροφείς ανάλογα με την πηγή διακρίνονται σε δύο περιπτώσεις.

Current Source Inverter

Η είσοδος είναι πηγή ρεύματος. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης εισόδου είναι χαμηλή με την τιμή του ρεύματος εισόδου να είναι υψηλή. Χρησιμοποιείται στις βιομηχανικές εφαρμογές μέσης τάσης όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα ισχύος. Δεν είναι ιδιαίτερα διαδομένη η χρήση τους.

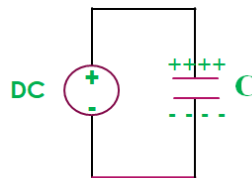


CSI

Σχήμα 1.21 Current Source Inverter

Voltage Source Inverter

Η είσοδος είναι μια πηγή τάσης. Η τιμή της σύνθετης αντίστασης εισόδου είναι υψηλή με το ρεύμα εισόδου να είναι μικρό. Χρησιμοποιείται σε πλήθος εφαρμογών, λόγω της υψηλής απόδοσης, της μεγάλης αξιοπιστίας και της γρήγορης απόκρισης.



VSI

Σχήμα 1.22 Voltage Source Inverter

Οι αντιστροφείς ανάλογα με τον τύπο του φορτίου διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

Single – Phase Inverter

Χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία μονοφασικών φορτίων εναλλασσόμενου ρεύματος και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες.

- Single Phase Half-bridge Inverter
- Single Phase Full-bridge Inverter

Three – Phase Inverter

Χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία τριφασικών φορτίων εναλλασσόμενου ρεύματος. Δύναται να λειτουργήσει με δύο τρόπους ανάλογα με την γωνία των παλμών.

- 180-degree mode
- 120-degree mode

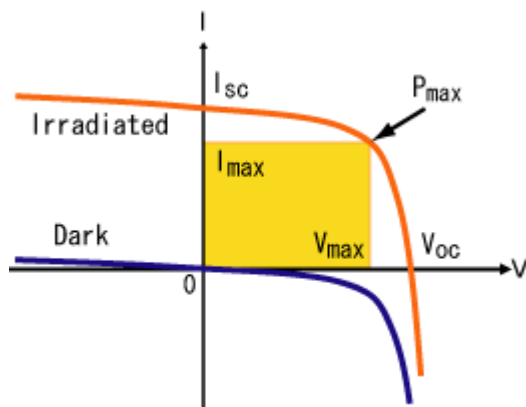
Οι αντιστροφείς ανάλογα με την τεχνική ελέγχου διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες.

- Single Pulse Width modulation (PWM)
- Multiple Pulse Width Modulation (MPWM)

- Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)
- Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation (MSPWM)

1.7 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από την καμπύλη ρεύματος – τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.23.



Σχήμα 1.23 Καμπύλη ρεύματος - τάσης (I-V)

Υπό συνθήκες φωτισμού το φωτοβολταϊκό στοιχείο άγει ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογο την με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στην περίπτωση όμως που επικρατούν συνθήκες σκότους το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει χαρακτηριστική παρόμοια της διόδου. Το ρεύμα της διόδου περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_D = I_{dark} = I_0 \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right)$$

Στην θεωρητική εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν λαμβάνονται υπόψιν αρκετοί παράγοντες που συμβάλλουν στον περιορισμό της. Οι παράγοντες αυτοί σχετίζονται με το ίδιο το φωτοβολταϊκό στοιχείο, αλλά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στην θέση εγκατάστασης.

Για λόγους σύγκρισης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard test conditions, STC), κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι.

- Θερμοκρασία στοιχείου: 25° C
- Ηλιακή ακτινοβολία: 1000 W/m²
- Air mass: 1.5

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αναφέρονται παρακάτω.

Επίδραση θερμοκρασίας

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών. Η απόδοση που δίνεται από τους κατασκευαστές των πλαισίων είναι σε θερμοκρασία 25° C. Όμως σε πολλές περιπτώσεις πραγματικής λειτουργίας η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών υπερβαίνει την τιμή αυτή.

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε τιμές υψηλότερες από τις συνθήκες αναφοράς έχει αρνητική επίδραση στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα, για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου η απόδοση μειώνεται κατά περίπου 0.5% ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από τη συμβατική. Αυτό συμβαίνει, καθώς με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η τάση του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Ακόμα, σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από την συμβατική, αυξάνεται η ηλεκτρική αντίσταση του ημιαγωγού στο φως, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Συντελεστής γήρανσης

Η απόδοση του πλαισίου μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω της αλλοίωσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Για την διαχρονική μείωση της απόδοσης αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μια βαθμιαία πτώση στην ποσότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνήθως προσεγγίζει το 1% - 2% ετησίως.

Συντελεστής καθαριότητας

Ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο όταν είναι ρυπασμένο προς την ηλεκτρική ισχύ στην περίπτωση που επιφάνειά του είναι εντελώς καθαρή. Ο συντελεστής μειώνεται από την επικάλυψη σωματιδίων, ακαθαρσιών, βλάστησης και υετού.

Ανακλαστικότητα φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ανάλογα με την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, παρατηρείται αυξημένη ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος για γωνίες μεγαλύτερες των 60°, ενώ για μικρότερες γωνίες πρόσπτωσης θεωρείται αμελητέα. Πιο συγκεκριμένα, ο συντελεστής ανακλαστικότητας έχει τιμές, πρακτικά, ίση με την μονάδα για γωνίες πρόσπτωσης έως 60°.

Ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας

Η ανομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στα επιμέρους φωτοβολταϊκά στοιχεία μιας συστοιχίας μπορεί να οδηγήσει στην πλήρη καταστροφή μερικών κελιών, λόγω της ανάπτυξης υψηλής θερμοκρασίας, με αποτέλεσμα παρατηρηθεί ιδιαίτερα υψηλή απώλεια ισχύος και μείωση της απόδοσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή ισχύος μπορεί να μεγιστοποιηθεί με τους εξής τρόπους:

- Αναδιαμόρφωση της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών
- Εξελικτικοί αλγόριθμοι
- Αριθμητικοί αλγόριθμοι
- Στοχαστικοί / Χαστικοί αλγόριθμοι
- Κατανεμημένο MPPT

1.8 Διατάξεις φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατασκευής, υπάρχουν σε φωτοβολταϊκές διατάξεις με τρεις διαφορετικούς τρόπους στήριξης: σταθερής στήριξης, εποχιακά ρυθμιζόμενης και συνεχούς παρακολούθησης της θέσης του ήλιου.

Στήριξη με σταθερή γωνία

Στην περίπτωση που όλη η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών είναι με σταθερή στήριξη η μηχανική αντοχή είναι ιδιαίτερα αυξημένη μιας και η εγκατάσταση δεν αποτελείται από κινητά μέρη. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δέχονται ηλιακή ακτινοβολία που διακυμαίνεται στην διάρκεια της ημέρας, ενώ όταν η γωνία κλίσης ισούται ακριβώς με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, οι ακτίνες του ηλίου προσπίπτουν κάθετα στους συλλέκτες δύο φορές τον χρόνο, μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Στροφή γύρω από ένα άξονα

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του και επιστρέφει με την χρήση κατάλληλου μηχανισμού στην αρχική θέση. Τις πρωινές ώρες κατά την ανατολή του ηλίου στρέφεται, ώστε να αποδίδει την μέγιστη δυνατή ενέργεια. Υπάρχουν δύο είδη περιστροφής που αναλύονται παρακάτω.

Αζιμουθιακό ηλιοτρόπιο

Η θέση του ηλίου βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που διαγράφει η κάθετη γωνία στον συλλέκτη, ενώ η περιστροφή γίνεται από έναν κατακόρυφο άξονα. Κατά την διάρκεια της ημέρας, η κλίση του συλλέκτη παραμένει σταθερή καθ' όλη την διάρκεια κίνησής του.

Ηλιοτρόπιο πολικού άξονα

Η περιστροφή του φωτοβολταϊκού πλαισίου γίνεται γύρω από τον άξονα, που έχει κλίση ίση με το γεωγραφικό πλάτος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Ο ήλιος βρίσκεται σε επίπεδο κάθετο ως προς τον συλλέκτη και περιλαμβάνει τον άξονα περιστροφής, καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας.

Η περιστροφή του ηλιακού συλλέκτη μπορεί να γίνει με ή χωρίς την χρήση ηλεκτρικών κινητήρων. Ανάλογα, με το γεωγραφικό πλάτος κάθε περιοχής εγκατάστασης, καθορίζεται η χρήση των ηλιοτροπικών ή των φωτοβολταϊκών συστημάτων σταθερού άξονα, καθώς σε περιοχές, όπου παρουσιάζονται σύννεφα μεγάλο μέρος του έτους, το ενεργειακό και οικονομικό κέρδος είναι ελάχιστο.

Συνεχής παρακολούθηση του ήλιου

Για την κατασκευή φωτοβολταϊκού συστήματος που γίνεται συνεχής παρακολούθηση του ηλίου απαιτούνται ηλεκτρικοί κινητήρες, ώστε να επιτευχθεί κίνηση γύρω από δύο άξονες. Η ενέργεια που χρειάζονται οι κινητήρες για την κίνηση της διάταξης παρέχεται από την παραγόμενη φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια. Με την δύση του ήλιου, το σύστημα των συλλεκτών επιστρέφει στην θέση αναφοράς, όπου η γωνία κλίσης είναι μικρή

και ο προσανατολισμός νότιος, για να είναι το σύστημα όσο το δυνατόν λιγότερο επιρρεπές στους ισχυρούς ανέμους. Πριν την ανατολή του ήλιου ο μηχανισμός στρέφει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έτσι ώστε οι ακτίνες να προσπίπτουν κάθετα στις επιφάνειες. Οι συλλέκτες προσανατολίζονται συνεχώς με την πορεία του ηλίου, με σκοπό οι ακτίνες να προσπίπτουν κάθετα στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η διάταξη αυτή επιτυγχάνει την βέλτιστη απόδοση σε σύγκριση με τις άλλες διατάξεις, αφού η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να είναι και έως 50% αυξημένη. Βέβαια, το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό σύστημα χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος και μειωμένη μηχανική αντοχή, καθιστώντας την περισσότερο ευάλωτη σε ισχυρούς ανέμους.

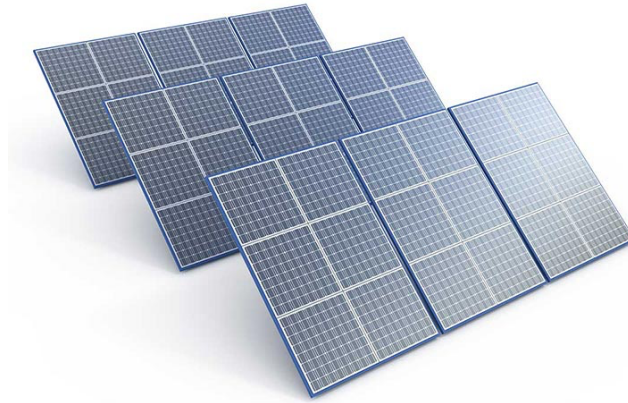
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο και φωτοβολταϊκή συστοιχία

Όταν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους σε ένα κοινό μεταλλικό πλαίσιο ως μια ενιαία κατασκευή, τότε αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Η σύνδεση τους διακρίνεται σε σειρά και παράλληλα και ανάλογα με την σύνδεση επιτυγχάνονται διαφορετικοί σκοποί. Πιο συγκεκριμένα με την σύνδεση σε σειρά, η ένταση του ρεύματος του πλαισίου παραμένει σταθερή, ενώ η τάση αυξάνεται ανάλογα του αριθμού των πλαισίων που συνδέονται σε σειρά. Στην περίπτωση της παράλληλης σύνδεσης, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή η ένταση του ρεύματος αυξάνεται ανάλογα του αριθμού των πλαισίων που συνδέονται παράλληλα, ενώ η τάση παραμένει σταθερή.



Σχήμα 1.24 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Ο συνδυασμός φωτοβολταϊκών πλαίσιο οδηγεί στην δημιουργία των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Ανάλογα με τις απαιτήσεις τροφοδοσίας ρεύματος και τάσης, τα φωτοβολταϊκά πλαίσιο μπορούν να συνδεθούν, είτε παράλληλα είτε σε σειρά, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.



Σχήμα 1.25 Φωτοβολταϊκές συστοιχίες

2. Παραγωγή ενέργειας με ανεμογεννήτριες στο έξυπνο δίκτυο

Στο τρέχον κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας και τα δομικά στοιχεία των ανεμογεννητριών, που αποτελούν βασικό μέρος του έξυπνου δικτύου.

2.1 Χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας

Όταν μια αέρια μάζα θερμαίνεται, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Η θέρμανση του αέρα γίνεται όταν ένα στρώμα αέρα θα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της γης, ενώ στην συνέχεια θα ανέλθει και την θέση του θα καλύψει ένα ψυχρότερο στρώμα αέρα που με την σειρά του θα ακολουθήσει την ίδια ακριβώς διαδικασία. Αυτή η ανοδική ή καθοδική κίνηση των θερμών και ψυχρών ρευστών μαζών, ονομάζεται κατακόρυφη μεταφορά. Ο αέρας που περιβάλλει την επιφάνεια της γης βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση λόγω κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας, της ανομοιογένειας του ανάγλυφου της γης, αλλά και της περιστροφικής κίνησης της γης.

2.2 Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου είναι μια μεταβλητή που αλλάζει τόσο κατά την διάρκεια μικρών χρονικών διαστημάτων, όπως λίγων δευτερολέπτων, όσο και κατά την διάρκεια μεγαλύτερων διαστημάτων, όπως μερικών ωρών. Οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου εξαρτώνται από την τοποθεσία και τον χρόνο. Οι εκάστοτε επιφάνειες του εδάφους προκαλούν διακυμάνσεις στην ροή του ανέμου. Στις περιπτώσεις, δηλαδή όπου υπάρχουν εμπόδια, όπως κτήρια, δασικές εκτάσεις, λίμνες ή θάλασσες η ροή του ανέμου και επακόλουθα η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζονται.

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου μπορεί να περιγράφει ως το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από την μέση τιμή:

$$V = \bar{V} + \sigma_v$$

ενώ η διακύμανση του ανέμου σ_v ισούται με:

$$\sigma_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2$$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια χρονική περίοδο T δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} V(t) \cdot dt$$

Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους και καθορίζει την αντοχή μιας ανεμογεννήτριας. Για τον υπολογισμό της με δεδομένα ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται η μέγιστη ωριαία

και στην συνέχεια η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου, ενώ στις περιπτώσεις μελέτης χρονοσειρών πολλών ετών ορίζεται ως δείγμα μέγιστων τιμών ανέμου οι μέγιστες ετήσιες τιμές.

2.3 Μεταβολή της ταχύτητας ανέμου ανάλογα το ύψος

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί μεταβλητό μέγεθος και ανάλογα με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους αλλάζει τιμή. Ένας από τους κυριότερους λόγους για την μεταβολή της αποτελεί η τριβή με το έδαφος. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους είναι μηδενική, λόγω της ύπαρξης τριβής μεταξύ αέρα και της επιφάνειας του εδάφους. Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας σε συνάρτηση με το ύψος, εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- u_* : η ταχύτητα τριβής η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα (ρ) και την επιφανειακή τάση Reynolds (τ): $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$
- k : η σταθερά von Karman
- z_0 : το μήκος τραχύτητας του εδάφους
- L : η παράμετρος ευστάθειας της ατμόσφαιρας
- ϕ : συνάρτηση που εξαρτάται από την ατμοσφαιρική ευστάθεια

Η παράμετρος ευστάθειας της ατμόσφαιρας δίνεται από την σχέση:

$$L = \frac{u_*^2 \cdot c_p \cdot \rho \cdot T}{\kappa \cdot g \cdot H_F}$$

όπου

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

T : η απόλυτη θερμοκρασία του αέρα

H_F : η κατακόρυφη ροή θερμότητας

C_p : η ειδική θερμότητα σε σταθερή πίεση

ενώ η σχέση που την περιγράφει είναι:

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \int_{z_0}^{z+z_0} \frac{\phi(z/L)}{z} dz$$

Οι μεταβολές αυτές της ταχύτητας του ανέμου συνθέτουν το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου, ενώ οι δύο κυριότερες συναρτήσεις που περιγράφουν την μεταβολή αυτή και βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα είναι η εκθετική συνάρτηση και η λογαριθμική συνάρτηση.

Εκθετική Συνάρτηση

Η εκθετική συνάρτηση εμφανίζει καλή ακρίβεια σε περιπτώσεις που η διαφορά ύψους είναι περισσότερο από 30-50m. Η ακρίβεια ελαττώνεται πολύ για μεγάλες διαφορές υψών.

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1}\right)^a$$

όπου,

z : ύψος από την επιφάνεια του εδάφους

$V(z_1)$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z_1 από το έδαφος

$V(z)$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z από το έδαφος

α : σταθερά που εξαρτάται από την μορφολογία του εδάφους

Λογαριθμική Συνάρτηση

$$\frac{V(z)}{V(10)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}$$

όπου

z_0 : το μήκος της τραχύτητας του εδάφους

2.4 Ριπή ανέμου

Η ριπή του ανέμου ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας (~20s) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Μετά το πέρας της ριπής, η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ριπή ξεπερνάει τα 9 m/s και ποικίλει από τα συνήθη επίπεδα κατά 4-5 m/s.

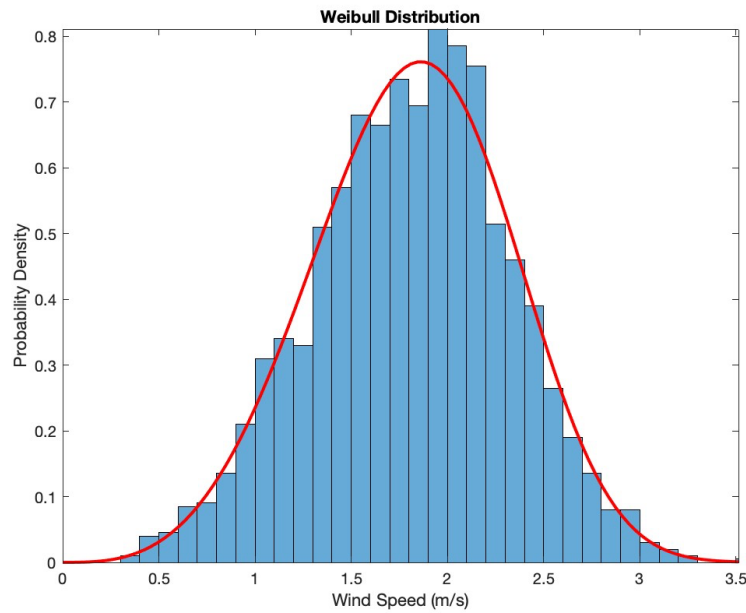
2.5 Κατανομή Weibull

Η κατανομή Weibull είναι μια στατιστική κατανομή που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ταχύτητας του ανέμου. Παρουσιάζει μια καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας που εξαρτάται από δύο παραμέτρους, την παράμετρο κλίμακας k και τον παράμετρο μορφολογίας c . Η παράμετρος κλίμακας είναι αντιστρόφως ανάλογος της διακύμανσης σ^2 των ταχυτήτων του ανέμου ως προς την μέση ταχύτητα, ενώ η παράμετρος μορφολογίας συνδέεται με την μέση ταχύτητα. Η κατανομή Weibull περιγράφει με αρκετά καλή ακρίβεια τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής των μετρήσεων για ύψος έως 100m από το έδαφος.

Η εξίσωση που περιγράφει την κατανομή Weibull είναι η παρακάτω:

$$P(V) = \frac{k}{c} \cdot \left[\frac{V}{c} \right]^{k-1}$$

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της κατανομής Weibull για παραμέτρους μορφολογίας και κλίμακας αντίστοιχα $c=4$ και $k=2$.



Σχήμα 2.1 Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull

2.6 Η ενέργεια ανέμου

Η μετακίνηση μιας αέριας μάζας από την ψυχρότερη στην θερμότερη έχει ισχύ που υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

όπου

ρ : η πυκνότητα του αέρα

A : η συνολική επιφάνεια που καλύπτει η δέσμη του ανέμου

V : η ταχύτητα του ανέμου

Η ισχύς της αέριας δέσμης είναι ανάλογη της πυκνότητας του αέρα, της συνολικής επιφάνειας που καλύπτει και του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

Ενώ για την πυκνότητα του αέρα ισχύει ότι:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

όπου,

P : η ατμοσφαιρική πίεση

R : η παγκόσμια σταθερά αερίων

T : η απόλυτη θερμοκρασία

Η πυκνότητα εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και την απόλυτη θερμοκρασία της τοποθεσίας που γίνεται η μελέτη, σύμφωνα με τον νόμο των ιδανικών αερίων.

2.7 Τοποθεσία εγκατάστασης ανεμογεννητριών

Η επιλογή τοποθεσίας των ανεμογεννητριών αποτελεί ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες επενδυτικού ενδιαφέροντος. Οι βασικοί παράγοντες που ερευνώνται πριν την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών είναι οι παρακάτω.

Ταχύτητα ανέμου

Προτιμώνται τοποθεσίες με μέση ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 6 m/s, αλλά και υψηλή συχνότητα στην παρουσία τους. Τέτοιες τοποθεσίες μπορεί να βρίσκονται ανοικτά της θάλασσας (offshore), σε περιοχές με ομαλό πεδίο και σε ορεινές περιοχές.

Πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Κατά την οικονομοτεχνική μελέτη λαμβάνεται σε μεγάλο βαθμό υπόψιν, η απόσταση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς στην περίπτωση που το δίκτυο βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από την τοποθεσία της εγκατάστασης το κόστος αυξάνεται υπερβολικά.

Περιβαλλοντικοί παράγοντες και νομικά ζητήματα

Πριν την κατασκευή, πρέπει να ελεγχθεί αν η εγκατάσταση πληροί τις περιβαλλοντικές, νομικές και κανονιστικές απαιτήσεις της περιοχής.

Πρόσβαση και μεταφορά

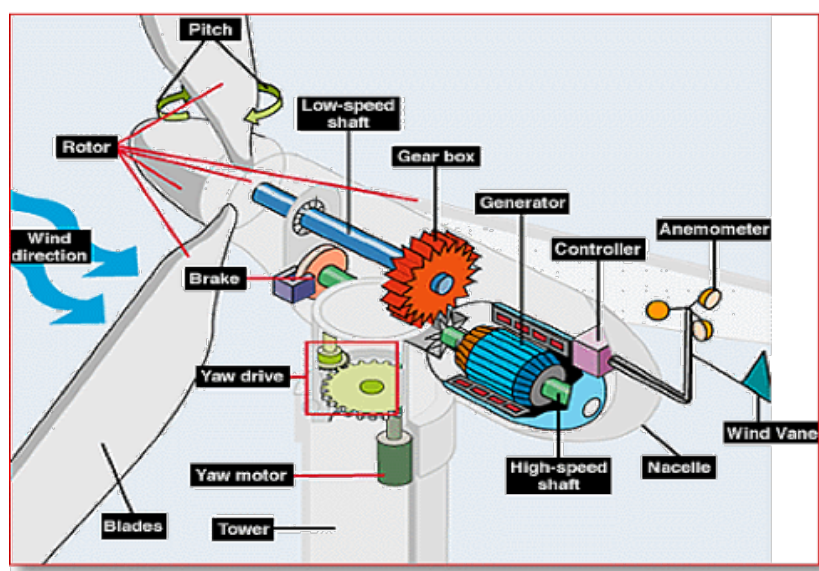
Οι προσβάσιμες τοποθεσίες, επιτρέπουν την εύκολη μεταφορά των δομικών στοιχείων της ανεμογεννήτριας κατά την εγκατάσταση και συμβάλλουν στην μείωση του κόστους και του χρόνου συντήρησής τους.

2.8 Ανεμογεννήτριες

Παρουσιάζονται αναλυτικά τα δομικά στοιχεία και οι κατηγορίες των ανεμογεννητριών.

2.8.1 Δομικά στοιχεία

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά δομικά στοιχεία που απαρτίζουν μια ανεμογεννήτρια



Σχήμα 2.2 Δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

Πτερύγια

Τα πτερύγια στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος, κατασκευάζονται από εποξικό υλικό ενισχυμένο με υαλονήματα καθώς και ανθρακονήματα, ενώ χρησιμοποιείται η τεχνολογία των αεροσκαφών. Στους μέσου μεγέθους πτερωτές χρησιμοποιούνται επίσης υαλονήματα με εναλλαγή κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις, αλλά και το ξύλο, λόγω της μεγάλης αντοχής που παρουσιάζει. Στα πτερύγια μικρού μεγέθους χρησιμοποιείται κυρίως η πολυουρεθάνη, τα υαλονήματα και το ξύλο. Το πλήθος των πτερυγίων που χρησιμοποιείται σε μια ανεμογεννήτρια μπορεί να διαφέρει, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων επηρεάζεται η απόδοση, η σταθερότητα και ο θόρυβος που παράγει η ανεμογεννήτρια. Το πτερύγιο έχει περιστροφική μορφή έτσι ώστε να έχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του, ενώ η γωνία πρόσπτωσης του αέρα αυξάνεται προς την βάση του.

Φρένο

Πρόκειται για μια διάταξη που χρησιμοποιείται για να ελαττώσει ή να μηδενίσει την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Τα συστήματα φρένων διακρίνονται σε υδραυλικά, μηχανικά και ηλεκτρικά. Η σωστή λειτουργία τους διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία σε περιπτώσεις βλάβης κάποιου στοιχείου της ανεμογεννήτριας.

Μηχανισμός παρεκκλίσεων

Ο μηχανισμός παρεκκλίσεων χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας στην κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από ένα σύστημα αισθητήρων, ενός ελεγκτή και ενός κινητήρα. Οι αισθητήρες ανιχνεύουν την διεύθυνση του ανέμου, ο ελεγκτής επεξεργάζεται τις μετρήσεις που λήφθηκαν και αποφασίζει την παρέκκλιση της ανεμογεννήτριας, ενώ τέλος ο κινητήρας ρυθμίζει την θέση της ανεμογεννήτριας ανάλογα την εντολή που λάβει από τον ελεγκτή.

Ανεμοδείκτης

Είναι ο μηχανισμός που ευθύνεται για την μέτρηση της κατεύθυνσης του ανέμου και την επικοινωνία με τον μηχανισμό παρεκκλίσεων, για τον σωστό προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας.

Ανεμόμετρο

Μετρά την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει τις μετρήσεις στον ελεγκτή.

Ελεγκτής

Αποτελείται από πλήθος υπολογιστικών συστημάτων τα οποία συνεχώς παρακολουθούν την κατάσταση της ανεμογεννήτριας, ενώ παράλληλα συλλέγουν στατιστικά δεδομένα σχετικά με την λειτουργία της.

Ελέγχει ένα μεγάλο αριθμό διακοπών, υδραυλικών αντλιών και κινητήρων στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας. Με την αύξηση της ονομαστικής ισχύος των ανεμογεννητριών, απαιτείται ο ελεγκτής να έχει υψηλότερο ποσοστό διαθεσιμότητας.

Άτρακτος

Είναι ένα περίβλημα καλύμματος που βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, την γεννήτρια, τον ελεγκτή, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας και το φρένο. Στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες υψηλής ονομαστικής ισχύος δίνεται η δυνατότητα κατασκευής πλατφόρμας ελικοπτέρου πάνω στην άτρακτο για την διευκόλυνση συντήρησή της.

Πυλώνες

Οι πυλώνες κατασκευάζονται από ιδιαίτερα ανθεκτικά υλικά με σκοπό την διασφάλιση της σταθερότητας της ανεμογεννήτριας, ανεξάρτητα των καιρικών συνθηκών. Τα υλικά κατασκευής του είναι το ατσάλι σε σωληνοειδή μορφή και τσιμέντο ή ατσάλι σαν πλέγμα. Όσο αυξάνεται το ύψος του πύργου, τόσο αυξάνεται και η ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, υψηλότεροι πύργοι δίνουν την δυνατότητα στα πτερύγια να περιστρέφουν με μεγαλύτερη ταχύτητα και να παράγουν με τον τρόπο αυτό περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια.

Στροφή πτερυγίων

Τα πτερύγια στρέφονται γύρω από τον άξονά τους, για να ελέγχουν την γωνία που προσπίπτει ο αέρας και κατά συνέπεια την ταχύτητα περιστροφής τους. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί το όριο που θέτουν

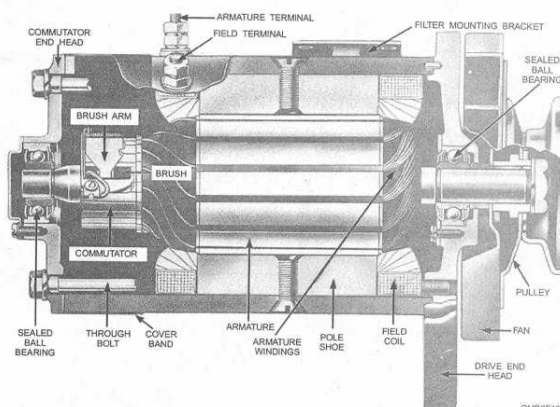
οι κατασκευαστές τους, τότε στρέφουν την επιφάνεια των πτερυγίων παράλληλα προς της κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να τα θέσουν εκτός λειτουργίας. Στις περιπτώσεις, βέβαια όπου η ένταση του ανέμου είναι ασθενής ή μέτρια η επιφάνειά τους στρέφεται κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου, για να μεγιστοποιηθεί η ταχύτητα περιστροφής τους.

Γεννήτρια

Η γεννήτρια αποτελεί τον βασικό μηχανισμό μετατροπής της κινητικής ενέργειας του δρομέα σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια, απαιτείται η τάση και η συχνότητα της γεννήτριας να ταυτίζεται με τις τιμές του δικτύου που γίνεται η διασύνδεση. Λόγω της κυμαινόμενης φύσης της αιολικής ενέργειας η λειτουργία της γεννήτριας σε μεταβλητή ταχύτητα είναι ιδιαίτερα επωφελής σε αντίθεση με την σταθερή ταχύτητα, καθώς μειώνει την καταπόνηση των πτερυγίων, του συστήματος μετάδοσης κίνησης και βελτιώνει την αεροδυναμική απόδοση του συστήματος.

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στις αιολικές μηχανές διακρίνονται στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

Στην πρώτη κατηγορία είναι οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, οι οποίες δεν συναντούν ευρέως χρήση σήμερα παρά μόνο σε ανεμογεννήτριες μικρής ονομαστικής ισχύος. Ο στάτης της DC γεννήτριας αποτελείται από έναν αριθμό πόλων που διεγείρονται είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από τυλίγματα συνεχούς ρεύματος. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω των ψηκτρών και του commutator και για αυτό απαιτείται συχνή και κοστοβόρα συντήρηση. Το συνεχές ρεύμα εξόδου μπορεί να αποθηκευτεί σε μονάδες αποθήκευσης ενέργειας ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο με την χρήση ηλεκτρονικών μετατροπών.

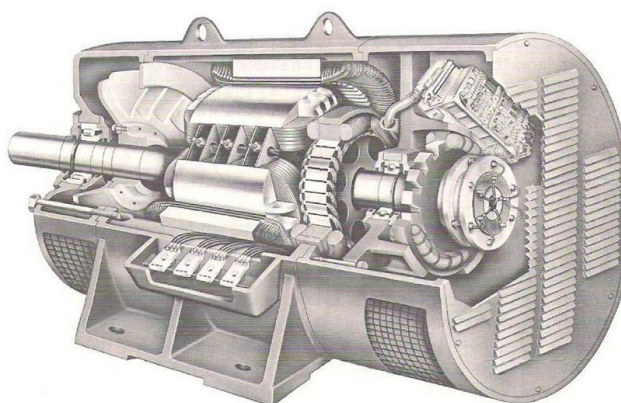


Σχήμα 2.3 Τομή γεννήτριας συνεχούς ρεύματος

Στην δεύτερη περίπτωση είναι οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Λαμβάνουν συνεχή ή DC διέγερση είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από ηλεκτρομαγνήτες και τον λόγο αυτό ονομάζονται σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSGs) και ηλεκτρικά διεγειρόμενες σύγχρονες μηχανές (EESGs). Τελευταία, χρησιμοποιούνται ευρέως οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη σε ανεμογεννήτριες με μικρή ονομαστική ισχύ, λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος και της μικρής μάζας τους. Βέβαια, δεδομένου ότι οι πραγματικές ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν, η ηλεκτρική ενέργεια δεν παράγεται με σταθερή συχνότητα, με αποτέλεσμα να

απαιτείται μετατροπή AC-DC-AC με τους ανάλογους μετατροπείς για σύνδεση στο δίκτυο.

Στις σύγχρονες γεννήτριες η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να διατηρείται σταθερή με την σύγχρονη, καθώς σε διαφορετική περίπτωση ο συγχρονισμός χάνεται. Ο έλεγχος της άεργου ισχύος στο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας μπορεί θεωρητικά να ελεγχθεί εύκολα μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της ηλεκτρικής διέγερσης. Επιπλέον, οι σύγχρονες μηχανές σταθερής ταχύτητας αποφεύγονται, καθώς οι περιοδικές διαταραχές, το φαινόμενο σκίασης και η τυχαία μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου θα περνούσαν στο ηλεκτρικό δίκτυο, υποβαθμίζοντας την παρεχόμενη ποιότητα ισχύος. Γενικά, οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πιο δαπανηρές, πολύπλοκες και επιρρεπείς σε αστοχίες σε σύγκριση με τις επαγωγικές γεννήτριες.



Σχήμα 2.4 Τομή σύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος

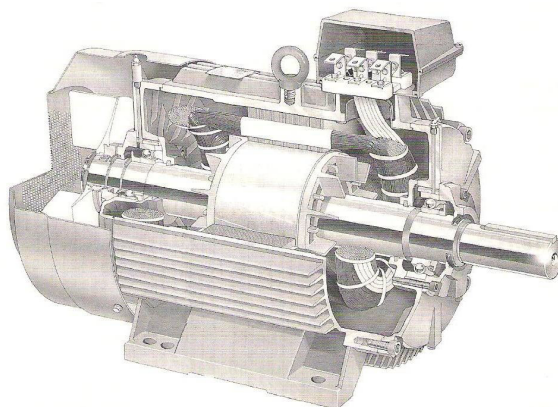
Στις σύγχρονες γεννήτριες η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να διατηρείται σταθερή με την σύγχρονη, καθώς σε διαφορετική περίπτωση ο συγχρονισμός χάνεται. Ο έλεγχος της άεργου ισχύος στο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας μπορεί θεωρητικά να ελεγχθεί εύκολα μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της ηλεκτρικής διέγερσης. Επιπλέον, οι σύγχρονες μηχανές σταθερής ταχύτητας αποφεύγονται, καθώς οι περιοδικές διαταραχές, το φαινόμενο σκίασης και η τυχαία μεταβλητή ταχύτητα του ανέμου θα περνούσαν στο ηλεκτρικό δίκτυο, υποβαθμίζοντας την παρεχόμενη ποιότητα ισχύος. Γενικά, οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πιο δαπανηρές, πολύπλοκες και επιρρεπείς σε αστοχίες σε σύγκριση με τις επαγωγικές γεννήτριες.

Η τρίτη κατηγορία αποτελείται από τις ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ονομάζονται και επαγωγικές γεννήτριες, ενώ διακρίνονται σε δύο τύπους, τις επαγωγικές γεννήτριες σταθερών στροφών (FSIGs) με δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού και τις επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (DFIGs) τυλιγμένου δρομέα. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο και είναι επιρρεπείς στην διατήρηση σταθερής τάσης. Για τον λόγο αυτό γίνεται αντιστάθμιση άεργου ισχύος με την χρήση πυκνωτών ή ηλεκτρονικών ισχύος. Βέβαια, όταν χρησιμοποιούνται πυκνωτές για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος, υπάρχει ο κίνδυνος να προκληθεί αυτοδιέγερση.

Οι FSIGs λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα, αλλά παρουσιάζουν πολλούς περιορισμούς, όπως την λειτουργία σε στενό εύρος διακριτών ταχυτήτων, τις υψηλές απαιτήσεις χώρου στην περιοχή εγκατάστασης, τα υψηλά επίπεδα

θορύβου και την χαμηλή απόδοση και αξιοπιστία. Ακόμα, οι εν λόγω γεννήτριες απαιτούν συχνή συντήρηση που πολλές φορές είναι αναποτελεσματική.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες οι FSIGs έχουν αντικατασταθεί με τις DFIGS. Οι συγκεκριμένες γεννήτριες μπορούν να λειτουργούν σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων (συνήθως $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας). Ως αποτέλεσμα, έχουν υψηλή απόδοση, χαμηλές μηχανικές καταπονήσεις και διακυμάνσεις ισχύος, ενώ προσφέρεται και δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος.



Σχήμα 2.5 Τομή ασύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος

2.8.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Τα συστήματα των ανεμογεννητριών χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του άξονα της ανεμογεννήτριας, την κατεύθυνση του δρομέα και τον αριθμό των πτερυγίων.

Ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του άξονα

Στην κατηγορία αυτή διακρίνονται οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούν το πιο σύνηθες τύπο ανεμογεννητριών σήμερα. Ο άξονας τους είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και συνήθως παράλληλα με την διεύθυνση του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες του συγκεκριμένου τύπου έχουν συνήθως 2-3 πτερύγια, ενώ χαρακτηριστικό των πτερυγίων είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Τέλος, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης τους χρησιμοποιούν σύστημα προσανατολισμού ανάλογα με την διεύθυνση του ανέμου, το οποίο λειτουργεί με αισθητήρες ή καθοδηγητικό πτερύγιο.



Σχήμα 2.6 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα διαθέτουν πτερύγια που είναι προσαρτημένα στην κορυφή και στην βάση του κατακόρυφου δρομέα. Η πιο εμπορική εκδοχή τους σήμερα είναι η ανεμογεννήτρια Darrieus, η οποία βρίσκει μικρή εφαρμογή μιας και οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν επικρατήσει.

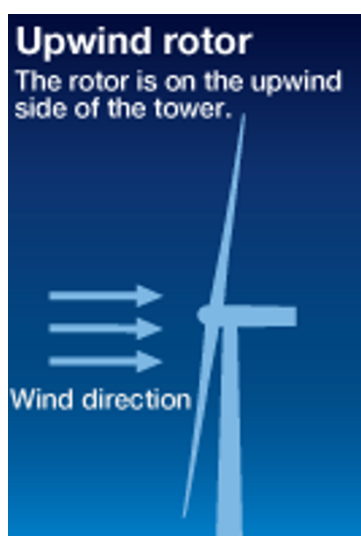


Σχήμα 2.7 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Ανάλογα με την κατεύθυνση του δρομέα

Η συγκεκριμένη κατηγορία απαρτίζεται από τις ανεμογεννήτριες που ο δρομέας είναι τοποθετημένος προς την κατεύθυνση του ανέμου, αλλά και τις ανεμογεννήτριες που ο δρομέας είναι τοποθετημένος αντίθετα από την κατεύθυνση από του ανέμου.

Στην πρώτη υποκατηγορία δεν υπάρχει μείωση της κινητικής ενέργειας του ανέμου όταν αυτός περνά από την άτρακτο. Βέβαια, παρουσιάζεται έχει ως κύριο μειονέκτημα ότι ο δρομέας πρέπει να τοποθετείται μακριά από τον πύργο, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη καλωδίωση και έτσι το κόστος εγκατάστασης να αυξάνεται. Τέλος, στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται και το γεγονός ότι απαιτείται ο μηχανισμός παρεκκλίσεων για την περιστροφή του δρομέα στην φορά του ανέμου. Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών σχεδιάζεται με τον τρόπο αυτό.



Σχήμα 2.8 Ανεμογεννήτρια με τον δρομέα τοποθετημένο προς την κατεύθυνση του ανέμου

Στην δεύτερη υποκατηγορία ο δρομέας βρίσκεται στην πίσω πλευρά της άτρακτου, ενώ η ανεμογεννήτρια μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς μηχανισμό παρεκκλίσεων. Ακόμα, οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους είναι αρκετά ελαφρότερες συγκριτικά με την προαναφερθείσα υποκατηγορία, καθιστώντας την οικονομικότερη λύση. Βέβαια, βασικός λόγος που δεν προτιμώνται είναι η διακύμανση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ο δρομέας περνά μέσα από τους στρόβιλους που δημιουργούνται μέσα στην άτρακτο, προκαλώντας έτσι μεγαλύτερη κόπωση στα υλικά της μηχανής, μειώνοντας τον χρόνο ζωής της ανεμογεννήτριας και αυξάνοντας παράλληλα το κόστος συντήρησής της.



Σχήμα 2.9 Ανεμογεννήτρια με τον δρομέα τοποθετημένο προς την κατεύθυνση αντίθετη του ανέμου

Ανάλογα των αριθμό των πτερυγίων

Αν και οι περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από τρεις πτερωτές υπάρχουν και αυτές με μια ή δύο πτερωτές.

Οι ανεμογεννήτριες με μια πτερωτή συνιστούν την δομικά πιο αποδοτική σχεδίαση για το πτερύγιο του δρομέα, καθώς έχει τις μεγαλύτερες διαστάσεις τομής πτερυγίου με όλη την εγκατεστημένη επιφάνεια του πτερυγίου σε μια μόνο δοκό. Ακόμα στις περιπτώσεις, όπου η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, η συγκεκριμένη κατηγορία ανεμογεννητριών σταματά την λειτουργία της με τρόπο τέτοιο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι δυνάμεις που δέχεται η ανεμογεννήτρια. Το χαμηλό κόστος αποτελεί παράγοντα προτίμησής τους σε σύγκριση με τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες. Βέβαια, οι συγκεκριμένες μηχανές δεν είναι ιδιαίτερα διαδομένες, καθώς παρουσιάζουν μια σειρά μειονεκτημάτων. Συγκεκριμένα, η απόδοση που παρουσιάζουν είναι χαμηλή σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες πολλών πτερυγίων, αφού ο δρομέας πρέπει να αποκτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα. Η υψηλή ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου προκαλεί υψηλά επίπεδα θορύβου στην περιοχή όπου είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Το κυριότερο μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η έλλειψη σταθερότητας, λόγω της ύπαρξης μόνο ενός πτερυγίου. Έτσι, για την διασφάλιση της ισορροπίας τοποθετείται ένα αντίβαρο στην άλλη πλευρά της βάσης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το συνολικό βάρος της εγκατάστασης.



Σχήμα 2.10 Ανεμογεννήτρια με ένα πτερύγιο

Οι ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια παρουσιάζουν προβλήματα ευστάθειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν η ανεμογεννήτρια στρέφεται προς τον άνεμο, οι δυνάμεις περιστροφής αλλάζουν σημαντικά καθώς τα πτερύγια περιστρέφονται. Αυτή η μεταβαλλόμενη δύναμη καθιστά αυτού του είδους τις ανεμογεννήτριες ασταθείς. Ακόμα, η υψηλή ταχύτητα περιστροφής για την λειτουργία τους δημιουργεί προβλήματα θορύβου. Τέλος, η σύγκριση τους με τις ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων δεν είναι εφικτή, καθώς απουσία ενός επιπλέον πτερυγίου δεν μεταφράζεται σε χαμηλότερο συνολικό κόστος. Το κόστος δύο πτερυγίων ενός δρομέα δύο πτερυγίων δεν ισοδυναμεί με το αντίστοιχο κόστος δύο πτερυγίων ενός δρομέα τριών πτερυγίων.



Σχήμα 2.11 Ανεμογεννήτρια με δύο πτερύγια

Οι ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων αποτελούν την πιο διαδεδομένη κατηγορία, καθώς διασφαλίζεται η συνολική σταθερότητα της μηχανής σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατηγορίες ανεμογεννητριών. Η πλειοψηφία των μηχανών αυτών στρέφουν τον δρομέα στην κατεύθυνση του ανέμου, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούν ηλεκτρικές μηχανές στον μηχανισμό των παρεκκλίσεων τους.



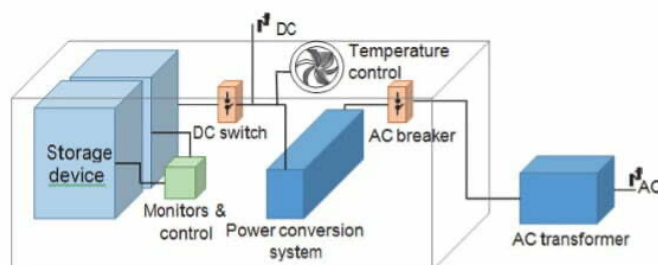
Σχήμα 2.12 Ανεμογεννήτρια με τρία πτερύγια

3. Αποθήκευση ενέργειας στο έξυπνο δίκτυο

Οι μονάδες αποθήκευσης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος των έξυπνων δικτύων. Αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης ή υψηλής παραγωγής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αποδίδουν στο δίκτυο στις περιόδους χαμηλής παραγωγής ή υψηλής ζήτησης ενέργειας. Εκτός από την βασική τους λειτουργία, διαθέτουν πλήθος άλλων λειτουργιών που συμβάλλουν στην ποιότητα ισχύος, την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την βέλτιστη οικονομική λειτουργία του δικτύου. Η δομή τους είναι πολύπλοκη, μιας και αποτελείται από αρκετά ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης, ελέγχου και προγραμματισμού με σκοπό την αποτελεσματικότητα και τον μεγάλο χρόνο ζωής. Όσο αφορά την διαστασιολόγηση τους, αυτή διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή και το σημείο τοποθέτησης τους ως προς το δίκτυο διανομής και μεταφοράς.

3.1 Δομή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούνται από διαφορετικά εσωτερικά μέρη. Κάθε μέρος έχει σημαντικό ρόλο και επιτελεί διαφορετική λειτουργία με κύριο στόχο την βέλτιστη, ασφαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος των μπαταριών. Στο σχήμα απεικονίζεται η σύνδεση των εξαρτημάτων του BESS.

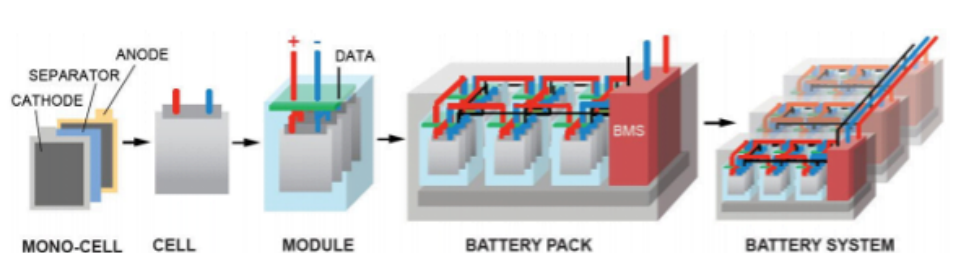


Σχήμα 3.1 Δομή του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το BESS.

Battery System

Αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Αποθηκεύει ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ή το δίκτυο και την αποδίδει όποτε κρίνεται απαραίτητο. Η δομή του συστήματος μπαταρίας απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 3.2 Δομή του συστήματος μπαταριών

Mono-Cell & Cells

Η μονή κυψέλη αποτελεί την πιο βασική μονάδα. Η κυψέλη απαρτίζεται από πολλές μονές κυψέλες. Η κυψέλη αναφέρεται σε μια άνοδο και κάθοδο που διαχωρίζεται από τον ηλεκτρολύτη και χρησιμοποιείται για την παραγωγή τάσης και ρεύματος. Η μπαταρία μπορεί από μια ή περισσότερες κυψέλες, που συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα.

Module

Το δομικό στοιχείο είναι ένας συνδυασμός πολλών μεμονωμένων κυψελών μπαταρίας που συνδέονται μεταξύ τους. Πολλά δομικά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους απαρτίζοντας τις συστοιχίες μπαταριών.

Battery Pack

Μια συστοιχία μπαταριών είναι ένα σύνολο πανομοιότυπων δομικών στοιχείων ή μεμονωμένων κυψελών. Ανάλογα με την επιθυμητή τάση, ρεύμα και ισχύ συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα.

Battery System

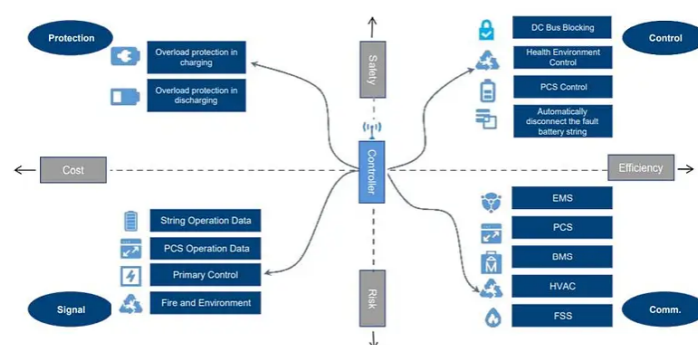
Το σύστημα μπαταριών απαρτίζεται από έναν αριθμό συστοιχιών μπαταριών. Υπάρχουν όρια στο πλήθος των συστοιχιών σε ένα σύστημα μπαταριών με βάση τους περιορισμούς της τάσης του συνεχούς ρεύματος και των ανάλογων πιστοποιήσεων.

Power Conversion System

Το σύστημα μπαταριών εντός του BESS αποθηκεύει και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε μορφή συνεχούς ρεύματος. Όμως, τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα και φορτία απαιτούν εναλλασσόμενο ρεύμα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα σύστημα μετατροπής ισχύος ή ένας υβριδικός αντιστροφέας. Τα εν λόγω αναφερόμενα συστήματα είναι δυναμικά, καθώς η ροή ισχύος είναι αμφίδρομη, δηλαδή το εναλλασσόμενο ρεύμα δικτύου μετατρέπεται σε συνεχές για να φορτίσει το σύστημα της μπαταρίας, ενώ το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας μπορεί να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο για την τροφοδοσία του δικτύου ή ηλεκτρικών φορτίων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει φόρτιση και εκφόρτιση του συστήματος της μπαταρίας. Βέβαια, η διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας διαφέρει ανάλογα την εφαρμογή, με την απόδοση των υβριδικών αντιστροφέων ή των συστημάτων μετατροπής ισχύος να έχουν καθοριστική συμβολή. Για να επιτευχθεί αυτό, είναι αναγκαίο να λαμβάνουν σήματα αναφοράς σχετικά με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Controller

Ο Controller είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση, τον έλεγχο, την προστασία, τον προγραμματισμό και την επικοινωνία με όλα τα εξαρτήματα του BESS. Ακόμα γίνεται σύνδεση του με εξωτερικές συσκευές, για την διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας του. Βασική λειτουργία του ελεγκτή, είναι η προστασία από την υπερφόρτωση και την αντίστροφη ισχύς. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματωθεί με το SCADA και το EMS.



Σχήμα 3.3 Λειτουργίες του Controller

Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

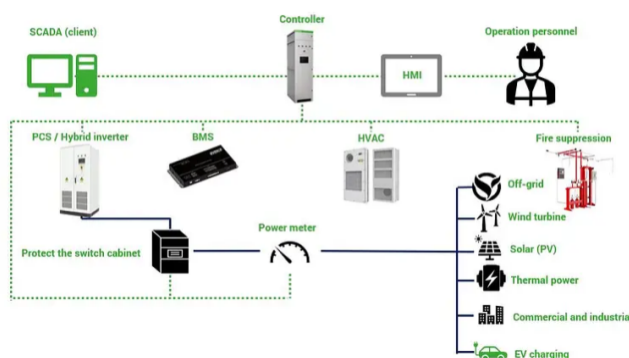
Αποτελεί βασική μέρος του BESS, μιας και είναι υπεύθυνο για την ρύθμιση της εσωτερικής θερμοκρασίας, μετακινώντας τον αέρα από και προς το εσωτερικό του συστήματος. Με την διατήρηση της θερμοκρασίας στο επιθυμητό επίπεδο, διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία των μπαταριών και παρατείνεται η διάρκεια ζωής τους. Σε διαφορετική περίπτωση, οι μπαταρίες μπορεί να υπερθερμανθούν, μειώνοντας την διάρκεια ζωής τους και της απόδοσης τους, ενώ δεν αποκλείεται να προκληθεί και πυρκαγιά. Τέλος, με το σύστημα θέρμανσης κατά περιόδους χαμηλών θερμοκρασιών αποφεύγεται η μείωση της χωρητικότητας των μπαταριών, της τάσης κατά την λειτουργία τους, ενώ αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση μειώνοντας το ρεύμα φόρτισης τους.

Fire Suppression

Το σύστημα κατάσβεσης της πυρκαγιάς αποτελεί ένα επιπλέον επίπεδο προστασίας στο σύστημα των μπαταριών. Αν ανιχνευθεί αυξημένη θερμοκρασία εκτός των κατασκευαστικών ορίων, το σύστημα διαχείρισης μπαταριών, θα απενεργοποιήσει αυτόματα το σύστημα. Ωστόσο, το BMS δεν μπορεί να αποτελεί το μοναδικό επίπεδο προστασίας, καθώς υπάρχει η πιθανότητα θερμικής διαρροής, ενώ ο περιορισμός του φαινομένου είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Για τον λόγο αυτό, μέσω των κατάλληλων αισθητήρων καπνού, αερίων και θερμοκρασίας ενεργοποιείται το σύστημα κατάσβεσης.

Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA)

Το σύστημα επικεντρώνεται στον έλεγχο και παρακολούθηση των εξαρτημάτων εντός του BESS. Είναι υπεύθυνο για την επικοινωνία με το PLC, με το BMS για την παρακολούθηση της κατάστασης της μπαταρίας, με το PCS/Υβριδικό αντιστροφέα και κάποιους βοηθητικούς μετρητές. Από την διεπαφή ανθρώπου μηχανής (HMI) οι χειριστές επικοινωνούν μεταξύ του BMS και άλλων βοηθητικών υποσυστημάτων. Το SCADA μπορεί να αναλάβει την λειτουργία του EMS.



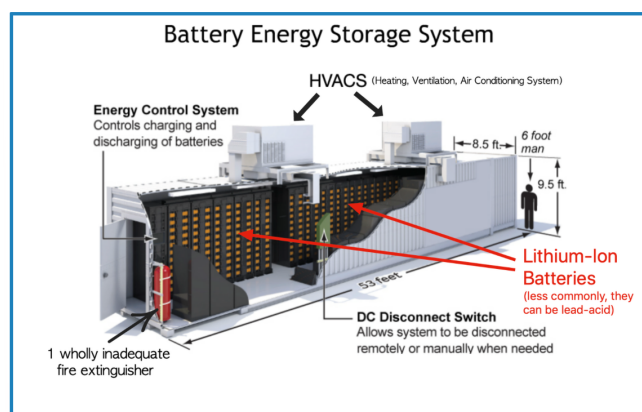
Σχήμα 3.4 Δομή SCADA

Energy Management System (EMS)

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο και προγραμματισμό του BESS. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, επικοινωνεί με το PCS/Υβριδικό αντιστροφέα και το BMS, λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από το ηλεκτρικό δίκτυο, τους μετασχηματιστές, τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες, τις ανεμογεννήτριες και τα φορτία. Επιπλέον, γίνεται ο κατάλληλος προγραμματισμός για την φόρτιση και την αποφόρτιση της μπαταρίας ανάλογα με την λειτουργία του BESS. Ακόμα, βελτιστοποιείται η απόδοση των μπαταριών και η διάρκεια ζωής τους, ενώ παράλληλα γίνεται εφαρμογή των περιορισμών του PCS/Υβριδικού αντιστροφέα. Για την βέλτιστη μελλοντική λειτουργία του BESS γίνεται ανάλυση και συλλογή στατιστικών δεδομένων της απόδοσης του.

3.2 Χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο του έξυπνου δικτύου, καθώς είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση της ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την απόδοση της αποθηκευμένης ενέργειας στο δίκτυο για την κάλυψη των αναγκών. Βέβαια, εκτός από τις βασικές λειτουργίες που περιεγράφηκαν παραπάνω ο ρόλος τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός στην εξάλειψη των φαινομένων που δημιουργούν υποβαθμίζουν την ποιότητα ισχύος και υποθάλπουν την αξιοπιστία του δικτύου. Η χρήση τους έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, αφού αποτελεί πιθανή λύση για την διασύνδεση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.5 Δομή συστήματος αποθήκευσης ενέργειας

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες περιγράφονται από κάποια κύρια χαρακτηριστικά, ώστε να γίνει η κατάλληλη διαστασιολόγηση τους ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:

Rated Power Capacity

Είναι συνολική δυνατή ικανότητα εκφόρτισης του BESS ή ο μέγιστος ρυθμός εκφόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί με το επίπεδο φόρτισης να είναι μέγιστο.

Energy Capacity

Είναι το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί (μετράται σε kWh ή MWh).

Storage Duration

Είναι το χρονικό διάστημα που ο αποθηκευτικός χώρος μπορεί να εκφορτιστεί πριν εξαντλήσει την διαθέσιμη ενέργεια.

Cycle life/lifetime

Είναι το χρονικό διάστημα ή οι συνολικοί κύκλοι που το σύστημα αποθήκευσης έχει την δυνατότητα να παρέχει κανονική φόρτιση ή εκφόρτιση πριν να παρουσιαστεί κάποια αποτυχία ή την σημαντική υποβάθμιση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.

Self-discharge

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το αποθηκευμένο φορτίο της μπαταρίας μειώνεται, χωρίς η κατανάλωση αυτή να προέρχεται από κάποιο φορτίο ή το δίκτυο, αλλά λόγω των εσωτερικών χημικών αντιδράσεων των μπαταριών. Η αυτοεκφόρτιση εκφράζεται ως ποσοστό απώλειας φόρτισης κατά την διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος. Αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος που είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη σε εφαρμογές που η αποθηκευμένη ενέργεια διατηρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα.

State of Charge

Αντιπροσωπεύει το τρέχον επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας και εκφράζεται ως ποσοστό. Ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης επηρεάζεται η ικανότητα της μπαταρίας να παρέχει ενέργεια στο διασυνδεδεμένο δίκτυο ανά πάσα στιγμή. Η κατάσταση φόρτισης δίνεται από τον τύπο:

$$SOC = 1 - \frac{1}{C_{B,nom}} \int_0^t i_{batt}(\tau) d\tau, \quad 0 < SOC < 1$$

$C_{B,nom}$: ονομαστική χωρητικότητα (Ah),

i_{batt} : ρεύμα εκφόρτισης (A),

t: χρόνος (h)

Round - trip Efficiency

Είναι ο λόγος της ενέργειας που φορτίζεται στην μπαταρία προς την ενέργεια που εκφορτίζεται από την μπαταρία. Μπορεί να αντιπροσωπεύει την συνολική απόδοση DC-DC ή AC-AC του συνολικού συστήματος της μονάδας αποθήκευσης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών εκφόρτισης, αλλά και άλλων ηλεκτρικών απωλειών.

3.3 Σημεία τοποθέτησης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες δύνανται να τοποθετηθούν σε διάφορα σημεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η χωροθέτηση του έχει σημαντικές επιπτώσεις στην εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που παρέχει, ενώ η τελική θέση εγκατάστασης εξαρτάται από την περίπτωση της προβλεπόμενης χρήσης του. Βέβαια, κατά την χωροθέτηση του BESS είναι σημαντικό να αναλύεται το κόστος και το όφελος που προσδίδει η κάθε τοποθεσία εγκατάστασης, για να καλυφθούν εν τέλει οι ανάγκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημεία τοποθέτησης των BESS είναι τα παρακάτω.

Δίκτυο μεταφοράς

Η διασύνδεση των BESS με το δίκτυο μεταφοράς έχει ευρεία πλεονεκτημάτων. Αρχικά, με την εγκατάσταση των BESS σε επίπεδο μεταφοράς, δύνανται να αναβληθούν αναβαθμίσεις του δικτύου για την κάλυψη των φορτίων αιχμής. Ακόμα μπορούν λειτουργήσουν ως εφεδρείες, για να καλύψουν την ανταπόκριση στις αλλαγές παραγωγής και ζήτησης, βελτιώνοντας παράλληλα την αξιοπιστία του συστήματος.

Δίκτυο Διανομής

Τα συστήματα αποθήκευσης που τοποθετούνται στο δίκτυο διανομής, συμβάλλουν στην επίλυση των προβλημάτων συμφόρησης του δικτύου, αλλά και την βελτίωση της ποιότητας ισχύος. Επιπρόσθετα, παρατηρούνται μικρότερες απώλειες ενέργειας κατά την διανομή, ενώ βελτιώνεται η ανθεκτικότητα του δικτύου κατά την διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων, παρέχοντας στα φορτία σταθερή ποιότητα ισχύος. Η εγκατάσταση τους προτιμάται κοντά στα φορτία συγκριτικά με τις γεννήτριες, λόγω της έλλειψης εκπομπής ρύπων και της απαίτησης μικρότερων εκτάσεων.

Συνεγκατεστημένες με τις ΑΠΕ

Η εγκατάσταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις από τα διασυνδεδεμένα φορτία απαιτεί μεγάλου μήκους δίκτυο μεταφοράς και κατά συνέπεια υψηλότερο κόστος της συνολικής εγκατάστασης και μεγαλύτερες απώλειες ισχύος. Δεδομένης της μεταβλητής παραγωγής των ΑΠΕ, η χωρητικότητα των γραμμών μεταφοράς δεν χρησιμοποιείται για μεγάλες χρονικές περιόδους κατά την διάρκεια ενός έτους. Με την χρήση των BESS μπορεί να μειωθεί η απαιτούμενη χωρητικότητα των γραμμών, αποθηκεύοντας την ενέργεια σε περιόδους υψηλής παραγωγής από ΑΠΕ και την απόδοση της σε περιόδους χαμηλής παραγωγής. Ακόμα, ένα βασικό πλεονέκτημα είναι η μείωση των αποσυνδέσεων των ΑΠΕ με το δίκτυο, λόγω συμφόρησης του ή μικρής ζήτησης ενέργειας, αξιοποιώντας την ανεκμετάλλευτη ενέργεια.

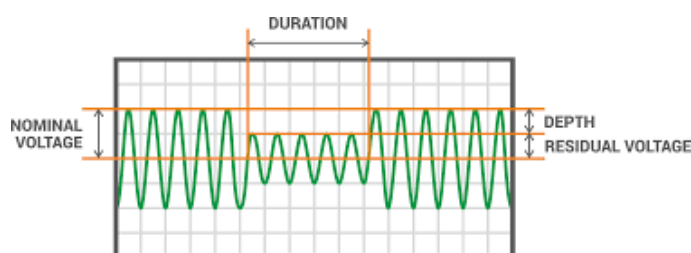
3.4 Επίλυση προβλημάτων στην ποιότητα ισχύος

Η ποιότητα ισχύος είναι μια παράμετρος που αναφέρεται στην ικανότητα ενός δικτύου ηλεκτρική ενέργειας να προσφέρει σταθερή και ποιοτική ηλεκτρικής ισχύς στο δίκτυο. Είναι σημαντική για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών φορτίων και την αποφυγή πιθανών βλαβών ή δυσλειτουργιών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ποιότητα ισχύος υποβαθμίζεται αισθητά με την εμφάνιση των παρακάτω φαινομένων.

Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας σε ένα έξυπνο δίκτυο, εκτός της ιδιότητας τους να αποθηκεύουν την παραγόμενη ενέργεια και να την αποδώσουν όποτε απαιτείται, έχουν την δυνατότητα να εξαλείφουν προβλήματα που σχετίζονται με την ποιότητα ισχύος.

Voltage Dips

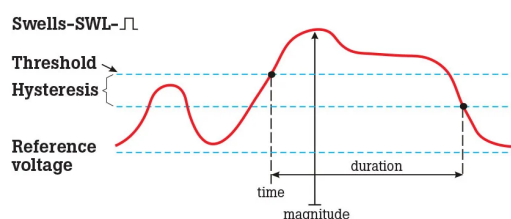
Παρατηρείται πτώση τάσης σε ποσοστό ίσο ή μεγαλύτερο του 10% της ονομαστικής τάσης. Συνήθως προκαλούνται από την εκκίνηση μεγάλων φορτίων και κυρίως επαγωγικών, αλλά και από την επικράτηση ακραίων καιρικών συνθηκών. Η υπόταση είναι η πτώση τάσης που διαρκεί περισσότερο από ένα λεπτό.



Σχήμα 3.6 Voltage Dip

Voltage Swells

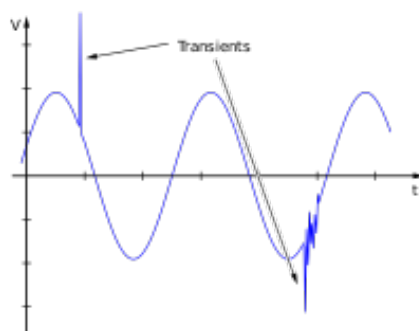
Παρατηρείται ανύψωση τάσης σε ποσοστό ίσο ή μεγαλύτερο του 10% της ονομαστικής τιμής. Συνήθως προκαλούνται από την απότομη μείωση φορτίου, την σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών, την σύνδεση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο ή την εμφάνιση μονοφασικού σφάλματος. Η υπέρταση είναι η ανύψωση τάσης που διαρκεί περισσότερο από ένα λεπτό.



Σχήμα 3.7 Voltage Swells

Transients

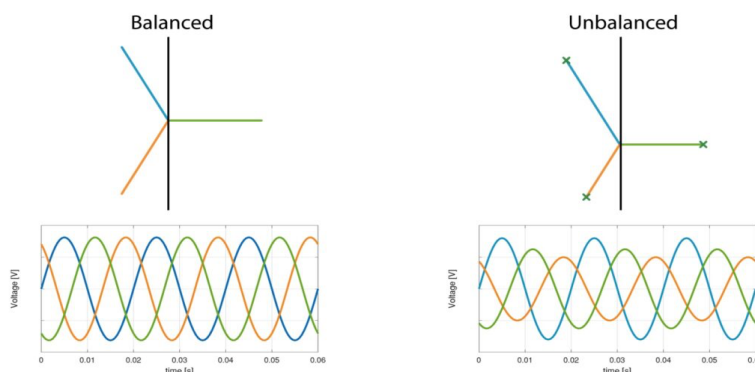
Παρατηρούνται υπερτάσεις μεγάλου πλάτους και μικρής διάρκειας που είναι αποτέλεσμα της απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Προκαλούνται κατά κύριο λόγο από την σύνδεση και αποσύνδεση κυρίως επαγωγικών φορτίων, αλλά και από κεραυνούς.



Σχήμα 3.8 Transients

Voltage Unbalance

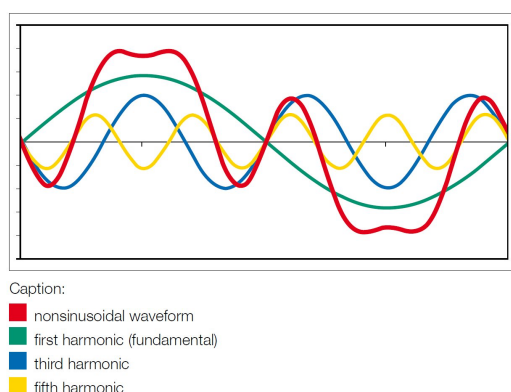
Παρατηρείται διαφορά μεταξύ του πλάτους ή/και της φάσης μεταξύ των τριών φάσεων. Προκαλείται συνήθως από την άνιση κατανομή των φορτίων στις τρεις φάσεις, από την παρουσία βραχυκυκλωμάτων στο δίκτυο και την μη ισορροπημένη παροχή ενέργειας από το δίκτυο. Το φαινόμενο αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την θερμοκρασία στους μετασχηματιστές και τους κινητήρες και κατά συνέπεια προκαλεί αστοχίες στην ομαλή λειτουργία τους και πολλές φορές βλάβες. Αυτό συμβαίνει, καθώς η ασυμμετρία τάσεων δημιουργεί ασυμμετρία υψηλών ρευμάτων, με τα πλάτη της έντασης του ρεύματος να είναι κατά έξι έως δέκα φορές μεγαλύτερα από αυτά της τάσης.



Σχήμα 3.9 Balanced and Unbalanced Voltage

Harmonics

Οι αρμονικές συνιστώσες είναι περιοδικές μη ημιτονοειδής κυματομορφές με συχνότητα πολλαπλάσια της βασικής ημιτονοειδούς συχνότητας της κυματομορφής με την οποία τροφοδοτείται το φορτίο. Παράγονται από τα μη γραμμικά φορτία που είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο.



Σχήμα 3.10 Harmonics

Η μέτρηση της παραμόρφωσης λόγω αρμονικών σε ένα δίκτυο δίνεται από τον συντελεστή αρμονικών (THD). Ο εν λόγω συντελεστής ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους RMS ενός συνόλου υψηλότερων αρμονικών συχνοτήτων προς το πλάτος RMS της βασικής αρμονικής.

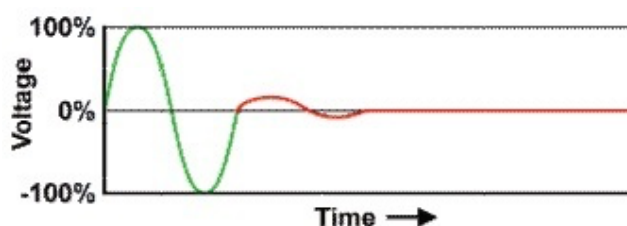
Ο συντελεστής αρμονικών δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1}$$

Η τιμή του συντελεστή αρμονικών τάσης θα πρέπει να είναι μικρότερος του 8%, για την διασφάλιση της ποιότητας ισχύος του δικτύου.

Voltage Interruptions

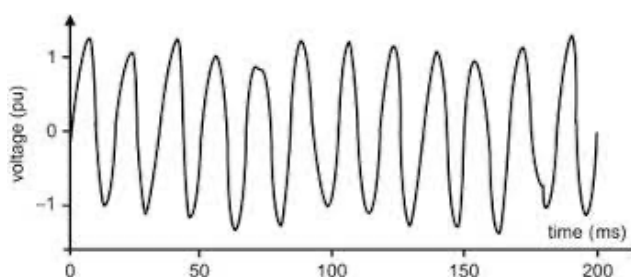
Παρατηρείται μεγάλη πτώση της RMS τιμής της τάσης ή πλήρης απώλεια τάσης, με το πλάτος της τάσης να είναι μικρότερο του 10% της ονομαστικής τάσης. Οι διακοπές τάσεις μπορεί να προέρχονται από την βλάβη ή δυσλειτουργία εξαρτημάτων ή από προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας. Οι μικρής διάρκειας διακοπές τάσης συνήθως είναι αποτέλεσμα δυσλειτουργίας ενός διακόπτη ή ασφάλειας. Οι μεγάλης διάρκειας διακοπές οφείλονται σε προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας, κατά την διάρκεια των οποίων ένα μέρος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποσυνδέεται για να εκτελεστούν εργασίες συντήρησης ή επισκευής του δικτύου.



Σχήμα 3.11 Voltage Interruption

Voltage fluctuations

Παρατηρείται μια σειρά μεταβολών στην κυματομορφή της τάσης ή μια συνεχής μεταβολή της RMS τάσης. Οι διακυμάνσεις τάσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται οι βηματικές μεταβολές τάσης, ενώ στην δεύτερη κυκλικές ή τυχαίες μεταβολές που προκαλούνται από διακυμάνσεις της σύνθετης αντίστασης του φορτίου. Οι διακυμάνσεις τάσης υποβαθμίζουν την απόδοση, καθώς προκαλούν αστάθεια στα επίπεδα τάσης και ρεύματος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τα κύρια αίτια που προκαλούν το φαινόμενο αυτό είναι η εκκίνηση κινητήρων και η ταχεία μεταβολή του φορτίου των κινητήρων. Οι συνεχείς περιοδικές διακυμάνσεις της τάσης είναι το αίτιο του flicker.



Σχήμα 3.12 Voltage fluctuations

3.5 Λειτουργίες της αποθηκευτικής μονάδας ενέργειας

Η μονάδα αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιείται στο έξυπνο δίκτυο, εκτός από την προφανή διεργασία της αποθήκευσης ενέργειας και την απόδοση της στο δίκτυο, εκτελεί και άλλες διεργασίες εξαιρετικής σημασίας για την διαχείριση της ποιότητας ισχύος, αλλά και του δικτύου. Παρακάτω γίνεται αναλυτική περιγραφή των λειτουργιών.

Time Shifting

Γίνεται αποθήκευση ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές που είναι διασυνδεδεμένες στο έξυπνο δίκτυο ή αγορά ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο όταν η τιμή της είναι χαμηλή. Η αποθηκευμένη ενέργεια αξιοποιείται για την κάλυψη των αναγκών του έξυπνου δικτύου ή πωλείται όταν η τιμή της ενέργειας είναι υψηλή. Με την διαδικασία αυτή αξιοποιείται η ενέργεια κατά βέλτιστο οικονομικό τρόπο.

Capacity Firming

Η παραγωγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μεταβλητή και ασυνεχής. Η εν λόγω λειτουργία εξομαλύνει τις διακυμάνσεις τάσεως και ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Peak Shaving

Μείωση της ζήτησης αιχμής για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους της ενέργειας τόσο στους οικιακούς καταναλωτές, όσο και στους βιομηχανικούς.

Load Following

Προσαρμογή της παροχής ενέργειας στην ζήτηση του φορτίου για την κάλυψη βραχυπρόθεσμων διακυμάνσεων του φορτίου, λόγω της ταχύτερης απόκρισης των μονάδων αποθήκευσης από την γεννήτριες.

Spinning Reserve

Κάλυψη των ελλείψεων ισχύος ενός δικτύου για χρονικό διάστημα τουλάχιστον μιας ώρας μέχρις ότου το εφεδρικό σύστημα να φτάσει την ονομαστική του τιμή.

Voltage Support

Υποστήριξη της σταθερότητας του συστήματος με την κατάλληλη ρύθμιση της άεργου ισχύος.

Black Start

Η διαδικασία αποκατάστασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μετά από διακοπή ρεύματος, χωρίς την υποστήριξη από εξωτερικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί να παραχθεί ενεργός ισχύς από το σύστημα της μπαταρίας για να χρησιμοποιηθεί ως ισχύς εκκίνησης για μεγάλους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

Frequency Regulation

Διατηρείται η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου κατά την διάρκεια διακυμάνσεων μικρής διάρκειας.

Reliability and Power quality

Γίνεται αντιστάθμιση των διακυμάνσεων των αρμονικών, flicker, sag, swell, διακοπών και μεταβατικών φαινομένων που υποβαθμίζουν την ποιότητα ισχύος και υποθάλπουν την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου. Αποτελεί βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

4. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στο έξυπνο δίκτυο

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασικό μέρος των του έξυπνου δικτύου. Αποτελείται από τις γραμμές διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, των 20kV και 400 V αντίστοιχα και από τους υποσταθμούς διανομής. Οι υποσταθμοί διανομής είναι υπεύθυνοι για τον υποβιβασμό της τάσης και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Οι καταναλωτές ως επί το πλείστον συνδέονται στην χαμηλή τάση, αν και βέβαια υπάρχουν περιπτώσεις σύνδεσης απευθείας στην μέση τάση, για την κάλυψη μεγαλύτερων φορτίων.

4.1 Δομή του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από διάφορες μονάδες, με την κάθε μια να εκτελεί διαφορετική λειτουργία. Παρακάτω περιγράφεται το κάθε δομικό στοιχείο του δικτύου διανομής.

Υποσταθμός Διανομής

Στους υποσταθμούς διανομής αποτελούν σημαντικό μέρος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς υποβιβάζουν την τάση από τα 20kV στα 400V, δηλαδή πραγματοποιείται το δεύτερο στάδιο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση υποβιβασμού είναι κατάλληλη για την τροφοδοσία των οικιακών καταναλωτών και μικρών καταναλωτών. Μερικοί υποσταθμοί έχουν την δυνατότητα να ελέγχονται από απόσταση με την χρήση συστημάτων αυτοματισμού. Η ομαλή λειτουργία τους είναι κρίσιμη για την αποδοτική και αξιόπιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Απαρτίζεται από τα παρακάτω δομικά στοιχεία.

Μετασχηματιστής

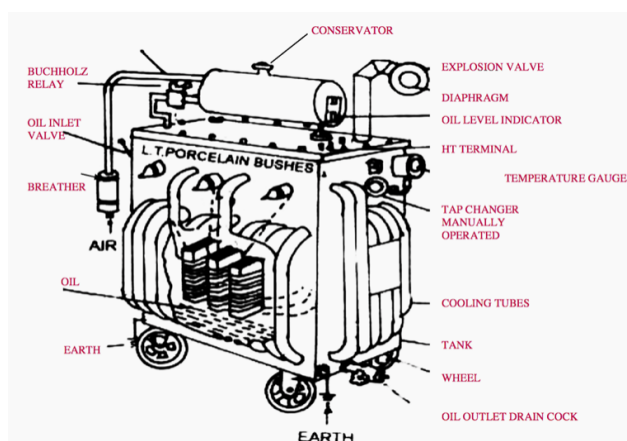
Είναι μια παθητική ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια μια τάσης και ρεύματος σε κάποια άλλη τάση και ρεύμα με δεδομένη συχνότητα. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής. Δηλαδή, όταν το πρωτεύον τύλιγμα διαρρέεται από εναλλασσόμενη τάση, δημιουργείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό επάγει την εναλλασσόμενη τάση στο δευτερεύον κύκλωμα. Σε ένα ιδανικό μετασχηματιστή ο λόγος των τάσεων του δευτερεύοντος πηνίου προς το πρωτεύον ισούται με τον λόγο του αριθμού των περιελίξεων του δευτερεύοντος πηνίου προς το πρωτεύον. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P}$$

Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου, ο μετασχηματιστής ανυψώνει την εναλλασσόμενη τάση αν $N_S > N_P$ ή την υποβιβάζει αν $N_S < N_P$.

Ο μετασχηματιστής συγκαταλέγεται στα πιο αποδοτικά ηλεκτρικά κυκλώματα, με την απόδοση του να ανέρχεται έως 99,75%. Το μέγεθος του διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή, από μερικά γραμμάρια σε εκατοντάδες τόνους.

Τα δομικά στοιχεία του μετασχηματιστή περιγράφονται παρακάτω.



Σχήμα 4.1 Δομικά στοιχεία μετασχηματιστή

Conservator

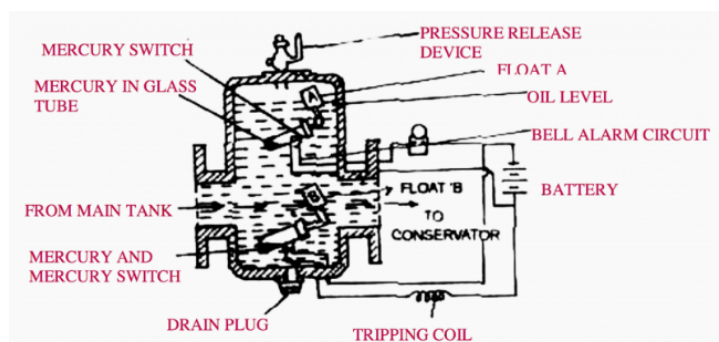
Πρόκειται για ένα δοχείο που περιέχει λάδι και είναι τοποθετημένο στην κορυφή του μετασχηματιστή και συνδέεται με την κύρια δεξαμενή με ένα σωλήνα. Ανάλογα με την θερμοκρασία, ο όγκος του λαδιού διαστέλλεται ή συστέλλεται, προκαλώντας άνοδο ή κάθοδο της στάθμης του λαδιού. Ο σκοπός του conservator είναι η διατήρηση του λαδιού σε σταθερό επίπεδο, ενώ σε περίπτωση διαστολής του να υπάρχει επαρκής χώρος.

Breather

Συνδέεται με το conservator και εμποδίζει την είσοδο της υγρασίας κατά την συστολή του λαδιού, μέσω του silica gel. Κατά την διάρκεια της διαστολής, είναι υπεύθυνο για την εξαγωγή αερίων από το conservator.

Buchholz Relay

Είναι ένας ηλεκτρονόμος που μόλις εμφανιστεί κάποιο σφάλμα ανοίγει το κύκλωμα του μετασχηματιστή. Λειτουργεί με αέριο και εγκαθίσταται μεταξύ του conservator και του σωλήνα του breather. Αποτελείται από δύο πλωτήρες λειτουργίας. Οι πλωτήρες αυτοί λειτουργούν με δύο διακόπτες υδραργύρου που παρέχονται χωριστά για τον κάθε ένα. Κάθε φορά που προκύπτει κάποια μικρή βλάβη ή η στάθμη του λαδιού είναι χαμηλή ενεργοποιείται ο πλωτήρας A (Σχήμα 4.6), ενώ στην περίπτωση σοβαρής βλάβης ενεργοποιείται ο πλωτήρας B, λόγω υπερβολικών αερίων. Με την ενεργοποίηση ενός από τους δύο πλωτήρες ο μετασχηματιστής τίθεται εκτός κυκλώματος, μέσω του διακόπτη του κυκλώματος.



Σχήμα 4.2 Buchholz Relay

Explosion Vent

Στην περίπτωση εμφάνισης μιας σημαντικής βλάβης στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, προκαλείται στιγμιαία εξάτμιση του λαδιού, με αποτέλεσμα να αυξηθεί πολύ γρήγορα η πίεση εντός του conservator. Εάν δεν εκτονωθεί η πίεση μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα θα προκληθεί έκρηξη του conservator. Ο σκοπός του συγκεκριμένου μηχανισμού είναι η απελευθέρωση της πίεσης από τον conservator και η γενική προστασία του μετασχηματιστή.

Oil Level Indicator

Δείχνει τη στάθμη του λαδιού στον conservator. Διαθέτει σήμανση σχετικά με την ελάχιστη και μέγιστη στάθμη.

Inlet Valve

Παρέχει δίοδο για την έκχυση του λαδιού στη δεξαμενή, σε περίπτωση καθαρισμού της ή έλλειψης λαδιού.

Outlet Valve

Παρέχει δίοδο για την εξαγωγή του λαδιού κατά την επισκευή ή όταν απαιτείται δείγμα λαδιού για έλεγχο.

Cooling Tubes

Οι εν λόγω σωλήνες αυξάνουν την επιφάνεια της δεξαμενής προς την ατμόσφαιρα, προσφέροντας καλύτερη και αποτελεσματικότερη ψύξη στο λάδι του μετασχηματιστή.

Tap Changer

Χρησιμοποιείται για την χειροκίνητη ρύθμιση της τάσης εξόδου συναρτήσει της τάσης γραμμής, μεταβάλλοντας τον αριθμό των στροφών σε μία περιέλιξη και έτσι τον λόγο στροφών του μετασχηματιστή.

Διακόπτης Κυκλώματος

Είναι εξοπλισμός που αυτόματα διακόπτει την παροχή ρεύματος στο σύστημα όταν παρουσιάζεται οποιοδήποτε σφάλμα ή βραχυκύκλωμα. Διακρίνεται για την ταχεία ανίχνευση και απομόνωση σφαλμάτων, ελαχιστοποιώντας τις ζημιές στο σημείο σφάλματος. Τα ρεύματα που αποκόπτονται μπορεί να είναι δέκα ή και περισσότερες φορές μεγαλύτερα από τα κανονικά ρεύματα. Αν και υπάρχουν πολλά είδη του συγκεκριμένου διακόπτη, στους υποσταθμούς διανομής χρησιμοποιούνται κυρίως oil, vacuum και air circuit breakers.



Σχήμα 4.3 Διακόπτης κυκλώματος κενού

Απαγωγέας Κεραυνών

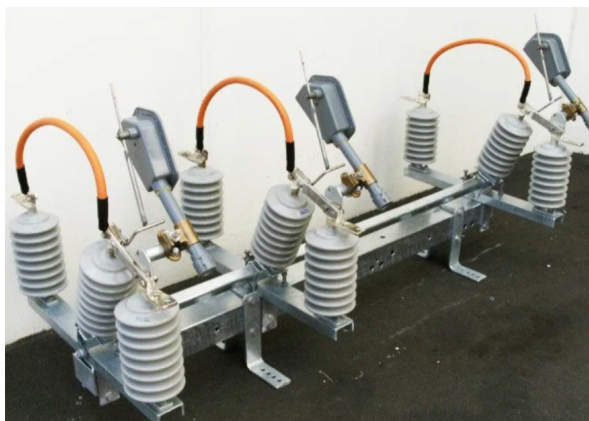
Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προστατευτικές διατάξεις του υποσταθμού διανομής, καθώς προστατεύει την εγκατάσταση και το εργαζόμενο προσωπικό από τις υψηλές τάσεις που προκαλούνται από τους κεραυνούς. Το ρεύμα από τον κεραυνό οδηγείται στην γη μέσω αγωγού.



Σχήμα 4.4 Απαγωγέας κεραυνών

Αποζεύκτης

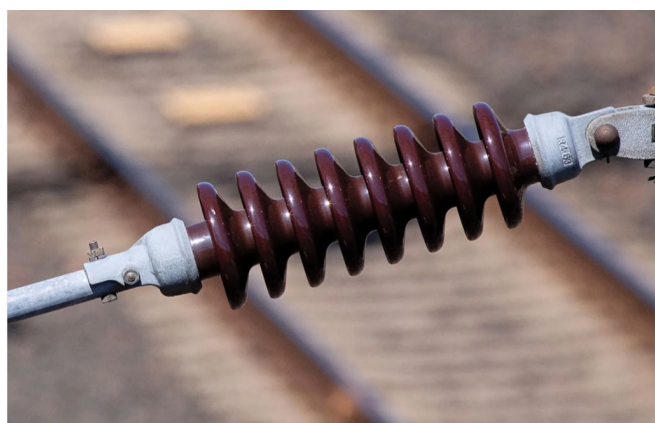
Χρησιμοποιείται για την απομόνωση του εξοπλισμού για συντήρηση, καθώς για την μεταφορά του φορτίο σε άλλο ζυγό. Ανάλογα με τον τύπο (κάθετο ή οριζόντιο) εξαρτάται η διάταξη του υποσταθμού. Ο οριζόντιος isolator καταλαμβάνει τις περισσότερες φορές περισσότερο χώρο από ότι ο κάθετος.



Σχήμα 4.5 Αποζεύκτης

Μονωτήρας

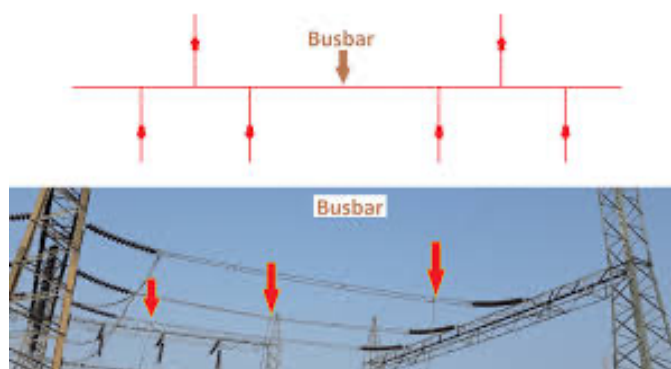
Μονώνει τον αγωγό υπό τάση και παρέχει μηχανική στήριξη. Προσδιορίζονται, από το μηχανικό φορτίο και την ηλεκτρική τους καταπόνηση. Βασικό στοιχείο για την επιλογή τους είναι η υπό βροχή μέγιστη ηλεκτρική τάση αντοχής, δηλαδή η ενεργός τιμή της τάσης που πρέπει να αντέχει συνεχώς ο μονωτήρας, κατά μήκος του, υπό βροχή με διεύθυνση 45° ως προς την κατακόρυφο. Η επαρκής μόνωση σε έναν υποσταθμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πρωταρχικής σημασίας, μιας και συμβάλλει στην αξιοπιστία του συστήματος και στην παροχή ασφάλειας στους εργαζόμενους στον χώρο.



Σχήμα 4.6 Μονωτήρας

Ζυγός

Είναι ένας μεταλλικός αγωγός ή ράβδος που χρησιμοποιείται για την σύνδεση ηλεκτρικού εξοπλισμού που βρίσκεται κοντά ο ένας στον άλλο, όταν τα ρεύματα είναι πολύ υψηλά. Ο ζυγός απαρτίζεται από έναν απομονωτή και τον διακόπτη του κυκλώματος και επιτρέπει την δημιουργία νέων κυκλωμάτων κατά το μήκος του.



Σχήμα 4.7 Ζυγός

Συστοιχία πυκνωτών

Συνδέονται πυκνωτές σε σειρά ή παράλληλα, με σκοπό την βελτίωση του συντελεστή ισχύος του δικτύου. Παράγουν άεργο ισχύ και έτσι ρυθμίζουν την αναλογία άεργου και ενεργού ισχύος στο δίκτυο, επιτυγχάνοντας τον κατάλληλο συντελεστή ισχύος. Η ομάδα πυκνωτών πρέπει να είναι όσο το δυνατότερο κοντά στο φορτίο.



Σχήμα 4.8 Συστοιχία πυκνωτών

Γείωση

Αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά συστήματα ασφάλειας του υποσταθμού, καθώς εξασφαλίζει την ασφάλεια του εργαζόμενου προσωπικού έναντι της ηλεκτροπληξίας. Σε περίπτωση, που τα καλώδια διανομής πληγούν από κεραυνούς, μέσω της γείωσης υπάρχει διαθέσιμο μονοπάτι για το υψηλό ρεύμα των κεραυνών με την γη. Ακόμα, γίνεται σύνδεση του ουδέτερου του μετασχηματιστή απευθείας με την γη, δηλαδή έχουμε ουδετέρωση, ενώ και απευθείας σύνδεση άλλων μεταλλικών αντικείμενων του υποσταθμού με την γη (γείωση). Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόδια του εκάστοτε εξοπλισμού οδηγούνται στο έδαφος και συνδέονται με το πλέγμα γείωσης. Αν το έδαφος έχει χαμηλή ειδική αντίσταση, τότε και η αντίσταση του συστήματος γείωσης θα είναι χαμηλή. Στην περίπτωση υψηλής ειδικής αντίστασης του εδάφους, το πλέγμα γείωσης γίνεται πυκνότερο και τοποθετούνται περισσότερα ηλεκτρόδια.



Σχήμα 4.9 Γείωση

Πίνακας Διανομής

Αποτελείται από Molded Case Circuit Breakers (MCCBs), εξοπλισμό ελέγχου, μετρητές και ρελέ, στεγασμένα στην αίθουσα ελέγχου. Για την ασφάλεια των εργαζομένων στον χώρο, το πλαίσιο του πίνακα διανομής συνδέεται απευθείας με την γη, μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης.



Σχήμα 4.10 Πίνακας Διανομής

Διάταξη περίφραξης

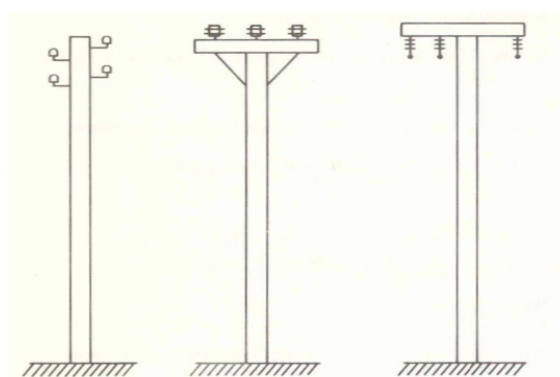
Περιφράσει όλη την εγκατάσταση του υποσταθμού διανομής για τον περιορισμό εισόδου μη εξουσιοδοτημένων ατόμων και ζώων. Το σύνολο της περίφραξης γειώνεται ανά τακτά διαστήματα, ενώ θα πρέπει να γίνεται η ανάλογη συντήρηση μια φορά το χρόνο.



Σχήμα 4.11 Διάταξη περίφραξης

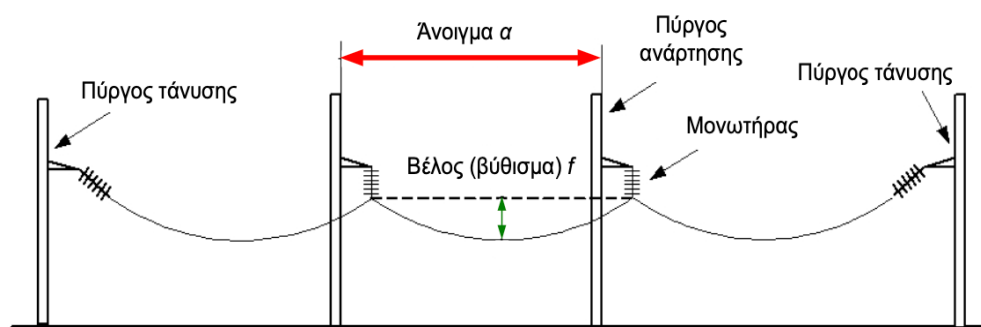
Πύργοι

Αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ξύλινοι, τσιμεντένιοι ή χαλύβδινοι. Χρησιμοποιούνται, για την στήριξη, το τέντωμα και την οδήγηση των αγωγών στην κατάλληλη πορεία. Στο δίκτυο διανομής ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες. Στους πύργους χαμηλής τάσης, στήριξης αγωγών μέσης τάσης και ανάρτησης αγωγών μέσης τάσης.



Σχήμα 4.12 Πύργοι μέσης και χαμηλή τάσης

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση προκύπτει ανάλογα με τα φορτία των πύργων. Ειδικότερα, οι πύργοι ανάρτησης φέρουν κατακόρυφα φορτία, ενώ οι πύργοι τάνυσης φέρουν τόσο κατακόρυφα όσο και οριζόντια φορτία και παράλληλα τεντώνουν του αγωγούς στα ευθύγραμμα τμήματα των γραμμών διανομής. Οι πύργοι κάμψης φέρουν οριζόντια και κατακόρυφα φορτία και χρησιμοποιούνται στα σημεία κάμψης των γραμμών διανομής. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πύργοι αντιμετάθεσης αγωγών και πύργοι σύνδεσης εναέριων γραμμών διανομής και καλωδίων.



Σχήμα 4.13 Διαφορετικοί τύποι πύργων χαμηλής και μέσης τάσης

Εναέριες γραμμές

Οι αγωγοί εναέριων γραμμών εντάσσονται σε δύο κατηγορίες. Στους αγωγούς χωρίς μόνωση και στους αγωγούς με μόνωση. Στην πρώτη κατηγορία κατασκευάζονται από χαλκό εφελκυσμένο εν ψυχρώ, αλουμίνιο, κράμα αλουμινίου Aldrey ή αλουμίνιο - χάλυβα (ACSR). Σε ειδικές και σπάνιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά και κράματα, όπως μπρούντζος και γαλβανισμένος χάλυβας. Οι αγωγοί είναι αναγκαίο να αντέχουν σε μηχανική και θερμική καταπόνηση, αλλά και να μην προκαλούν υψηλές απώλειες Corona. Βέβαια, οι απώλειες από το φαινόμενο Corona εξαρτώνται από την διάμετρο του αγωγού και την πεδιακή ένταση. Για το λόγο αυτό, είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται μεγαλύτερο πλήθος αγωγών ανά φάση ή να αυξάνεται η διάμετρος του αγωγού. Για καλύτερη ευκαμψία κατασκευάζονται από πολύκλινα συρματόσχοινα.

Οι αγωγοί από χαλκό διακρίνονται για την υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, την καλή μηχανική αντοχή και το γεγονός ότι διαβρώνονται εύκολα. Βέβαια, έχουν μεγάλο ειδικό βάρος, απαιτώντας σε μικρότερες αποστάσεις πυλώνες στήριξης. Πλέον, λόγω του υψηλού κόστους χρησιμοποιούνται σχεδόν μόνο σε γραμμές τροφοδότησης ηλεκτρικών τρένων.



Σχήμα 4.14 Αγωγός χαλκού

Οι αγωγοί από αλουμίνιο προτιμώνται συγκριτικά με τους αγωγούς χαλκού, εξαιτίας του χαμηλού κόστους και βάρους που τους χαρακτηρίζουν. Πιο

συγκεκριμένα το ειδικό βάρος του αλουμινίου είναι 3,3 φορές μικρότερο από αυτό του χαλκού. Τα κύρια μειονεκτήματα του αλουμινίου είναι μικρή μηχανική αντοχή, η χαμηλή αγωγιμότητα και η εύκολη διάβρωση, ειδικά στις παραθαλάσσιες περιοχές.



Σχήμα 4.15 Αγωγός αλουμινίου

Οι αγωγοί από ACSR κατασκευάζονται από αλουμίνιο και χάλυβα. Αποτελούνται από ένα έως τρία στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και από ένα έως τρία στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Για την εξασφάλιση καλής συνοχής του συρματόσκοινου τα σύρματα είναι συνεστραμμένα με αντίθετη διεύθυνση συστρώφης σε δύο γειτονικά στρώματα. Έχουν, μεγάλη μηχανική αντοχή, λόγω του χαλύβδινου πυρήνα, ενώ για την ίδια ένταση ρεύματος έχουν καλύτερη μηχανική αντοχή με μικρότερο βάρος σε σύγκριση με τους αγωγούς χαλκού. Επιπλέον, η μηχανική του αντοχή βελτιώνεται με τον χρόνο, λόγω διαφορετικού ρυθμού ερπυσμού αλουμινίου και χάλυβα. Η χρήση του σε γραμμές διανομής είναι σπανιότερη και χρησιμοποιείται ως επί τον πλείστον σε γραμμές μεταφοράς.



Σχήμα 4.16 Αγωγός ACSR

Οι απώλειες ισχύος στις εναέριες γραμμές οφείλονται κατά κύριο λόγο στις ωμικές απώλειες, στις απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας και Foucault και στις απώλειες λόγω επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης.

Ωμικές απώλειες

Οι ωμικές απώλειες προκαλούνται, λόγω της αντίστασης των αγωγών. Εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού και τη διατομή του. Επιπλέον, όσο υψηλότερη άεργος ισχύς μεταφέρεται στους αγωγούς τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι ενεργές απώλειες.

Απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας και Foucault

Στην περίπτωση που τα καλώδια είναι συνεστραμμένα, δημιουργούνται απώλειες στην μεταλλική θωράκιση των αγωγών κάθε φάσης, από τα επαγόμενα σε αυτούς ρεύματα κυκλοφορίας και Foucault.

Απώλειες λόγω χωρητικής και επαγωγικής αντίστασης

Οι αγωγοί παρουσιάζουν χωρητική και επαγωγική αντίσταση, λόγω των ιδιοτήτων των υλικών τους και της διάταξής τους στον χώρο. Οι δύο αυτοί τύποι αντίστασης αποτελούν σημαντικό ποσοστό συνολικών απωλειών κατά την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την επιλογή της κατάλληλης διατομής του αγωγού της εναέριας γραμμής είναι απαραίτητο να τηρηθούν τεχνικοί περιορισμοί. Πιο συγκεκριμένα, οι περιορισμοί σχετίζονται με:

- την μηχανική αντοχή
- την μέγιστη επιτρεπτή πτώσης τάσης
- την μέγιστη τιμή έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος για κάθε διατομή και είδος αγωγού

Η επιλογή του είδους των αγωγών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από την τοποθεσία της εγκατάστασης, από τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής και του κόστους.

Τα είδη των αγωγών μαζί με τις τυποποιημένες διατομές, τα ηλεκτρικά και τα θερμικά χαρακτηριστικά τους περιγράφονται παρακάτω.

ACSR

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)
ACSR	16	1,260	0,394	127
	35	0,574	0,369	197
	50	0,404	0,358	266
	95	0,215	0,336	400

Πίνακας 4.1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού ACSR

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	Θερμικό Όριο υπό Ονομαστική τάση (MVA)	
		15kV	20kV
ACSR	16	3,5	4,7
	35	5,8	7,7
	95	11,6	15,5

Πίνακας 4.2 Θερμικά χαρακτηριστικά αγωγού ACSR

CU

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)
CU	16	1,248	0,412	115
	35	0,591	0,387	175
	50	0,401	0,375	230
	95	0,218	0,358	360

Πίνακας 4.3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού CU

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	Θερμικό Όριο υπό Ονομαστική τάση (MVA)	
		15kV	20kV
CU	16	3	4
	35	4,8	6,4
	95	9,1	12,2

Πίνακας 4.4 Θερμικά χαρακτηριστικά αγωγού CU

AL

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)
AL	16	1,248	0,330	130
	35	0,591	0,306	205
	50	0,401	0,294	260
	70	0,301	0,284	325

Πίνακας 4.5 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά αγωγού AL

Υπόγειες γραμμές

Η εγκατάσταση των υπόγειων γραμμών γίνεται μέσα σε κατάλληλα διαμορφωμένα χαντάκια, σε υπάρχοντες σωλήνες ή σε τάφρους. Κατά την εγκατάσταση τους λαμβάνεται υπόψιν η μορφολογία του εδάφους και δίνεται έμφαση και σε άλλες συνθήκες, όπως την υγρασία, την διαρροή νερού και την παρουσία μικροοργανισμών, για την προστασία από μηχανικές καταπονήσεις και φθορές της μόνωσης τους. Έχουν ιδιαίτερα υψηλή θερμοική αντοχή είναι ιδιαίτερα υψηλή, καθώς έχει εύρος από -40°C έως 90°C και ποικίλει ανάλογα με το υλικό του καλωδίου, τον τύπο της μόνωσης και την εφαρμογή.

Συνήθως, δύο είναι οι κύριες περιπτώσεις που συναντώνται τα υπόγεια καλώδια στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περιπτώσεις αυτές είναι, να μην προσφέρεται το περιβάλλον για εναέρια μεταφορά και να μην είναι δυνατή η στήριξη των εναέριων αγωγών, εξαιτίας μεγάλων ανοιγμάτων. Συναντώνται σε αστικά κέντρα και πυκνοκατοικημένες περιοχές και χαρακτηρίζονται από το εξαιρετικά δαπανηρό κόστος εγκατάστασης (3 – 35 ακριβότερες από τις αντίστοιχες εναέριας). Η συντήρησή τους είναι αρκετά δύσκολη και πολύπλοκη.

Οι απώλειες στις υπόγειες γραμμές οφείλονται κυρίως στις ωμικές απώλειες, στις απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας, στις διηλεκτρικές απώλειες και στις απώλειες λόγω επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης.

Ωμικές απώλειες

Οι ωμικές απώλειες προκαλούνται, λόγω της αντίστασης των αγωγών. Εξαρτώνται από την ειδική αντίσταση του υλικού του αγωγού και τη διατομή του. Συγκριτικά με τις εναέριας γραμμές, οι απώλειες που συναντώνται στα υπόγεια καλώδια είναι σημαντικά μικρότερες.

Απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας

Οι απώλειες ρευμάτων κυκλοφορίας οφείλονται στα ρεύματα που επάγονται στους μεταλλικούς μανδύες, στις θωρακίσεις και στους οπλισμούς των καλωδίων, σε περιπτώσεις γείωσης σε παραπάνω από ένα σημεία. Οι απώλειες αυτές είναι χαμηλές σε καλώδια με μικρή διατομή και μικρής αξονικής απόστασης των πόλων.

Διηλεκτρικές απώλειες

Οι διηλεκτρικές απώλειες οφείλονται στην κυκλοφορία του ρεύματος στο μονωτικό υλικό. Ο τύπος που περιγράφει τις διηλεκτρικές απώλειες είναι ο παρακάτω:

$$P_d = C\omega V^2 \tan\delta$$

όπου $C = \frac{\epsilon}{18 \ln\left(\frac{D_i}{d_c}\right)} 10^{-9} \text{ F.m}^{-1}$ για κυκλικούς αγωγούς ή διαφορετικά δίνεται από του κατασκευαστές

- D_i : εξωτερική διάμετρος μόνωσης (mm)
- ϵ : σχετική διαπερατότητα της μόνωσης
- d_c : διάμετρος του αγωγού (mm)

Εξαρτώνται από το τετράγωνο της τάσης, την χωρητικότητα του καλωδίου, την γωνιακή συχνότητα και τον συντελεστή απωλειών $\tan\delta$.

Απώλειες λόγω επαγωγικής και χωρητικής αντίστασης

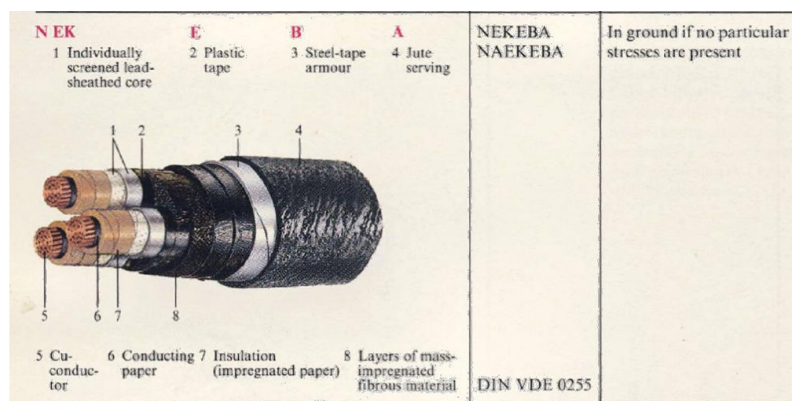
Τα καλώδια εμφανίζουν υψηλή χωρητικότητα, εξαιτίας της μόνωσής τους, δημιουργώντας απώλειες. Επιπλέον, παρουσιάζουν κάποιες απώλειες, λόγω της εγγενούς επαγωγικής αντίστασης.

Τα τυποποιημένα είδη υπογείων καλωδίων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα παρακάτω:

NEKEBA/NAEKEBA

Τριπολικό καλώδιο με αγωγούς αλουμινίου, μόνωση από εμπλουτισμένο χαρτί, τριών ανεξάρτητων μολύβδινων μανδυνών με κοινό χαλύβδινο οπλισμό, διατομής $3 \times 240 \text{ mm}^2$.

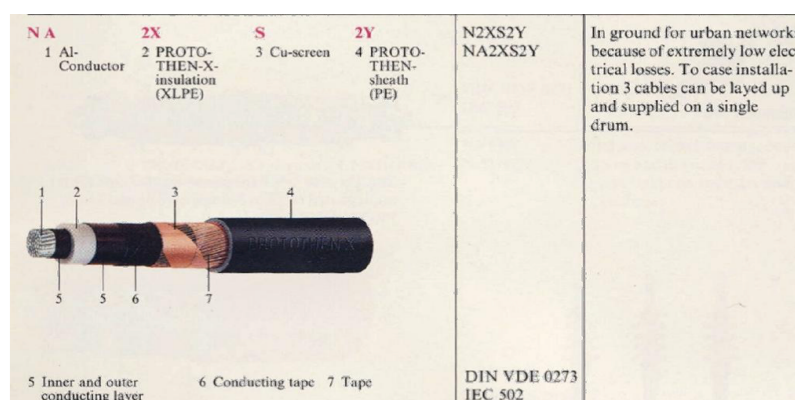
Η διαφορά στο NEKEBA και το NAEKEBA οφείλεται στο διαφορετικό υλικό κατασκευής τους. Ειδικότερα, το NEKEBA κατασκευάζεται από χαλκό, ενώ το NAEKEBA από αλουμίνιο και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους είναι όμοια.



Σχήμα 4.17 Τριπολικά καλώδια NEKEBA/NAEKEBA

N2XS2Y/NA2XS2Y

Τρία μονοπολικά καλώδια με αγωγούς αλουμινίου, μόνωσης XLPE, με θωράκιση Al και εξωτερικό προστατευτικό μανδύα PVC, διατομής 240 mm², συνεστραμμένο γύρω από αγωγό γης από Al, διατομής 25 mm² που περιβάλλεται από μολύβδινο μανδύα. Για την σύντομη περιγραφή τους αναφέρονται και ως 3 x 240 mm² Al + 25 mm² Al. Στα δίκτυα μέσης τάσης τα καλώδια με μόνωση XLPE σταδιακά αντικαταστούν τα καλώδια NEKEBA, εξαιτίας των χαμηλών απωλειών ενέργειας. Η διαφοροποίηση μεταξύ των N2XS2Y και NA2XS2Y έγκειται στην διαφορά του υλικού του αγωγού. Στη πρώτη περίπτωση χρησιμοποιείται χαλκός, ενώ στην δεύτερη αλουμίνιο. Διατηρούν έτσι όμοια τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τους, αλλά διαφέρουν ως προς τα όρια φόρτισης. Ανάλογα με το επίπεδο τάσης που φέρουν, διαφοροποιείται το πάχος της μόνωσης και η μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση του καλωδίου.



Σχήμα 4.18 Μονοπολικά καλώδια N2XS2Y/NA2XS2Y

Τα είδη των καλωδίων μαζί με τις τυποποιημένες διατομές, τα ηλεκτρικά και τα θερμικά χαρακτηριστικά τους περιγράφονται παρακάτω.

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	ΩΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (Ω/km)	ΧΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ (nF/km)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΕΝΤΑΣΗ (A)
NA2XS2Y	240	0,162	0,115	270	456
NAEKEBA	240	0,150	0,108	530	353

Πίνακας 4.6 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των καλωδίων NA2XS2Y και NAEKEBA

ΕΙΔΟΣ	ΔΙΑΤΟΜΗ (mm ²)	Θερμικό Όριο υπό Ονομαστική τάση (MVA)	
		15kV	20kV
NA2XS2Y	240	10,65	14,20
NAEKEBA	240	8,05	10,74

Πίνακας 4.7 Θερμικά χαρακτηριστικά των καλωδίων NA2XS2Y και NAEKEBA

Μόνωση καλωδίων

Η μόνωση των καλωδίων διαφυλάσσει τους αγωγούς από την υγρασία και την οξείδωση. Αποφεύγονται τα βραχυκυκλώματα, μιας και δεν υπάρχει επαφή του αγωγού με άλλους αγωγούς ή την γη. Επιπλέον, η μόνωση καθορίζει την θερμοκρασία και άρα την φόρτιση του καλωδίου. Το βασικό μειονέκτημα της είναι το γεγονός ότι προκαλεί διηλεκτρικές απώλειες. Η επιλογή του κατάλληλου μονωτικού υλικού γίνεται ανάλογα με τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών. Οι ιδιότητες αυτών είναι η διηλεκτρική αντοχή (kV/mm), την ωμική αντίσταση του μονωτικού υλικού (Ω), τον συντελεστή απωλειών $\tan\delta$ και το μέγεθος των μικροεκκενώσεων.

Παρακάτω αναλύονται τα διαφορετικά είδη των μονώσεων και οι ιδιότητές τους.

Χαρτί – Λάδι

Πρόκειται για χαρτοταινία τυλιγμένη γύρω από τους αγωγούς, εμποτισμένη με μονωτικό λάδι ή παχύρευστη μάζα. Η παχύρευστη μάζα χρησιμοποιείται σε μέρη με υψομετρική διαφορά. Αν και παλαιότερα χρησιμοποιούνταν σε όλο το διαθέσιμο εύρος τάσεων, πλέον έχει αντικατασταθεί από XLPE. Η μέγιστη θερμοκρασία επιτρεπτής συνεχούς λειτουργίας είναι οι 80° C.

PVC

Το πολυβινυλιοχλωρίδιο (PVC) χρησιμοποιείται ως μέσο μόνωσης για επίπεδα τάσης έως 10 kV. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικό σε χημικές προσβολές και στη υγρασία, ενώ δρα ανασταλτικά στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Η διάρκεια ζωής του είναι μεγάλη και μπορεί να γίνει τοποθέτηση στο έδαφος χωρίς πρόσθετη προστασία. Βέβαια, έχει υψηλές διηλεκτρικές απώλειες, είναι τοξικό και οξειδωτικό σε πυρκαγιές και είναι εύθραυστο σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η μέγιστη θερμοκρασία επιτρεπτής συνεχούς λειτουργίας είναι οι 60 - 70 ° C.

PE

Το πολυαιθυλένιο χρησιμοποιείται ως μέσο τάσης για επίπεδα τάσης μεγαλύτερα των 10 kV. Βασικά πλεονεκτήματά του αποτελούν οι χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες και η πολύ καλή αντοχή του σε υγρασία και χημικές ουσίες. Βέβαια, προσβάλλεται από την υπεριώδη ακτινοβολία και έχει μεγάλο συντελεστή θερμοκρασιακής διαστολής. Επιπλέον, σε περίπτωση πυρκαγιάς, η σύσταση του συμβάλλει στην διατήρησή της. Η μέγιστη θερμοκρασία επιτρεπτής συνεχούς λειτουργίας είναι οι 70 ° C.

XLPE

Το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο προκύπτει από την δικτύωση των μορίων του PE, βελτιώνοντας την αντοχή σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Τα επίπεδα τάσης λειτουργίας είναι τα ίδια με αυτά του πολυαιθυλενίου. Επιπλέον, διακρίνονται για την αυξημένη αντοχή ενάντια στην δημιουργία ρωγμών και στις χημικές ουσίες σε σύγκριση με τη μόνωση πολυαιθυλενίου. Η μέγιστη θερμοκρασία επιτρεπτής συνεχούς λειτουργίας είναι οι 90 ° C.

Γήρανση μόνωσης

Η γήρανση της μόνωσης είναι ένα φαινόμενο που επηρεάζει την αντοχή και την αποτελεσματικότητα της μόνωσης με την πάροδο του χρόνου. Οι ιδιότητες των μονωτικών υλικών υποβαθμίζονται υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών, ηλεκτρικών και μηχανικών καταπονήσεων, εισβολής χημικών ουσιών και έκθεσης στην υγρασία.

Για την πλειοψηφία των μονωτικών υλικών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κανόνες

- Ο κανόνας Montsinger, αναφέρει ότι για κάθε αύξηση της θερμοκρασίας από 8-10 ° C πάνω από την ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας, η διάρκεια ζωής ενός μονωτικού υλικού μειώνεται στο μισό.
- Η διάρκεια ζωής ενός μονωτικού υλικού μειώνεται στο μισό για κάθε αύξηση τάσης κατά 8-10%.

Μανδύας

Γειωμένος αγωγός που περιβάλλει τα καλώδια, απομονώνοντας τους υπό τάση αγωγούς. Κατασκευάζεται από μόλυβδο, αλουμίνιο, και χάλκινα συρματίδια – ταινίες. Προσφέρει προστατευτικό στρώμα κατά της εισβολής υγρασίας και χημικών, ενώ είναι ιδιαίτερης σημασίας για την προστασία των ατόμων και των εγκαταστάσεων. Ελέγχει την ροή των χωρητικών ρευμάτων και των ρευμάτων βραχυκύκλωσης, διαφυλάσσοντας τα υλικά της μόνωσης.

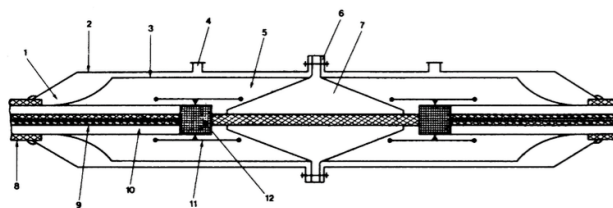
Μηχανική Ενίσχυση

Χρησιμοποιείται για την προστασία του καλωδίου κατά την μεταφορά και την εγκατάσταση. Κατασκευάζεται από χαλύβδινα σύρματα ή ταινίες με πάχος 0,1 – 1 mm και πλάτος 1 – 3 cm. Σε αρκετές περιπτώσεις, αν οι μανδύες είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή από πλαστική μόνωση, η μηχανική ενίσχυση δεν απαιτείται, καθώς η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μεγάλη.

Σύνδεσμοι

Χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν δύο τμήματα καλωδίου ή για να δημιουργήσουν διακλαδώσεις. Η κατασκευή τους είναι εξαιρετικής κρισιμότητας, γιατί αποτελούν σημεία ασυνέχειας της μόνωσης των καλωδίων. Οι συνηθέστερες τεχνικές συνδέσμων περιγράφονται παρακάτω:

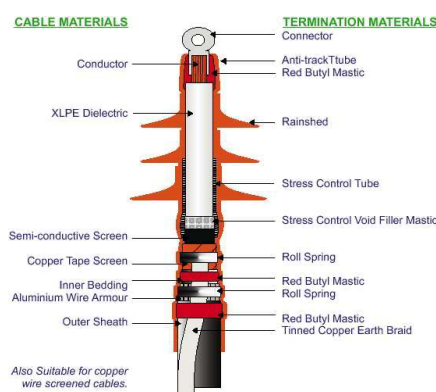
- Θερμοσυστελλόμενα υλικά
- Ταινίες πολυμερών
- Έκχυση ρητινούχων μονώσεων σε καλούπι που προσαρμόζεται γύρω από τον σύνδεσμο
- Χρήση χυτοσιδηρών συνδέσμων



Σχήμα 4.19 Σύνδεσμος καλωδίων

Ακροκιβώτια

Χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των άκρων των καλωδίων με τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις. Προσφέρουν επαρκής μόνωση, δεν επιτρέπουν την εισβολή της υγρασίας και προφυλάσσουν από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους τα τέρματα του καλωδίου.



Σχήμα 4.20 Δομή ακροκιβώτιου

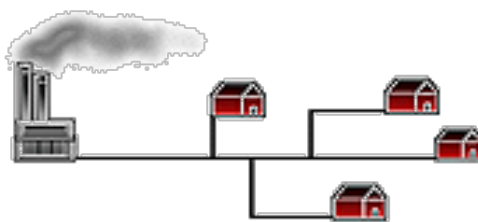
4.2 Τύποι συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται ανάλογα με τα εκάστοτε δομικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες ταξινόμησης που αναλύονται παρακάτω.

Ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη δομή τους διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες.

Ακτινικό σύστημα διανομής

Ο ακτινικός σχεδιασμός χρησιμοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος των δικτύων διανομής, καθώς αποτελεί τον απλούστερο και οικονομικότερο τρόπο σχεδίασης. Το δίκτυο αποτελείται από την κεντρική γραμμή, τον κορμό και τις διακλαδώσεις του. Ο έλεγχος του κορμού γίνεται με ένα διακόπτη ισχύος, ενώ οι διακλαδώσεις ελέγχονται από ασφαλειοαποζεύκτες και από διακόπτες απομόνωσης. Εξαιτίας της δομής του το κύριο μειονέκτημα που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος σχεδιασμός είναι η ύπαρξη μόνο μίας διαδρομής από τον υποσταθμό προς τους καταναλωτή, με αποτέλεσμα σε περίπτωση βλάβης ή βραχυκυκλώματος να παρατηρηθεί ολική απώλεια ισχύος στο δίκτυο. Λόγω της χαμηλής τους αξιοπιστίας χρησιμοποιούνται σε εναέρια δίκτυα που τροφοδοτούν φορτία που δεν απαιτείται υψηλή αξιοπιστία.



Σχήμα 4.21 Ακτινικό δίκτυο διανομής

Κυκλικό σύστημα διανομής

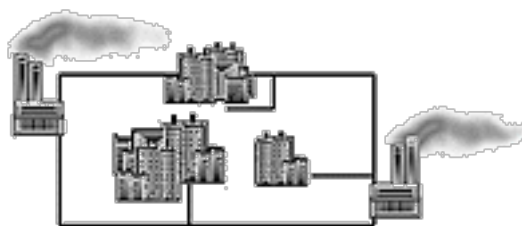
Το κυκλικό σύστημα διανομής αρχίζει και επιστρέφει στο ίδιο σημείο, ενώ η τροφοδοσία γίνεται από δύο σημεία του ίδιου ή διαφορετικού υποσταθμού. Το βασικό πλεονέκτημα εν λόγω συστήματος είναι η τροφοδοσία των φορτίων και από τις δύο κατευθύνσεις. Έτσι, με την τοποθέτηση διακοπών στα κατάλληλα σημεία, σε περίπτωση αποτυχίας ενεργοποιούνται οι διακόπτες και εξασφαλίζεται η παροχή ισχύος από τον άλλο υποσταθμό. Αν και αποτελεί ακριβότερο σύστημα από το ακτινικό, λόγω των περισσότερων διακοπών και αγωγών που απαιτούνται, έχει υψηλότερο βαθμό αξιοπιστίας.



Σχήμα 4.22 Κυκλικό δίκτυο διανομής

Βροχοειδές σύστημα διανομής

Τα βροχοειδή συστήματα αποτελούν τα πιο πολύπλοκα συστήματα διανομής σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα που περιεγράφηκαν. Η πολυπλοκότητά τους έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί βρόγχοι που συνδέονται μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα καταναλωτής μπορεί να τροφοδοτείται από δύο ή περισσότερες παροχές ρεύματος. Έτσι, το εν λόγω σύστημα αποτελεί την βέλτιστη λύση από πλευράς αξιοπιστίας, αλλά χρησιμοποιείται κυρίως σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπως τα αστικά κέντρα.



Σχήμα 4.23 Βροχοειδές δίκτυο διανομής

Ανάλογα με την κατασκευή της γραμμών διανομής ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες.

Εναέριο σύστημα διανομής

Τα εναέρια δίκτυα διανομής αποτελούν τα πιο διαδεδομένα δίκτυα, λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής. Η αποκατάσταση των βλαβών μπορεί να γίνει γρήγορα και αποτελεσματικά, λόγω και της οπτικής επαφής με το δίκτυο, κατά την διάρκεια συντήρησης. Βέβαια, η έκθεση του στα έντονα καιρικά φαινόμενα, συμβάλλει στην αύξηση τους κόστους συντήρησης του, λόγω των βλαβών που προκύπτουν, υποβαθμίζοντας παράλληλα την αξιοπιστία του δικτύου. Ακόμα, ένα μειονέκτημά είναι η εμφάνιση του φαινομένου Corona, που αυξάνει τις απώλειες ισχύος στο σύστημα. Καταλαμβάνουν, σημαντικό χώρο, η διάθεση του οποίου είναι σχεδόν αδύνατη, ειδικά στα αστικά κέντρα και στις πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ δημιουργούν οπτική ρύπανση.

Υπόγειο σύστημα διανομής

Τα υπόγεια δίκτυα διανομής χρησιμοποιούνται κυρίως της εξοικονόμησης χώρου, αλλά και για λόγους αισθητικής, ιδιαίτερα στις πυκνοκατοικημένες περιοχές. Καθώς, δεν εκτίθενται σε καιρικά φαινόμενα, παρουσιάζουν ελάχιστο αριθμό βλαβών και μεγαλύτερη αξιοπιστία. Βέβαια, σε περίπτωση βλάβης η διαδικασία εντοπισμού του σφάλματος είναι αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα. Η εγκατάσταση και συντήρησή τους είναι τόσο χρονοβόρα όσο και κοστοβόρα. Αν και απουσιάζει το φαινόμενο Corona από το υπόγειο σύστημα διανομής, εξαιτίας των μονώσεων των καλωδίων, εμφανίζεται το φαινόμενο γειτνίασης που παρουσιάζεται, καθώς τα καλώδια διανομής ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Ανάλογα με την μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες.

Σύστημα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος (AC)

Είναι τα πιο διαδεδομένα συστήματα διανομής τόσο στις αστικές όσο και στις βιομηχανικές περιοχές. Ταξινομούνται σε δύο υποκατηγορίες, την πρωτεύουσα και την δευτερεύουσα διανομή. Στην πρωτεύουσα διανομή η τάση του ρεύματος υποβιβάζεται από το δίκτυο μεταφοράς από τα 150 kV ή 400 kV στα 20 kV και διαμοιράζεται στους υποσταθμούς διανομής και σε μεγάλους καταναλωτές, όπως βιομηχανίες. Στην δευτερεύουσα διανομή η τάση υποβιβάζεται από τα 20kV στα 400 V, για να τροφοδοτήσει αστικές περιοχές και μικρά φορτία. Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου συστήματος διανομής είναι ο εύκολος υποβιβασμός και ανύψωση τάσης, μέσω των υποσταθμών και των μετασχηματιστών. Επιπλέον, γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχεδιασμένες να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα και παράλληλα η πλειοψηφία των οικιακών συσκευών, αλλά και του βιομηχανικού εξοπλισμού έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Σύστημα διανομής συνεχούς ρεύματος (DC)

Παρότι είναι λιγότερο δημοφιλές, συγκριτικά με τα συστήματα διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος, η χρήση τους τελευταία έχει αυξηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως μικροδίκτυα, έξυπνα δίκτυα, φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και κέντρα δεδομένων. Είναι πιο αποτελεσματικά και αποδοτικά από τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς χρησιμοποιούν ηλεκτρονικές διατάξεις υψηλής απόδοσης και δεν παρουσιάζουν επαγωγικές και χωρητικές απώλειες, κατά την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

5. Έξυπνα φορτία στο έξυπνο δίκτυο

Τα έξυπνα δίκτυα μπορεί να συνδέονται με ηλεκτρικά, θερμικά ή άλλου τύπου φορτία. Όμως, η πλειοψηφία των φορτίων είναι έξυπνα φορτία, καθώς διαθέτουν την ικανότητα να προσαρμόζουν την κατανάλωση της ενέργειας βάσει των συνθηκών παραγωγής, ζήτησης και κατανάλωσης που επικρατούν στο δίκτυο.

Τα φορτία μπορούν να ταξινομηθούν ως κρίσιμα και μη κρίσιμα, με βάση αν μπορούν να ελεγχθούν και το επίπεδο κρισιμότητας. Τα μη διακοπτόμενα φορτία είναι κρίσιμα φορτία τα οποία συνήθως τροφοδοτούνται αδιαλείπτως. Τα κρίσιμα φορτία, πρέπει να εξυπηρετούνται συνεχώς ανεξάρτητα το κόστος και την ποσότητα της ενέργειας που καταναλώνουν. Από την άλλη πλευρά, τα μη κρίσιμα φορτία δύναται να γίνει ο χρονοπρογραμματισμός τους, ώστε να επιτευχθεί η μείωση του κόστους λειτουργία του έξυπνου δικτύου. Επιπρόσθετα, τα φορτία μπορούν να διακριθούν σε προβλέψιμα και μη προβλέψιμα. Τα προβλέψιμα φορτία συμβάλλουν στην πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και άρα στην εύκολη οικονομική και χρονική διαχείριση του φορτίου.

Οι κυριότερες λειτουργίες των έξυπνων φορτίων περιγράφονται παρακάτω.

Μετατόπιση φορτίου

Τα έξυπνα φορτία έχουν την δυνατότητα της μετατόπισης φορτίου. Δηλαδή, μπορούν να μετατοπίσουν την κατανάλωση ενέργειας από τις ώρες αιχμής στη ώρα χαμηλής ζήτησης. Βέβαια, αυτό εξαρτάται και από την κρισιμότητα του φορτίου. Η περιγραφόμενη λειτουργία στην μείωση τους κόστους λειτουργίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, σε περιπτώσεις που ισχύει η δυναμική τιμολόγηση, ενώ παράλληλα μειώνει τις απαιτήσεις μέγιστης μεταφοράς ισχύος του δικτύου.

Απομακρυσμένος έλεγχος

Με τον απομακρυσμένο έλεγχο δίνεται η δυνατότητα στον ελεγκτή του δικτύου, να ελέγξει από απόσταση το έξυπνο φορτίο, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη επέμβαση για την διακοπή λειτουργίας του.

Καταγραφή κατανάλωσης ενέργειας και δημιουργία στατιστικών δεδομένων

Μια από τις βασικότερες λειτουργίες του έξυπνων φορτίου είναι αναλυτική καταγραφή της συνολικής ενεργούς και άεργους ισχύος που καταναλώνεται, της χρονικής διάρκειας και της χρονικής στιγμής που είναι ενεργό το φορτίο. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου τα στατιστικά δεδομένα λειτουργίας του, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της απόδοσης του και για την λήψη αποφάσεων σχετικά με την βέλτιστη λειτουργία κατά την διάρκεια της ημέρας.

Αλληλεπίδραση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Τα έξυπνα φορτία μπορούν να συνεργαστούν απρόσκοπτα με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να προσαρμόσουν την κατανάλωση τους ανάλογα με την παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ ή ακόμα να προγραμματιστούν να λειτουργούν αποκλειστικά από αυτές.

Αυτοδιάγνωση

Με τα προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα τα έξυπνα φορτία έχουν την δυνατότητα να διαγνώσουν και να αναφέρουν πιθανόν βλάβες στον διαχειριστή του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η άμεση επέμβαση για την συντήρησή του και αποφυγή σημαντικής ζημιάς.

Με τις λειτουργίες τους τα έξυπνα φορτία συμβάλλουν στην σταθερότητα, την αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.

6. Περιγραφή των τεχνικών χαρακτηριστικών του έξυπνου δικτύου

Παρακάτω περιγράφονται τα ονομαστικά στοιχεία των δομικών στοιχείων του δικτύου και οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατάλληλη διαστασιολόγηση τους.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι τα παρακάτω:

Ονομαστική ισχύς

$$P_{WT} = 2.5 \text{ kW}$$

Τάση εξόδου

$$V = 400 \text{ V}$$

Ζεύγη πόλων

$$p = 4$$

Αντίσταση από γραμμή σε γραμμή

$$R_{Line} = 0.36 \ \Omega$$

Επαγωγική αντίσταση από γραμμή σε γραμμή

$$L_{Line} = 1.67 \text{ mH}$$

Αντίσταση στάτη

$$R_s = 0.18 \ \Omega$$

Σταθερά ροπής

$$T = 0.42 \text{ N.m}$$

Οι εξισώσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών της ανεμογεννήτριας αναγράφονται παρακάτω:

Ηλεκτρομαγνητική ροπή

$$T_e = \frac{3N_{pp}[\varphi_r i_{qs} - (L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs}]}{2}$$

Ταχύτητα του δρομέα

$$\omega_r = \frac{N_{pp}}{JS} (T_e - T_m)$$

Ταχύτητα εκκίνησης

$$TSR = \frac{\omega_{cutin} R}{V_{cutin}}$$

Συχνότητα εκκίνησης

$$f_{cutin} = \frac{N_{cutin}P}{120}$$

Συνολικός αριθμός περιελίξεων για το τύλιγμα του στάτη

$$N_{turns/phase} = \frac{V_p}{4.44f_{cutin}\phi_g K_w}$$

Επιπλέον, για την μεγιστοποίηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος MPPT Perturb & Observe (P&O). Η αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου γίνεται στο πρώτο κεφάλαιο.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι τα παρακάτω:

Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σειρά

$$N_{ser} = 1$$

Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων παράλληλα

$$N_{par} = 8$$

Μέγιστη παραγόμενη ισχύς

$$P_{max} = 250.2 \text{ W}$$

Συνολική παραγόμενη ισχύς

$$P_{PV} = 2 \text{ kW}$$

Φωτοβολταϊκά κύτταρα ανά μονάδα

$$60$$

Τάση ανοιχτοκύκλωσης

$$V_{OC} = 37.3 \text{ V}$$

Ρεύμα βραχυκύκλωσης

$$I_{SC} = 8.66 \text{ A}$$

Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος

$$V_{MP} = 30.7 \text{ V}$$

Ένταση ρεύματος στο σημείο μέγιστης ισχύος

$$V_{MP} = 8.15 \text{ A}$$

Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας έγινε χρήση του αλγόριθμου Incremental Conductance. Η αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου γίνεται στο πρώτο κεφάλαιο.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας είναι τα παρακάτω:

Ονομαστική χωρητικότητα

48 Ah

Ονομαστική τάση λειτουργίας

$V_r = 240 \text{ V}$

Αρχική κατάσταση φόρτισης

$\text{SOC}_{\text{init}} = 50 \%$

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του διασυνδεδεμένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα παρακάτω:

Τάση δικτύου

$V = 400 \text{ V}$

Συχνότητα λειτουργίας

$f = 50 \text{ Hz}$

Επιτρεπόμενα όρια τάσης

$\pm 10 \%$ της ονομαστικής τάσης

Επιτρεπόμενα όρια συχνότητας

$\pm 1 \%$ της ονομαστικής συχνότητας

Παρακάτω αναγράφονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τους μετατροπείς ανύψωσης που διασυνδέονται με την ανεμογεννήτρια και την φωτοβολταϊκή συστοιχία. Η μπαταρία συνδέθηκε με έναν αμφίδρομο μετατροπέα για την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με το δίκτυο.

Μέγιστο ρεύμα εξόδου

$$I_{\text{outmax}} = \frac{P}{V_{\text{out}}}$$

Πηνίο

$$L = V_{\text{in}} \frac{V_{\text{out}} - V_{\text{in}}}{d e l l_L f_s V_{\text{out}}}$$

Πυκνωτής

$$C = I_{outmax} \frac{1 - \frac{V_{in}}{V_{out}}}{f_s \Delta V_{out}}$$

Αντίσταση

$$R = \frac{V_{out}}{I_{outmax}}$$

Duty Cycle

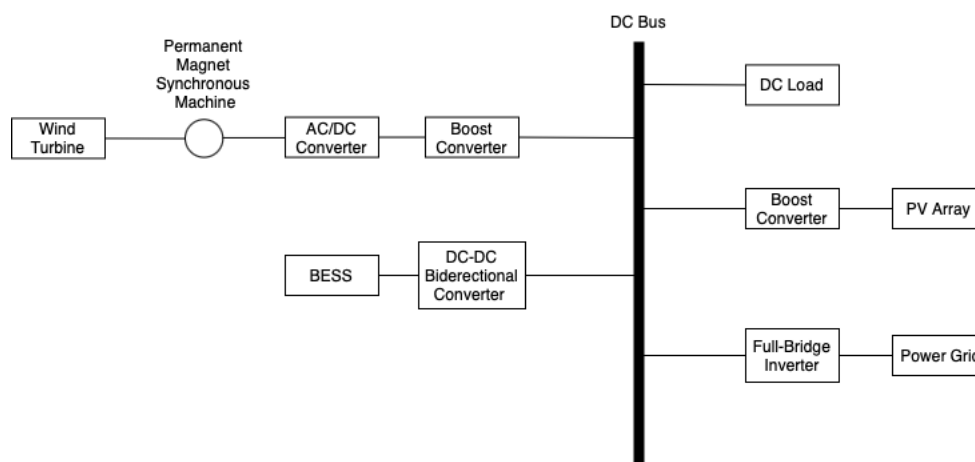
$$d = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}}$$

7. Μοντέλο και έλεγχος των συστημάτων του έξυπνου δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το μοντέλο του έξυπνου δικτύου και παρουσιάζεται ο έλεγχος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας για σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

7.1 Περιγραφή του μοντέλου του έξυπνου δικτύου

Το έξυπνο δίκτυο αποτελείται από την ανεμογεννήτρια, την φωτοβολταϊκή συστοιχία, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες, ένα DC φορτίο και το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο. Πιο αναλυτικά, συνδέθηκε η ανεμογεννήτρια σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη με έναν μετατροπέα AC/DC για την μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος της εξόδου της σε συνεχές. Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένας μετατροπέας ανύψωσης για την επίτευξη της τάσης εξόδου αναφοράς του DC δικτύου (400 V). Η φωτοβολταϊκή συστοιχία συνδέθηκε στον DC ζυγό με την χρήση ενός μετατροπέα ανύψωσης, με σκοπό να ανυψωθεί η τάσης εξόδου της, καθώς ανάλογα με την ισχύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ποικίλει. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες, συνδέθηκε στο έξυπνο δίκτυο με την χρήση ενός αμφίδρομου μετατροπέα, για την ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας από και προς το έξυπνό δίκτυο. Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνδέθηκε με το έξυπνο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ένα αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, ο οποίος εκτός από την υψηλή απόδοση που διαθέτει, επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά ισχύος με το έξυπνο δίκτυο. Τέλος, στον DC ζυγό συνδέθηκε και ένα DC φορτίο. Παρακάτω απεικονίζεται το μοντέλο του έξυπνου δικτύου.



Σχήμα 7.1 Μοντέλο του έξυπνου δικτύου

7.2 Έλεγχος της ανεμογεννήτριας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη

Η ανεμογεννήτρια σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη είναι μια ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας. Για τον έλεγχο της, χρησιμοποιείται η τεχνική ελέγχου dq, πραγματοποιώντας τον μετασχηματισμό abc σε dq. Τα ρεύματα του άξονα d και q, I_{ds} και I_{qs} αντίστοιχα, ελέγχουν την ενεργό και την άεργο ισχύ της ανεμογεννήτριας, επιτρέποντας την ρύθμιση της τάσης και της άεργου ισχύος από και προς το έξυπνο δίκτυο. Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός απλοποιεί την διαδικασία ελέγχου, καθώς διαχωρίζει τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος από τον σύνθετο χώρο των τριών φάσεων σε δύο βρόγχους ελέγχου. Ο αποτελεσματικός έλεγχος της ανεμογεννήτριας συμβάλλει ομαλή ροή ισχύος μεταξύ της γεννήτριας και του έξυπνου δικτύου, όπου συναντάται μεταβλητή ταχύτητα της γεννήτριας και σταθερή συχνότητα δικτύου.

Ο έλεγχος dq είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στις ανεμογεννήτριες, καθώς εκτός από την ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος, διασφαλίζει τον συγχρονισμό της παραγόμενης ισχύος με την συχνότητα και την τάση του δικτύου, βοηθά στην λειτουργία της ανεμογεννήτριας στο σημείο μέγιστης ισχύος και συμβάλλει στην αξιοπιστία της. Έτσι, γίνεται αποτελεσματική και αποδοτική ενσωμάτωση τους στο έξυπνο δίκτυο.

Το μαθηματικό μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας του μόνιμου μαγνήτη προκύπτει από μία διφασική σύγχρονη αναφορά dq, στην οποία ο άξονας q προηγείται 90° σε σύγκριση με τον άξονα d, σε σχέση με την διεύθυνση περιστροφής. Ο μετασχηματισμός του πλαισίου αναφοράς dq ανάγει τα τρία μεγέθη του εναλλασσόμενου ρεύματος σε δύο μεγέθη συνεχούς ρεύματος, αποσκοπώντας στην εκτέλεση απλουστευμένων υπολογισμών. Ο dq μετασχηματισμός και ο αντίστροφος του δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις, με το F να αντιπροσωπεύει την ένταση του ρεύματος, την τάση ή την επαγωγή, οι τιμές των οποίων εξαρτώνται από την θέση του δρομέα.

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \omega t & \cos (\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin (\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin (\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos (\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix}$$

Τα ρεύματα των αξόνων d και q στο πεδίο της συχνότητας (s) μπορούν να αναπαρασταθούν όπως τις παρακάτω εξισώσεις, ενώ προκύπτουν από το μοντέλο του ισοδύναμου κυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.

$$I_{ds} = \frac{(-V_{ds} - R_s I_{ds} - \omega_r)}{sL_{ds}}$$

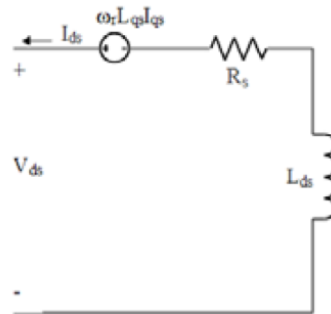
$$I_{qs} = \frac{[-V_{qs} - R_s I_{qs} - \omega_r (L_{ds} + L_{ls}) I_{ds} + \omega_r \phi_r]}{s L_{qs}}$$

Όπου V_{ds} και V_{qs} είναι οι τάσεις d και q άξονα, I_{ds} και I_{qs} είναι τα ρεύματα στάτη d και q- άξονα, R_s είναι η αντίσταση του στάτη και ω_r είναι η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας, L_{ds} και L_{qs} είναι οι αυτεπαγωγές στάση d και q άξονα και ϕ_r είναι η ροή του δρομέα. Για τις L_{ds} και L_{qs} ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις.

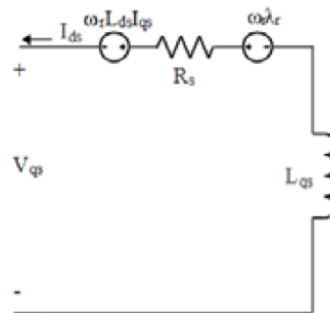
$$L_{ds} = L_{ls} + L_{dm}$$

$$L_{qs} = L_{ls} + L_{qm}$$

Όπου L_{dm} και L_{qm} είναι οι επαγωγές μαγνήτισης στους άξονες d και q και L_{ls} είναι διαρροή, λόγω επαγωγής. Το απλοποιημένο μοντέλο του άξονα dq στο πεδίο του δρομέα παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 7.2 Κύκλωμα d άξονα



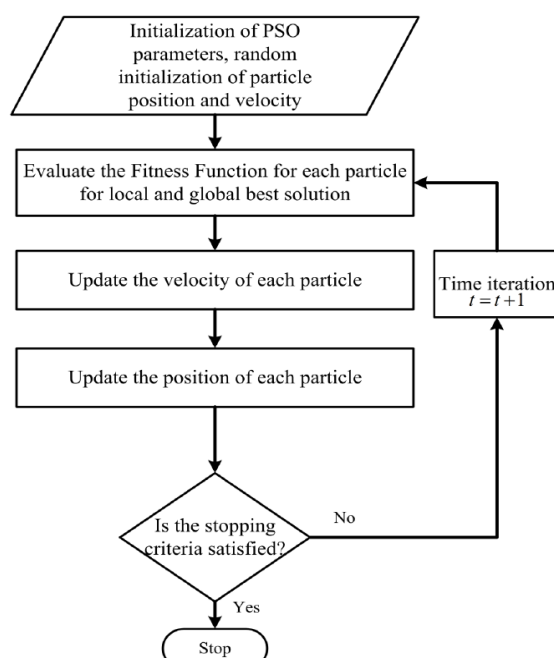
Σχήμα 7.3 Κύκλωμα q άξονα

7.3 Έλεγχος του BESS

Για τον έλεγχο του συστήματος μπαταρίας χρησιμοποιήθηκε ένας PI ελεγκτής. Ο εν λόγω ελεγκτής δέχεται ως είσοδο την διαφορά των τάσεων αναφοράς και φορτίου και ανάλογα την διαφορά που προκύπτει ρυθμίζει κατάλληλα το Duty Cycle της γεννήτριας PWM, που λειτουργεί σε σταθερή συχνότητα. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνει την ομαλή λειτουργία του συστήματος μπαταριών. Βέβαια, για την βέλτιστη επιλογή των P και I παραμέτρων του ελεγκτή, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος PSO, ο οποίος λειτουργεί επαναληπτικά, με σκοπό την βέλτιστη λύση.

Η έξοδος της γεννήτριας PWM, δίνεται ως σήμα εισόδου στην πύλη του IGBT του αμφίδρομου μετατροπέα, όπου ανάλογα με την τιμή του Duty Cycle του σήματος PWM, ρυθμίζει την ροή ενέργειας από το σύστημα μπαταρίας προς το έξυπνο δίκτυο και αντίστροφα. Με την περιγραφόμενη διαδικασία, επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος της μπαταρίας.

Ο αλγόριθμος αποτελεί μία υπολογιστική μέθοδο προσπαθώντας επαναληπτικά να βελτιώσει μια υποψήφια λύση σε σχέση με ένα δεδομένο μέτρο ποιότητας. Επιλύει ένα πρόβλημα, έχοντας στην διάθεση του ένα πληθυσμό υποψήφιων λύσεων, που ονομάζονται σωματίδια και μετακινεί τα σωματίδια στο χώρο αναζήτησης, ανάλογα με την θέση και την ταχύτητα του σωματιδίου. Η μετακίνηση του κάθε σωματιδίου, επηρεάζεται από την καλύτερη γνωστή τοπική θέση του, αλλά καθοδηγείται ακόμα προς τις καλύτερες θέσεις στο χώρο αναζήτησης, οι οποίες ενημερώνονται, καθώς άλλα σωματίδια βρίσκουν καλύτερες θέσεις στον χώρο. Η διαδικασία αυτή οδηγεί το σμήνος σε καλύτερες λύσεις.



Σχήμα 7.4 Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Particle Swarm Optimization

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι μια μεταερευνητική μέθοδος, καθώς κάνει λίγες ή μηδενικές υποθέσεις σχετικά με το πρόβλημα. Έχει την δυνατότητα, να αναζητήσει πολύ μεγάλους χώρους υποψήφιων λύσεων, ενώ το κύριο

πλεονέκτημα της είναι το γεγονός ότι δεν απαιτεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης να είναι διαφοροποιήσιμο, όπως απαιτείται από τις κλασσικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Βέβαια, ο εν λόγω αλγόριθμος δεν εγγυάται ότι βρίσκεται η βέλτιστη λύση του εξεταζόμενου προβλήματος.

7.4 Έλεγχος του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του έξυπνου δικτύου, ενώ ο έλεγχός του έγινε με την τεχνική ελέγχου dq. Ο έλεγχος του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς μετατρέπει την τάση και το ρεύμα του δικτύου σε ένα πλαίσιο, έτσι ώστε από εναλλασσόμενα σήματα να μετατρέπονται σε συνεχή σήματα. Για να επιτευχθεί ο μετασχηματισμός αυτός, χρησιμοποιείται ο Phase-Locked Loop (PLL) που ανιχνεύει την γωνία φάσης της τάσης του δικτύου.

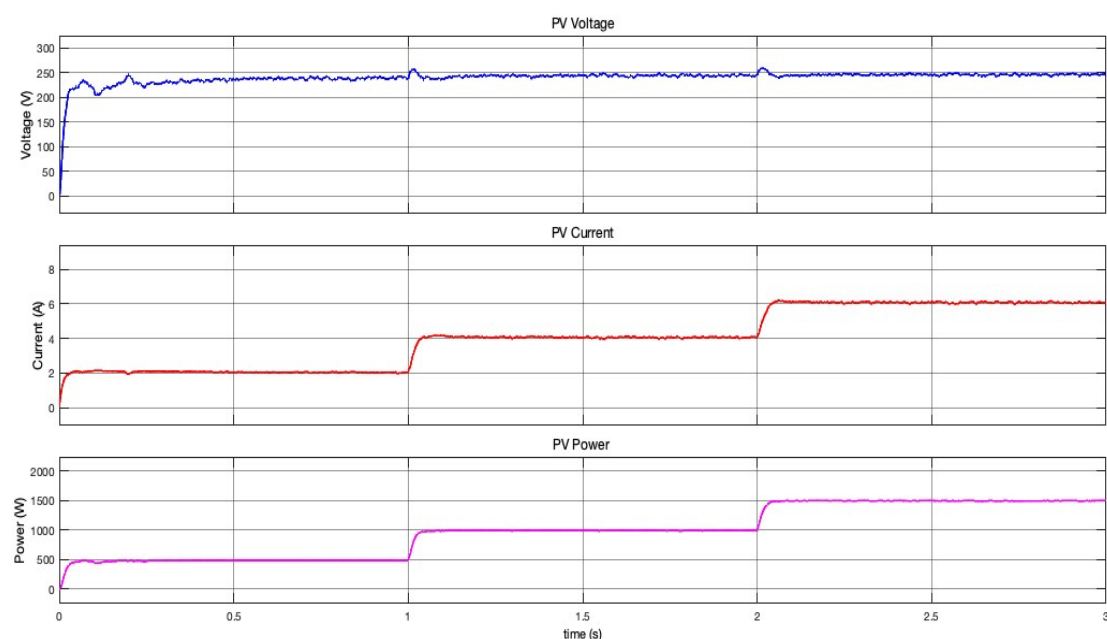
8. Αποτελέσματα προσομοίωσης του έξυπνου δικτύου

Με την χρήση του λογισμικού Simulink, έγινε η μοντελοποίηση και προσομοίωση του έξυπνου δικτύου, ενώ εξετάστηκε η λειτουργία του σε διαφορετικά σενάρια παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και παροχής ενέργειας από το διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

8.1 Σενάρια λειτουργίας του έξυπνου δικτύου

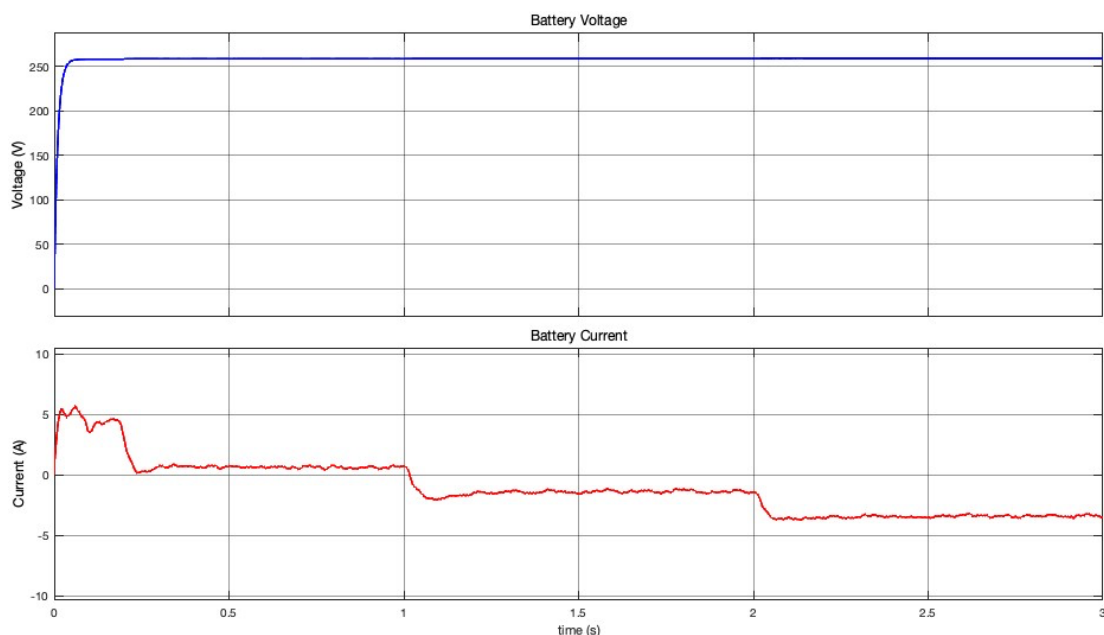
1^ο Σενάριο λειτουργίας

Κατά την λειτουργία του δικτύου για 3 s παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Το έξυπνο δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχει σε αυτό σταθερή ισχύ. Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας η παραγωγή της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή, καθώς η ταχύτητα ανέμου έχει ρυθμιστεί στα 10 m/s. Όμως, η προσπίπτουσα ακτινοβολία μεταβάλλεται από 250 W/m² έως 1000 W/m² με βήμα 250 W/m² ανά δευτερόλεπτο.



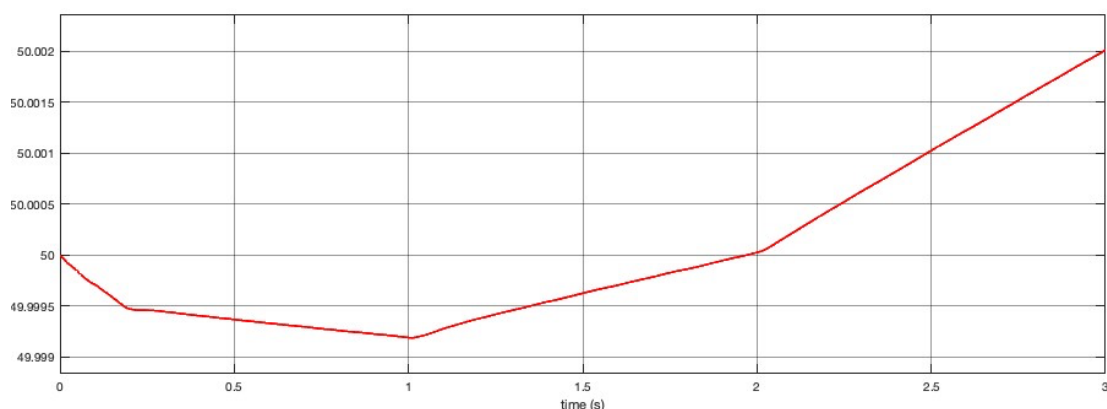
Σχήμα 8.1 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (1^ο Σενάριο)

Παρατηρείται ότι η τάση του φωτοβολταϊκού παραμένει σταθερή με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές που γίνεται μεταβολή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και παρουσιάζεται μια μικρή ανύψωση τάσης. Η ένταση του ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και παραμένει σταθερή κατά τα χρονικά διαστήματα που ηλιακή ακτινοβολία είναι σταθερή. Η ισχύς του φωτοβολταϊκού προκύπτει από το γινόμενο της τάσης και της έντασης του ρεύματος του φωτοβολταϊκού, οπότε οι μεταβολές που παρουσιάζονται είναι ανάλογες των επιμέρους μεταβολών τους.



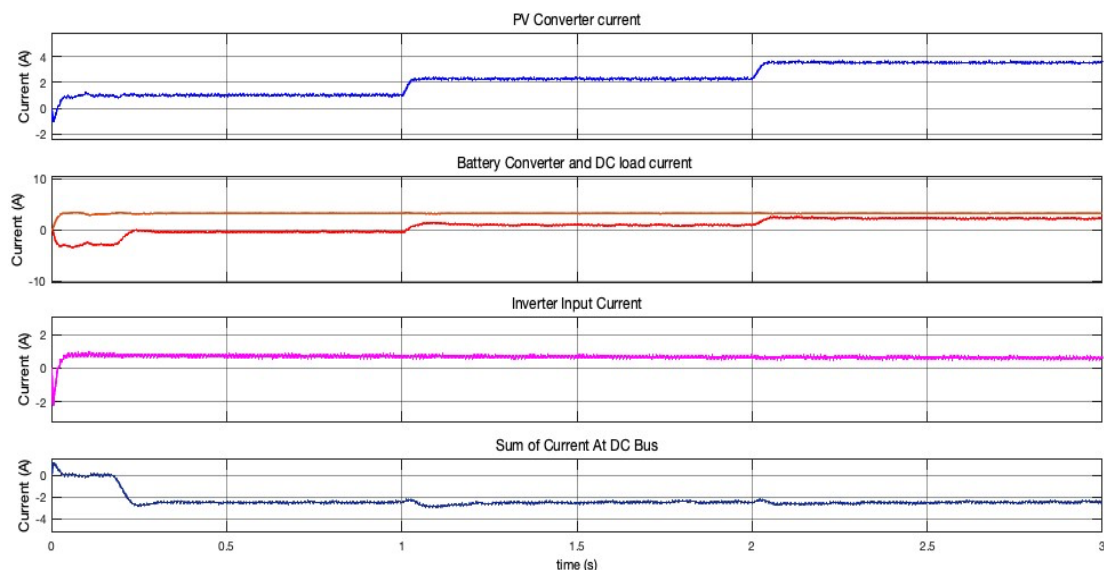
Σχήμα 8.2 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (1^ο Σενάριο)

Η τάση της μπαταρίας ανυψώνεται έως την τάση λειτουργίας, όπου και παραμένει σταθερή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία μέχρι το 1 s δεν είναι επαρκής για την κάλυψη των αναγκών του έξυπνου δικτύου, με αποτέλεσμα να γίνεται αποφόρτιση της μπαταρίας. Βέβαια, μετά το πρώτο δευτερόλεπτο και την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε συνδυασμό με την ενέργεια που παράγεται από την ανεμογεννήτρια, αρκούν για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας και για τον λόγο αυτό η μπαταρία φορτίζει με την περίσσεια της ενέργειας που προκύπτει. Με την περεταίρω αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, η περίσσεια ενέργεια αυξάνεται και άρα η ένταση του ρεύματος φόρτισης σημειώνει αύξηση.



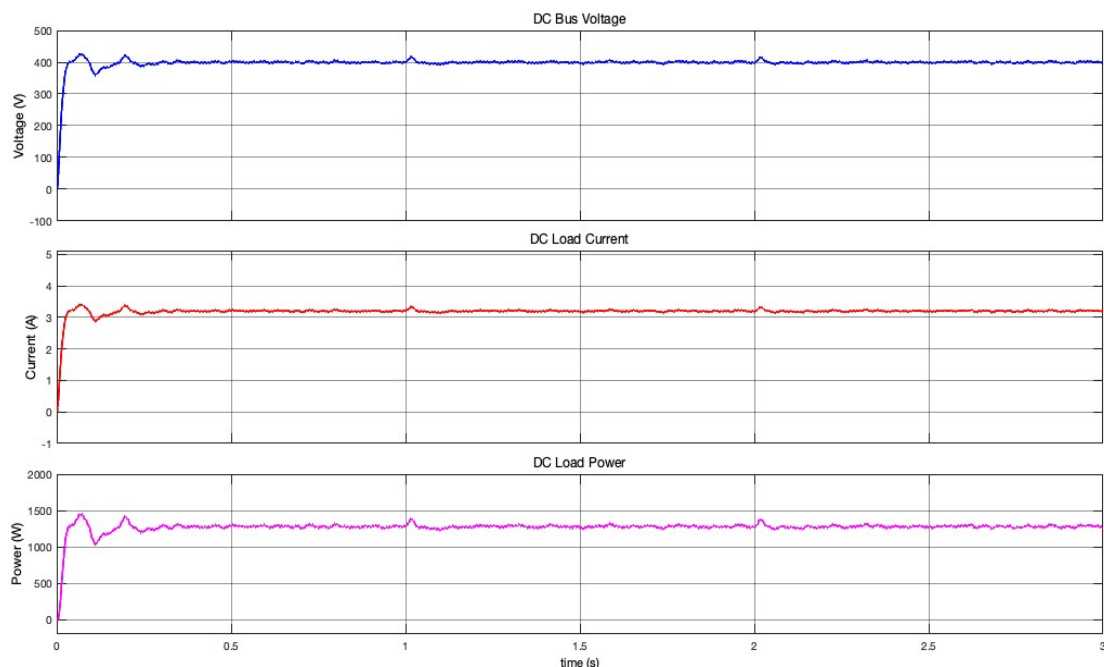
Σχήμα 8.3 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (1^ο Σενάριο)

Η κατάσταση της φόρτισης της μπαταρίας σημειώνει πτώση, καθώς γίνεται εκφόρτιση της κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου. Μετά το χρονικό διάστημα αυτό γίνεται φόρτιση της, με την κλίση φόρτισης να είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος φόρτισης.



Σχήμα 8.4 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (1^ο Σενάριο)

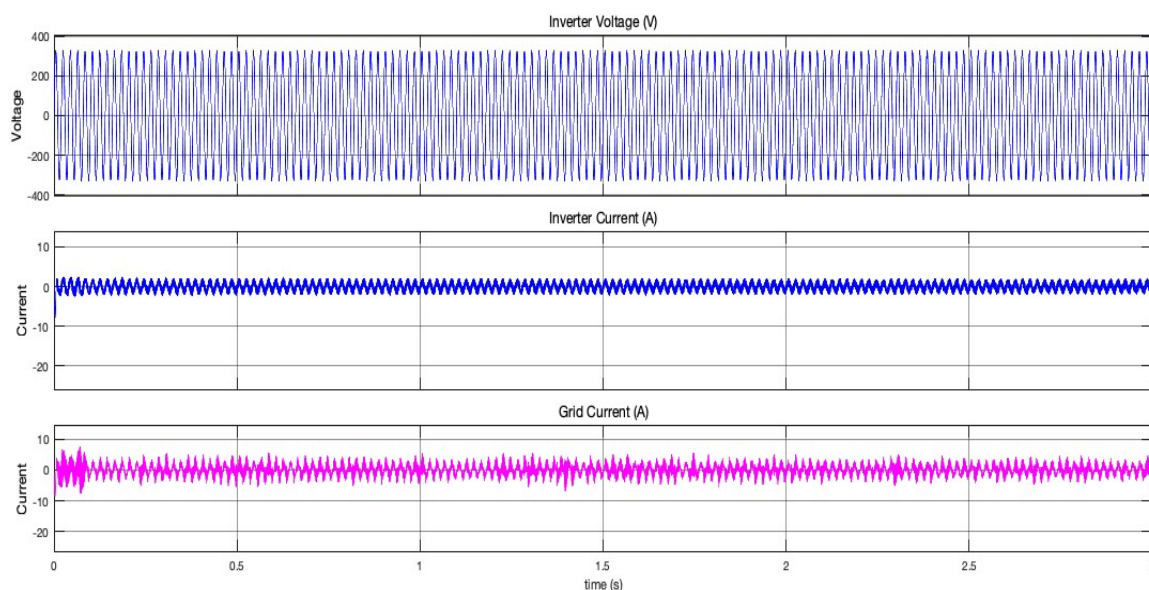
Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού αυξάνεται με την αύξηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, κάτι που συμβαίνει και στην περίπτωση του ρεύματος του μετατροπέα της μπαταρίας. Όσο αφορά το ρεύμα της εισόδου του αντιστροφέα, αυτό παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σταθερή ισχύς. Τέλος, το ρεύμα του DC φορτίου είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τις μεταβολές στην ηλιακή ακτινοβολία. Το άθροισμα όλων των παραπάνω ρευμάτων απεικονίζεται στην τελευταία κυματομορφή.



Σχήμα 8.5 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (1^ο Σενάριο)

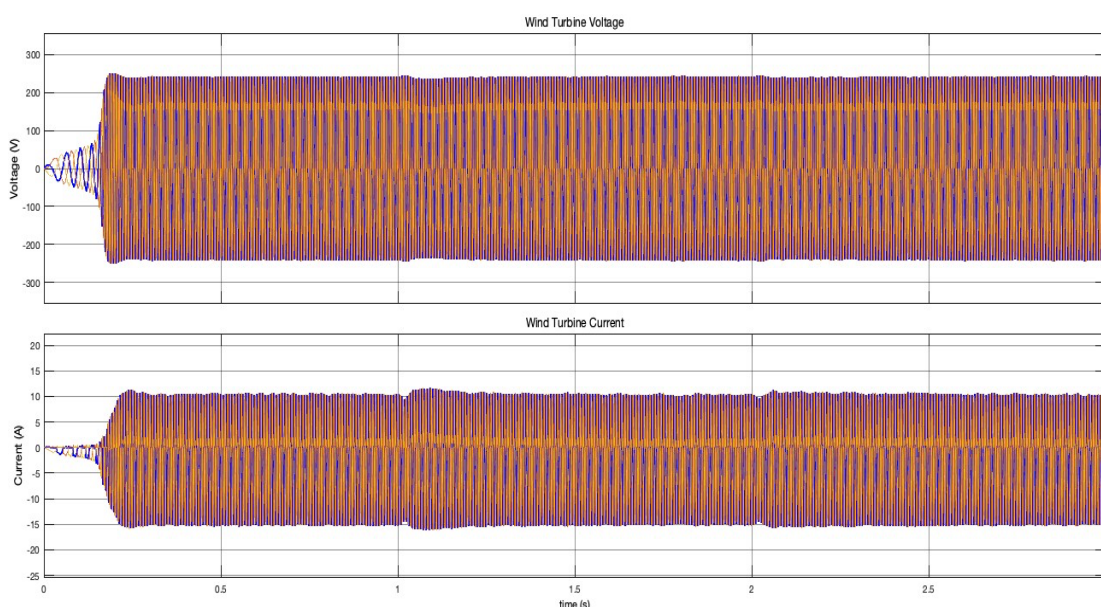
Η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο και η ένταση του ρεύματος είναι σταθερές, με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές, όπου γίνεται μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας και παρουσιάζεται έτσι μια μικρή διακύμανση στην

ηλεκτρική ισχύ και ρεύμα μέχρι να σταθεροποιηθούν ξανά. Όσο αφορά την τάση του DC Bus, παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα με εξαίρεση μικρές διακυμάνσεις, εντός των επιτρεπτών ορίων τις χρονικές στιγμές που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 8.6 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (1^ο Σενάριο)

Η ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι σταθερή, οπότε δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στη τάση ή το ρεύμα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

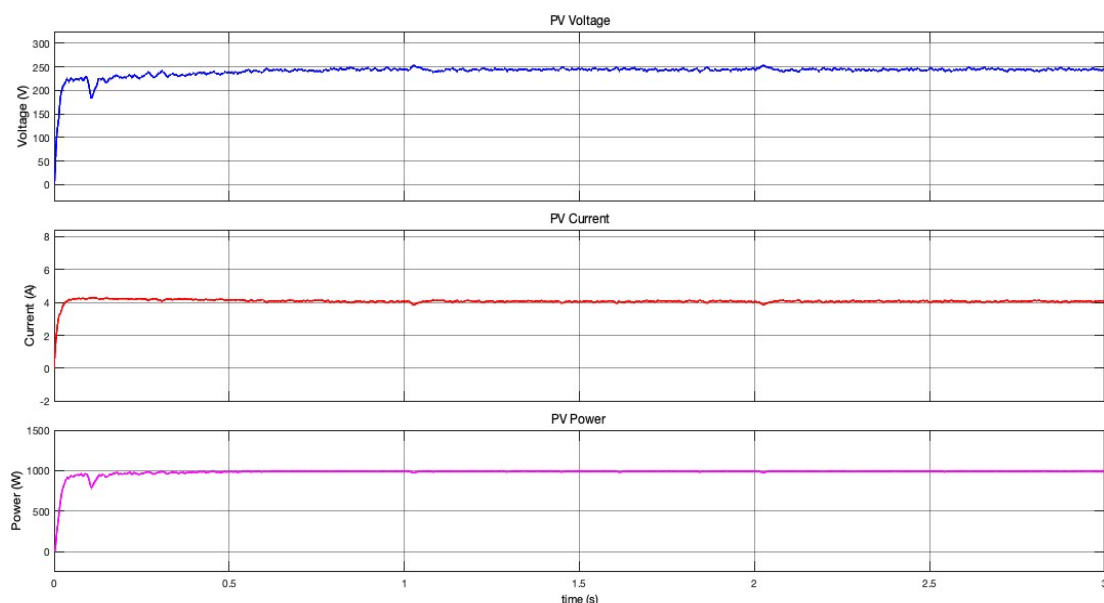


Σχήμα 8.7 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (1^ο Σενάριο)

Η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα ανέμου, οπότε δεν υπάρχει κάποια μεταβολή στη τάση και στο ρεύμα κατά την διάρκεια λειτουργίας της.

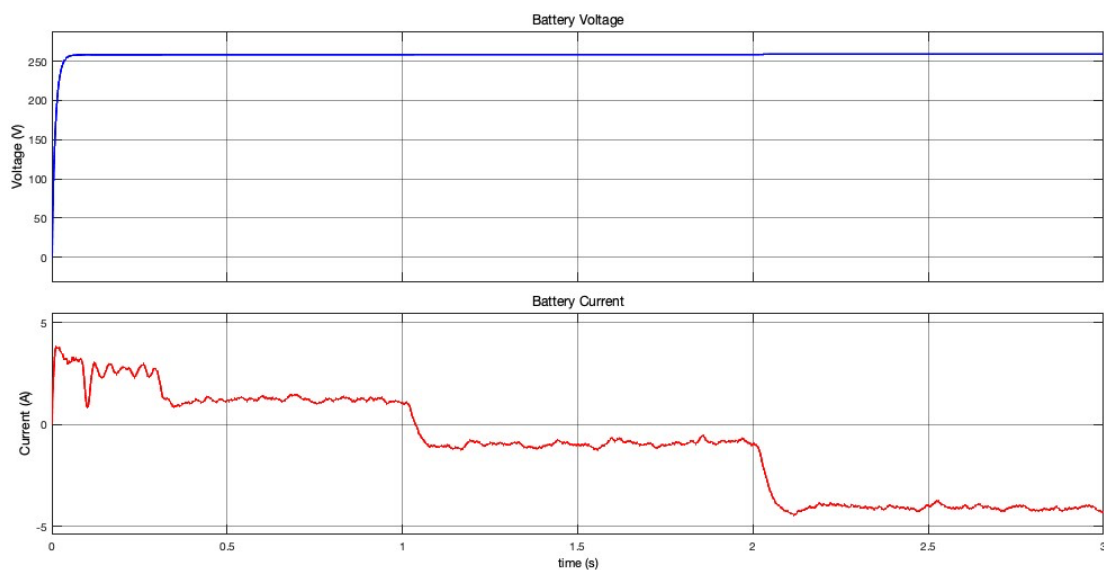
2^ο Σενάριο λειτουργίας

Το έξυπνο δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχει σε αυτό σταθερή ισχύ. Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας η παραγωγή της ανεμογεννήτριας είναι μεταβλητή, με την ταχύτητα του ανέμου να μεταβάλλεται από 9 έως 11 m/s με σταθερό βήμα 1 m/s το χρονικό διάστημα από 0 έως 3 s. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία παραμένει σταθερή και ίση 500 W/m².



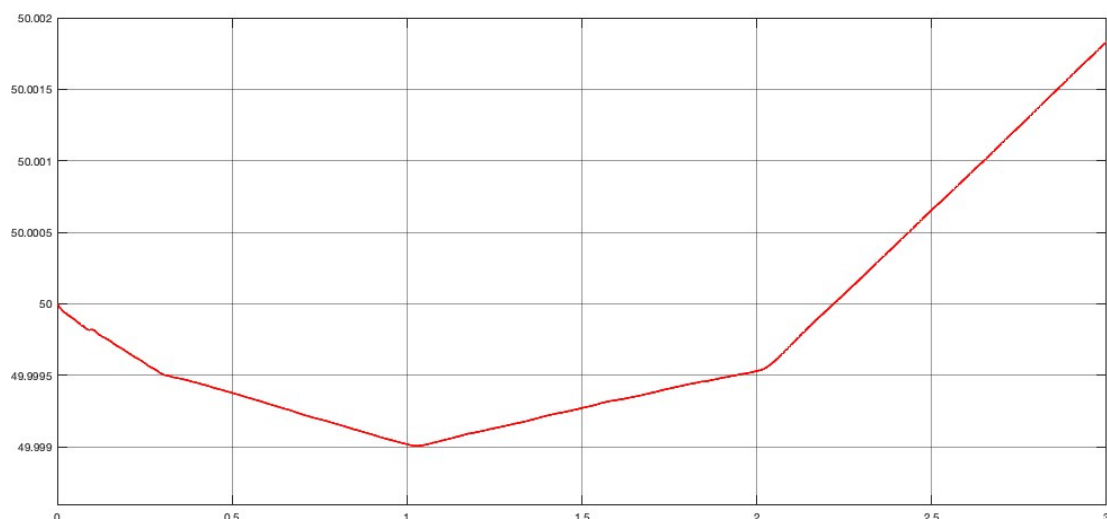
Σχήμα 8.8 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (2^ο Σενάριο)

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, οπότε δεν παρουσιάζονται μεταβολές.



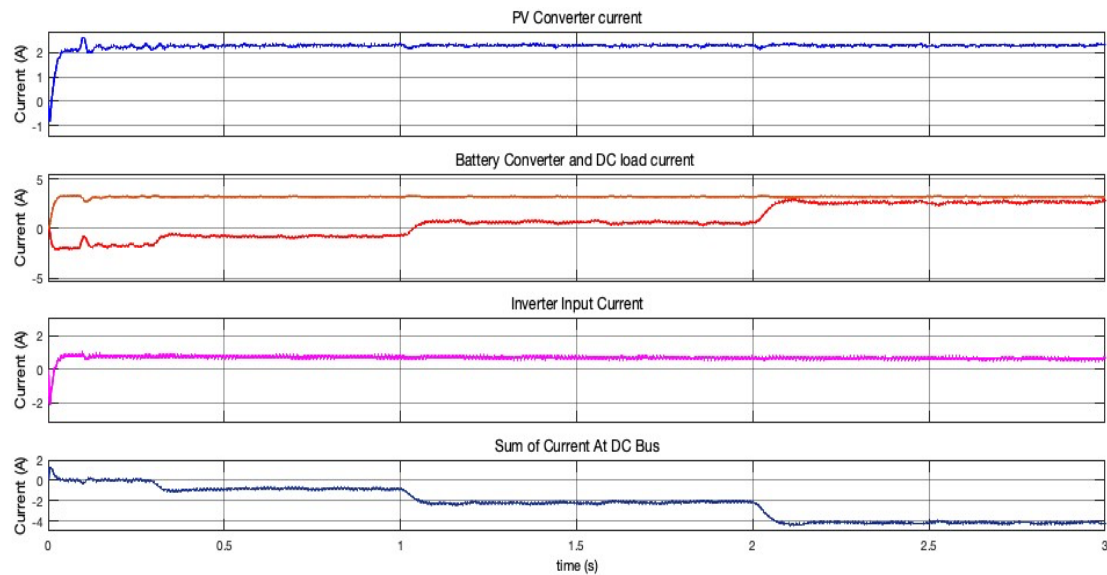
Σχήμα 8.9 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (2^ο Σενάριο)

Η τάση της μπαταρίας ανυψώνεται έως την τάση λειτουργίας, όπου και παραμένει σταθερή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Η παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες ζήτησης μέχρι το 1 s, με αποτέλεσμα να γίνεται αποφόρτιση της μπαταρίας. Βέβαια, μετά το πρώτο δευτερόλεπτο και την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου η ενέργεια από την ανεμογεννήτρια και τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι αρκετή για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας και για τον λόγο αυτό η μπαταρία φορτίζει με την περίσσεια της ενέργειας που προκύπτει. Με την περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας του ανέμου η ένταση του ρεύματος φόρτισης σημειώνει αύξηση, καθώς αυξάνεται η περισσευούμενη ενέργεια.



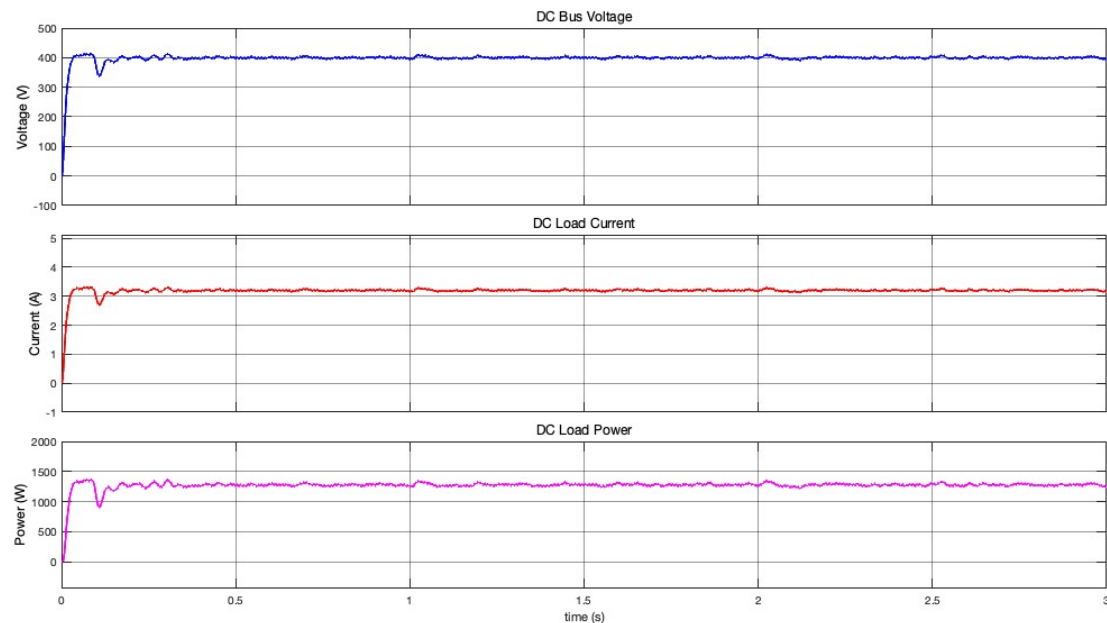
Σχήμα 8.10 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (2^ο Σενάριο)

Η κατάσταση της φόρτισης της μπαταρίας σημειώνει πτώση, καθώς γίνεται εκφόρτιση της κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου. Έπειτα, το χρονικό διάστημα 1-2 s γίνεται φόρτιση της, ενώ το χρονικό διάστημα 2-3 s η φόρτιση γίνεται με μεγαλύτερη ένταση ρεύματος, κάτι που γίνεται φανερό και από την αύξηση της κλίσης.



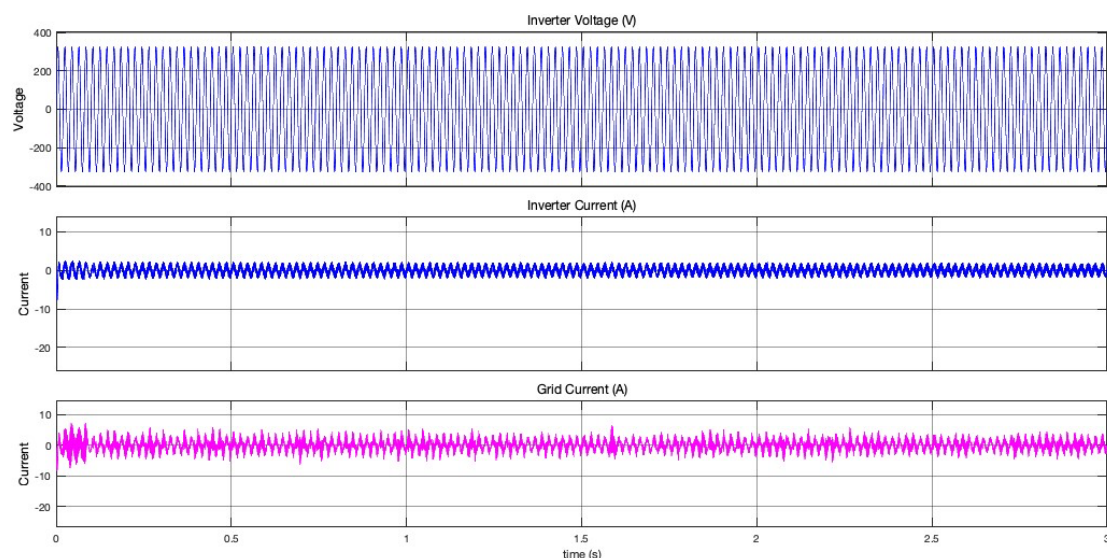
Σχήμα 8.11 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (2^ο Σενάριο)

Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού δεν μεταβάλλεται, καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία παραμένει σταθερή. Το ρεύμα του μετατροπέα της μπαταρίας αυξάνεται, με την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας της ανεμογεννήτριας. Όσο αφορά το ρεύμα της εισόδου του αντιστροφέα, αυτό παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργεια σταθερής ισχύος. Τέλος, το ρεύμα του DC φορτίου είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τις μεταβολές της παραγόμενης ισχύς από την ανεμογεννήτρια. Το άθροισμα όλων των παραπάνω ρευμάτων απεικονίζεται στην τελευταία κυματομορφή.



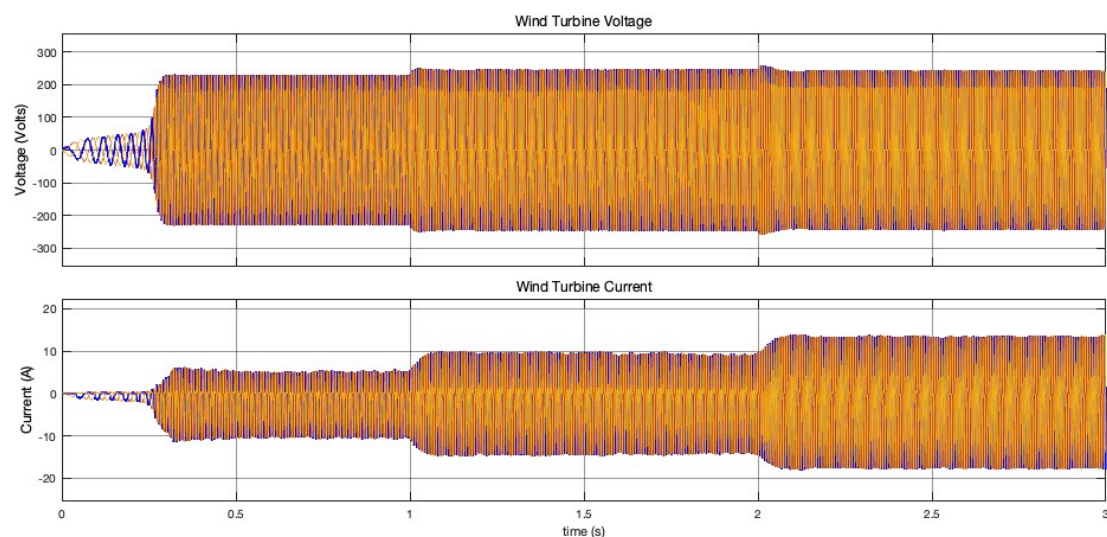
Σχήμα 8.12 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (2^ο Σενάριο)

Η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο και η ένταση του ρεύματος είναι σταθερές, με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές, όπου γίνεται μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και παρουσιάζεται έτσι μια μικρή διακύμανση στην ισχύ μέχρι να σταθεροποιηθεί ξανά. Όσο αφορά την τάση του DC Bus, παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.



Σχήμα 8.13 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (2^ο Σενάριο)

Η ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο είναι σταθερή, οπότε δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στη τάση ή το ρεύμα του αντιστροφέα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

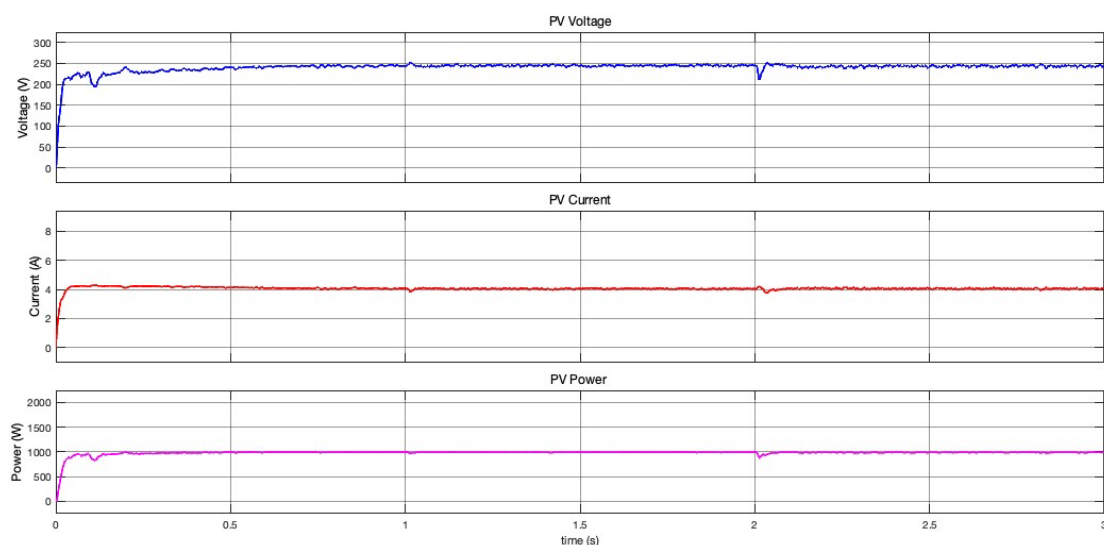


Σχήμα 8.14 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (2^ο Σενάριο)

Η ταχύτητα ανέμου μεταβάλλεται με το χρόνο και κατά συνέπεια μεταβάλλεται παραγόμενη ισχύς της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται μετά την χρονική στιγμή 1, 2 s αύξηση της έντασης του ρεύματος, καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξήθηκε κατά 1 και 2 m/s αντίστοιχα από την αρχή της προσομοίωσης. Η τάση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας παραμένει σταθερή.

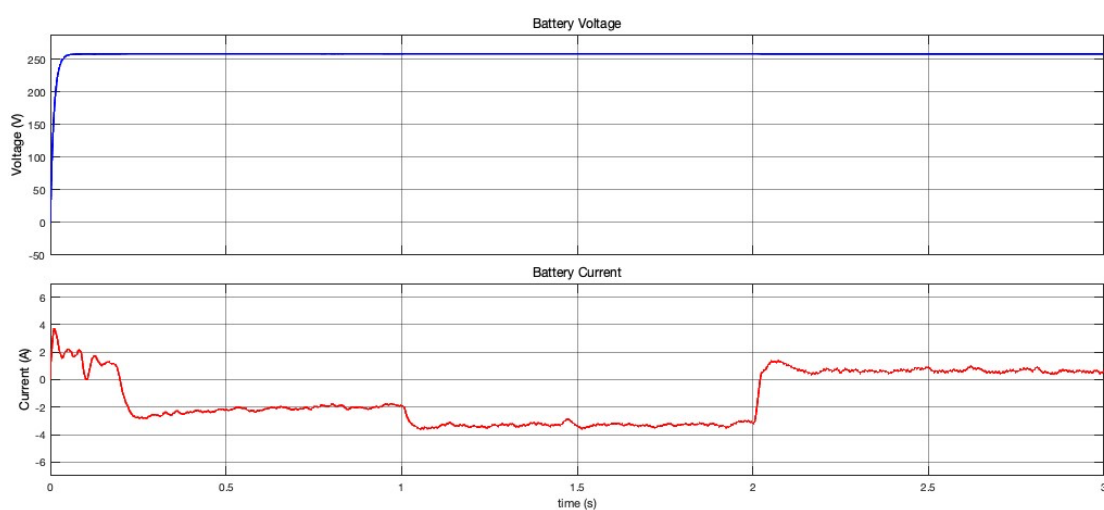
3^ο Σενάριο λειτουργίας

Το έξυπνο δίκτυο είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και εξετάζονται τρία διαφορετικά ενδεχόμενα λειτουργίας του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα το χρονικό διάστημα από 0 έως 1 s το δίκτυο βρίσκεται σε λειτουργία ανταλλαγής μηδενικής ενεργού ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο. Το χρονικό διάστημα 1 έως 2 s το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει ηλεκτρική ισχύ, ενώ στο διάστημα 2 έως 3 s, παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σταθερή ισχύς. Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας η παραγωγή της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή, με την ταχύτητα του ανέμου να είναι 10 m/s. Επιπλέον, καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης η προσπίπτουσα ακτινοβολία παραμένει σταθερή και ίση 500 W/m^2 .



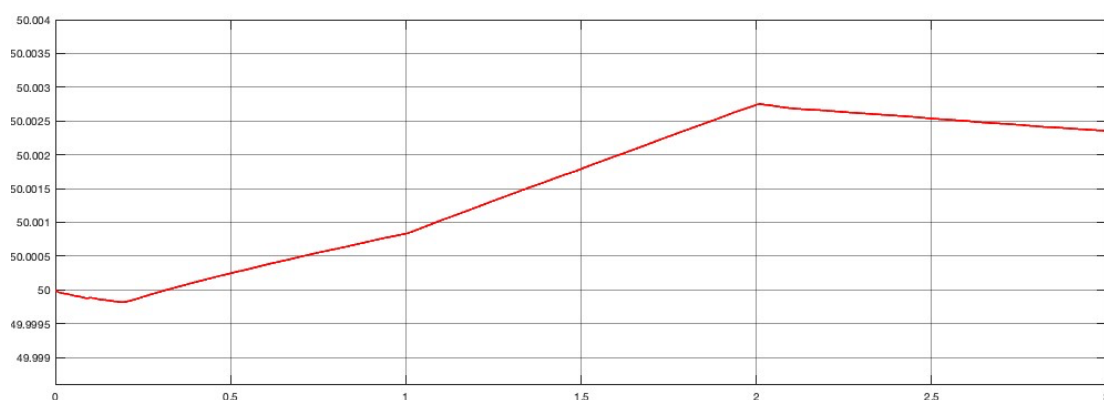
Σχήμα 8.15 Κυματομορφή ισχύος, ρεύματος και τάσεως φωτοβολταϊκού σε συνάρτηση με τον χρόνο (3^ο Σενάριο)

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, οπότε δεν παρουσιάζονται μεταβολές.



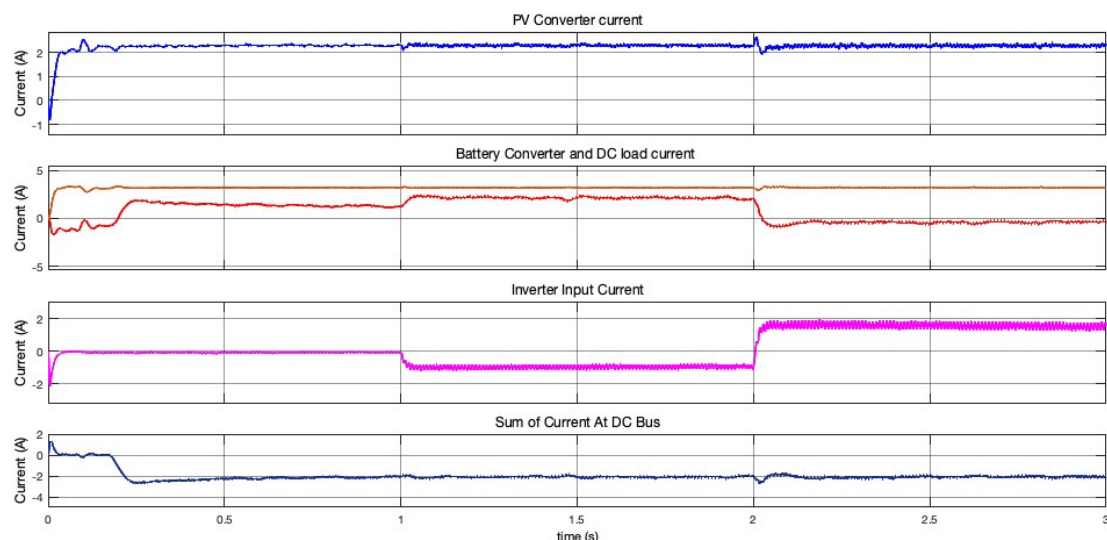
Σχήμα 8.16 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (3^ο Σενάριο)

Η τάση της μπαταρίας ανυψώνεται έως την τάση λειτουργίας, όπου και παραμένει σταθερή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας είναι αρνητική, καθώς το χρονικό διάστημα 0 έως 1 s το δίκτυο είναι σε λειτουργία μηδενικής ανταλλαγής ενεργού ισχύος και υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τις ΑΠΕ. Για το λόγο αυτό η μπαταρία φορτίζεται. Το χρονικό διάστημα 1 έως 2 s η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας αυξάνεται, καθώς παρέχεται στο έξυπνο δίκτυο σταθερή ισχύς. Καθώς, υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τις ΑΠΕ, η παρεχόμενη ισχύς από το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιείται για φόρτιση της μπαταρίας με μεγαλύτερο ρυθμό φόρτισης. Το χρονικό διάστημα 2 έως 3 s το έξυπνο δίκτυο παρέχει σταθερή ισχύς στο ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ η παραγωγή των ΑΠΕ δεν είναι αρκετή για την τροφοδοσία του. Για τον λόγο αυτό, η ένταση του ρεύματος της μπαταρίας είναι θετική, κάτι που υποδηλώνει ότι η μπαταρία εκφορτίζεται για να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση ενέργειας.



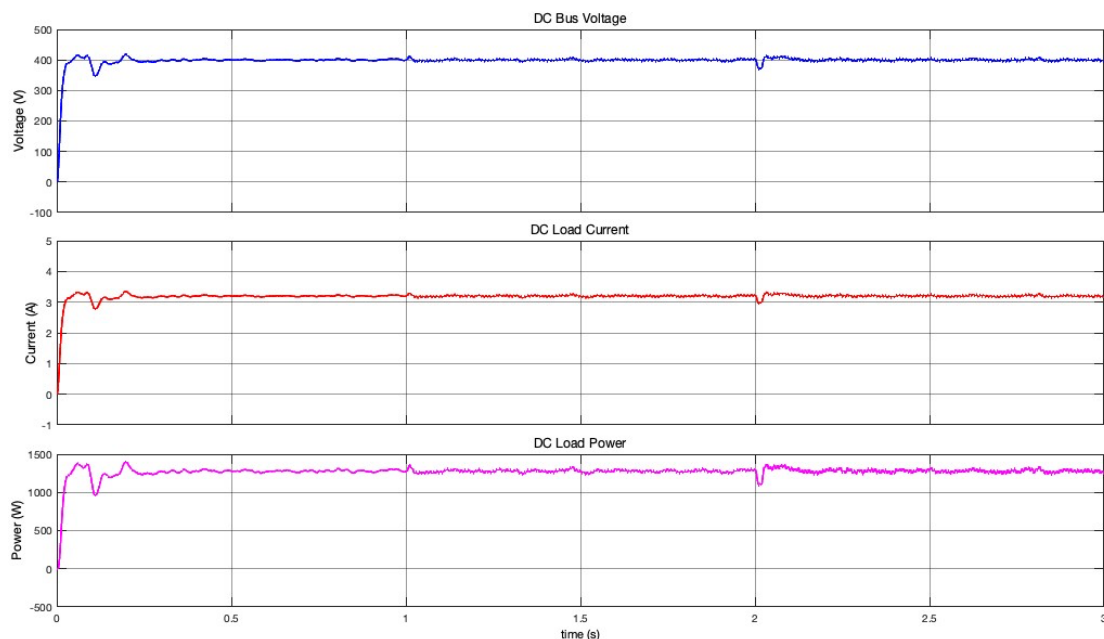
Σχήμα 8.17 Κυματομορφή της κατάστασης φόρτισης του συστήματος μπαταρίας σε συνάρτηση με τον χρόνο (3^ο Σενάριο)

Η κατάσταση της φόρτισης της μπαταρίας σημειώνει αύξηση, καθώς γίνεται φόρτιση της κατά την διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου. Έπειτα, έως το δεύτερο δευτερολέπτο η φόρτιση γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό, κάτι που γίνεται φανερό και από την αύξηση της κλίσης. Τέλος, κατά την διάρκεια του δεύτερου δευτερολέπτου, η μπαταρία παρέχει ισχύ για την κάλυψη της απαιτούμενη ισχύος, οπότε γίνεται και εκφόρτιση της.



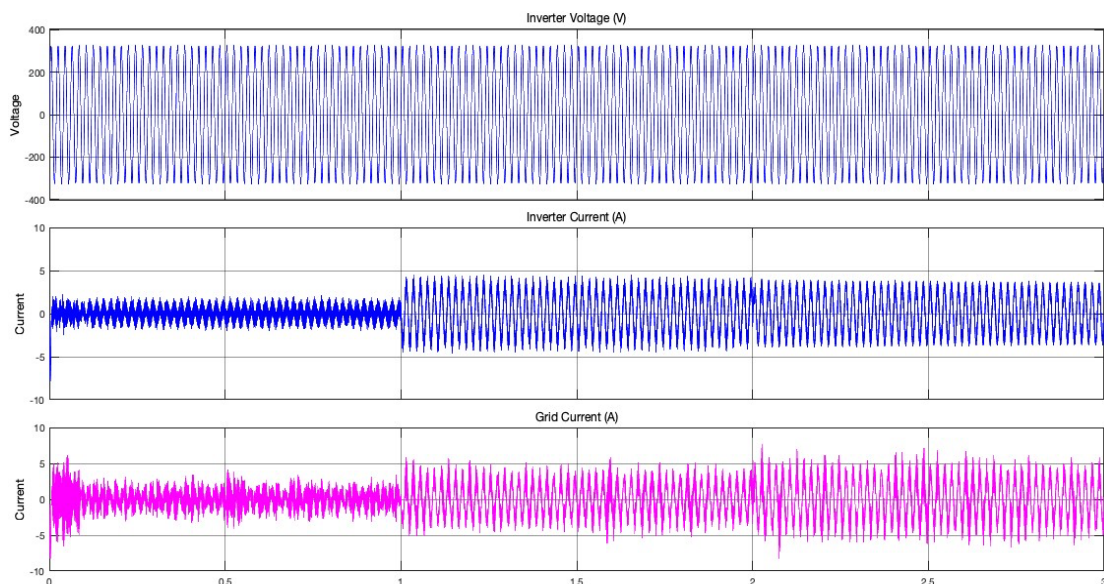
Σχήμα 8.18 Κυματομορφές ρεύματος φωτοβολταϊκού, του μετατροπέα της μπαταρίας, του DC φορτίου, του αντιστροφέα και το άθροισμα τους στο DC Bus (3^ο Σενάριο)

Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού δεν μεταβάλλεται, καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε αυτό παραμένει σταθερή. Το ρεύμα του μετατροπέα της μπαταρίας αυξάνεται μετά το 1 s, αφού η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται με την διασύνδεση του ηλεκτρικού δικτύου και η μπαταρία φορτίζεται. Μετά το πέρας του πρώτου δευτερολέπτου, παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια, με αποτέλεσμα να συνδράμει και η μπαταρία για την κάλυψη των αναγκών ενέργειας, με το ρεύμα του μετατροπέα της μπαταρίας να είναι αρνητικό. Όσο αφορά το ρεύμα της εισόδου του αντιστροφέα, αυτό είναι μηδενικό το χρονικό διάστημα από 0 έως 1 s, καθώς η ανταλλαγή ενεργού ισχύος είναι μηδενική, αρνητικό από το χρονικό διάστημα 1-2 s, καθώς παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια από το διασυνδεδεμένο δίκτυο, ενώ το χρονικό διάστημα από 2 έως 3 s, γίνεται παροχή ισχύος στο διασυνδεδεμένο δίκτυο, με αποτέλεσμα το ρεύμα να λαμβάνει θετική τιμή. Τέλος, το ρεύμα του DC φορτίου είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τις μεταβολές της ισχύος, που προκαλούνται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το άθροισμα όλων των παραπάνω ρευμάτων απεικονίζεται στην τελευταία κυματομορφή.



Σχήμα 8.19 Κυματομορφές της τάσης του DC Bus και του ρεύματος, ισχύος του DC φορτίου (3^ο Σενάριο)

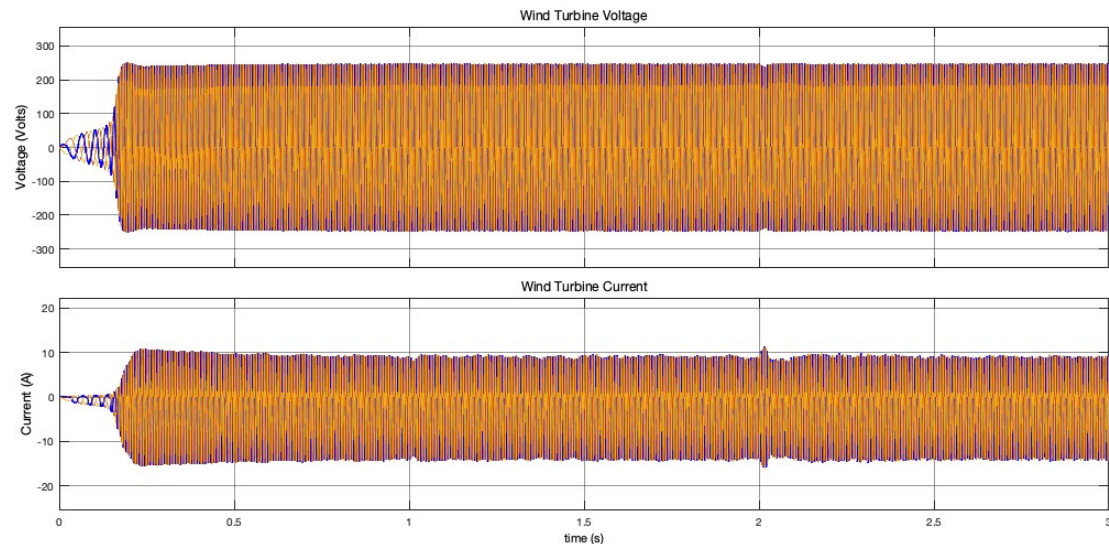
Η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο και η ένταση του ρεύματος είναι σταθερές, με εξαίρεση τις χρονικές στιγμές, όπου παρέχεται ή απορροφάται ηλεκτρική ενέργεια από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι κυματομορφές τις αναφερόμενες χρονικές στιγμές παρουσιάζουν μικρές διακυμάνσεις μέχρι να σταθεροποιηθούν ξανά. Όσο αφορά την τάση του DC Bus, παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα με εξαίρεση μικρές διακυμάνσεις, εντός των επιτρεπτών ορίων τις χρονικές στιγμές που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 8.20 Κυματομορφές ρεύματος, τάσης του αντιστροφέα και ρεύματος του δικτύου (3^ο Σενάριο)

Το χρονικό διάστημα από 0 – 1 s παρουσιάζεται μόνο άεργο ρεύμα, ενώ η ανταλλαγή ενεργού ισχύος έχει ρυθμιστεί στο 0. Η τάση του αντιστροφέα

παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, γεγονός που υποδεικνύει την ομαλή λειτουργία του. Το ρεύμα του αντιστροφέα μεταβάλλεται τις χρονικές στιγμές 1, 2 s, όπου γίνεται απορρόφηση και παροχή ηλεκτρικής ισχύος αντίστοιχα. Το ρεύμα του δικτύου μεταβάλλεται και αυτό για τον παραπάνω λόγο τις ίδιες χρονικές στιγμές.



Σχήμα 8.21 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος της ανεμογεννήτριας (3^ο Σενάριο)

Η ταχύτητα ανέμου παραμένει σταθερή, οπότε δεν υπάρχει μεταβολή στη τάση και το ρεύμα της ανεμογεννήτριας.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Tiantian Zhang
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/photovoltaic-effect>
- [2] G.Boyle, Mr. Solar
https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_effect
- [3] Χαρούλα Μελέτη
<http://ikee.lib.auth.gr/record/300358/files/Πτυχιακή.pdf>
- [4] Βατάλης Αναστάσιος
http://ikee.lib.auth.gr/record/133389/files/Αιολική_Ενέργεια.pdf
- [5] Robert Whittlesey
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vertical-axis-wind-turbine>
- [6] Muhammad Kamran
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/horizontal-axis-wind-turbine>
- [7] Danish wind industry association
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/tower.htm>
- [8] Danish wind industry association
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/powerreg.htm>
- [9] Danish wind industry association
<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [10] Wenping Cao, Ying Xie and Zheng Tan
<https://www.intechopen.com/chapters/38933>
- [11] Megawatts Sustainable Energy Pte Ltd
<https://www.megawatts.com.sg/renewable-energy/energy-storage/capacity-firming/>
- [12] Nashvinder Singh and Jigeesha Upadhaya
<https://blog.norcalcontrols.net/bess-battery-energy-storage-systems-support-grid>
- [13] Fluke
<https://www.fluke.com/en/learn/blog/power-quality/how-to-find-harmonics-in-electrical-systems>
- [14] The Revolution of Energy Storage
<https://troescorp.com/what-is-battery-energy-storage/>
- [15] Evesco
<https://www.power-sonic.com/blog/battery-energy-storage-system-components/>

- [16] Tech Web
<https://techweb.rohm.com/product/power-ic/dcdc/dcdc-evaluation/897/>
- [17] Electrical Technology
<https://www.electricaltechnology.org/2021/10/electric-power-distribution-network.html>
- [18] Κ.Γυφτάκης
Ηλεκτρικές Μηχανές – Διαλέξη 2^η Μετασχηματιστές
- [19] Edvard Csanyi
<https://electrical-engineering-portal.com/equipment-distribution-substation>
- [20] Electrical Tech
<https://electricaltech.in/la-lightning-arresters-also-called-surge-arrester-diverter-in-electrical-substations/>
- [21] Electrical Technology
<https://www.electricaltechnology.org/2018/02/design-earthing-grounding-substation-grid.html>
- [22] Λαμπρίδης Δημήτρης, Ανδρέου Γεώργιος
Κατασκευαστικά Στοιχεία Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς – Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
- [23] Λαμπρίδης Δημήτρης, Ανδρέου Γεώργιος
Καλώδια Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας – Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
- [24] Dehua Zheng, Jun Yue
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/smart-load>
- [25] R. BharathK, E. Suresh
<https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-Implementation-of-Improved-Fractional-BharathK-Suresh/400a94c8be8c62cfa1c758890d0123dfb0b3bf53>
- [26] Nagesh Eswar
https://www.researchgate.net/figure/Flow-Chart-For-the-Short-Circuit-Method_fig1_321696955
- [27] Γεώργιος Σ. Λέντζας, Θωμάς Κ. Μπουμπούλης
<http://ikee.lib.auth.gr/record/290221/files/Μπούμπουλης-Λεντζας.pdf>
- [28] Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Particle_swarm_optimization
- [29] Raza Umar
https://www.researchgate.net/figure/Flowchart-for-basic-PSO-algorithm_fig3_266614526
- [30] Acharya Parash1, Papadakis Antonis, Shaikh Muhammad Naveed
https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2016/18/matecconf_acpee2016_04001.pdf

[31] Jundi Jia, Peter Rønne-Hansen
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/dq-control>