



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΟΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΙΤΕ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΕΙΤΕ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΤΟΥ

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΚΩΣΤΗ**

**Επιβλέπων: ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΒΛΑΧΟΠΟΥΛΟΥ**

Κοζάνη, Μάιος 2023

# 1 Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο “ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΟΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑΣ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΕΙΤΕ ΣΕ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΕΙΤΕ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟΠ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣΔ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΒΛΑΧΟΠΟΥΛΟΥ αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Κωστής Γεώργιος & Βλαχόπουλος Δημήτριος, 2023, Κοζάνη

Copyright (C) \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_



Υπογραφή Φοιτητή:

## 2 Περίληψη

Στόχος της παρούσας πτυχιακής αποτελεί η διασύνδεση Φ/Β πάρκων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την προσομοίωση της διανεμημένης παραγωγής είτε από οικιακά δίκτυα, είτε από ιδιοπαραγωγούς. Πιο συγκεκριμένα θα μελετηθούν όλα τα στάδια της διασύνδεσης από τη δημιουργία κατάλληλου Φ/Β (κατάλληλης ισχύος) για την τροφοδότηση φορτίων ή μπαταριών που έχουν ως σκοπό την υποστήριξη του δικτύου και αύξησης της αξιοπιστίας του σε περιόδους αιχμής. Ακόμη, παρουσιάζεται η σχεδίαση κατάλληλου μετατροπέα Συνεχούς Τάσης σε Συνεχή Τάση για την σταθεροποίηση της τάσης (DC Link) καθώς και του συστήματος ελέγχου του (MPPT- Maximum Power Point Tracker) και τέλος η σχεδίαση κατάλληλου μετατροπέα ισχύος από Συνεχή τάση σε Εναλλασσόμενη τάση (2-Level ή Multilevel) καθώς και του συστήματος ελέγχου του και του φίλτρου εξόδου για την αποκοπή αρμονικών και μετατροπή του τετραγωνικού παλμού σε ημιτονοειδή μορφή κατάλληλης συχνότητας (ίδιας με αυτή του δικτύου). Στο τελευταίο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται, επίσης, μια μελέτη περίπτωσης για ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα σε οροφή αυτοπαραγωγού.

**Λέξεις Κλειδιά: MPPT (Maximum Power Point Tracker), Inverter (2-Level),**

### 3 Abstract

The objective of this thesis is to connect PV parks to the electrical grid in order to simulate distributed production from either household networks or self-producers. To be more precise, every step of the interconnection process—from the development of acceptable PV (suitable electricity) to the feeding of loads or batteries—will be examined with the goal of assisting the network and boosting its dependability during peak hours. Designing a suitable DC to DC converter for voltage stabilization (DC Link) and its control system (MPPT-Maximum Power Point Tracker) is followed by designing a suitable DC to AC power converter (2-Level or Multilevel) and its control system and output filter to cut off harmonics and transform the square pulse into a sinusoidal wave. The last part of the dissertation also presents a case study for a solar photovoltaic system on a self-generating roof.

**Keywords: MPPT (Maximum Power Point Tracker), Inverter (2-Level),**

## 4 Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα από όλα και όλους τον καθηγητή μου Δημήτριο Βλαχόπουλο ο οποίος μέσα από την καθοδήγηση του όλα αυτά τα χρόνια που φοιτούσα μου μεταλαμπάδευσε γνώσεις για την συνέχεια της επαγγελματικής μου ζωής. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές και την σχολή σπούδων και αυτοί με την σειρά τους μου έδωσαν την ευκαιρία να γινώ ηλεκτρολόγος μηχανικός ΤΕ. Ακόμα την οικογένεια μου και τους φίλους μου που με συνοδεύσαν στο ταξίδι αυτό. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ALESCO σπούδων έκανα την πρακτική μου άσκηση και με έβαλε στον κόσμο της αγοράς του μηχανικού σας ευχαριστώ όλους μέσα από την καρδιά μου.

## 5 Πίνακας Περιεχομένων

1	Δήλωση μη λογοκλοπής και ανάληψης προσωπικής ευθύνης .....	2
2	Περίληψη .....	3
3	Abstract .....	4
4	Ευχαριστίες .....	5
5	Πίνακας Περιεχομένων .....	6
6	Κατάλογος Εικόνων .....	10
7	Κατάλογος Σχημάτων .....	11
8	Κατάλογος Πινάκων .....	13
9	Πίνακας Συντομογραφιών .....	14
1.	Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή .....	15
1.1.	Γενικά περί φωτοβολταϊκής παραγωγής ενέργειας.....	15
1.1.1.	Ηλιακό Φωτοβολταϊκό Στοιχείο .....	15
1.1.2.	Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενης διόδου p-n .....	18
1.2.	Περιγραφή και τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου .....	19
1.3.	Παράγοντες που επιδρούν στη απόδοση της Φ/Β μετατροπής και διαμορφώνουν την κατασκευαστική γεωμετρία ενός Φ/Β στοιχείου .....	22
1.4.	Διάκριση Φ/Β συλλεκτών.....	24
1.5.	Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β συλλεκτών .....	27
1.5.1.	Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.....	27
1.5.2.	Καμπύλες ισχύος από διαφορετικές συνθήκες.....	27
1.5.3.	Τρόποι Σύνδεσης.....	28
1.6.	Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων .....	30
1.6.1.	Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	33
1.6.2.	Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	35
1.6.3.	Υβριδικά Φ/Β Συστήματα .....	36
2.	Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Ανάλυση Τοπολογιών Ηλεκτρονικών Ισχύος .....	39
2.1.	Αντιστροφείς .....	40
2.2.	Ταξινόμηση των Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος .....	41
2.2.1.	Μετατροπείς με μεταγωγή γραμμής.....	42
2.2.2.	Μετατροπέας Αυτομετατροπής.....	43
2.2.2.1.	Μετατροπέας Πηγής Τάσης .....	43
2.2.2.2.	Μετατροπέας πηγής ρεύματος.....	44

2.3.	Διάφορες Τοπολογίες Inverter .....	45
2.3.1.	Μετατροπείς Με Βάση Τον Αριθμό Των Σταδίων Επεξεργασίας Ισχύος ..	45
2.3.1.1.	Single Stage Inverter (Μονοβάθμιοι Μετατροπείς) .....	45
2.3.1.2.	Multiple Stage Inverter (Μετατροπέας Πολλαπλών Σταδίων) .....	46
2.3.2.	Μετατροπείς με Μετασχηματιστή ή Χωρίς (Transformer And Transformer Less Inverters) .....	46
2.3.3.	Μετατροπείς Πολλαπλών Επιπέδων (Multilevel Inverters) .....	48
2.3.3.1.	Μετατροπείς με Σύσφιξη Διόδου Ημι-Γέφυρας (Half-Bridge Diode Clamped Inverters) .....	48
2.3.3.2.	Μετατροπείς Μονής Γέφυρας με Σύσφιξη (Full-Bridge Single Leg Clamped Inverters) .....	49
2.3.3.3.	Διαδοχικοί Μετατροπείς (Cascaded Inverters).....	50
2.3.3.4.	Μετατροπείς Μαλακής/Σκληρής Μεταγωγής (Soft/Hard Switching Inverters) 51	
2.4.	Αρχιτεκτονικές Φ/Β συστημάτων .....	52
2.4.1.	Κεντρικοποιημένη Τεχνολογία .....	52
2.4.2.	Τεχνολογία Αλυσίδας .....	53
2.4.3.	Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων .....	56
2.4.4.	Τεχνολογία Φ/Β Πλαισίων E.P.....	58
2.4.5.	Τεχνολογία Παράλληλων Αλυσίδων Λογικής “Master” & “Slave” .....	59
2.5.	Τύποι Φωτοβολταϊκών Μετατροπέων .....	60
2.6.	Τοπολογίες Φωτοβολταϊκών Μετατροπέων Βασισμένες στην Αρχιτεκτονική	61
2.6.1.	Κεντρικός Μετατροπέας.....	61
2.6.2.	Μετατροπέας Στοιχειοσειρών .....	63
2.6.3.	Μετατροπέας Πολλαπλών Στοιχειοσειρών .....	65
2.6.4.	Micro-Inverter .....	65
2.7.	Ταξινόμηση μετατροπέων σύνδεσης δικτύου (grid tie Inverters).....	67
2.7.1.	Απαίτηση του Grid-Tied PV System .....	69
2.8.	Μετατροπέας Active Frond End (AFE).....	72
2.9.	Grid-Forming Inverter (GFMI)- Ελεγκτές διαμόρφωσης πλέγματος.....	74
2.10.	Medium voltage Inverter .....	77
3.	Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Τεχνικές παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές.....	81
3.1.	MPPT για Φ/Β.....	81
3.1.1.	Βασικά στοιχεία του MPPT .....	81
3.1.2.	Χαρακτηριστικά I–V και P–V.....	82
3.1.3.	Μερική σκίαση .....	83

3.2.	Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος .....	84
3.3.	Ελεγκτής MPPT .....	85
3.4.	Ταξινόμηση των μεθόδων MPPT .....	87
3.5.	Grid Tie Inverter και MPPT.....	92
4.	Κεφάλαιο 4ο: Σύγκριση διασταυρούμενων περιπτώσεων inverter .....	95
4.1.	Inverter σύστημα εμπορικής χρήσης ανά κατηγορία για Φ/Β σύστημα.....	95
4.1.1.	On-Grid Solar Inverter .....	95
4.1.2.	Off-Grid Solar Inverter.....	102
4.1.3.	Hybrid Solar Inverter .....	112
4.2.	Active Front-end (AFE) ή Grid-tie Inverter; .....	118
4.3.	Διαφορά μεταξύ του μετατροπέα πηγής τάσης (VSI) και του μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI).....	120
4.4.	Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τοπολογιών φωτοβολταϊκών μετατροπέων βασισμένες στην αρχιτεκτονική .....	121
5.	Κεφάλαιο 5ο: Μελέτη Περίπτωσης.....	126
5.1.	Γιατί να βάλει κανείς ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής ενέργειας με μπαταρίες.....	126
5.2.	Τεχνική Έκθεση.....	127
5.2.1.	Γεωγραφική θέση έργου:.....	127
5.2.2.	Περιγραφή έργου .....	127
5.2.2.1.	Φωτοβολταϊκά πλαίσια .....	127
5.2.2.2.	Μετατροπείς (inverters).....	128
5.2.2.3.	Υποπίνακες.....	128
5.2.2.4.	Κεντρικός Πίνακας .....	128
5.2.2.5.	Μπαταρίες .....	128
5.2.2.6.	Ρυθμιστές φόρτισης (charger controllers).....	129
5.2.2.7.	Καλωδιώσεις.....	129
5.2.2.8.	Αντικεραυνικά.....	129
5.2.2.9.	Γείωση.....	130
5.2.3.	Ανάλυση κυκλώματος .....	130
5.2.4.	Σημαντικές λειτουργίες του inverter .....	130
5.2.4.1.	ESS .....	130
5.2.4.2.	OFF-GRID/PV FIRST .....	131
5.2.4.3.	CHARGE ALGORITHM.....	132
5.2.4.4.	TEMPERATURE COMPENSION .....	133
5.2.4.5.	SETTINGS.....	133



5.2.4.6.	TECHNICAL SPECIFICATIONS.....	134
5.2.4.7.	CONFIGURATION .....	135
5.2.4.8.	Τιμές τάσης για την ρύθμιση του inverter.....	136
5.2.5.	Σημαντικές λειτουργίες της μπαταρίας.....	136
5.2.5.1.	Κοστολόγηση .....	137
5.2.5.2.	Σχεδιασμός.....	139
6.	Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Συμπεράσματα .....	140
7.	Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	142

## 6 Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου [3].	16
Εικόνα 1.2: Κοινές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών μονάδων [5].	26
Εικόνα 1.3: Γραφική απεικόνιση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος [23]	35
Εικόνα 1.4: Γραφική απεικόνιση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος [23]	36
Εικόνα 1.5: Διαμορφώσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο και αυτόνομων/εκτός δικτύου [26]	37
Εικόνα 1.6 Διαμόρφωση hybrid φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο και αυτόνομων/εκτός δικτύου [27].	37
Εικόνα 2.1: Ταξινόμηση Φ/Β κεντρικού μετατροπέα [43].	62
Εικόνα 2.2: Τοπολογίες κεντρικών μετατροπέων (a)VSI, (b)CSI, (c)NPC, (d)Flying πυκνωτής,(e) Cascaded H-bridge και,(f)Z- πηγή [43].	63
Εικόνα 2.3: Ταξινόμηση μετατροπέων φωτοβολταϊκών στοιχειοσειρών [43].	64
Εικόνα 2.4: Τοπολογίες για χρήση μετατροπέα στοιχειοσειρών (a)Χαμηλής συχνότητας T/f,(b)H4,(c)Υψηλή συχνότητα T/f,(d)H5,(e)H6,(f)HERIC και μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών με χρήση,(g)Υψηλή συχνότητα T/f,(h)VSI που βασίζεται σε Boost,(i)NPC τριών επιπέδων με βάση ενίσχυση,(j) H-γέφυρα,(k) Μη απομονωμένη ώθηση σε δύο στάδια [43].	64
Εικόνα 2.5: Ταξινόμηση μικρο-μετατροπέων [43].	66
Εικόνα 2.6: a) Push–pull, (b) Fly-back, (c) Half-bridge, (d) Half-wave, (e) και (f) Full-wave cyclo-converters, (g) Differential-mode operation, (h) Quasi-Z-source, (i) Full-bridge, (j) Half-bridge, (k) Three-level converters, (l) Buck–boost, (m) Two switch buck– boost, (n) Switched inductor, (o) Fly-back, (p) Full-bridge, (q) Push–pull [43].	66
Εικόνα 2.7: Βιομηχανικές τοπολογίες μετατροπέα για διαμόρφωση μονάδας String, Multistring, Central και ac. (2L-VSI: μετατροπέας τάσης-πηγής δύο επιπέδων· MV: μέση τάση) [48].	67
Εικόνα 2.8: Ταξινόμηση τοπολογιών μετατροπέων [49].	68
Εικόνα 2.9: Λειτουργικά διαγράμματα μετατροπέων που ακολουθούν και σχηματίζουν πλέγμα. Οι μετατροπείς που ακολουθούν το δίκτυο μιμούνται τις πηγές ρεύματος στους ακροδέκτες εξόδου τους, ενώ οι μετατροπείς που σχηματίζουν δίκτυο λειτουργούν όπως πηγές τάσης των οποίων η έξοδος συμμορφώνεται με τους νόμους πτώσης [55].	77
4.1: Έλεγχος κατάστασης λειτουργίας του υβριδικού μετατροπέα.	116
Εικόνα 5.1 Στη φωτογραφία βλέπουμε τη συνδεσμολογία off-grid [79].	132
Εικόνα 5.2 Τεχνικές Προδιαγραφές [80].	134
Εικόνα 5.3 Τεχνικές Προδιαγραφές [80].	135
Εικόνα 5.4 Σχεδιασμός	139

## 7 Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης ηλιακών κυψελών [4].	18
Σχήμα 1.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτιζόμενης μη-ιδανικής διόδου p-n που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε κατά τη φωτοαγώγιμη συνδεσμολογία, οπότε λειτουργεί ως αισθητήρας ανίχνευσης ακτινοβολίας, είτε κατά τη φωτοβολταϊκή συνδεσμολογία, οπότε λειτουργεί ως στοιχείο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [6]	19
Σχήμα 1.3: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτιζόμενου μη-ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [7].	20
Σχήμα 1.4: Μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V ενός ΦΒ στοιχείου ως προς τη θερμοκρασία του για εργαστηριακές συνθήκες ακτινοβολίας [8].	21
Σχήμα 1.5: Η μεταβολή του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος ενός ΦΒ στοιχείου για διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας προσδιορίζει τη γραμμή μέγιστης ισχύος. [8].	22
Σχήμα 1.6: Τα επιμέρους στρώματα που συνθέτουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου [9]	22
Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστική καμπύλη (τύπος ASE-50-ETF/17) [13].	28
Σχήμα 1.8: Η ηλεκτρική συνδεσμολογία για τη δημιουργία σειριακής συστοιχίας τριών πλαισίων [14].	29
Σχήμα 1.9: Η παράλληλη ηλεκτρική συνδεσμολογία δύο όμοιων συστοιχιών που περιλαμβάνουν τρία πλαίσια ονομαστικής τάσης 24 V προσδίδει αυξημένη ένταση ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου ονομαστικής τάσεως 72 V. Στο κιβώτιο συνδεσμολογίας η κάθε μία συστοιχία απολήγει σε ξεχωριστή διάταξη απομόνωσης με ασφάλεια ρεύματος [14].	29
Σχήμα 1.10: Παραδοσιακή μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [19].	32
Σχήμα 1.11: Διάκριση σύγχρονων φωτοβολταϊκών συστημάτων [20].	33
Σχήμα 2.1: Δομικό Διάγραμμα Σύγχρονου Φωτοβολταϊκού Συστήματος [20]	39
Σχήμα 2.2: Ταξινομήσεις ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος [30]	42
Σχήμα 2.3: Grid-connected Line-commutated CSI [31]	42
Σχήμα 2.4: Grid-connected Self-commutated VSI [33]	44
Σχήμα 2.5: Τύποι φωτοβολταϊκών μετατροπών (α) Single stage inverter, (β) Two stage inverter [34]	45
Σχήμα 2.6: Διαφορετικές θέσεις πυκνωτή αποσύνδεσης ισχύος για μετατροπέα μονοβάθμιας και πολλαπλών σταδίων [37].	46
Σχήμα 2.7: (a) Τοποθέτηση του μετασχηματιστή συχνότητας γραμμής μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου. (b) Μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος συνδεδεμένο στο δίκτυο HF. (c) Ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας είναι ενσωματωμένος σε έναν μετατροπέα dc-dc συνδεδεμένο σε μονάδα φωτοβολταϊκής μονάδας dc-link [38].	48
Σχήμα 2.8: Μετατροπέας τριών επιπέδων συσφιγμένο με δίοδο μισής γέφυρας [39].	49
Σχήμα 2.9: Μετατροπέας σύσφιξης με μονοκόμματο διακόπτη πλήρους γέφυρας [40].	50
Σχήμα 2.10: Διαδοχικός μετατροπέας [39].	51
Σχήμα 2.11: Κεντρικοποιημένη Τεχνολογία [42].	53
Σχήμα 2.12: Τεχνολογία Αλυσίδας [42]	55

Σχήμα 2.13: Μονοφασικός αντιστροφέας $srwm$ με $M/\Sigma$ ανύψωσης τάσης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τεχνολογίας αλυσίδας [42].	55
Σχήμα 2.14: Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων [42].	57
Σχήμα 2.15: Μονοφασικός αντιστροφέας $srwm$ με μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τεχνολογίας πολλαπλών αλυσίδων [42].	57
Σχήμα 2.16: Τεχνολογία Φ/Β Πλαισίων E.P. [42]	59
Σχήμα 2.17: Αντιστροφέας Ρεύματος τοπολογίας Flyback (Flyback Current Source Inverter, CSI-Flyback). -Χρησιμοποιείται σε AC-PV Modules [42].	59
Σχήμα 2.18: Τεχνολογία Παράλληλων Αλυσίδων Λογικής “Master” & “Slave” [42].	60
Σχήμα 2.19: Αρχιτεκτονικές ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση την ικανότητα διαχείρισης ισχύος (α) Κεντρικός Φ/Β μετατροπέας, (β) Φ/Β μετατροπέας σειράς, (γ) Φ/Β μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών, (δ) Φ/Β μετατροπέας μονάδας AC [43].	61
Σχήμα 2.20: Συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος - ο Active Front End [52].	73
Σχήμα 2.21: Τοπολογικό σχήμα αναφέρεται σε έναν μόνο μετατροπέα AFE [52].	73
Σχήμα 2.22: Εφαρμογή AFE Φ/Β σύστημα [52].	74
Σχήμα 2.23: Μοντέλο κυκλώματος μετατροπέα σχηματισμού δικτύου με φίλτρο L [53].	75
Σχήμα 2.24: Το στάδιο ισχύος ενός GFMI [53].	75
Σχήμα 2.25: Τυπική δομή μιας μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής [54].	79
Σχήμα 2.26: Η δομή του μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων γέφυρας Cascade H [56].	80
Σχήμα 3.1: Βασικό σύστημα MPPT με μετατροπέα [59].	82
Σχήμα 3.2: (α) $I-V$ και $P-V$ καμπύλες κάτω από ποικίλη ηλιακή ακτινοβολία. (β) $I-V$ και $P-V$ καμπύλες κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες [59].	83
Σχήμα 3.3: Λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας (α) υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία (β) υπό μερική σκίαση (γ) η προκύπτουσα $I-V$ και $P-V$ καμπύλη για τα (α) και (β) [60].	84
Σχήμα 3.4: Ευρεία κατηγοριοποίηση των μεθόδων MPPT [48].	88

## 8 Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Αποδόσεις μετατροπής διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών μονάδων [11] .....	26
Πίνακας 2.1: Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τοπολογιών μετατροπών [50]. .....	70
Πίνακας 3.1: Περιγραφή πολλών παραμέτρων επιλογής ελεγκτών MPPT [62] .....	85
Πίνακας 3.2: Σύγκριση μεταξύ των κοινών χρησιμοποιούμενων αναλογικών/ψηφιακών MPPT IC ή μικροελεγκτών [63].....	87
Πίνακας 3.3: Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών μεθόδων MPPT [67].....	90
Πίνακας 4.1: Σύγκριση των On-Grid Solar Inverter .....	101
Πίνακας 4.2: Οδηγίες εγκατάστασης ενός Off Grid Solar Inverter [72].....	103
Πίνακας 4.3: Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων του AN-SCI02-EX-PRO [75].....	117
Πίνακας 4.4: Διαφορά μεταξύ του μετατροπέα πηγής τάσης και του μετατροπέα πηγής ρεύματος [77] .....	120
Πίνακας 4.5: Διαφορά μεταξύ της λειτουργίας ελέγχου τάσης και της λειτουργίας ελέγχου ρεύματος του μετατροπέα πηγής τάσης [31] .....	121
Πίνακας 4.6: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τοπολογιών μετατροπών [37].....	122
Πίνακας 4.7: Πίνακας 5.7. Αξιολόγηση απόδοσης φωτοβολταϊκών μετατροπών [78] .....	124
Πίνακας 5.1 Κοστολόγηση .....	137

## 9 Πίνακας Συντομογραφιών

Φωτοβολταϊκό	Φ/B
Active Front End	AFE
Air Mass	AM
Alternating Current	AC
Autonomous Neural Networks	ANN
Capacitance Diode	CD
Cascaded H-bridge	CHB
Current Control Mode	CCM
Current Source Inverter	CSI
Direct Current	DC
Fill Factor	FF
Fuzzy Logic Control	FLC
Grid Tie Inverter	GTI
Grid-Forming Inverter	GFMI
High Frequency	HF
Incremental Conductance	IC
Insulated-Gate Bipolar Transistor	IGBT
Line-Commutated Inverter	LCI
Maximum Power Point Tracker	MPPT
Mean Voltage	MV
Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor	MOSFET
Modular Multilevel Converter	MMC
Optimization Techniques	OT
Perturb and Observer	P&O
Phase Lock Loop	PLL
Photovoltaic	PV
Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation	PLECs
Point of Common Coupling	PCC
Pulse Width Modulation	PWM
Self-Commutated Inverter	SCI
Standard Testing Conditions	STC
Total Harmonic Distortion	THD
Total Harmonic Distortion	THDi
Transformerless	TL
Voltage Control Mode	VCM
Voltage Source Inverter	VSI
Voltage Source Inverter	VSI
Zero Current Switching	ZCS
Zero Voltage Switching	ZVS

## 1. Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

Στις μέρες μας, το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αυξηθεί λόγω της αύξησης της χρήσης ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην κατανάλωση ενέργειας, του κόστους και της ζημίας που προκαλούν στο περιβάλλον. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μία από τις καλύτερες λύσεις για την πρόκληση της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας λόγω των απεριόριστων, άφθονων και φιλικών προς το περιβάλλον πηγών της [1]. Η ηλιακή ενέργεια είναι αναμφίβολα η σημαντικότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθώς χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα θέρμανσης, παροχής ζεστού νερού και εξαερισμού εδώ και χρόνια. Πλέον, η ηλιακή τεχνολογία είναι ικανή να καλύψει τις παγκόσμιες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ειδικοί στον τομέα της ενέργειας ανέμεναν ότι το 2050, πάνω από το 50% της ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [2]. Σε αυτό το κεφάλαιο, αναλύονται το θεωρητικό πλαίσιο της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και οι τύποι των Φ/Β συστημάτων.

### 1.1. Γενικά περί φωτοβολταϊκής παραγωγής ενέργειας

Η φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προκαλείται από την ακτινοβολία που διαχωρίζει τα θετικά και τα αρνητικά φορτία στο απορροφητικό υλικό. Εάν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, αυτά τα φορτία μπορούν να δημιουργήσουν ένα ηλεκτροκινητικό πεδίο και να παράγουν ρεύμα για χρήση σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Οι θεμελιώδεις αρχές της παραγωγής φωτοβολταϊκών, επομένως, περιλαμβάνουν τη γνώση της επιστήμης των υλικών και του φωτοβολταϊκού φαινομένου, το οποίο με τη σειρά του περιλαμβάνει βασικές έννοιες όπως ατομική σύνδεση, μέταλλα, ημιαγωγοί και μονωτές, κρυσταλλική δομή (πυρίτιο), ενέργεια διάκενου ζώνης, ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, διασταύρωση PN, αλληλεπίδραση ύλης και ακτινοβολίας [3].

#### 1.1.1. Ηλιακό Φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Ένα ηλιακό στοιχείο είναι μια συσκευή που χρησιμοποιεί το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο για να μετατρέψει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι κατασκευασμένο από δύο διαφορετικούς τύπους υλικών ημιαγωγών – τύπου n και τύπου p. Όταν το ηλιακό φως μιας συγκεκριμένης συχνότητας λάμπει στη διασταύρωση μεταξύ των ημιαγωγών τύπου n και τύπου p, τα ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους του ημιαγωγού μπορούν να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της διασταύρωσης. Αυτή η διαδικασία προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Η δομή του ηλιακού κυττάρου φαίνεται στην Εικόνα 1.1.

Σε μια πρακτική συσκευή, ένα μεταλλικό πλέγμα στην επιφάνεια επιτρέπει στο φως να διεισδύσει στον ημιαγωγό μεταξύ των γραμμών του πλέγματος και σχηματίζει ηλεκτρική επαφή για την άντληση ρεύματος. Τα ηλεκτρόδια χυτεύονται σε υλικά τύπου p και n. Το φως που απορροφάται στη διασταύρωση p-n μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε μια τέτοια διαμόρφωση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως: τον τύπο του υλικού της κυψέλης που χρησιμοποιείται (πυρίτιο ή άλλο), το μέγεθος της κυψέλης (μεμονωμένο ή ομάδα κυψελών), την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, την ηλιακή κλίση και άλλα συναφή χαρακτηριστικά.

Η ισχύς εξόδου P σε ένα ηλιακό κύτταρο εκφράζεται ως:

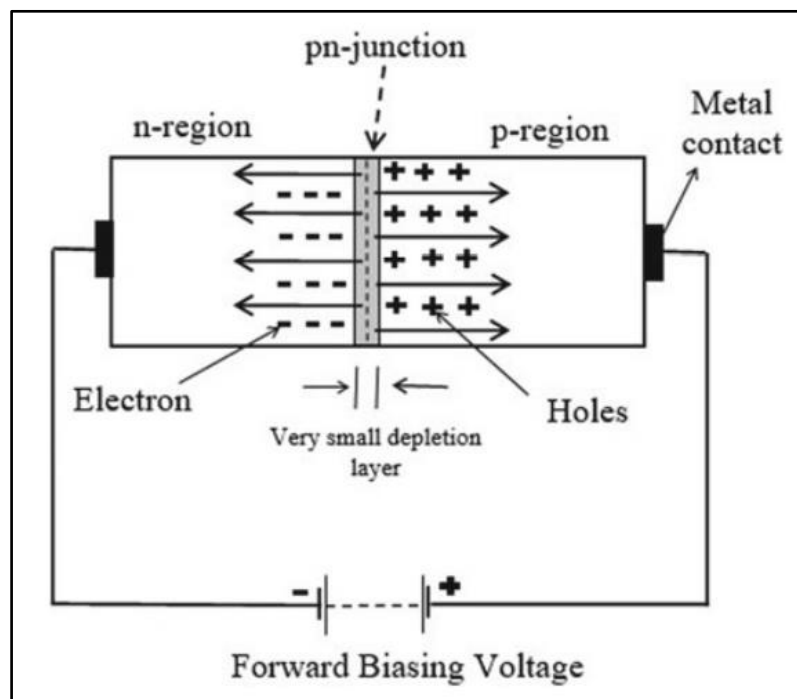
$$P = I \cdot V \text{ (1.1),}$$

*Εξίσωση 1.1*

Όπου:

I: Ρεύμα του ηλιακού στοιχείου

V: Τάση εξόδου.



Εικόνα 1.1 Σχηματική απεικόνιση ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού στοιχείου [3].

Τα χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης και τάσης ισχύος ενός ηλιακού στοιχείου [4] φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να παράγει έως και 2 W ενέργειας. Όταν το ρεύμα φορτίου είναι μηδέν, η τάση του γίνεται μέγιστη και είναι γνωστή ως τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$ . Όταν το ρεύμα φορτίου αυξάνεται,



επιτυγχάνεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  και η τάση μηδενίζεται. Η ισχύς από ένα ηλιακό στοιχείο δείχνει μια συμπεριφορά τύπου καμπάνας μεταξύ αυτών των δύο άκρων μηδενικής ισχύος. Η τάση και το ρεύμα που αντιστοιχούν στο μέγιστο είναι  $V_{max}$  και  $I_{max}$ .

Η μέγιστη ισχύς  $P_{max}$  μπορεί να γραφτεί ως:

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max}$$

*Εξίσωση 1.2*

Τα  $V_{max}$  και  $I_{max}$  καθορίζουν τη μέγιστη ισχύ  $P_{max}$  που μπορεί να επιτευχθεί από μια ηλιακή κυψέλη.

Ο Συντελεστής Πλήρωσης - Fill Factor (FF) μιας κυψέλης είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς την τάση ανοιχτού κυκλώματος και το ρεύμα βραχυκυκλώματος.

$$FF = P_{max}/V_{oc} \cdot I_{sc}$$

*Εξίσωση 1.3*

Όπου:

$I_{sc}$ : Ρεύμα Βραχυκυκλώματος

Ο παράγοντας πλήρωσης εξηγεί την απόδοση του συστήματος. Εάν είναι γνωστός ο FF για μια κυψέλη, μπορεί να βρεθεί η μέγιστη ισχύς εξόδου της. Ένας συντελεστής πλήρωσης ίσος με το 1 είναι ιδανικός. Η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρει ένα κβάντο φωτός ή ένα φωτόνιο είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος κύματος του φωτός. Η ενέργεια της φωτεινής δέσμης σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος  $E_{\lambda}$  δίνεται από:

$$E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}$$

*Εξίσωση 1.4*

Όπου:

$h$ : Σταθερά του Planck

$c$ : Ταχύτητα του φωτός

$\lambda$ : Μήκος κύματος του φωτός

Μια δέσμη φωτός που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια που κυμαίνεται από 1,59 έως 3,26 eV πέφτει στο ορατό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση μετατροπής ενός ηλιακού κυττάρου είναι η αναλογία της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου

και της ενεργειακής ροής του ηλιακού φωτός που πέφτει στην επιφάνεια. Μπορούμε να γράψουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση ενός ηλιακού στοιχείου ως:

$$n = \frac{P_{max}}{A \cdot R}$$

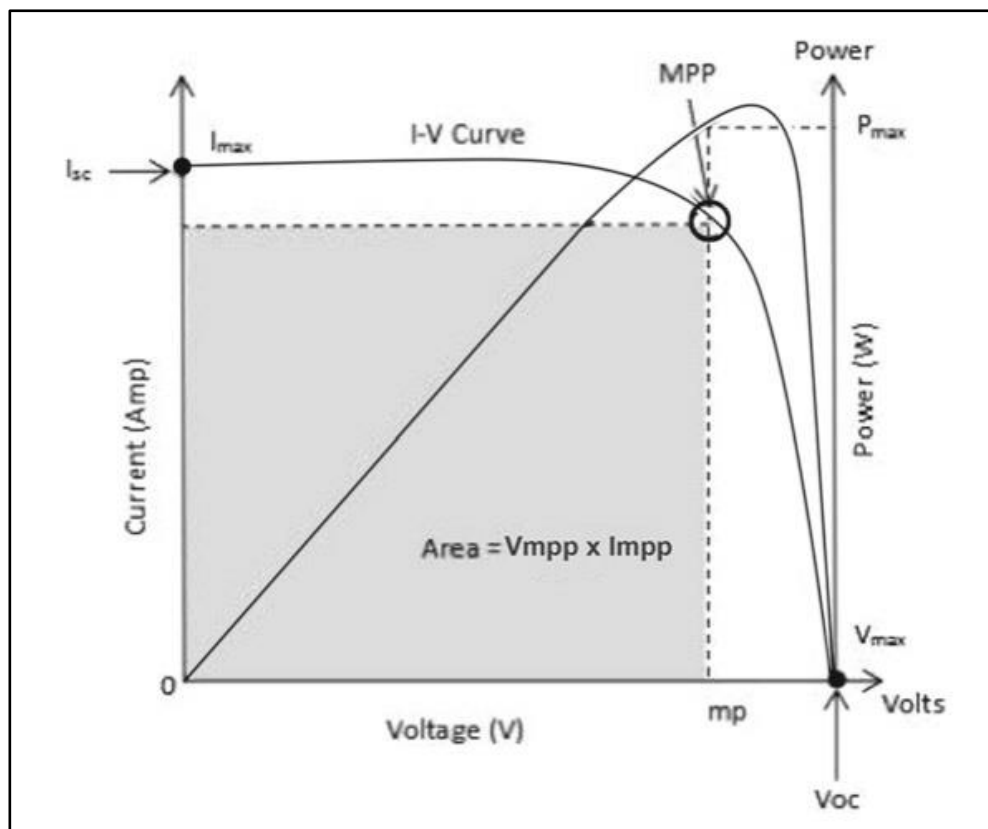
Εξίσωση 1.5

Όπου:

A: Άνω ή Εκτεθειμένη επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου

R: Ακτινοβολία στην επιφάνεια του ηλιακού στοιχείου

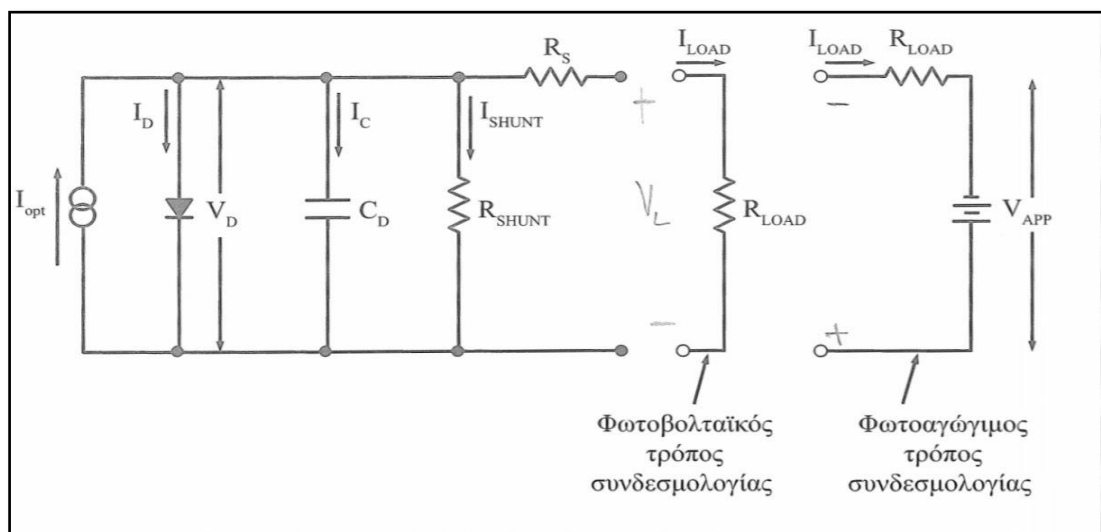
Οι ιδιότητες του υλικού, η ακτινοβολία και η φασματική σύνθεση του ηλιακού φωτός είναι σημαντικά στοιχεία στο σχεδιασμό των ηλιακών κυψελών. Η πραγματική απόδοση ενός ηλιακού στοιχείου επηρεάζεται επίσης από την ακτινοβολία, την ηλιοφάνεια, τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την παρουσία σύννεφων κλπ. [5].



Σχήμα 1.1 Χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης ηλιακών κυψελών [4].

### 1.1.2. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτιζόμενης διόδου p-n

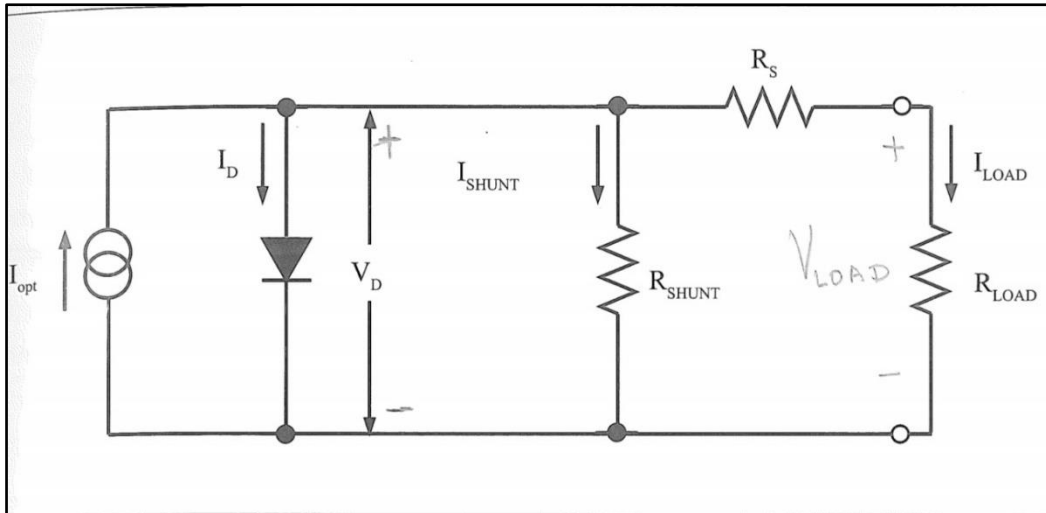
Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φωτιζόμενης διόδου περιλαμβάνει μια πηγή φωτορεύματος, το  $I_{opt}$ , και μια ιδανική δίοδο. Μέρος του φωτορεύματος ρέει μέσω της διόδου για να διατηρήσει το δυναμικό  $V_D$ , ανάλογο με το σημείο λειτουργίας. Το μη ιδανικό εξάρτημα της διόδου προσομοιώνεται από το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα R-C, το οποίο περιλαμβάνει τον πυκνωτή που προσδιορίζεται από τη χωρητικότητα της διόδου (Capacitance Diode -  $C_D$ ) και την παράλληλη αντίσταση  $R_{SHUNT}$ . Επίσης, το υπόστρωμα και οι ωμικές επαφές εισάγουν σειριακή αντίσταση  $R_S$ , η οποία είναι σημαντική για τη σωστή πόλωση. Τυπικές τιμές για την αντίσταση σειράς είναι  $R_S=2-5 \Omega$ , ενώ για  $R_{SHUNT}=10^8$ . Οι ιδανικές τιμές προκύπτουν ως  $R_S \rightarrow 0$  και  $R_{SHUNT} \rightarrow \infty$ .



Σχήμα 1.2 Το ισοδύναμο κύκλωμα μίας φωτιζόμενης μη-ιδανικής διόδου p-n που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε κατά τη φωτοαγώγιμη συνδεσμολογία, οπότε λειτουργεί ως αισθητήρας ανίχνευσης ακτινοβολίας, είτε κατά τη φωτοβολταϊκή συνδεσμολογία, οπότε λειτουργεί ως στοιχείο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. [6]

## 1.2. Περιγραφή και τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το κύκλωμα για ένα φωτιζόμενο φωτοβολταϊκό στοιχείο σε λειτουργία σταθερής κατάστασης φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Αυτό το σχήμα περιλαμβάνει την πηγή φωτορεύματος  $I_{opt}$ , το ρεύμα  $I_D$  ροής της διόδου, το ρεύμα φορτίου  $I_{LOAD}$  με αντίσταση εξωτερικού φορτίου  $R_{LOAD}$  και τον κλάδο με την παράλληλη αντίσταση  $R_{SHUNT}$  που ρέει ρεύμα  $I_{SHUNT}$ . Εισάγεται επίσης η αντίσταση της σειράς  $R_S$ , η οποία περιλαμβάνει τις αντιστάσεις που εισάγονται από τις ωμικές επαφές και τον όγκο των υλικών, δηλαδή το υπόστρωμα και τα αγωγίμα κανάλια. Η αντίσταση  $R_{LOAD}$  καταναλώνει την παραγόμενη ισχύ της φωτοβολταϊκής κυψέλης. Όλα τα στοιχεία αντίστασης θεωρούνται γραμμικά και σταθερά, εκτός από τις αντιστάσεις  $R_{SHUNT}$  και  $R_S$ , οι οποίες εμφανίζουν εξάρτηση από τη θερμοκρασία.



Σχήμα 1.3: Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτιζόμενου μη-ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου [7].

Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση φορτίου δίνεται από το 1<sup>ο</sup> νόμο Kirchhoff:

$$I_{LOAD} = I_{opt} - I_D - I_{SHUNT}$$

Εξίσωση 1.6

Όπου:

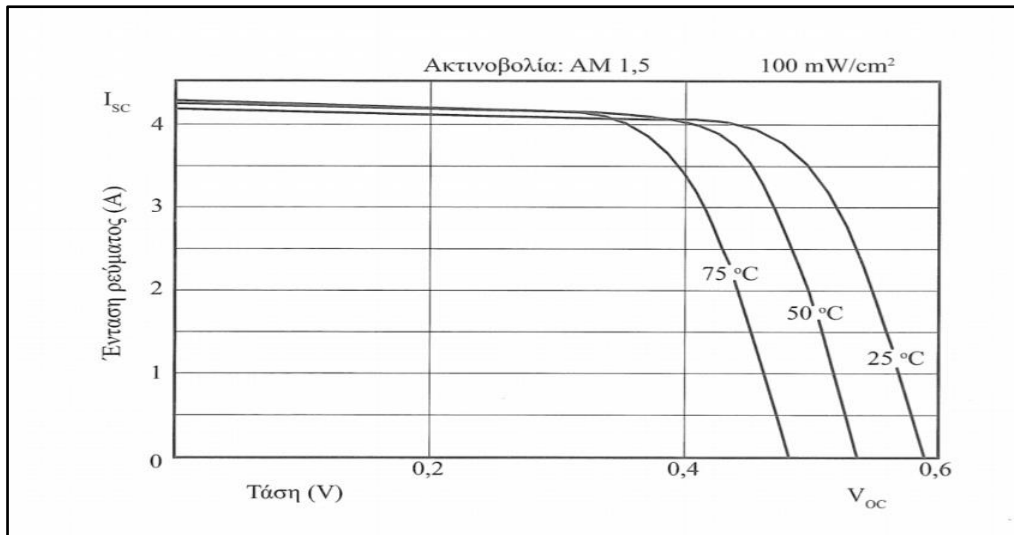
$I_{LOAD}$ : Το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση φορτίου  $R_{LOAD}$ ,

$I_{opt}$ : Το παραγόμενο φωτορεύμα,

$I_D$ : Το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο p-n,

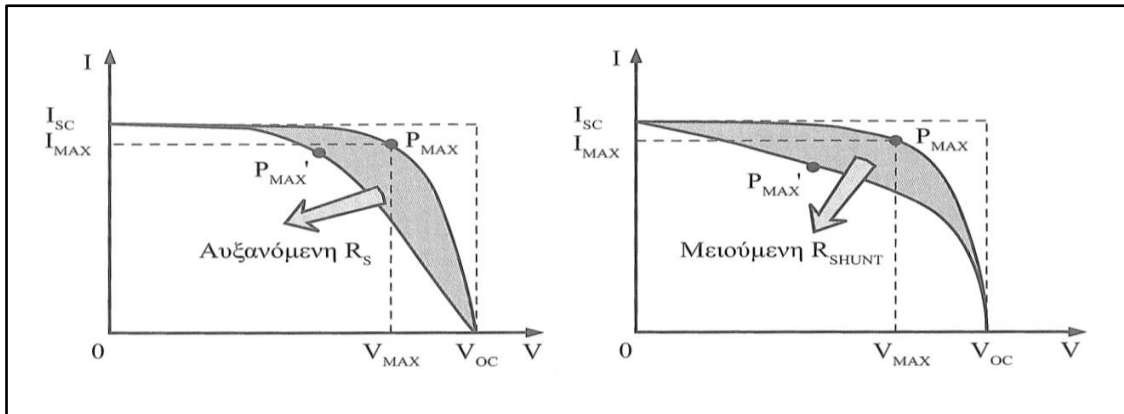
$I_{SHUNT}$ : Η επιπρόσθετη συνιστώσα ρεύματος της διόδου λόγω της εκδήλωσης των μη ιδανικών, μηχανισμών μεταφοράς φορτίου.

Το ρεύμα και η τάση σε ένα ηλιακό στοιχείο επηρεάζονται από τη θερμοκρασία. Η τάση μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, ενώ το ρεύμα αυξάνεται με πολύ αργό ρυθμό. Αυτό προκαλεί μείωση της ισχύος που μπορεί να παράγει το ΦΒ στοιχείο.



Σχήμα 1.4: Μεταβολή της χαρακτηριστικής I-V ενός ΦΒ στοιχείου ως προς τη θερμοκρασία του για εργαστηριακές συνθήκες ακτινοβολήσης [8].

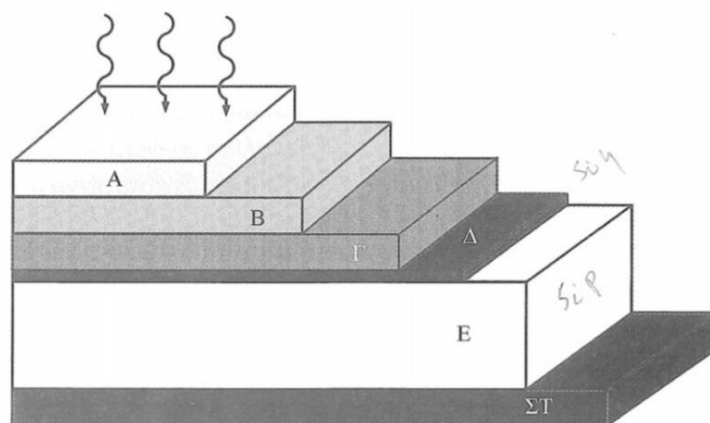
Όταν αυξάνεται η αντίσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο ηλιακός πίνακας, τόσο το ρεύμα βραχυκυκλώματος όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος μειώνονται. Ωστόσο, ο συντελεστής πλήρωσης (το ποσοστό της ενέργειας που μπορεί να μετατρέψει ένα ηλιακό πάνελ σε ηλεκτρική ενέργεια) μειώνεται επειδή δεν είναι πλέον δυνατό να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ισχύς εξόδου με τη δεδομένη αντίσταση κυκλώματος. Η αύξηση της αντίστασης του κυκλώματος μειώνει επίσης την τάση εξόδου του ηλιακού πάνελ. Η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παράγει ένα ηλιακό πάνελ. Τα υψηλότερα επίπεδα ακτινοβολίας προκαλούν γραμμική αύξηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος, ενώ η τάση ανοιχτού κυκλώματος δεν αλλάζει σημαντικά. Η θερμοκρασία επηρεάζει επίσης το πόση ενέργεια μπορεί να παράγει ένα ηλιακό πάνελ και τα πάνελ μπορεί να έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Στόχος είναι η παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλιακά πάνελ με τον καθορισμένο συντελεστή απόδοσης.



Σχήμα 1.5: Η μεταβολή του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος ενός ΦΒ στοιχείου για διαφορετικές συνθήκες φωτεινότητας προσδιορίζει τη γραμμή μέγιστης ισχύος. [8]

### 1.3. Παράγοντες που επιδρούν στη απόδοση της Φ/Β μετατροπής και διαμορφώνουν την κατασκευαστική γεωμετρία ενός Φ/Β στοιχείου

Ο κύκλος μετατροπής των φωτοβολταϊκών είναι μια διαδικασία με την οποία η ενέργεια μετατρέπεται από το ηλιακό φως σε ηλεκτρική. Έχει μέγιστη ενεργειακή απόδοση περίπου 6% έως 14%, αλλά μπορεί να φτάσει το 17% σε ορισμένες περιπτώσεις. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του κύκλου, όπως τα υλικά που χρησιμοποιούνται, η γεωμετρία κατασκευής των συσκευών μετατροπής, η κρυσταλλική ποιότητα και καθαρότητα των υλικών ημιαγωγών, η θερμοκρασία λειτουργίας, η απόχρωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας φωτός και η απορροφούμενη ισχύς φωτονίων πυκνότητα. Μερικές επιλογές για τη βελτίωση της απόδοσης παρατίθενται παρακάτω.



Σχήμα 1.6: Τα επιμέρους στρώματα που συνθέτουν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο πυριτίου [9]

1. Το επιθυμητό βάθος για την απορρόφηση των φωτονίων: Η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται εκθετικά καθώς πλησιάζει στην επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου. Αυτό συμβαίνει επειδή η ακτινοβολία απορροφάται από

τα άτομα και τα μόρια του αέρα, γεγονός που μειώνει την ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο ηλιακό κύτταρο. Ο συντελεστής απορρόφησης ενός υλικού εξαρτάται από τον συνδυασμό του υλικού και το χρώμα του φωτός. Εάν τοποθετήσετε ένα ηλεκτροστατικό φράγμα κοντά στην επιφάνεια του υλικού, η φωτοβολταϊκή μετατροπή θα γίνει με τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση.

2. Η επιλογή του κρυσταλλικού υποστρώματος: Το υπόστρωμα βοηθά στη στήριξη της δομής της διόδου p-n, διαχέοντας τη θερμότητα στην πίσω πλευρά της επαφής. Αυτή η θερμότητα παράγεται από φωτόνια με ενέργειες που είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες από την τιμή του ενεργειακού χάσματος των υλικών ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά κύτταρα.
3. Η περιοχή που δέχεται την ακτινοβολία, ο εκπομπός: Το ανώτερο στρώμα της διόδου που απορροφά την ακτινοβολία φωτός ονομάζεται «εκπομπός» και αποτελείται από βαριά ντοπαρισμένο πυρίτιο. Υπάρχει κάποια διαφωνία σχετικά με το επίπεδο ντόπινγκ που παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα για τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, αλλά η συνήθης επιλογή είναι να γίνει ο εκπομπός βαριά ντοπαρισμένο πυρίτιο με πάχος περίπου 0,3 μικρομέτρων.
4. Το ενεργειακό διάκενο και το υλικό: Το ενεργειακό χάσμα (σε eV) και ο τύπος του διακένου (άμεσο ή έμμεσο) καθορίζουν πόσο εύκολα ένα υλικό μπορεί να απορροφήσει φωτόνια. Για υλικά που πρέπει να απορροφήσουν γρήγορα φωτόνια, ο ιδανικός τύπος κενού είναι ένα «άμεσο» διάκενο. Σε κανονικές συνθήκες, υλικά με έμμεσο ενεργειακό κενό, όπως το πυρίτιο, χρησιμοποιούνται επειδή έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής ηλεκτρονίων και αποφεύγουν τον ανασυνδυασμό.
5. Η γεωμετρία των ωμικών επαφών: Το τμήμα της επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου που καλύπτεται από τις μεταλλικές επαφές που συλλέγουν τα ηλεκτρόνια από τον πομπό υπόκειται σε φωτοσκιάσεις. Το τμήμα που βρίσκεται σε σκιά λόγω των υπερκείμενων μεταλλικών επαφών δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10% της συνολικής επιφάνειας της Φ/Β κυψέλης. Τα λεπτά και αραιά κανάλια αναμένεται να μειώσουν τη σκίαση, αλλά ταυτόχρονα εκθέτουν τα ηλεκτρόνια σε έναν ιδιαίτερο κίνδυνο επιφανειακού ανασυνδυασμού, καθώς τα ηλεκτρόνια, αφού ανέβουν στην επιφάνεια λήψης φωτός, πρέπει να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις στην επιφάνεια για να φτάσουν τα τερματικά. Η πίσω πλευρά έχει μια επένδυση από λαμαρίνα που αποτελεί την πίσω ωμική επαφή. Η μάζα του μετάλλου βοηθά στη διάχυση της παραγόμενης θερμότητας από το εσωτερικό της διόδου.
6. Η ελαχιστοποίηση της επανασύνδεσης στην πίσω όψη: Ο αριθμός των φορών που τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού μειώνεται όταν εφαρμόζεται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό μειώνει την ποσότητα της ενέργειας που χάνεται όταν τα ηλεκτρόνια ρέουν πίσω μέσα από τις οπές της συσκευής. Ένα λεπτό στρώμα υλικού με έντονη πρόσμιξη ή

ένα στρώμα θετικού φορτίου μπορεί να μειώσει τον αριθμό των συγκρούσεων μεταξύ ηλεκτρονίων και οπών.

7. Μείωση της ανακλαστικότητας: Η επιφάνεια του πυριτίου έχει υψηλή ανακλαστικότητα σε ορατά μήκη κύματος, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί μια επίστρωση ή διαμόρφωση επιφάνειας για να μειωθεί αυτή η ανακλαστικότητα. Αυτό επιτρέπει την απορρόφηση περισσότερου φωτός, οδηγώντας σε έναν πιο φωτεινό λαμπτήρα.
8. Το περιβάλλον πλαίσιο: Η ονομαστική θερμοκρασία πλαισίου είναι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού πίνακα όταν είναι ανοιχτό κύκλωμα και υπόκειται σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι συνθήκες είναι η θερμοκρασία του αέρα (20 °C), η ταχύτητα ανέμου (m/s), η τοποθέτηση πλαισίου (ελεύθερη από την πίσω πλευρά) και η ακτινοβολία στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πίνακα. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παράγει ο φωτοβολταϊκός πίνακας (σε watt) βασίζεται σε τυπικές συνθήκες δοκιμής, οι οποίες είναι 1000 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο. Το φάσμα ακτινοβολίας του πίνακα είναι 1,5 μ. Η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ο φωτοβολταϊκός πίνακας είναι 25 °C. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν ένα πλαίσιο που περικλείεται από ένα διαφανές οργανικό φύλλο ή γυαλί. Το πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και είναι στεγανό. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ διατίθενται σε διαφορετικά μεγέθη και το πλαίσιο πρέπει να ταιριάζει με το μέγεθος του φωτοβολταϊκού πίνακα. Για να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στον πίνακα, κάθε σειρά σειράς πρέπει να έχει μια ασφάλεια ρεύματος. Η τρέχουσα ασφάλεια έχει σχεδιαστεί για να προστατεύει τον πίνακα από υπερβολική έλξη ρεύματος.

#### 1.4. Διάκριση Φ/B συλλεκτών

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παράγουν ηλεκτρισμό από τη χρήση του άμεσου ηλιακού φωτός στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι πολλαπλές φωτοβολταϊκές κυψέλες περιλαμβάνουν μια φωτοβολταϊκή μονάδα και πολλές φωτοβολταϊκές μονάδες συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα σε ένα σύστημα φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν μια ιδιότητα απορρόφησης φωτός που απορροφά το φωτόνιο και παράγει ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσω του φωτοβολταϊκού του αποτελέσματος. Το φαινόμενο PV μετατρέπει το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια με ηλιακές κυψέλες. Το ηλιακό φως είναι άφθονο και είναι η πραγματική ενέργεια που έλκεται από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα και προκαλεί μερικά ηλεκτρόνια για να αποκτήσουν υψηλή ενέργεια και να κινηθούν ελεύθερα. Ένα φράγμα δυναμικού είναι ενσωματωμένο στην κυψέλη και βοηθά αυτά τα ηλεκτρόνια να παράγουν μια τάση που χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ρεύματος μέσω των κυκλωμάτων [10]. Η ηλεκτρική απόδοση εξαρτάται από το μήκος και την ένταση του ηλιακού φωτός που πέφτει στο σύστημα και τον τύπο και την ποιότητα των φωτοβολταϊκών κυψελών και των υλικών και εξαρτημάτων κυψελών που χρησιμοποιούνται στο ηλιακό στοιχείο.



Σύμφωνα με τη διαδικασία κατασκευής, οι κύριοι τύποι ηλιακών κυψελών που υπάρχουν είναι οι εξής πολυκρυσταλλικά, μονοκρυσταλλικά και άμορφα υλικά [5]:

### 1) Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (pc-Si)

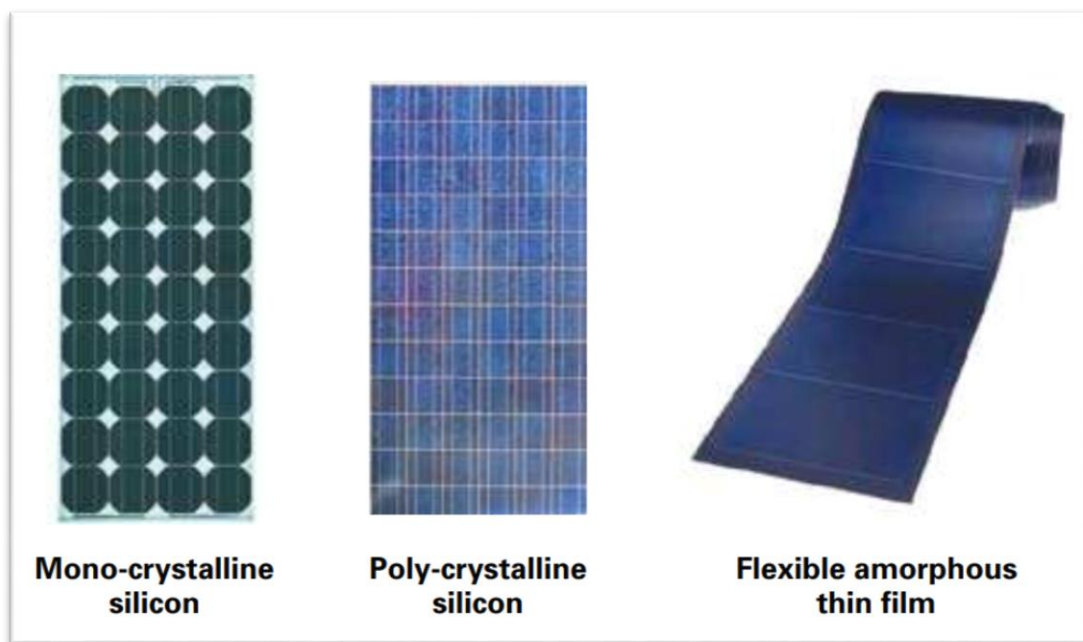
Τα κύτταρα κατασκευάζονται χύνοντας τηγμένο πυρίτιο σε καλούπια και κόβοντας το ψυχρό καλούπι σε γκοφρέτες. Είναι μια δοκιμασμένη τεχνολογία που είναι συγκριτικά πιο εύκολη στην κατασκευή και λιγότερο δαπανηρή. Χρησιμοποιώντας πολυκρυσταλλικό υλικό που απορροφά ένα ευρύ φάσμα ηλιακού φάσματος, είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση. Η απόδοση κυμαίνεται από 13 έως 15%. Στην πολυκρυσταλλική του μορφή, το πυρίτιο μπορεί να παραχθεί σε μορφή κορδέλας ή σε μορφή πλινθώματος, από την οποία κόβονται λεπτές φέτες/ γκοφρέλες πάχους έως 200 m. Το κόστος των πλακών πυριτίου έχει μειωθεί απότομα τα τελευταία 20 χρόνια. Έχει το πλεονέκτημα της κατασκευής σε μεγάλα μεγέθη και αυτή τη στιγμή είναι σε μέγιστη χρήση.

### 2) Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (mc-Si)

Τα ηλιακά κύτταρα ήταν τα πρώτα που κατασκευάστηκαν εμπορικά. Η απόδοση κυμαινόταν από 16 έως 19%, αλλά είναι πιο δαπανηρή η κατασκευή τους. Η κατασκευή ηλιακών κυψελών μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι μια διαδικασία υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Για το λόγο αυτό, τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα ανέλαβαν σύντομα την εμπορική χρήση. Τα πλινθώματα μονοκρυστάλλων είναι κατασκευασμένα από καθαρό πυρίτιο. Τα πλινθώματα κόβονται σε φέτες για να παράγουν εξαιρετικά λεπτές γκοφρέτες για ηλιακά κύτταρα. Η υψηλότερη απόδοση που επιτεύχθηκε για κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου στο εργαστήριο είναι 26,7%.

### 3) Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το ηλιακό στοιχείο χρησιμοποιεί τεχνολογία λεπτής μεμβράνης για την εναπόθεση του υλικού απευθείας σε ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο. Είναι συγκριτικά πιο απλό να κατασκευαστεί με εναπόθεση σε υποστρώματα χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή πλαστικό. Όσο πιο λεπτή είναι η κυψέλη, περισσότερο ηλιακό φως μπορεί να φτάσει στη διασταύρωση και, ως εκ τούτου, είναι δυνατή η αύξηση της απόδοσης. Μια λεπτή μεμβράνη όχι μόνο θα έχει μεγαλύτερη επιφάνεια αλλά θα καταναλώνει και λιγότερο υλικό. Χρησιμοποιώντας τόσο πολυκρυσταλλικά όσο και άμορφα υλικά, εξαιρετικά λεπτές μεμβράνες (1–20μ) πυριτίου έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσο, η απόδοση του άμορφου πυριτίου είναι σχετικά χαμηλή, η οποία υποβαθμίζεται περαιτέρω με το φωτισμό και το χρόνο. Τα ηλιακά κύτταρα υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H) είναι πιο οικονομικά, αλλά έχουν απόδοση μικρότερη από 10%. Καταβάλλονται προσπάθειες για να αυξηθεί περαιτέρω η απόδοση μετατροπής τους.



Εικόνα 1.2: Κοινές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών μονάδων [5].

Εκτός από τις αισθητικές διαφορές, η πιο εμφανής διαφορά μεταξύ των τεχνολογιών Φ/Β κυψελών είναι η απόδοση μετατροπής τους, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 1.1. Για παράδειγμα, μια λεπτή άμορφη φωτοβολταϊκή συστοιχία πυριτίου θα χρειαστεί σχεδόν διπλάσιο χώρο από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια κρυσταλλικού πυριτίου, επειδή η απόδοση της μονάδας μειώνεται στο μισό, για την ίδια ονομαστική χωρητικότητα υπό Τυπικές Συνθήκες Δοκιμής (αξιολόγηση STC – Standard Testing Conditions). Για φωτοβολταϊκές μονάδες κρυσταλλικού πυριτίου, η απόδοση της μονάδας είναι χαμηλότερη σε σύγκριση με το άθροισμα της απόδοσης της κυψέλης συνιστωσών λόγω της παρουσίας κενών μεταξύ των κυψελών και του περιγράμματος γύρω από το κύκλωμα, π.χ. σπατάλη χώρου που δεν παράγει ισχύ, επομένως χαμηλότερη συνολική απόδοση [11]

Πίνακας 1.1: Αποδόσεις μετατροπής διαφόρων τεχνολογιών φωτοβολταϊκών μονάδων [11]

Τεχνολογία	Αποδοτικότητα ενότητας
Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο	12,5-15%
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	11-14%
Άμορφο πυρίτιο (a-Si)	5-7%

## 1.5. Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β συλλεκτών

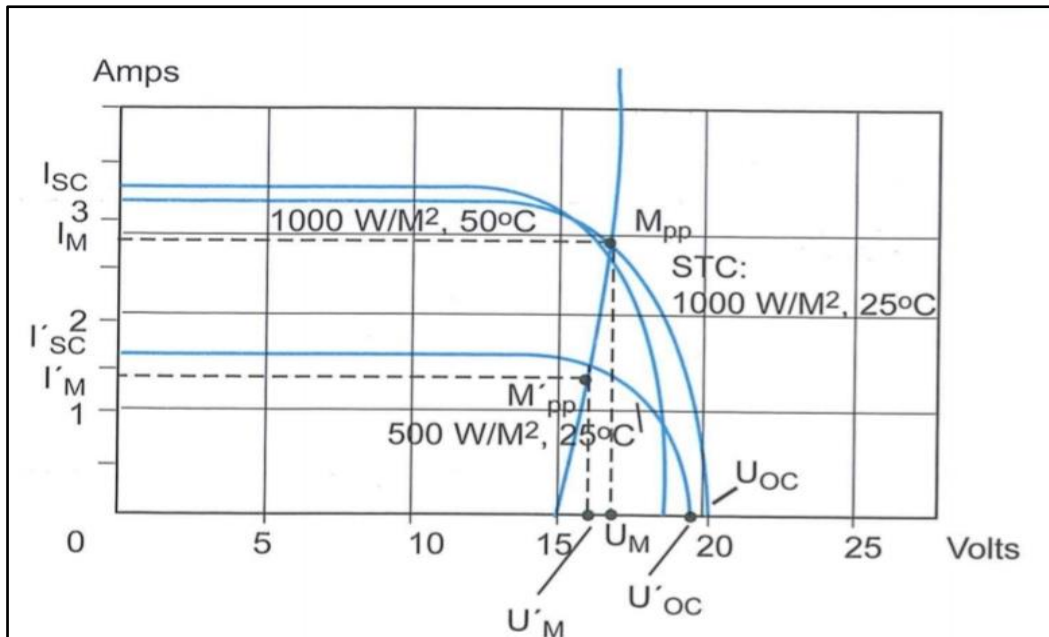
### 1.5.1. Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Η έξοδος μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι πάντα περίπου 0,5 βολτ και η κυψέλη μπορεί να παράγει ισχύ έως και 3 watt. Πίνακες φωτοβολταϊκών κυψελών συνδέονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Ένα πλαίσιο συγκρατεί τις φωτοβολταϊκές κυψέλες μαζί και είναι η βασική δομή για κάθε εγκατάσταση Φ/Β. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, επομένως η επάνω πλευρά μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης συνδέεται με την πίσω πλευρά της επόμενης κυψέλης. Οι συγκολλήσεις που συνδέουν τις κυψέλες είναι το πιο ευάλωτο σημείο του φωτοβολταϊκού πλαισίου, επομένως το πλαίσιο είναι εγκλεισμένο σε διαφανή ρητίνη.

### 1.5.2. Καμπύλες ισχύος από διαφορετικές συνθήκες

Με στόχο τη δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών κελιών ή και πάνελ υπό κοινές συνθήκες, έχουν οριστεί λεγόμενες Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (Standard Testing Conditions) γνωστές ως STC. Οι συνθήκες αυτές αντιστοιχούν σε [12]:

- Ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας ίσης με  $1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία κελιού ίση με  $25^\circ\text{C}$ . Σε πραγματικές συνθήκες, η θερμοκρασία του κελιού ενός εκτεθειμένου πάνελ είναι συνήθως κατά  $25-30^\circ\text{C}$  υψηλότερη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, που μπορεί να είναι περίπου ίση με  $20^\circ\text{C}$  κατά μέσο όρο μέσα στο έτος.
- Η ταχύτητα του ανέμου  $1\text{m/s}$ .
- Η μάζα αέρα είναι (Air Mass)  $AM=1,5$ . Η μάζα αέρα αποτελεί μία παράμετρο που σχετίζεται με τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας, διαμέσου της ατμόσφαιρας. Έτσι όταν ο ήλιος βρίσκεται κάθετα στην επιφάνεια της γης, η ηλιακή ακτινοβολία περνάει μόνο μία φορά διαμέσου του ατμοσφαιρικού αέρα, γεγονός που δηλώνεται ως  $AM=1$ . Ο παράγοντας  $AM=1,5$  που χρησιμοποιείται ως πρότυπη συνθήκη για το χαρακτηρισμό των ηλιακών κελιών αντιστοιχεί σε γωνία ηλίου ίση προς  $41,8^\circ$  του ορίζοντα.



Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστική καμπύλη (τύπος ASE-50-ETF/17) [13].

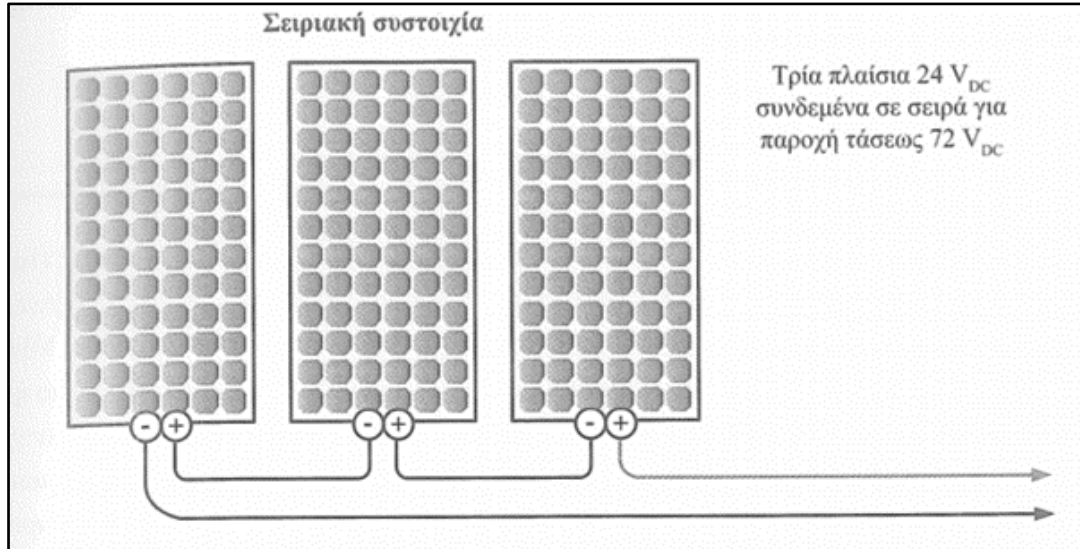
### 1.5.3. Τρόποι Σύνδεσης

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από πάνελ που παράγουν ηλεκτρισμό όταν το φως πέφτει πάνω τους. Τα πάνελ ταξινομούνται ανάλογα με την τάση που παράγουν, με τα πάνελ που παράγουν 12 ή 24 βολτ να είναι κοινά. Η καλωδίωση σειράς συνδέει τους πίνακες μεταξύ τους και μια Φ/Β συστοιχία είναι μια ομάδα πάνελ που συνδέονται με αυτόν τον τρόπο. Όταν διαθέτετε μια σειρά από πάνελ, μπορείτε να τα συνδέσετε με έναν διαχειριστή συστήματος φωτοβολταϊκών για να λάβετε περισσότερο ρεύμα. Τα πεδία είναι οι περιοχές όπου είναι εγκατεστημένες οι συστοιχίες φωτοβολταϊκών και ένα υποπεδίο είναι μια ομάδα πινάκων που συνδέονται παράλληλα. Όταν υπάρχει μια σειρά από πάνελ σε ένα πεδίο, το ρεύμα που πηγαίνει στον διαχειριστή θα είναι διπλάσιο από αυτό που παράγει κάθε πίνακας από μόνο του.

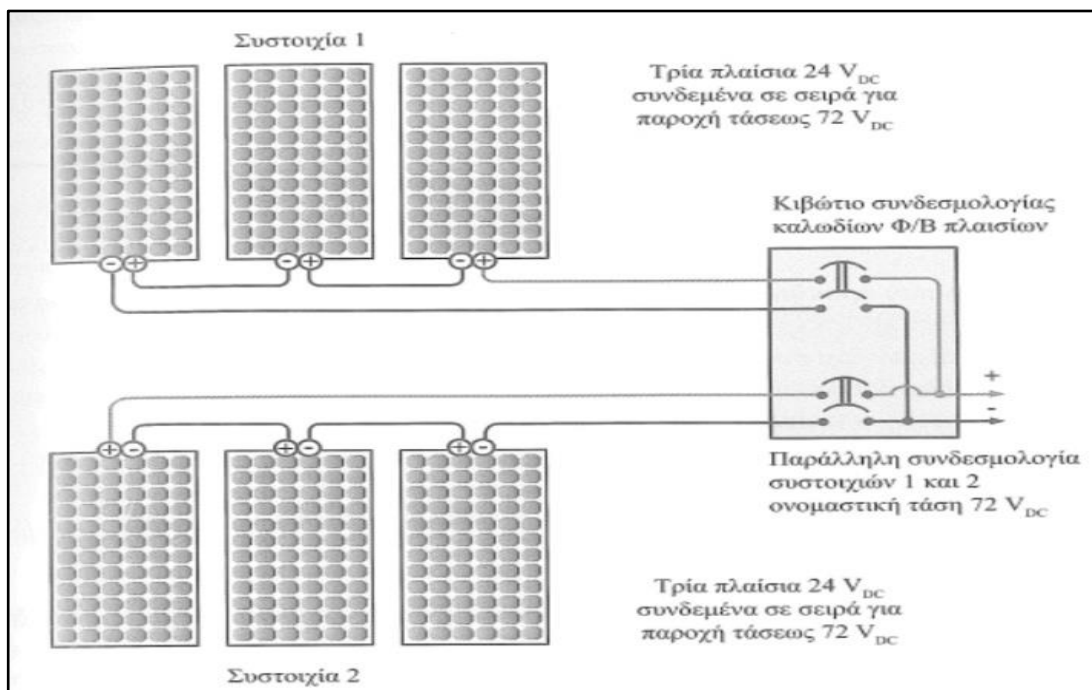
Σύμφωνα με τον Τετελένη (2011), η σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους ακόλουθους τρόπους [13]:

- Σε μία απλή σειρά.
- Σε απλές παράλληλες σειρές (Series – Parallel, SP). Σε αυτήν την περίπτωση τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και στην συνέχεια αυτή η σειρά συνδέεται παράλληλα με άλλες σειρές. Κατά γενική ομολογία, 9 στοιχεία αποτελούν την κάθε σειρά και 4 σειρές αποτελούν κάθε πλαίσιο.
- Σε διατάξεις αθροιστικές σταυρωτού δεσμού (Total – Crossed – Tied, TCT). Σε αυτήν την περίπτωση συνδέονται η διάταξη SP σταυρωτά με τα ηλεκτρικά συστήματα σε κάθε σειρά του σημείου συνάντησης.

- Σε διάταξη γεφυρωτής διασύνδεσης (bridge – linked). Σε αυτήν την περίπτωση τα στοιχεία αλληλοσυνδέονται όλα μεταξύ τους με γεφυρωτή σύνδεση.
- Σε διάταξη κυψέλης (honeycomb).



Σχήμα 1.8: Η ηλεκτρική συνδεσμολογία για τη δημιουργία σειριακής συστοιχίας τριών πλαισίων [14].



Σχήμα 1.9: Η παράλληλη ηλεκτρική συνδεσμολογία δύο όμοιων συστοιχιών που περιλαμβάνουν τρία πλαίσια ονομαστικής τάσης  $24 V$  προσδίδει αυξημένη ένταση ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου ονομαστικής τάσεως  $72 V$ . Στο κιβώτιο συνδεσμολογίας η κάθε μία συστοιχία απολύνει σε ξεχωριστή διάταξη απομόνωσης με ασφάλεια ρεύματος [14].

## 1.6. Κατηγορίες Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Η ακριβής διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της οικονομικής σκοπιμότητας τους. Το μέγεθος των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε απομονωμένες περιοχές αποτελεί σημαντικό τομέα ενδιαφέροντος πολλών ερευνητών, παρουσιάζοντας διαφορετικές προσεγγίσεις [15].

Όσον αφορά τις προοπτικές των επενδύσεων στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία υπάρχουν οι εξής διακριτές κατηγορίες:

- 1) Φ/Β Συστήματα μικρότερα των 20 κιλοβάτ (kWp)**
- 2) Μικρά Κινητά Φωτοβολταϊκά Συστήματα (1mW–100 Wp )**

Συνήθως είναι μικρό το μέγεθος του, για να μετατοπίζεται με ιδιαίτερη ευκολία και να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια όπου είναι αναγκαία, όπως σε κήπους, κάμπινγκ και σπίτια αν υπάρξει διακοπή ρεύματος. Θα πρέπει να συνδυάζεται με σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [14]. Το μικρό κινητό Φωτοβολταϊκό σύστημα περιέχει:

- Φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Μπαταρία
- Αυτόματο Φορτιστή –Ρυθμιστή φόρτισης
- Ηλεκτρονικό φορτιστή
- Μεταλλική βάση, στην όψη της οποίας του υπάρχουν εγκατεστημένα τα παραπάνω εξαρτήματα

- 3) Φωτοβολταϊκά Συστήματα 20-150 kWp (ενδεικτικό μέγεθος ~100 kWp)**
- 4) Αυτόνομα ή Απομονωμένα Συστήματα (100 Wp –200k Wp )**

Στην κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για κατοικίες και μικρούς οικισμούς που δεν είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο. Ακόμη χρησιμοποιούνται για [16]:

- Ηλεκτροδότηση Ιερών Μονών.
- Αφαλάτωση / άντληση / καθαρισμό νερού.
- Συστήματα εξωτερικού φωτισμού δρόμων, πάρκων, αεροδρομίων κλπ.
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών, τηλεμετρήσεων και συναγερμού.
- Συστήματα σηματοδότησης οδικής κυκλοφορίας, ναυτιλίας, αεροναυτιλίας κλπ.
- Αγροτικές εφαρμογές όπως άντληση νερού, ιχθυοκαλλιέργειες, ψύξη αγροτικών προϊόντων, φαρμάκων κλπ.

- 5) Μεγάλα Ηλιακά Πάρκα (>150 kWp έως πολλά MWp)**

Η κατηγορία αυτή αφορά Φ/Β σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγέθους 50kWp έως μερικά MWp, στους οποίους η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

#### **6) Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα**

Συνήθως είναι μεγαλύτερο το μέγεθος του και τοποθετημένο μόνιμα. Έτσι μπορεί να καλύψει με ηλεκτρισμό τροχόσπιτα, θερμοκήπια και σκάφη. Το αυτόνομο Φωτοβολταϊκό σύστημα περιέχει [17]:

- Διάταξη λειτουργίας MPPT.
- Αντιστροφέα - Μετατροπέα DC/AC (Inverter).
- Ομάδες Φωτοβολταϊκών πλαισίων για την κατασκευή της απαιτούμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αυτόματο Ρυθμιστή - Φορτιστή των συσσωρευτών αποθήκευσης.
- Επιλογέα χρήσης άλλων πηγών ενέργειας (π.χ. ντιζελογεννήτρια).
- Ηλεκτρολογικό πίνακα ασφαλειών της ηλεκτρικής εγκατάστασης.
- Πίνακα ελέγχου και λειτουργίας τυχών ορισμένων καταναλώσεων που λειτουργούν με συνεχή τάση.

#### **7) Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα – Οικιακός Τομέας**

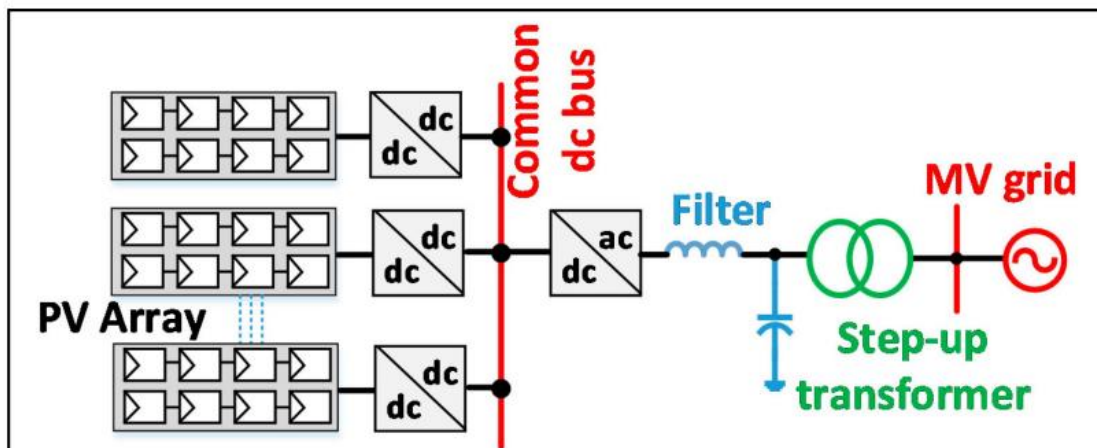
Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν Φ/Β συστήματα τυπικού μεγέθους 1,5kWp έως 20kW, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε στέγες ή προσόψεις κατοικιών και τροφοδοτούν άμεσα τις καταναλώσεις του κτιρίου, η δε πλεονάζουσα ενέργεια διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όπως προαναφέρθηκε, η κατηγορία αυτή αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς Φ/Β συστημάτων. Τα οφέλη που προκύπτουν από την ενσωμάτωση Φ/Β σε κτίρια είναι [16]:

- Συγχρονισμός ψυκτικών φορτίων κτιρίων κατά τη θερινή περίοδο με τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ από τα Φ/Β.
- Αποφυγή χρήσης γης για την εγκατάσταση.
- Αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και επιτόπου κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας.
- Επίσης, οι Φ/Β συστοιχίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως δομικά στοιχεία των κτιρίων, εφόσον γίνει σωστός σχεδιασμός. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η οικονομική απόδοση του συστήματος, λόγω αποφυγής κόστους συμβατικών οικοδομικών υλικών.

Τα κατανεμημένα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις ομάδες με βάση την ισχύ εξόδου τους [18]:

- Συστήματα μικρής κλίμακας, των οποίων η ισχύς εξόδου είναι έως 250 κιλοβάτ. Συνήθως, αυτός ο τύπος φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι κοινός στον οικιακό τομέα, όπου οι ηλιακοί συλλέκτες βρίσκονται σε στέγες.
- Συστήματα εμπορικής κλίμακας, με ισχύ εξόδου που κυμαίνεται μεταξύ 250 και 1000 κιλοβάτ.
- Συστήματα μεγάλης κλίμακας (ή χρησιμότητας), με ισχύ εξόδου μεγαλύτερη από 1 MW.

Τα μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η προτιμώμενη λύση για τα γρήγορα ενεργειακά συστήματα πολλών μεγαβάτ για την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στις αγροτικές περιοχές, καθώς μπορούν να κατασκευαστούν και να λειτουργήσουν σε λιγότερο από 1 χρόνο, σε σύγκριση με τα περίπου 4 χρόνια που απαιτούνται για τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής στην ίδια ισχύ [10]. Στην παραδοσιακή μεγάλη κλίμακας φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που φαίνεται στο Σχήμα 1.10, οι φωτοβολταϊκές μονάδες συνδέονται σε συνδυασμό σε σειρά/ παράλληλα για να σχηματίσουν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία στη συνέχεια συνδέεται με έναν μετατροπέα DC/DC. Οι έξοδοι των μετατροπέων DC/DC των φωτοβολταϊκών συστοιχιών συνδέονται σε έναν κοινό δίαυλο DC στην περιοχή 415–690 V. Ένας κεντρικός μετατροπέας DC/AC συνδέεται στον κοινό δίαυλο DC για να μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος MV μέσω ενός μετασχηματιστή ανόδου, ο οποίος είναι απαραίτητος για την ενίσχυση της τάσης από το επίπεδο του κοινού διαύλου DC στο επίπεδο του δικτύου MV [19].

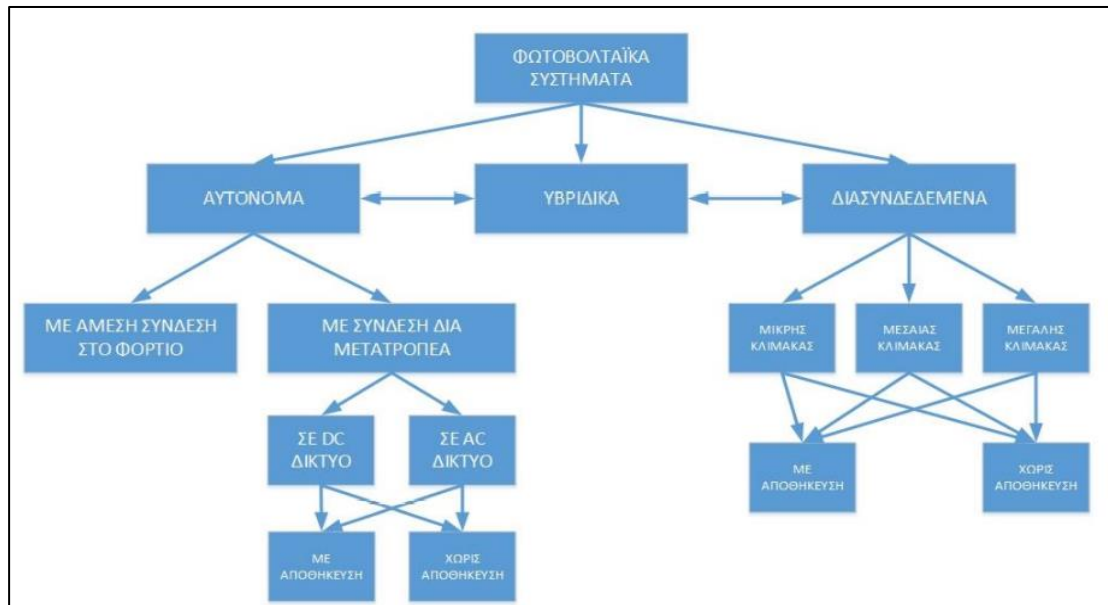


Σχήμα 1.10: Παραδοσιακή μεγάλη κλίμακας φωτοβολταϊκή εγκατάσταση [19].

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων ως προς τη σύνδεσή τους με το δίκτυο μεταφοράς και διανομής: διασυνδεδεμένα συστήματα, αυτόνομα συστήματα και υβριδικά συστήματα. Όλα έχουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, στην ουσία όμως, εναπόκειται τελικά στον πελάτη να επιλέξει τον τύπο εγκατάστασης που θέλει και που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες του. Η βασική διάκριση που γίνεται είναι αν το εν λόγω σύστημα είναι συνδεδεμένο



με το δίκτυο. Επιπλέον, εξετάζεται εάν το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες συχνά είναι απαραίτητες σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα αλλά αποτελούν εναλλακτική στα σημερινά διασυνδεδεμένα συστήματα. Το τελευταίο προκύπτει από την ανάγκη εγγύησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφενός και από την αδυναμία ελέγχου της κύριας πηγής, της ηλιακής ακτινοβολίας, αφετέρου. Οι διάφορες κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων λοιπόν τεκμηριώνονται στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Διάκριση σύγχρονων φωτοβολταϊκών συστημάτων [20].

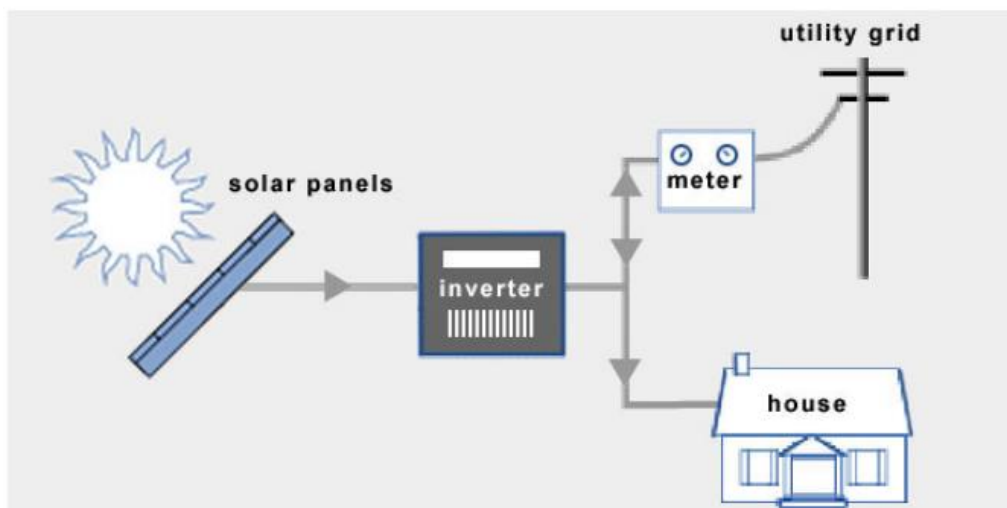
### 1.6.1. Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Μια διασυνδεδεμένη ηλιακή εγκατάσταση χρησιμοποιεί μετατροπείς που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο, αντί για συσσωρευτές. Αυτό σημαίνει ότι ο πελάτης έχει ήδη σύνδεση με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιήσει την ηλιακή ενέργεια για να μειώσει το μηνιαίο λογαριασμό ρεύματος. Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εύκολο να σχεδιαστούν και είναι οικονομικά επειδή αποτελούνται από λίγα εξαρτήματα. Ο κύριος στόχος ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η μείωση του λογαριασμού ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αυτός ο τύπος συστήματος έχει ένα μειονέκτημα: εάν δεν υπάρχει ρεύμα από το δίκτυο, λόγω της υπάρχουσας σύνδεσης του πελάτη, δεν θα υπάρχει ρεύμα ή ενέργεια στο σύστημα. Αυτό είναι επίσης απαραίτητο για λόγους ασφαλείας, επειδή οι τεχνικοί που εργάζονται σε καλώδια ρεύματος θα πρέπει να γνωρίζουν ότι υπάρχει πηγή ρεύματος από το δίκτυο. Οι μετατροπείς που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο θα πρέπει να αποσυνδέονται αυτόματα όταν δεν αισθάνονται ενέργεια στο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι αυτά τα συστήματα δεν μπορούν να παρέχουν ενέργεια κατά τη διάρκεια διακοπής ρεύματος ή έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα δεν μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια

για μελλοντική χρήση. Ωστόσο, εάν ένας πελάτης έχει μια ηλιακή εγκατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο, έχει τη δυνατότητα να προσθέσει ένα σύστημα αποθήκευσης αργότερα. Η λύση είναι η δημιουργία ενός συζευγμένου συστήματος AC όπου ο αρχικός μετατροπέας που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο συνδέεται με έναν εφεδρικό μετατροπέα που είναι κατάλληλος για σύνδεση με μπαταρίες. Αυτή είναι μια εξαιρετική λύση για πελάτες που θέλουν να εγκαταστήσουν Φ/Β τώρα, αλλά δεν είναι ακόμα έτοιμοι να επενδύσουν σε μπαταρίες [21].

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδέονται με το υπάρχον δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Χαμηλής ή Μέσης Τάσης και λειτουργούν παράλληλα με αυτό. Σε ένα τέτοιο σύστημα δεν υπάρχει συνήθως η ανάγκη για αποθήκευση της ενέργειας, διότι η παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά πάνελ ενέργεια είτε καταναλώνεται επί τόπου από τον ιδιοκτήτη (ιδιοκατανάλωση) ή διοχετεύεται στο δίκτυο προς πώληση ή προς λογιστικό συμψηφισμό. Στην ουσία τα διασυνδεδεμένα συστήματα αυτού του τύπου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ως προς το καθεστώς διαχείρισης της εγχεόμενης στο δίκτυο ενέργειας: α) Σύστημα με αυτοπαραγωγή, όπου ο ιδιοκτήτης χρησιμοποιεί την παραγόμενη ενέργεια για να καλύψει τις ανάγκες των δικών του ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Στην περίπτωση αυτή το πλεόνασμα (περίσσεια) της ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο προς συμψηφισμό, ενώ σε περίπτωση έλλειψης, το σύστημα τροφοδοτείται από το δίκτυο, β) Σύστημα με πώληση όλης της παραγόμενης ενέργειας στο δίκτυο και κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ξεχωριστά από το δίκτυο. Παλαιότερα η τιμή πώλησης του ρεύματος στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) ήταν υψηλότερη από την τιμή αγοράς, συνεπώς συνέφερε η εξ' ολοκλήρου πώληση της παραγόμενης ενέργειας απ' ό,τι ο συμψηφισμός αυτής.

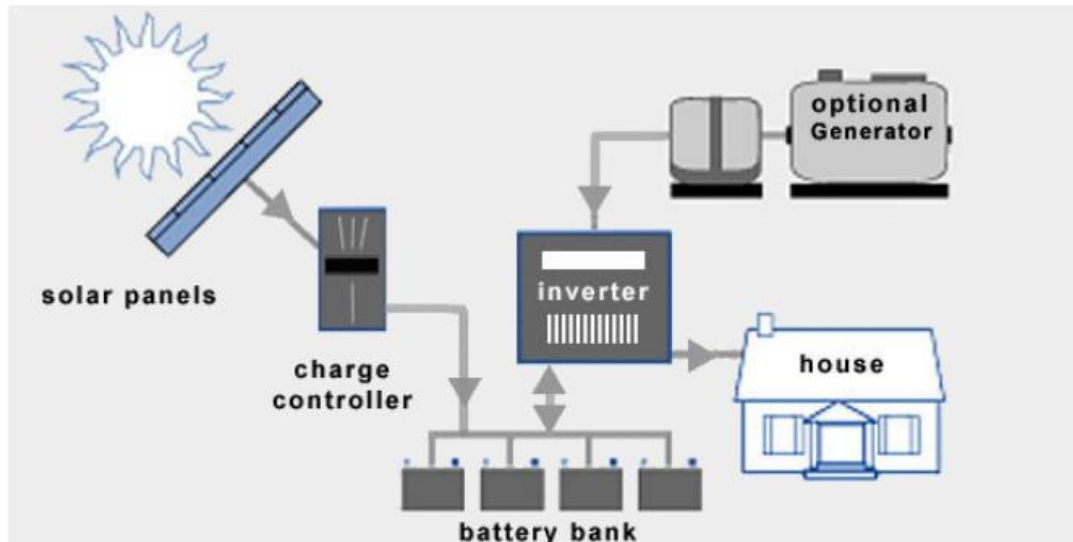
Στα διασυνδεδεμένα συστήματα εντάσσονται και τα φωτοβολταϊκά συστήματα net metering. Διασυνδεδεμένα συστήματα είναι επίσης και τα μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά πάρκα, αφού συνδέονται είτε στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (έως 100kWp) είτε στο δίκτυο Μέσης ή Υψηλής Τάσης. Η διαφοροποίηση στα πάρκα είναι η ύπαρξη κατάλληλου υποσταθμού ανύψωσης τάσης για τη διοχέτευση της ενέργειας στο δίκτυο [22].



Εικόνα 1.3: Γραφική απεικόνιση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος [23]

### 1.6.2. Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

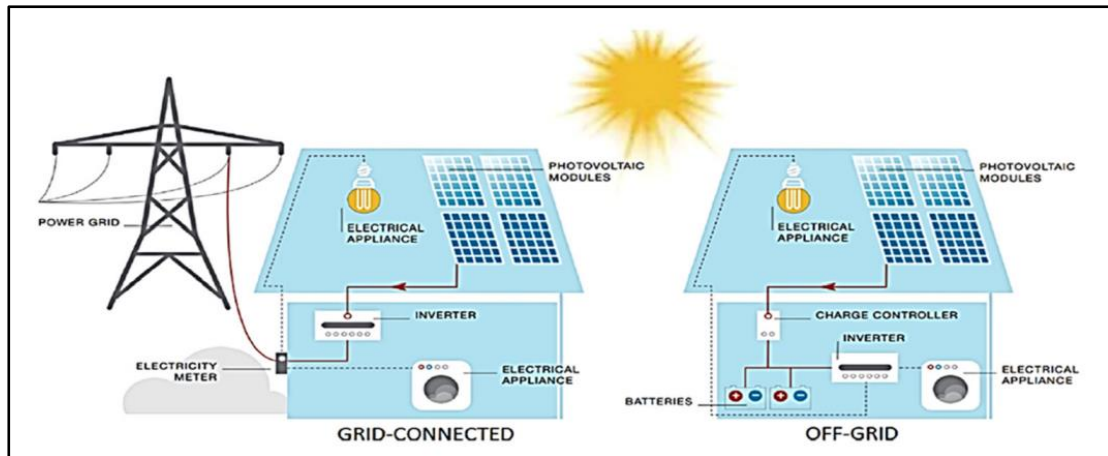
Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι χρήσιμα για άτομα που δεν μπορούν εύκολα να συνδεθούν στο δίκτυο ή για άτομα που δεν έχουν την οικονομική δυνατότητα να τροφοδοτήσουν το σύστημα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν έχει νόημα κάποιος που είναι ήδη συνδεδεμένος στο δίκτυο να αποσυνδεθεί εντελώς και να εγκαταστήσει αυτόνομα ένα Φ/Β σύστημα. Τα οφέλη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ότι ο πελάτης μπορεί να γίνει ενεργειακά ανεξάρτητος και να έχει τροφοδοσία ενέργειας σε απομακρυσμένα σημεία από το δίκτυο. Επίσης θα έχει σταθερό ενεργειακό κόστος και δεν θα λαμβάνει λογαριασμούς από την κατανάλωση ενέργειας. Μια άλλη σημαντική πτυχή των αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι ότι είναι αρθρωτά και μπορούν να αυξήσουν την παραγωγική τους ικανότητα καθώς αυξάνονται οι ενεργειακές ανάγκες του πελάτη. Ωστόσο, τα αυτόνομα συστήματα ενδέχεται να μην πληρούν τις προϋποθέσεις που απαιτούνται για να γίνουν δεκτά σε κυβερνητικά προγράμματα κινήτρων για επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, το σύστημα πρέπει να είναι σχεδιασμένο ώστε να καλύπτει το 100% των ενεργειακών αναγκών του πελάτη και να είναι ακόμα λίγο πιο ακριβό από ένα τυπικό διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα [21].



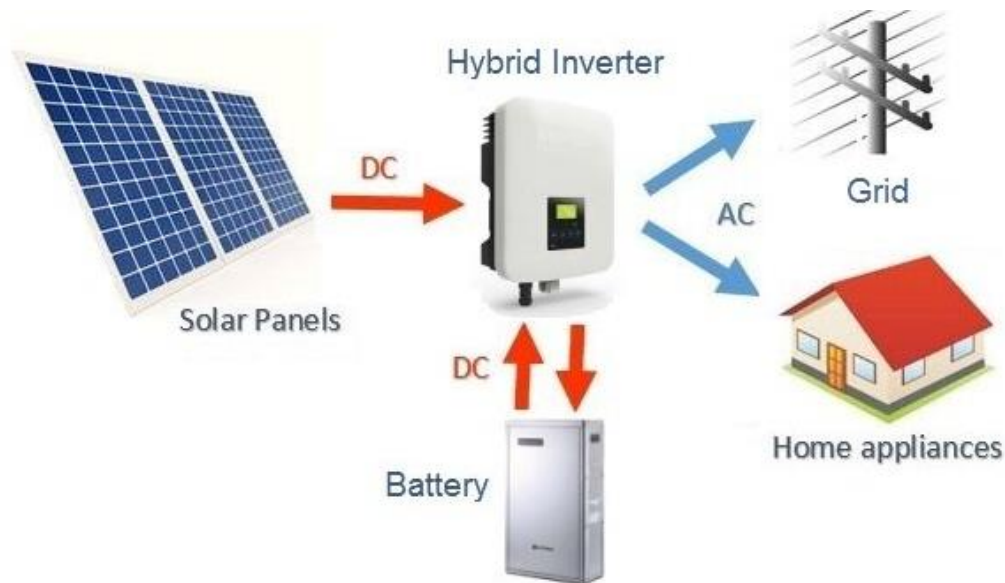
Εικόνα 1.4: Γραφική απεικόνιση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος [23]

### 1.6.3. Υβριδικά Φ/Β Συστήματα

Το υβριδικό σύστημα είναι ένας συνδυασμός ενεργειακού συστήματος που περιλαμβάνει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για βέλτιστη διαμόρφωση παραγωγής [24]. Η διαμόρφωση μπορεί να είναι συνδυασμός συμβατικής ενέργειας με συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή συνδυασμός περισσότερων του ενός συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως Φ/Β - Δίκτυο, Φ/Β - Μπαταρία και άλλα. Η παρουσία ηλιακής ενέργειας οδηγεί στη χρήση της υβριδικής παραγωγής ενέργειας. Τα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους που είναι η συνδεδεμένη στο δίκτυο και η αυτόνομη διαμόρφωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα εξαρτάται μόνο από τις εναλλακτικές πηγές. Απαιτείται αποθήκευση ενέργειας ως εφεδρικό σύστημα κατά τη διάρκεια της έλλειψης ηλιακής ακτινοβολίας. Το αυτόνομο σύστημα είναι πιο κατάλληλο για απομακρυσμένη τοποθεσία λόγω της απρόσιτης πρόσβασης του δικτύου κοινής ωφέλειας. Επιπλέον, ο αυτόνομος τύπος τραβάει περισσότερη προσοχή καθώς αυτό το σύστημα προσφέρει χαμηλό κόστος εγκατάστασης για εφαρμογές σε απομακρυσμένες τοποθεσίες [25].



Εικόνα 1.5: Διαμορφώσεις φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο και αυτόνομων/εκτός δικτύου [26]



Εικόνα 1.6 Διαμόρφωση hybrid φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο και αυτόνομων/εκτός δικτύου [27].

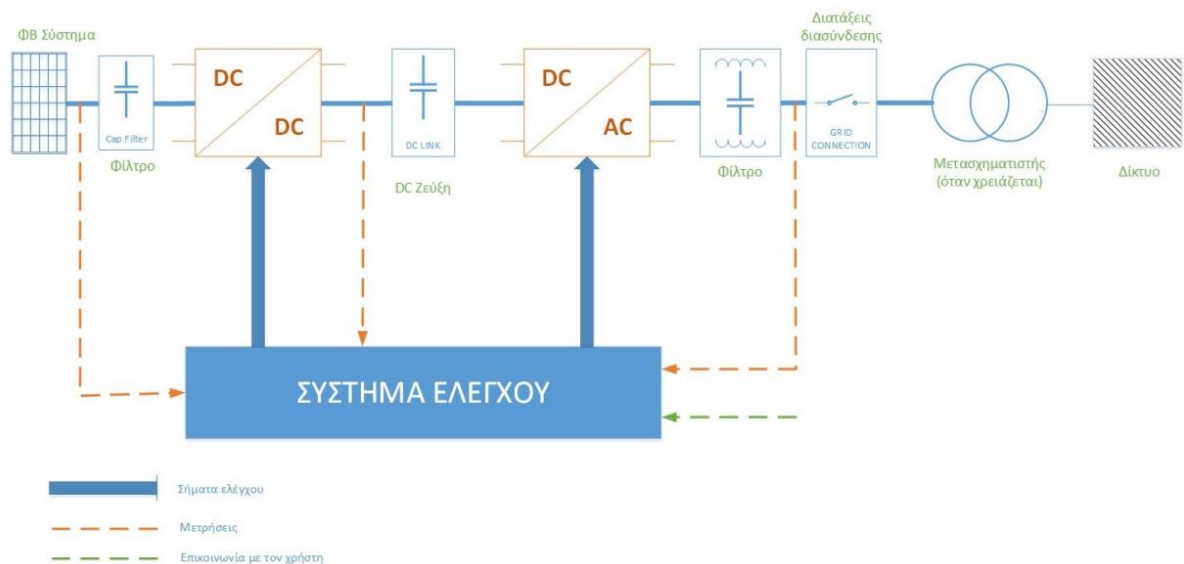
Το σύστημα που συνδέεται με το δίκτυο είναι ένας συνδυασμός του δικτύου κοινής ωφέλειας και ενός εναλλακτικού συστήματος πηγής. Το σύστημα εξαρτάται αποκλειστικά από τον φωτοβολταϊκό πίνακα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι χαμηλή, το δίκτυο κοινής ωφέλειας χρησιμοποιείται για την κάλυψη των απαιτήσεων φορτίου. Το σύστημα μεγάλης κλίμακας μπορεί να εφαρμοστεί στο σύστημα που συνδέεται με το δίκτυο καθώς θα αυξήσει την οικονομική σκοπιμότητα του συστήματος. Το συνδεδεμένο στο δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι επίσης ικανό να φτάσει σε υψηλή απόδοση λόγω της απεριόριστης χωρητικότητας αποθήκευσης. Ωστόσο, απαιτείται κατάλληλη διαμόρφωση για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος [25]

Ένα υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα είναι ένας τύπος συστήματος που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα ενός διασυνδεδεμένου συστήματος (όπου μπορεί να

χρησιμοποιήσει την ισχύ του δικτύου όταν το δίκτυο είναι εκτός λειτουργίας) με τα πλεονεκτήματα ενός εφεδρικού συστήματος μπαταρίας (έτσι να είναι πάντα προετοιμασμένο σε περίπτωση μιας διακοπής).

## 2. Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Εφαρμογές Φωτοβολταϊκών Συστημάτων και Ανάλυση Τοπολογιών Ηλεκτρονικών Ισχύος

Ένα Φ/Β σύστημα αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών συλλεκτών που μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα πάνελ ομαδοποιούνται σε συστοιχίες, οι οποίες μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε συγκεκριμένα επίπεδα. Στη συνέχεια, προστίθενται συστήματα που βοηθούν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της γεννήτριας και στην προσαρμογή της ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στις απαιτήσεις φορτίου. Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων: συνδεδεμένα στο δίκτυο, εκτός δικτύου και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται σε μορφή δομικού διαγράμματος, η γενική αναπαράσταση ενός σύγχρονου ΦΒ συστήματος.



Σχήμα 2.1: Δομικό Διάγραμμα Σύγχρονου Φωτοβολταϊκού Συστήματος [20]

Η εφαρμογή των Φ/Β στο σύστημα καταναλωμένης παραγωγής αποκτά μεγαλύτερη προσοχή με τις εξελίξεις στην τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος και τις παγκόσμιες περιβαλλοντικές ανησυχίες. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά διαδραματίζουν βασικό ρόλο στην κατανάλωση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το κεφάλαιο, η ταξινόμηση του Φ/Β συστήματος, οι διαμορφώσεις του συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού μετατροπέα, η ταξινόμηση διαφόρων τύπων μετατροπέων και οι τοπολογίες συζητούνται, περιγράφονται και παρουσιάζονται με σχηματικό τρόπο.

## 2.1. Αντιστροφείς

Ο όρος αντιστροφέας (inverter) σημαίνει μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος που μετατρέπει την τάση συνεχούς ρεύματος των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ονομαστικές εναλλασσόμενες τάσεις 230 V (ανά φάση) / 50 Hz. Οι αντιστροφείς παίζουν καθοριστικό ρόλο σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση καθώς η ενέργεια που παράγεται μέσω αυτών κατευθύνεται στο δίκτυο. Επομένως, πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση και αξιοπιστία.

Η ΔΕΗ απαιτεί από τους μετατροπείς να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές για να συνδεθούν με το υπόλοιπο σύστημα. Αφού εγκατασταθούν οι μετατροπείς, ελέγχονται για να διαπιστωθεί εάν πληρούν αυτές τις απαιτήσεις [28]:

- 1) Η τάση και η συχνότητα των μετατροπέων μπορούν να ρυθμιστούν για να περιορίσουν την ποσότητα ισχύος και τη συχνότητα χρήσης. Τα όρια αυτά είναι από -20% έως +15% και  $\pm 0,5$  Hz, αντίστοιχα, για σταθμούς στο διασυνδεδεμένο σύστημα και από -20% έως +15% και από 47,5 Hz έως 51 Hz για σταθμούς σε μη διασυνδεδεμένα νησιά. Εάν τα όρια είναι ενεργοποιημένα, ο χρόνος αποσύνδεσης πρέπει να είναι μικρότερος από 0,5 sec και ο χρόνος επανασύνδεσης τουλάχιστον 3 λεπτά.
- 2) Η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total Harmonic Distortion-THD) του ρεύματος των αντιστροφέων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 5%.
- 3) Εφόσον οι αντιστροφείς δε διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης η έγχυση συνεχούς ρεύματος (dc injection current) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 0,5% του ονομαστικού ρεύματος.
- 4) Προστασία έναντι του φαινομένου νησιδοποίησης (Islanding) κατά το πρότυπο VDE 0126.
- 5) Ο συντελεστής ισχύος του Σταθμού σε περιπτώσεις παραγωγής πάνω από το 50% της ονομαστικής ικανότητας παραγωγής, πρέπει να είναι μεγαλύτερος του 0,95 επαγωγικού και να κυμαίνεται μεταξύ 0,95 επαγωγικού (όταν απορροφάται άεργος ισχύς) και 0,85 χωρητικού (όταν παράγεται άεργος ισχύς). Αυτό συμβαίνει σύμφωνα με τις οδηγίες του αρμόδιου Διαχειριστή. Στην περίπτωση μονάδων παραγωγής που δεν μπορούν να ελέγξουν τον συντελεστή ισχύος, ο κάτοχος τους πρέπει να εγκαταστήσει τον απαιτούμενο εξοπλισμό αντιστάθμισης.

Στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς κατατάσσονται και οι αντιστροφείς με τους οποίους θα ασχοληθούμε. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την είσοδο και την έξοδο τους:

- Μετατροπείς AC-DC
- Μετατροπείς DC-AC
- Μετατροπέας DC-DC



- Μετατροπέας AC-AC

Οι αντιστροφείς των διασυνδεδεμένων συστημάτων διαχωρίζονται ανάλογα με το είδος της τάσης που παράγουν σε:

- Μονοφασικούς αντιστροφείς, με τυπικά μεγέθη ισχύος έως 10-11 kW.
- Τριφασικούς αντιστροφείς, με μεγέθη ισχύος από 6-7 kW έως και 1 MW.

Οι αντιστροφείς ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση (χαμηλής ή υψηλής συχνότητας) ανάμεσα στην DC είσοδο και την AC έξοδο χωρίζονται σε:

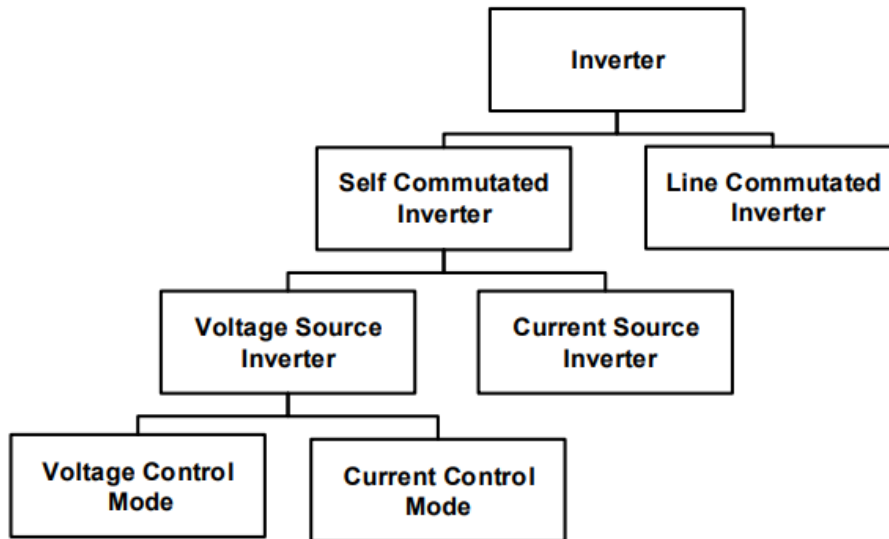
- Αντιστροφείς με μετασχηματιστή (Inverters With Transformer)
- Αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (Transformerless (TL) Inverters)

Επιπλέον, ανάλογα της τεχνολογίας διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιείται οι αντιστροφείς χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Κεντρικοί αντιστροφείς (Central Inverters)
- Αντιστροφείς κλάδων (String Inverters)
- Αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (Multi-String Inverters)
- Αντιστροφείς με ενσωμάτωση σε φωτοβολταϊκά πάνελ (Module Integrated Inverters).

## 2.2. Ταξινόμηση των Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος

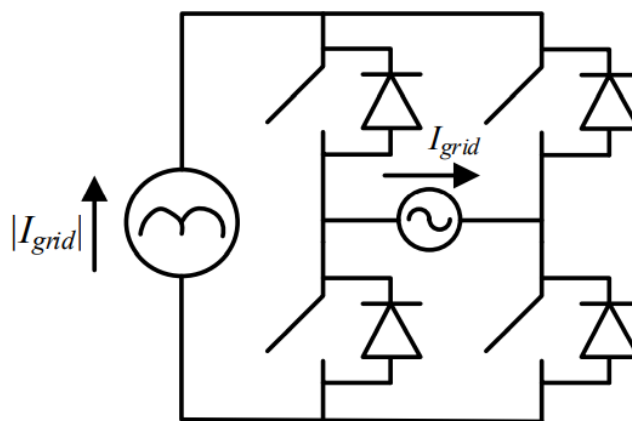
Για ένα Φ/Β σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο, απαιτείται κατάλληλο μέγεθος φάσης, συχνότητας και τάσης του τριφασικού σήματος εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος για τον γρήγορο και ακριβή συγχρονισμό με το δίκτυο. Η μετατροπή DC σε AC πραγματοποιείται από ένα σημαντικό στοιχείο του συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος γνωστό ως μετατροπέας [29]. Ο inverter στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ένας πλευρικός μετατροπέας δικτύου που βασίζεται σε ηλεκτρονικά ρεύματα και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κύριους τύπους με βάση τις συμπεριφορές ενεργοποίησης και απενεργοποίησης (commutation), που είναι οι μετατροπείς που επικοινωνούν με μεταγωγή γραμμής και οι αυτο-συνδεδεμένοι μετατροπείς. Οι μετατροπείς που επικοινωνούν με γραμμή εξαρτώνται από τις παραμέτρους του κυκλώματος και οι διακόπτες λειτουργούν με βάση την πολικότητα ή την κατεύθυνση της ροής του ρεύματος. Αφ' ετέρου, οι αυτομετατροπείς λειτουργούν με πλήρη έλεγχο της διαδικασίας ενεργοποίησης και απενεργοποίησης των συσκευών εναλλαγής. Οι δύο κύριες κατηγορίες μπορούν περαιτέρω να χωριστούν σε διάφορους υποτύπους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Ταξινομήσεις ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος [30]

### 2.2.1. Μετατροπείς με μεταγωγή γραμμής

Στους Line-Commutated Inverter (LCI) η διαδικασία μεταγωγής πραγματοποιείται από τις παραμέτρους του δικτύου κοινής ωφέλειας, δηλαδή η αντιστροφή της πολικότητας της τάσης AC και η ροή αρνητικού ρεύματος (ή μηδενικού ρεύματος) ξεκινά τη διαδικασία μεταγωγής. Ο LCI γενικά χρησιμοποιεί τα θυρίστορ μεταγωγής ως συσκευές μεταγωγής ισχύος, οι οποίες είναι συσκευές ημι-ελεγκτή. Ο ακροδέκτης πύλης της συσκευής ελέγχει τη λειτουργία ενεργοποίησης, ενώ η απενεργοποίηση δεν μπορεί να ελεγχθεί με τον ίδιο μηχανισμό καθώς εξαρτάται από το ρεύμα της γραμμής ή την τάση του δικτύου για την απενεργοποίησή της. Έτσι, εάν είναι απαραίτητη μια αναγκαστική συσσώρευση, ένα εξωτερικό κύκλωμα προστίθεται στις ημιελεγχόμενες συσκευές για τον έλεγχο της διαδικασίας απενεργοποίησης επίσης. Για παράδειγμα, μια δίοδος αντιπαράλληλης προστίθεται στην περίπτωση μετατροπέα LCI μισής γέφυρας για την ενεργοποίηση της διαδικασίας αναγκαστικής εναλλαγής.



Σχήμα 2.3: Grid-connected Line-commutated CSI [31]

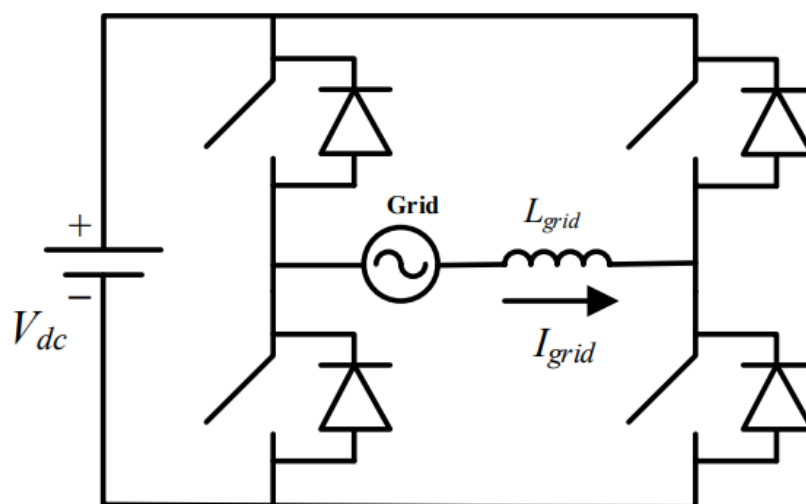
## 2.2.2. Μετατροπέας Αυτομετατροπής

Ο Self-Commutated Inverter (SCI) είναι ο πλήρως ελεγχόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Το δυναμικό στο τερματικό της πύλης ελέγχει τόσο τη διαδικασία απενεργοποίησης όσο και ενεργοποίησης των συσκευών μεταγωγής ισχύος. Η μεταφορά ρεύματος από τη μια συσκευή μεταγωγής στην άλλη είναι ενεργοποιημένη με ελεγχόμενο τρόπο. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στον SCI περιλαμβάνουν Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) και Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT). Για εφαρμογές μέσης έως υψηλής ισχύος άνω των 100 kW και εύρος χαμηλών συχνοτήτων 20 kHz, χρησιμοποιούνται IGBT. Από την άλλη πλευρά, για υψηλή συχνότητα τυπικά στην περιοχή 20-800 kHz και χαμηλή ισχύ μικρότερη από 20 kW, χρησιμοποιούνται MOSFET. Για τη δημιουργία της κυματομορφής της τάσης εξόδου και για τον έλεγχο του SCI, χρησιμοποιείται η τεχνική μεταγωγής Pulse Width Modulation (PWM). Για εφαρμογές μετατροπέων συνδεδεμένων στο δίκτυο, απαιτείται υψηλή συχνότητα μεταγωγής για να επιτραπεί η μείωση του βάρους του μετατροπέα, να μειωθούν οι αρμονικές του ρεύματος και της τάσης εξόδου και επίσης να μειωθεί το μέγεθος του φίλτρου εξόδου [32]. Ο SCI είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος πλήρως ελεγκτή, επομένως ελέγχει τόσο το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα όσο και την κυματομορφή τάσης. Επιπλέον, είναι πολύ ανθεκτικός στις διαταραχές του δικτύου κοινής ωφέλειας, καταστέλλει τις αρμονικές του ρεύματος και βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του δικτύου. Σήμερα, ο SCI προτιμάται έναντι του LCI για φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο λόγω της προόδου που έγινε στο σύστημα ελέγχου για SCI και επιπλέον, λόγω της εξέλιξης των προηγμένων συσκευών μεταγωγής παρόμοιων με αυτές των IGBT και MOSFET ισχύος. Ο SCI μπορεί περαιτέρω να χωριστεί σε μετατροπείς πηγής τάσης και μετατροπείς πηγής ρεύματος.

### 2.2.2.1. Μετατροπέας Πηγής Τάσης

Στον Μετατροπέα Πηγής Τάσης - Voltage Source Inverter (VSI), η πηγή τάσης DC βρίσκεται στην πλευρά εισόδου του μετατροπέα, επομένως η πολικότητα της τάσης εισόδου παραμένει η ίδια. Ωστόσο, η πολικότητα του ρεύματος DC εισόδου καθορίζει την κατεύθυνση της μέσης ροής ισχύος μέσω του μετατροπέα. Στην πλευρά εξόδου, μπορεί να ληφθεί μια κυματομορφή τάσης AC μεταβλητού πλάτους και σταθερού πλάτους. Χρησιμοποιείται ένας επαγωγέας γραμμής σύνδεσης μαζί με το VSI για τον περιορισμό της ροής ρεύματος από τον μετατροπέα στο δίκτυο κοινής ωφέλειας. Επιπλέον, ένας σχετικά μεγάλος πυκνωτής, παρόμοιος με μια πηγή τάσης συνδέεται παράλληλα με την πλευρά DC εισόδου του VSI. Η ρύθμιση παραμέτρων VSI με δυνατότητα αυτόματης εναλλαγής φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Ο VSI μπορεί να λειτουργήσει σε δύο τρόπους λειτουργίας που είναι ο τρόπος λειτουργίας ελέγχου τάσης (Voltage Control Mode - VCM) και ο τρόπος λειτουργίας ελέγχου ρεύματος (Current Control Mode - CCM). Στην περίπτωση του VCM, η κύρια μεταβλητή του

ελεγκτή είναι η τάση Point of Common Coupling (PCC), επομένως δεν υπάρχει έλεγχος στα ρεύματα της γραμμής. Από την άλλη πλευρά, στο CCM τα ρεύματα γραμμής παρέχονται με τρόπο ελέγχου. Ο VCM συνιστάται για αυτόνομα ή εκτός δικτύου Φ/Β συστήματα, καθώς η διατήρηση του μεγέθους, της συχνότητας και της φάσης της τάσης PCC είναι μείζονος σημασίας στην περίπτωση του αυτόνομου δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τόσο ο VCM όσο και ο CCM μπορούν να εφαρμοστούν για το συνδεδεμένο στο δίκτυο Φ/Β σύστημα, αλλά ο CCM είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Ο λόγος για τη χρήση του CCM είναι ότι το άκαμπτο ηλεκτρικό δίκτυο υπαγορεύει την τάση PCC, Έτσι, ο έλεγχος των ρευμάτων για την παροχή της παραγόμενης ισχύος Φ/Β είναι πιο αξιόπιστος και ασφαλέστερος από τη μέθοδο VCM χωρίς έλεγχο των ρευμάτων. Σε περίπτωση διαταραχών του δικτύου, η μεταβατική καταστολή του ρεύματος είναι δυνατή με το CCM και ένας συντελεστής υψηλής ισχύος μπορεί να αποκτηθεί με απλή δομή ελέγχου, γι' αυτό οι μετατροπείς με το CCM χρησιμοποιούνται εκτενώς σε συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα. Έτσι, ο προτιμώμενος μετατροπέας για ένα Φ/Β σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο είναι ο VSI που λειτουργεί σε λειτουργία ελέγχου ρεύματος.



Σχήμα 2.4: Grid-connected Self-commutated VSI [33]

#### 2.2.2.2. Μετατροπέας πηγής ρεύματος

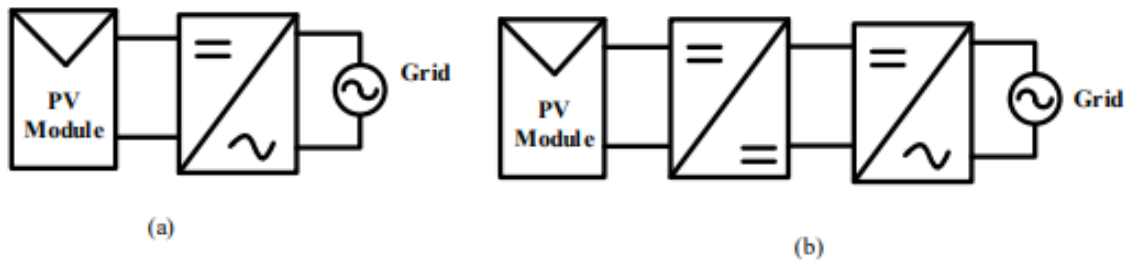
Στον μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI), η πλευρά εισόδου του μετατροπέα συνδέεται με μια πηγή ρεύματος συνεχούς ρεύματος και ως εκ τούτου, η πολικότητα του ρεύματος εισόδου παραμένει η ίδια. Η πολικότητα της τάσης DC εισόδου, ωστόσο, καθορίζει την κατεύθυνση της μέσης ροής ισχύος μέσω του μετατροπέα. Μια κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητού πλάτους και σταθερού πλάτους μπορεί να ληφθεί στην πλευρά εξόδου. Σε αντίθεση με το VSI, ένα μεγάλο πηνίο που διατηρεί τη σταθερότητα του ρεύματος που συνδέεται σε σειρά στην πλευρά εισόδου του CSI.

## 2.3. Διάφορες Τοπολογίες Inverter

Με βάση τη διαμόρφωση και τους τύπους των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται, οι μετατροπείς μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες. Αυτή η διαίρεση των κατηγοριών βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως τον αριθμό των σταδίων επεξεργασίας ισχύος, π.χ. μονοβάθμια και πολλαπλών σταδίων, διαμορφώσεις μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή, αριθμό επιπέδων που εμπλέκονται στο σχεδιασμό και τον τύπο της μεταγωγής που χρησιμοποιείται. Κάθε κατηγορία αναλύεται εν συντομία και περιγράφεται.

### 2.3.1. Μετατροπείς Με Βάση Τον Αριθμό Των Σταδίων Επεξεργασίας Ισχύος

Οι μετατροπείς με βάση τα στάδια επεξεργασίας ισχύος ταξινομούνται σε δύο κύριους τύπους, οι οποίοι είναι οι μονοβάθμιοι μετατροπείς και οι μετατροπείς πολλαπλών σταδίων, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Τύποι φωτοβολταϊκών μετατροπέων (α) Single stage inverter, (β) Two stage inverter [34]

#### 2.3.1.1. Single Stage Inverter (Μονοβάθμιοι Μετατροπείς)

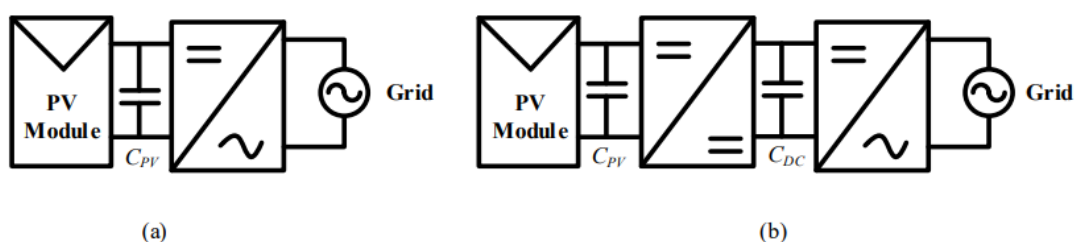
Ο μετατροπέας ενός σταδίου εκτελεί διάφορες λειτουργίες, όπως ο έλεγχος των εγχεόμενων ρευμάτων δικτύου, η λειτουργία των ενισχύσεων τάσης και η διαδικασία παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος. Στον μετατροπέα ενός σταδίου, η χρήση μετασχηματιστή συχνότητας γραμμής (που λειτουργεί σε χαμηλή συχνότητα) προσθέτει μεγάλο βάρος στον μετατροπέα και συμβάλλει στις απώλειες μέγιστης απόδοσης 2 % [35].

Από την άλλη πλευρά, η χρήση μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας ή μετατροπέας χωρίς μετασχηματιστή είναι η πιο αποδοτική, οικονομική και ελαφρύτερη σε βάρος. Αντικαθιστούν όλο και περισσότερο τους μετασχηματιστές συχνότητας γραμμής. Διάφορες τοπολογίες μετατροπέων, όπως οι buck boost ή boost μετατροπέα παρουσιάζονται με ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μετατροπή DC σε AC και η ενίσχυση τάσης MPPT πραγματοποιούνται σε ένα μόνο στάδιο. Σε αυτές τις τοπολογίες, είτε ένας επαγωγέας χρησιμοποιείται ως στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας είτε ένας μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας που εκτελεί τις λειτουργίες απομόνωσης και αποθήκευσης ενέργειας. Τα βασικά χαρακτηριστικά του μονοβάθμιου μετατροπέα buck-boost είναι η εξάλειψη του μετασχηματιστή

συχνότητας γραμμής. Ωστόσο, οι μετατροπείς μονού σταδίου υποφέρουν συχνά από χαμηλό εύρος τάσης εισόδου DC, χαμηλή ποιότητα ισχύος και μειωμένη χωρητικότητα ισχύος.

### 2.3.1.2. Multiple Stage Inverter (Μετατροπέας Πολλαπλών Σταδίων)

Ένας μετατροπέας με περισσότερα από ένα στάδια επεξεργασίας ισχύος αναφέρεται ως μετατροπέας πολλαπλών σταδίων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6 (b). Σε αυτόν τον τύπο μετατροπέα, το τελευταίο στάδιο εκτελεί τη λειτουργία της μετατροπής DC σε AC ενώ το αρχικό (και το ενδιάμεσο) στάδιο επιτυγχάνει την ενίσχυση τάσης και σε ορισμένες περιπτώσεις τη λειτουργία της γαλβανικής απομόνωσης. Το εύρος τάσης εισόδου DC για τον μετατροπέα είναι πολύ χαμηλό, είναι μη απομονωμένος τύπος επειδή δεν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής σε αυτήν την περίπτωση [36]. Παρουσιάζεται μια άλλη απομονωμένη τοπολογία μετατροπέα buck-boost πολλαπλών σταδίων, όπου χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας και λειτουργεί με χαμηλή τάση DC. Το ρεύμα ανορθωμένου ημιτονοειδούς κύματος που λαμβάνεται στο πρώτο στάδιο μετατρέπεται σε ημιτονοειδές ρεύμα πλήρους κύματος στη μεταγωγή συχνότητας γραμμής από τον μετατροπέα πηγής ρεύματος δεύτερου σταδίου.



Σχήμα 2.6: Διαφορετικές θέσεις πυκνωτή αποσύνδεσης ισχύος για μετατροπέα μονοβάθμιας και πολλαπλών σταδίων [37].

### 2.3.2. Μετατροπείς με Μετασχηματιστή ή Χωρίς (Transformer And Transformer Less Inverters)

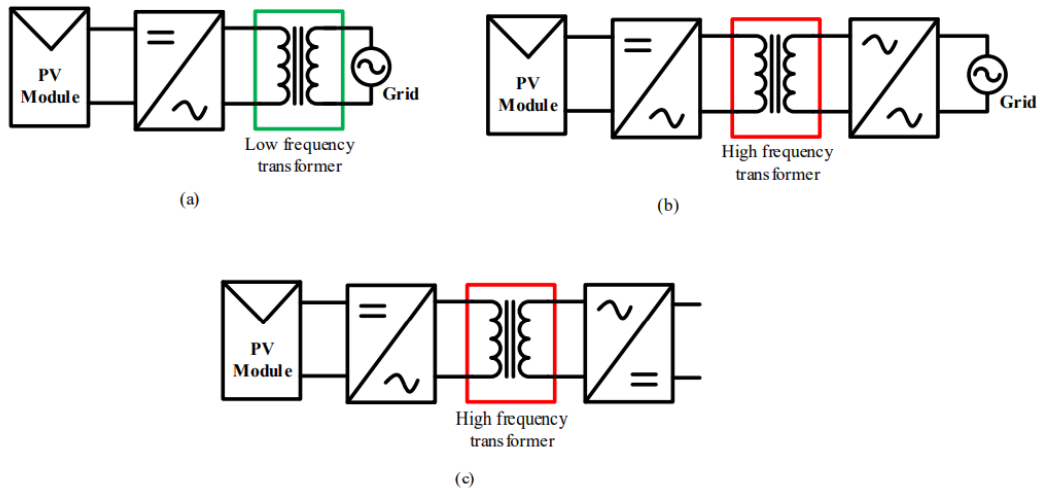
Μια άλλη ταξινόμηση των μετατροπέων, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, γίνεται με βάση την ύπαρξη ή απουσία του μετασχηματιστή. Με άλλα λόγια, αυτή η ταξινόμηση μπορεί επίσης να έχει ένα ή πολλαπλά στάδια ισχύος, αλλά η κύρια κατηγοριοποίηση σε αυτή την περίπτωση βασίζεται στον μετασχηματιστή. Γενικά, με βάση τον μετασχηματιστή, οι τοπολογίες Φ/Β μετατροπέων που συνδέονται με το δίκτυο κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες, δηλαδή σε αυτές με μετασχηματιστή και σε αυτές που είναι λιγότερο μετασχηματιστές.

Οι μετασχηματιστές συχνότητας γραμμής χρησιμοποιούνται στους μετατροπείς για γαλβανική απομόνωση μεταξύ του φωτοβολταϊκού πίνακα και του δικτύου κοινής ωφέλειας. Ο μετασχηματιστής απομόνωσης βοηθά στην εξάλειψη του προβλήματος

της έγχυσης συνεχούς ρεύματος από το Φ/Β σύστημα στο δίκτυο κοινής ωφέλειας. Δεδομένου ότι οι μετασχηματιστές συχνότητας γραμμής είναι βαρύς σε βάρος και ογκώδεις σε μέγεθος αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο το συνολικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος, επομένως ο μετασχηματιστής συχνότητας γραμμής θεωρείται ως το προβληματικό στοιχείο του μετατροπέα. Μια εναλλακτική λύση σε αυτό είναι η χρήση του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας που είναι ενσωματωμένος στον μετατροπέα ή στον μετατροπέα DC/DC, ο οποίος μειώνει το μέγεθος και το βάρος του συστήματος και έτσι μειώνει το συνολικό κόστος. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό, μερικές τοπολογίες μετατροπέων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7.

Ο μετατροπέας χωρίς μετασχηματιστή σε σύγκριση με τις τοπολογίες μετασχηματιστών είναι οικονομικές λύσεις και παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση. Ωστόσο, για την αντιμετώπιση του προβλήματος της έγχυσης ρεύματος συνεχούς ρεύματος, απαιτούν την εγκατάσταση επιπλέον κυκλώματος. Ένα άλλο πρόβλημα που σχετίζεται με τοπολογίες χωρίς μετασχηματιστή είναι ότι δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του δικτύου κοινής ωφέλειας και της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Επιπλέον, μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις τάσης μεταξύ της Φ/Β γεννήτριας και της γείωσης, ανάλογα με το κύκλωμα του μετατροπέα [38].

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τοπολογίες μονοφασικών μετατροπέων συνδεδεμένων στο δίκτυο βασισμένες σε μετασχηματιστές είναι η μισή γέφυρα H, η πλήρης γέφυρα H, η HERIC, η H5, η H6, η NPC, ο ενεργός NPC, ο flying πυκνωτής και ο Conergy NPC. Πρόσφατα, στην αγορά υπάρχουν πολλοί κατασκευαστές Φ/Β μετατροπέων χωρίς μετασχηματιστή, π.χ.: REFU, Danfos solar, Ingeteam, Conergy, Sunways και SMA, προσφέροντας μέγιστη απόδοση έως και 98% και υψηλή ευρωπαϊκή απόδοση (>97%). Οι μετατροπείς χωρίς μετασχηματιστή μπορεί να είναι μονοβάθμιοι ή πολλαπλών σταδίων.



Σχήμα 2.7: (a) Τοποθέτηση του μετασχηματιστή συχνότητας γραμμής μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου. (b) Μετατροπέας εναλλασσόμενου ρεύματος συνδεδεμένος στο δίκτυο HF. (c) Ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας είναι ενσωματωμένος σε έναν μετατροπέα dc-dc συνδεδεμένο σε μονάδα φωτοβολταϊκής μονάδας dc-link [38].

### 2.3.3. Μετατροπείς Πολλαπλών Επιπέδων (Multilevel Inverters)

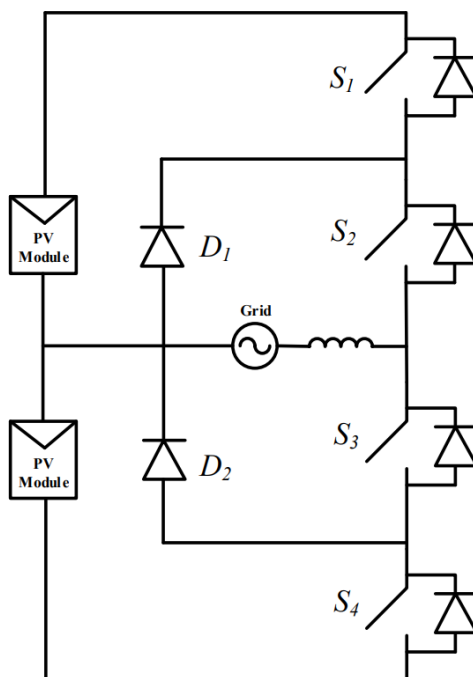
Η μείωση του συνολικού κόστους του συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος οφείλεται πλέον στη βελτίωση των υφιστάμενων τεχνολογιών μετατροπών συνδεδεμένων στο δίκτυο. Σε σύγκριση με τους απλούς μετατροπείς δύο επιπέδων, οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων που συνδέονται στο δίκτυο προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα. Οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων έχουν ως αποτέλεσμα την τάση AC στον ακροδέκτη εξόδου του μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από πολλά επίπεδα τάσης κλιμακοστασίου. Η ημιτονοειδής κυματομορφή σκάλας που προκύπτει από τον μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων είναι κοντά σε ένα πραγματικό και καθαρό ημιτονοειδές κύμα με χαμηλή ολική αρμονική παραμόρφωση. Έτσι, η απαίτηση φίλτρου μειώνεται και η αρμονική παραμόρφωση είναι χαμηλή. Μπορούν εύκολα να παραχθούν διάφορα επίπεδα τάσης DC λόγω της αρθρωτής δομής των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Επομένως, οι πολυεπίπεδες τοπολογίες είναι κατά βάση κατάλληλες για τα Φ/Β συστήματα.

#### 2.3.3.1. Μετατροπείς με Σύσφιξη Διόδου Ημι-Γέφυρας (Half-Bridge Diode Clamped Inverters)

Ένα σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα τριών επιπέδων με συσφιγμένο με δίοδο μισής γέφυρας, ο οποίος αποτελεί σημαντικό μέρος των μονοφασικών φωτοβολταϊκών συστημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο χωρίς μετασχηματιστή, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8 [39]. Στον ακροδέκτη εξόδου του μετατροπέα, μπορεί να επιτευχθεί θετική τάση με ταυτόχρονη ενεργοποίηση των διακοπών S1 και S2. Μια αρνητική τάση λαμβάνεται με εναλλαγή του S3, και S4, ενώ μηδενική τάση δημιουργείται από ενεργοποίηση και των δύο S2 και S3 την ίδια στιγμή. Προκειμένου να επιτρέπεται η μεταφορά ισχύος από το Φ/Β στο δίκτυο κοινής ωφέλειας, η τάση διαύλου συνεχούς ρεύματος πρέπει να είναι πάντα μεγαλύτερη από το πλάτος τάσης



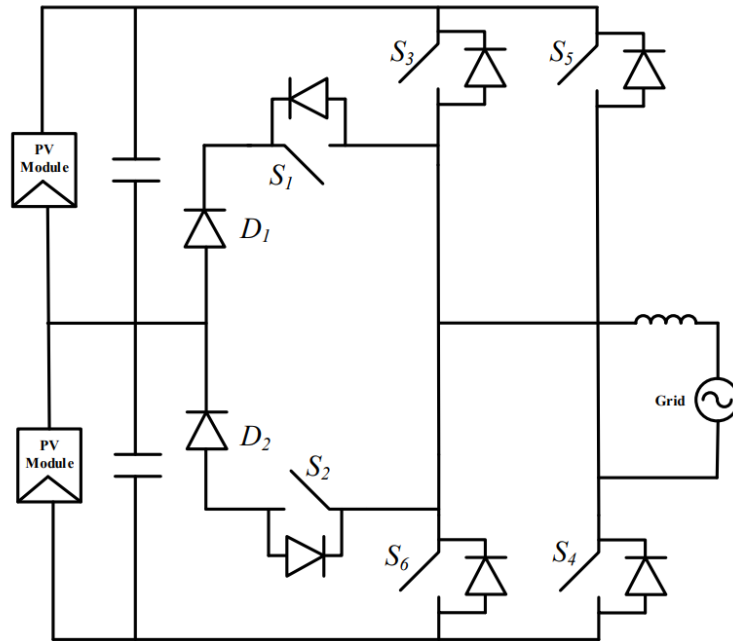
του δικτύου. Το μεσαίο σημείο της φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι γειωμένο και αυτό μειώνει τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και εξαλείφει το χωρητικό ρεύμα γείωσης, που είναι τα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας μετατροπέα.



Σχήμα 2.8: Μετατροπέας τριών επιπέδων συσφιγμένο με δίοδο μισής γέφυρας [39].

### 2.3.3.2. Μετατροπείς Μονής Γέφυρας με Σύσφιξη (Full-Bridge Single Leg Clamped Inverters)

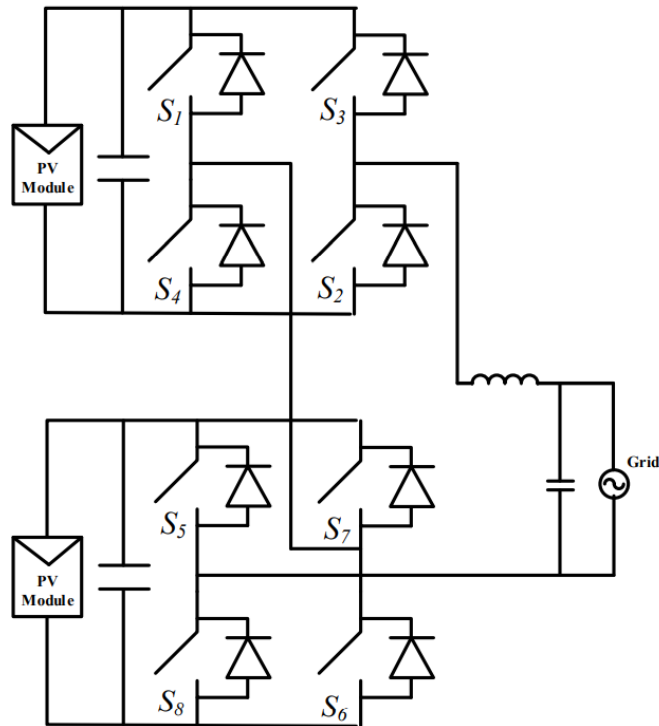
Ένας μετατροπέας μονής σύσφιξης πλήρους γέφυρας για φωτοβολταϊκά συστήματα κατοικιών περιγράφεται στο Σχήμα 2.9 [40]. Εκτός από τους συμβατικούς διακόπτες πλήρους γέφυρας  $S_6$ ,  $S_5$ ,  $S_4$ , και  $S_3$ , αμφίδρομοι διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  μαζί με τις διόδους  $D_1$  και  $D_2$  προστίθενται. Αυτό επιτρέπει τον σωστό έλεγχο του ρεύματος που ρέει προς και από το μέσο του διαύλου DC. Με αυτήν την τοπολογία, το ελάχιστο μέγεθος του μετατροπέα για ένα Φ/Β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή είναι περίπου 1,5 kW.



Σχήμα 2.9: Μετατροπέας σύσφιξης με μονοκόμματο διακόπτη πλήρους γέφυρας [40].

### 2.3.3.3. Διαδοχικοί Μετατροπέες (Cascaded Inverters)

Για τη μετατροπή DC-AC, ένας κλιμακωτός μετατροπέας που χρησιμοποιείται σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο χωρίς μετασχηματιστή απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10 [39]. Αυτή η τοπολογία συνδέει σε σειρά την έξοδο AC δύο διαμορφώσεων πλήρους γέφυρας προκειμένου να αυξήσει τον αριθμό των επιπέδων τάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή κάθε μεμονωμένη γέφυρα μπορεί να παράγει στην έξοδο AC με τρία ανόμοια επίπεδα τάσης. Έτσι, με αποτέλεσμα μια τάση εξόδου AC πέντε επιπέδων χωρίς αποκλεισμούς. Το δομοστοιχειωτό και κλιμακωτό χαρακτηριστικό του κλιμακωτού μετατροπέα είναι τα βασικά πλεονεκτήματα, καθώς μπορεί να επεκταθεί για να επιτύχει ακόμη μεγαλύτερο αριθμό επιπέδων, μόνο με την κλιμάκωση των βασικών μονάδων τριών επιπέδων.



Σχήμα 2.10: Διαδοχικός μετατροπέας [39].

#### 2.3.3.4. Μετατροπείς Μαλακής/Σκληρής Μεταγωγής (Soft/Hard Switching Inverters)

Οι μετατροπείς μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τύπο μεταγωγής που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση αυτή, οι μετατροπείς κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο μεταγωγής που χρησιμοποιείται και όχι με βάση τον αριθμό των σταδίων ισχύος. Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι, οι μετατροπείς σκληρής και μαλακής μεταγωγής. Έτσι, τόσο οι μετατροπείς σκληρής όσο και μαλακής μεταγωγής μπορούν να αποτελούνται από ένα ή περισσότερα από ένα στάδια ισχύος. Σήμερα, οι συνδεδεμένοι στο δίκτυο φωτοβολταϊκοί μετατροπείς σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας την τεχνική soft switching, προκειμένου να επιτυγχάνεται υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση και καλύτερη απόδοση. Τα σοβαρά προβλήματα EMI και οι απώλειες μεταγωγής προκαλούνται από απότομες διακυμάνσεις στα ρεύματα και τις τάσεις του διακόπτη, ειδικά στον μετατροπέα μεταγωγής υψηλής συχνότητας [41]. Αυτή η απότομη εναλλαγή των συσκευών σε τυχαία περίπτωση αναφέρεται ως σκληρή εναλλαγή και επομένως, προκαλεί διάφορα προβλήματα στη διαδικασία μεταγωγής.

Υπάρχουν δύο τύποι ομαλής μεταγωγής: Μεταγωγή Μηδενικής Τάσης - Zero Voltage Switching (ZVS) για μείωση  $dv/dt$  και Μεταγωγή Μηδενικού Ρεύματος - Zero Current Switching (ZCS) για μείωση  $di/dt$ . Δίκτυα συντονισμού υψηλής συχνότητας που βασίζονται σε παθητικά εξαρτήματα όπως η δεξαμενή πυκνωτή-επαγωγέα, οι συσκευές μεταγωγής ισχύος και οι βοηθητικές δίοδοι συνδυάζονται με τα

παραδοσιακά κυκλώματα PWM σκληρής μεταγωγής για να σχηματίσουν την τοπολογία soft-switching.

Οι παραδοσιακές τοπολογίες μετατροπέα buck-boost που βασίζονται σε PWM έχουν πολλά μειονεκτήματα όπως, (α) αρμονικά στοιχεία υψηλής συχνότητας που προκαλούν Electromagnetic Interference - EMI, (β) μεγάλο ρεύμα διαρροής λόγω της εγγενούς τάσης κοινής λειτουργίας υψηλής συχνότητας στους ακροδέκτες εξόδου, (γ) χαμηλή απόδοση σε υψηλή συχνότητα μεταγωγής (δ) αυξάνει το μέγεθος και το βάρος του μετατροπέα εάν έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε χαμηλή συχνότητα μεταγωγής και υψηλή απόδοση. Αυτοί οι περιορισμοί ξεπερνιούνται με τις τεχνικές μαλακής μεταγωγής συντονισμού, η τάση κατά πλάτος ή το ρεύμα μέσω της συσκευής μεταγωγής διασφαλίζεται ότι είναι μηδέν κατά την περίπτωση της μεταγωγής. Αυτό ελαχιστοποιεί τις απώλειες μεταγωγής των συσκευών μεταγωγής ισχύος.

#### 2.4. Αρχιτεκτονικές Φ/Β συστημάτων

Ανάλογα με τον τρόπο που συνδυάζονται οι δομικές μονάδες, τα Φ/Β συστήματα κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις τεχνολογικές τάσεις:

- Κεντριοποιημένη τεχνολογία (Centralized technology)
- Τεχνολογία Αλυσίδας (String technology)
- Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων (Multi-string technology)
- Τεχνολογία Φ/Β Πλαισίων Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC-PV Module technology, ή PV M.I.C.- PV Module Integrated Converter).

Που έγκειται η διαφοροποίηση των παραπάνω τεχνολογικών δομών ;

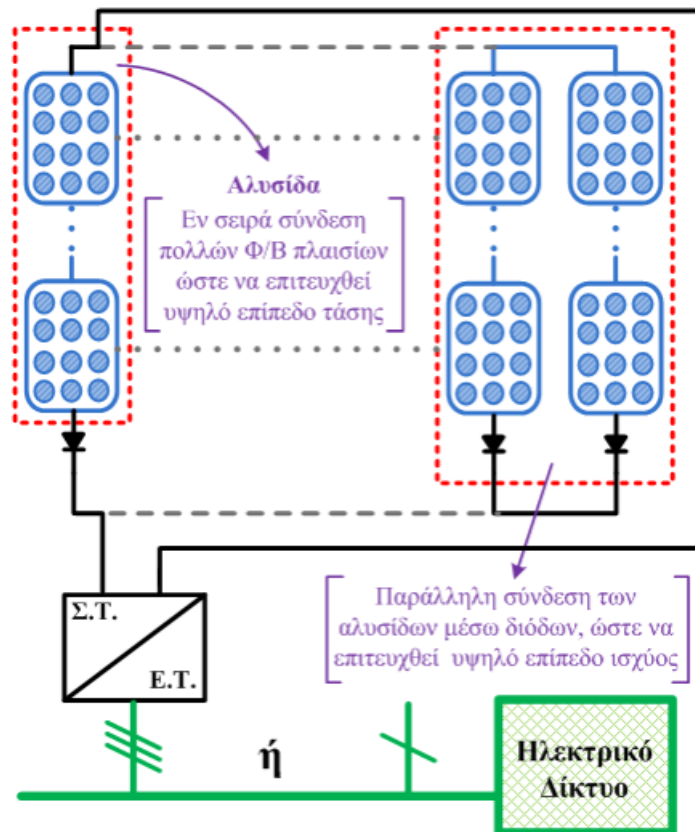
1. Στον αριθμό των Φ/Β πλαισίων που συνδέονται ανά ηλεκτρονικό μετατροπέα (επίπεδο ισχύος του μετατροπέα).
2. Στον τρόπο με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους τα Φ/Β πλαίσια (εν σειρά ή παράλληλη σύνδεση ή και συνδυασμός αυτών).

##### 2.4.1. Κεντριοποιημένη Τεχνολογία

Μια κεντρική διαμόρφωση είναι αυτή στην οποία ένας τεράστιος αριθμός φωτοβολταϊκών μονάδων είναι συνδεδεμένοι σε έναν μεμονωμένο μετατροπέα για να επιτευχθεί μια αρκετά υψηλή τάση. Το επίπεδο ισχύος αντιστροφής φτάνει έως και MW. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα ισχύος 330kW στο Pellworm της Γερμανίας το 1991.

- **Πλεονεκτήματα:** Η Σ.Τ. στα άκρα των αλυσίδων είναι αρκετά μεγάλη και συνεπώς μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε Ε.Τ. με τη χρήση ενός μόνο αντιστροφέα.

- Εξαιρετικά απλή δομή αλλά η αποδοτικότητά της και η οικονομική της βιωσιμότητα αποδυναμώνεται από σημαντικά **μειονεκτήματα**:
  1. Ύπαρξη ενός κεντρικού Μ.Ρ.Ρ.Τ. για το σύνολο των Φ/Β πλαισίων.
  2. Υποχρεωτική χρησιμοποίηση διόδων αντεπιστροφής.
  3. Απώλειες στις διόδους αντεπιστροφής.
  4. Υψηλή τιμή συνεχούς τάσης μεταξύ του Φ/Β πλέγματος και του αντιστροφέα.
  5. Αναπόφευκτη διακοπή του συνόλου της ηλεκτροπαραγωγής σε περιπτώσεις προγραμματισμένης συντήρησης και σε περιπτώσεις αντικατάστασης μέρους του Φ/Β εξοπλισμού.
  6. Αδυναμία μαζικής παραγωγής.



Σχήμα 2.11: Κεντροποιημένη Τεχνολογία [42].

#### 2.4.2. Τεχνολογία Αλυσίδας

Αποτελεί μικρογραφία της κεντροποιημένης τεχνολογίας. Σε αυτή τη διαμόρφωση, δεδομένου ότι κάθε φωτοβολταϊκή στοιχειοσειρά είναι συνδεδεμένη με έναν μεμονωμένο μετατροπέα, δεν υπάρχει χρήση διόδου αποκλεισμού. Εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στον Ευρωπαϊκό χώρο σε ευρεία κλίμακα το 1995, με την εμπορική παραγωγή του αντιστροφέα SWR 700 Sunny Boy της εταιρείας SMA Regelsystem

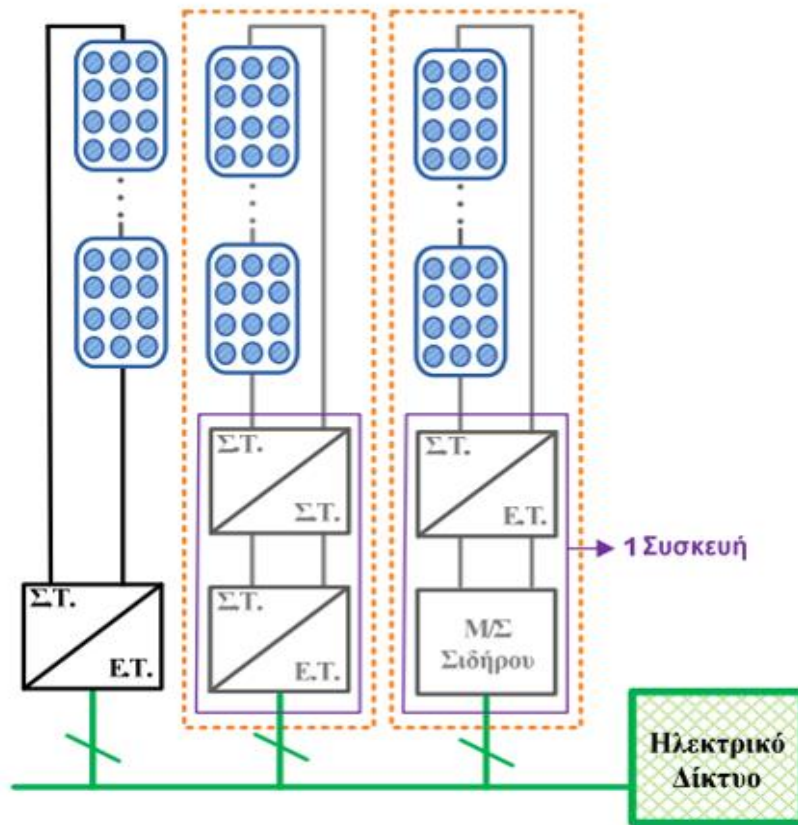
GmbH. Στην είσοδος του μετατροπέα συνδέονται μία ή περισσότερες αλυσίδες και το επίπεδο ισχύος αντιστροφέα κυμαίνεται από 0.7kW έως και 12kW.

- **Πλεονεκτήματα:**

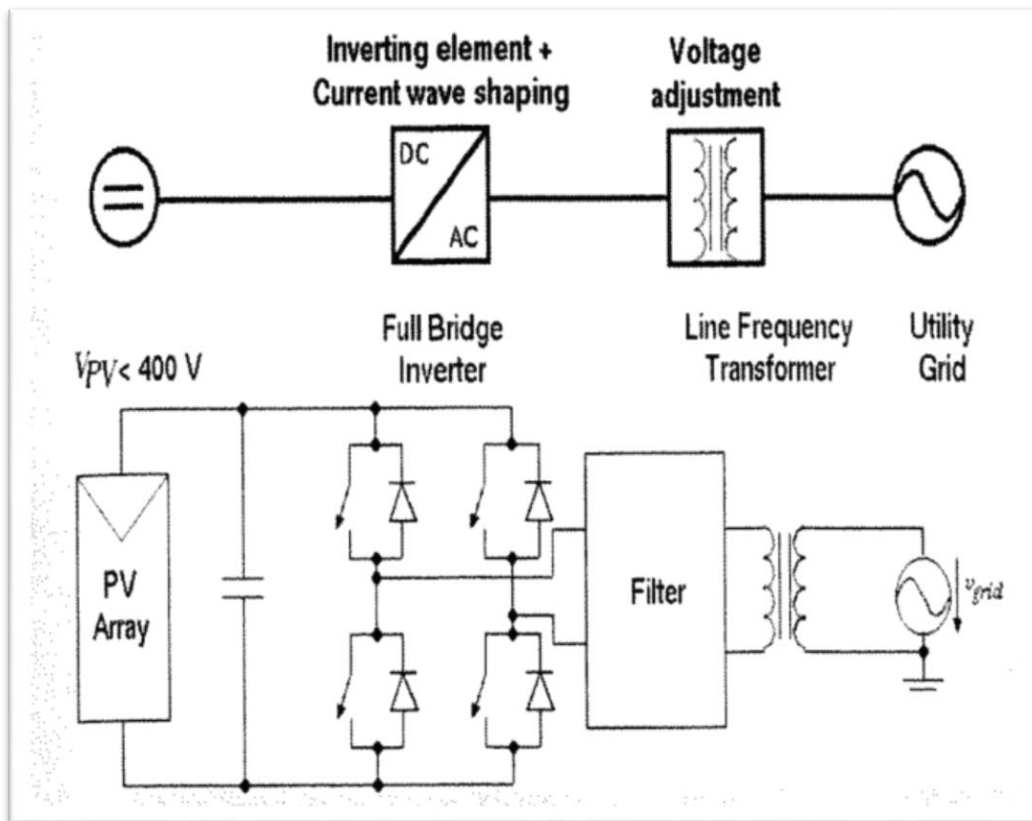
1. Η Σ.Τ. στα άκρα των αλυσίδων είναι αρκετά μεγάλη (συνήθης περίπτωση) και συνεπώς μπορεί να μετατραπεί απευθείας σε Ε.Τ. με τη χρήση ενός μόνο αντιστροφέα. Σε αντίθετη περίπτωση η χρησιμοποίηση ενός μετατροπέα ανύψωσης Σ.Τ. σε Σ.Τ ή ενός χαμηλόσυχνου Μ/Σ είναι αναπόφευκτη.
2. Κατάλληλη για αστικά κέντρα: Δυνατότητα προσαρμογής σε μικρότερου μεγέθους επιφάνειες (συγκριτικά με την κεντροκοποιημένη δομή), με αντίστοιχο βέβαια περιορισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Η παράλληλη λειτουργία πολλών Φ/Β συστημάτων τεχνολογίας Αλυσίδας επιτρέπει την παραγωγή μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Δεν υπάρχουν δίοδοι αντεπιστροφής. (περίπτωση: 1 αλυσίδα/μετατροπέα)
5. Έλεγχος μικρότερου αριθμού Φ/Β πλαισίων από τον χρησιμοποιούμενο Μ.Ρ.Ρ.Τ.
6. Μερική μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε περιπτώσεις βλάβης.
7. Οι υπόλοιπες αλυσίδες συνεχίζουν να λειτουργούν. Δυνατότητας μαζικής παραγωγής.

- **Μειονεκτήματα:**

1. Υψηλή τιμή συνεχούς τάσης μεταξύ του Φ /Β πλέγματος και του αντιστροφέα.
2. Ύπαρξη ενός Μ.Ρ.Ρ.Τ. για το σύνολο των Φ /Β πλαισίων μιας αλυσίδας οδηγεί σε σημαντική μείωση της παραγωγής σε περιπτώσεις ανομοιόμορφης σκίασης.
3. Μειωμένη απόδοση του συστήματος λόγω της πιθανής χρησιμοποίησης δύο εν σειρά συνδεδεμένων μετατροπέων.
4. Πιθανή χρησιμοποίηση διόδων αντεπιστροφής.



Σχήμα 2.12: Τεχνολογία Αλυσίδας .[42]



Σχήμα 2.13: Μονοφασικός αντιστροφέας ρωτη με Μ/Σ ανύψωσης τάσης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τεχνολογίας αλυσίδας [42].

### 2.4.3. Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων

Αποτελεί την αρτιότερη πρόταση για την παραγωγή σημαντικών ποσών ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β συστήματα μεγάλης κλίμακας. Εφαρμόζεται και σε μεγάλα κτιριακά Φ/Β συστήματα την τελευταία δεκαετία. Διαθέτει πολλούς ανεξάρτητους μετατροπείς Σ.Τ. σε Σ.Τ, καθένας εκ των οποίων εμπεριέχει το δικό του Μ.Ρ.Ρ.Τ. Η είσοδος κάθε μετατροπέα Σ.Τ. συνδέεται με μια ανεξάρτητη “αλυσίδα”, ενώ οι έξοδοι τους συνδέονται σε ένα μόνο κεντρικό αντιστροφέα. Υπάρχει δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογης τάξης με αυτή της Κεντροκοποιημένης δομής συνδυάζοντας ταυτόχρονα τα πλεονεκτήματα των συστημάτων τεχνολογίας Αλυσίδας.

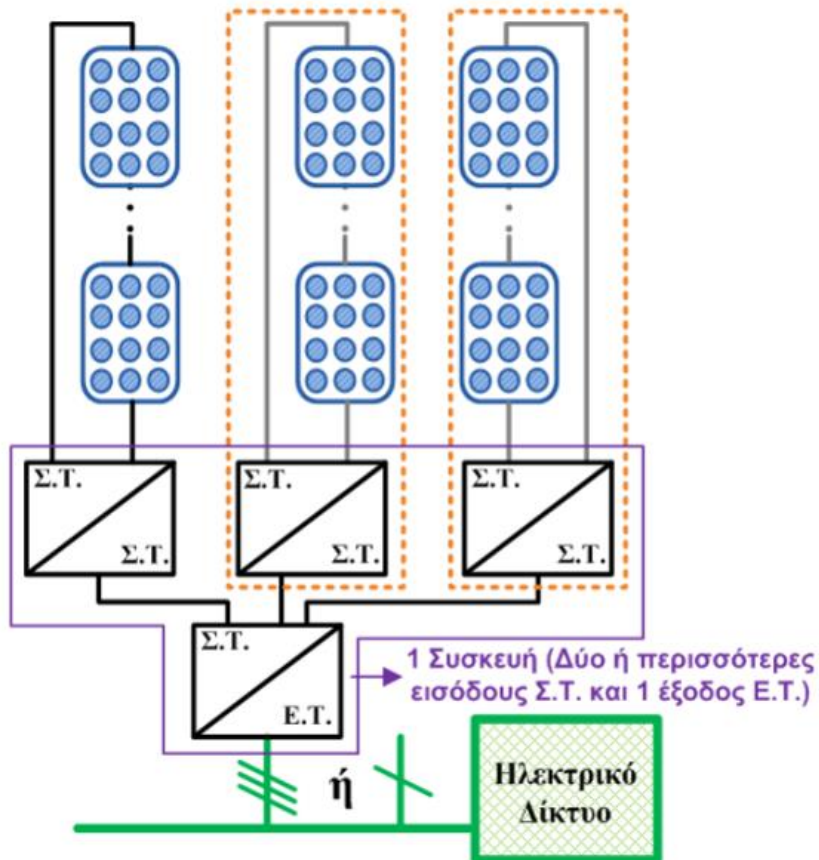
- **Πλεονεκτήματα:**

1. Άρτια συνεργασία μεταξύ ανεξάρτητων αλυσίδων οι οποίες μπορεί να απαρτίζονται τόσο από διαφορετικό αριθμό Φ/Β πλαισίων, όσο και από Φ/Β πλαίσια διαφορετικής τεχνολογίας.
2. Η παράλληλη λειτουργία αλυσίδων διαφορετικού προσανατολισμού ή με διαφορετικές συνθήκες σκίασης δεν δυσχεραίνουν την παραγωγικότητα του όλου συστήματος. Κάθε αλυσίδα δουλεύει στο δικό της σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος.
3. Η χρησιμοποίηση πολλών ανεξάρτητων αυτοτελών αλυσίδων περιορίζει τον κίνδυνο ολικής διακοπής της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας, σε περίπτωση που εμφανιστεί βλάβη σε κάποιες από αυτές.

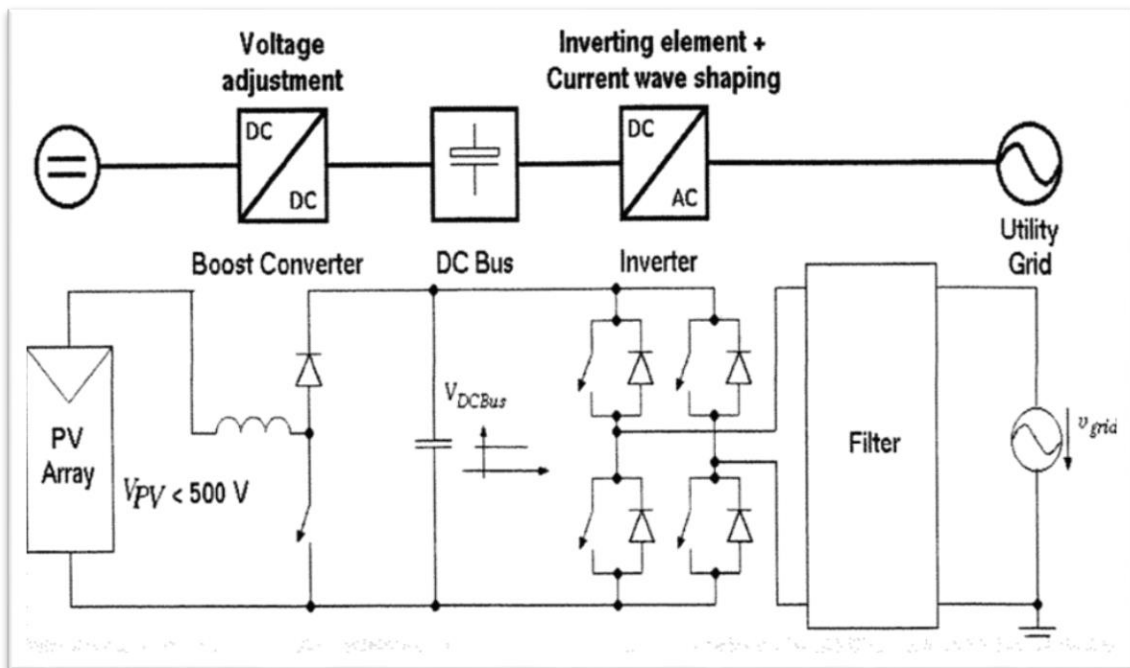
- **Μειονεκτήματα:**

1. Πιθανή υψηλή τιμή συνεχούς τάσης μεταξύ του Φ/Β πλέγματος και του αντιστροφέα.
2. Η ύπαρξη ενός μόνο “κεντρικού” αντιστροφέα οδηγεί σε διακοπή της ηλεκτροπαραγωγικής διαδικασίας στην περίπτωση που ο ίδιος παρουσιάσει βλάβη.
3. Πιθανή υψηλή τιμή συνεχούς τάσης μεταξύ του Φ/Β πλέγματος και του αντιστροφέα.





Σχήμα 2.14: Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων [42].



Σχήμα 2.15: Μονοφασικός αντιστροφέας *srwt* με μετατροπέα αύξησης τάσης. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές τεχνολογίας πολλαπλών αλυσίδων [42].

#### 2.4.4. Τεχνολογία Φ/Β Πλαισίων E.P.

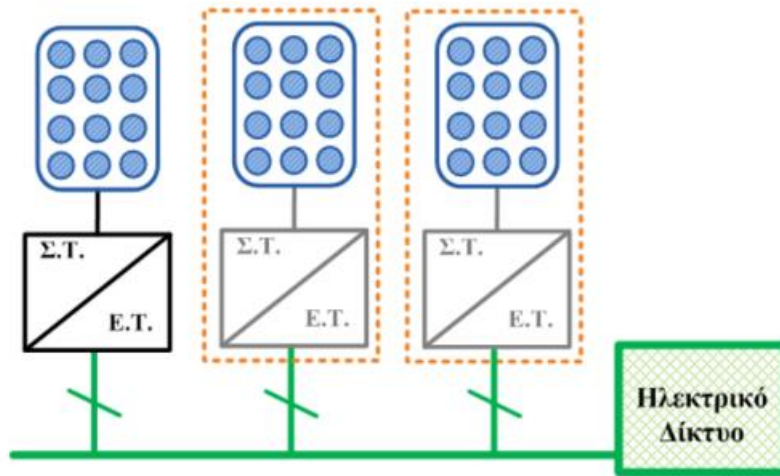
Αποτελείται από Φ/Β διατάξεις μικρής ισχύος (έως 300W), οι οποίες δημιουργούνται από την ενσωμάτωση ενός μόνο Φ/Β πλαισίου και ενός μονοφασικού αντιστροφέα σε μια αυτοτελή ηλεκτρονική διάταξη. Η παράλληλη λειτουργία πολλών αυτοτελών μονάδων επιτρέπει την παραγωγή μεγαλύτερων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Πλεονεκτήματα:**

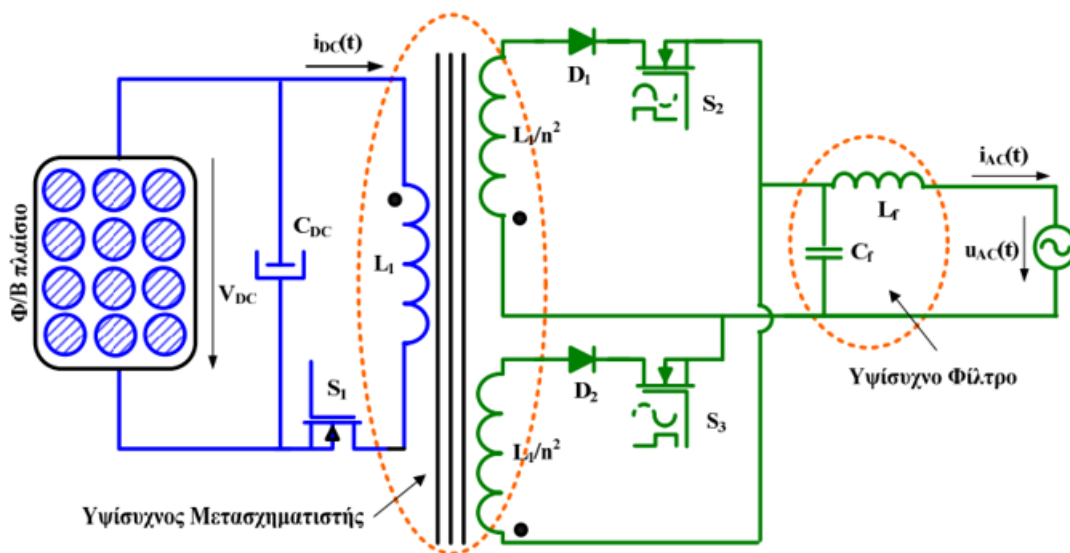
1. Η σύνδεση ενός μόνο Φ/Β πλαισίου ανά μετατροπέα επιτρέπει το βέλτιστο έλεγχο της φωτογεννήτριας από τον Μ.Ρ.Ρ.Τ., οδηγώντας έτσι σε μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας της κάτω από οποιοσδήποτε περιβαλλοντολογικές συνθήκες.
2. Δυνατότητα μαζικής παραγωγής.
3. Χαμηλή τιμή τάσης διασύνδεσης πλαισίου -μονοφασικού αντιστροφέα.
4. Υψηλή αξιοπιστία: ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος ολικής απώλειας της ηλεκτροπαραγωγής σε περιπτώσεις προγραμματισμένης συντήρησης ή εμφάνισης βλαβών.
5. Δημιουργία μικρών και ευέλικτων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, οι οποίες μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν τόσο σε μικρές κατοικίες, όσο και σε μεγάλα εμπορικά ή δημοσία κτίρια.
6. Δεν απαιτείται η εφαρμογή ειδικών τεχνικών γειώσεως ούτε η τοποθέτηση ειδικών συστημάτων προστασίας.
7. Προσιτή λύση για το ευρύ κοινό, που δεν έχει ιδιαίτερη εξοικείωση με τις ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις “plug-and-play device”.

- **Μειονεκτήματα:**

1. Έκθεση του μετατροπέα σε μεγάλες θερμοκρασίες, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, γεγονός που μπορεί να επιφέρει μείωση του προσδόκιμου της διάρκεια ζωής του.
2. Θερμική καταπόνηση των Φ/Β πλαισίων.
3. Ανάγκη ανύψωσης της τάσης του Φ/Β πλαισίου.
4. Υψηλό κόστος για μεγάλα Φ/Β συστήματα.



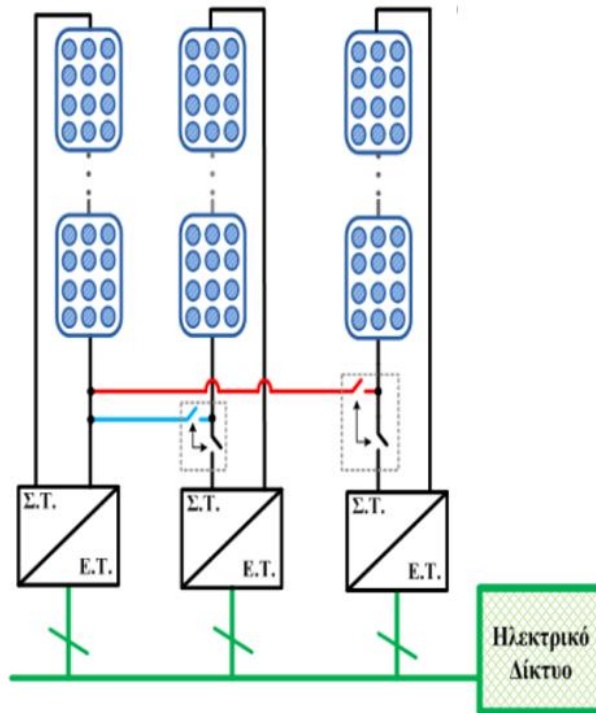
Σχήμα 2.16: Τεχνολογία Φ/Β Πλαισίων E.P. [42]



Σχήμα 2.17: Αντιστροφείας Ρεύματος τοπολογίας Flyback (Flyback Current Source Inverter, CSI-Flyback). - Χρησιμοποιείται σε AC-PV Modules [42].

#### 2.4.5. Τεχνολογία Παράλληλων Αλυσίδων Λογικής “Master” & “Slave”

Στόχος της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η λειτουργία των μετατροπών στο ονομαστικό τους σημείο λειτουργίας. Σε συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας το σύνολο των Φ/Β πλαισίων συνδέεται μόνο σε ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα. Στην περίπτωση αυξανόμενης της ηλιοφάνειας το σύνολο των Φ/Β πλαισίων μοιράζεται σταδιακά και στους υπόλοιπους μετατροπείς. Τα μειονεκτήματα είναι ο πολύπλοκος σχεδιασμός και η επικοινωνία μεταξύ των μετατροπών.



Σχήμα 2.18: Τεχνολογία Παράλληλων Αλυσίδων Λογικής “Master” & “Slave” [42].

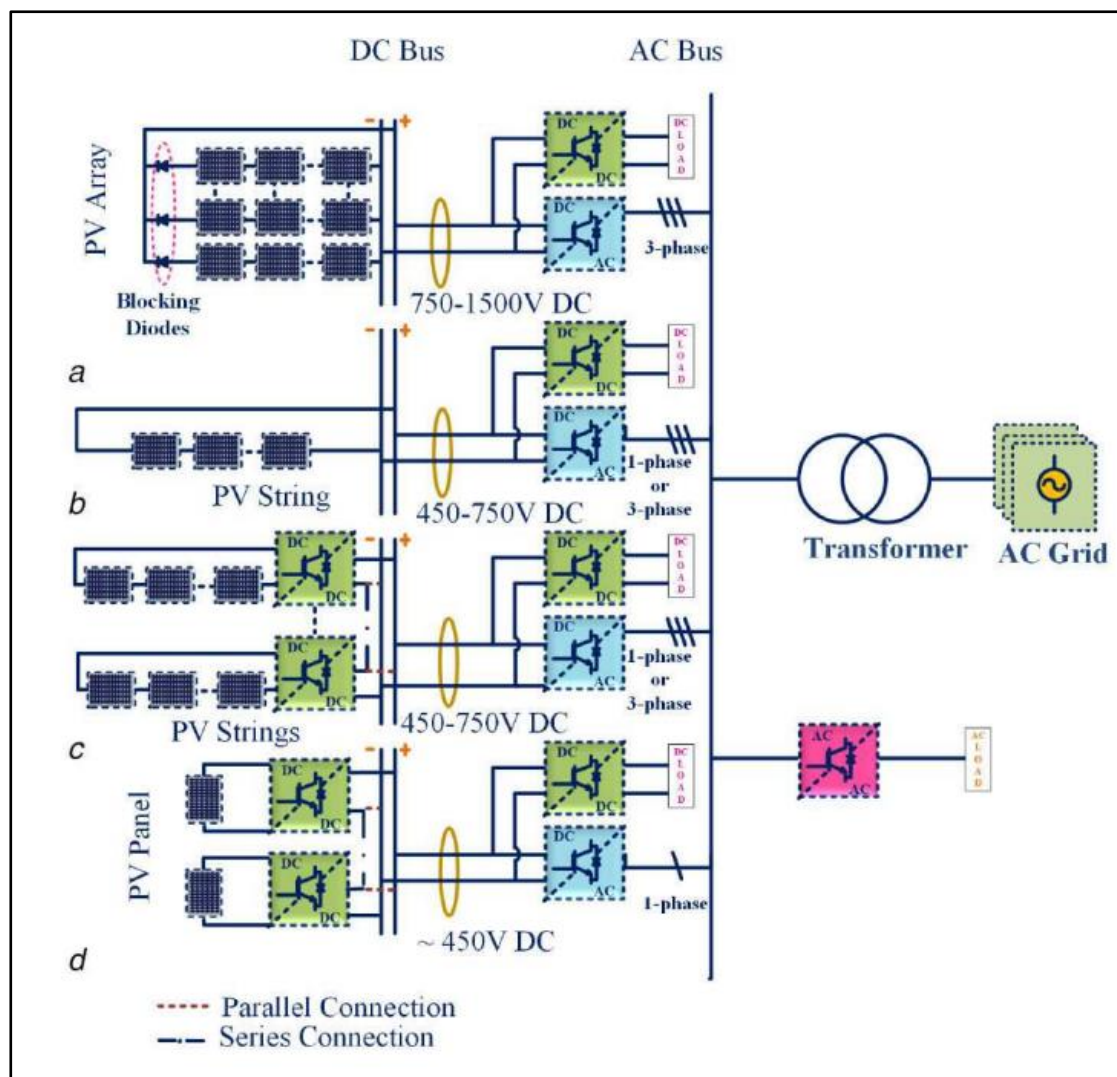
## 2.5. Τύποι Φωτοβολταϊκών Μετατροπέων

Ο μετατροπέας είναι ένα από τα βασικά μέρη ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο. Οι μετατροπείς ταξινομούνται με βάση την τοπολογία διαμόρφωσης, το μέγεθος ή τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι ζωτικές εργασίες του μετατροπέα περιλαμβάνουν μετατροπή χαμηλών απωλειών, βελτιστοποίηση ισχύος, παρακολούθηση και ασφάλιση, διαχείριση θερμοκρασίας και προστασία. Για την εφαρμογή της ολοκλήρωσης δικτύου διατίθενται πρακτικά δύο τύποι φωτοβολταϊκών μετατροπέων, δηλαδή με μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή. Κάθε ένα από αυτά έχει τα υπέρ και τα κατά του. Έτσι, για την ενοποίηση του δικτύου και του φωτοβολταϊκού συστήματος, το Φ/Β σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί σύμφωνα με τις απαιτούμενες ιδιότητες ως εξής [43]:

- Μονοστάδιο/πολυστάδιο.
- Χρήση πυκνωτών αποσύνδεσης.
- Αν υπάρχει απομόνωση ή όχι.
- Αν ένας μετατροπέας χρησιμοποιείται για μονοφασικό ή τριφασικό.
- Με/χωρίς χρήση μετατροπέα DC–DC.

## 2.6. Τοπολογίες Φωτοβολταϊκών Μετατροπών Βασισμένες στην Αρχιτεκτονική

Οι τοπολογίες φωτοβολταϊκών μετατροπών ταξινομούνται με βάση τη σύνδεσή τους ή τη διάταξη των φωτοβολταϊκών μονάδων ως αρχιτεκτονικές φωτοβολταϊκών συστημάτων που φαίνονται στο Σχήμα 2.19.



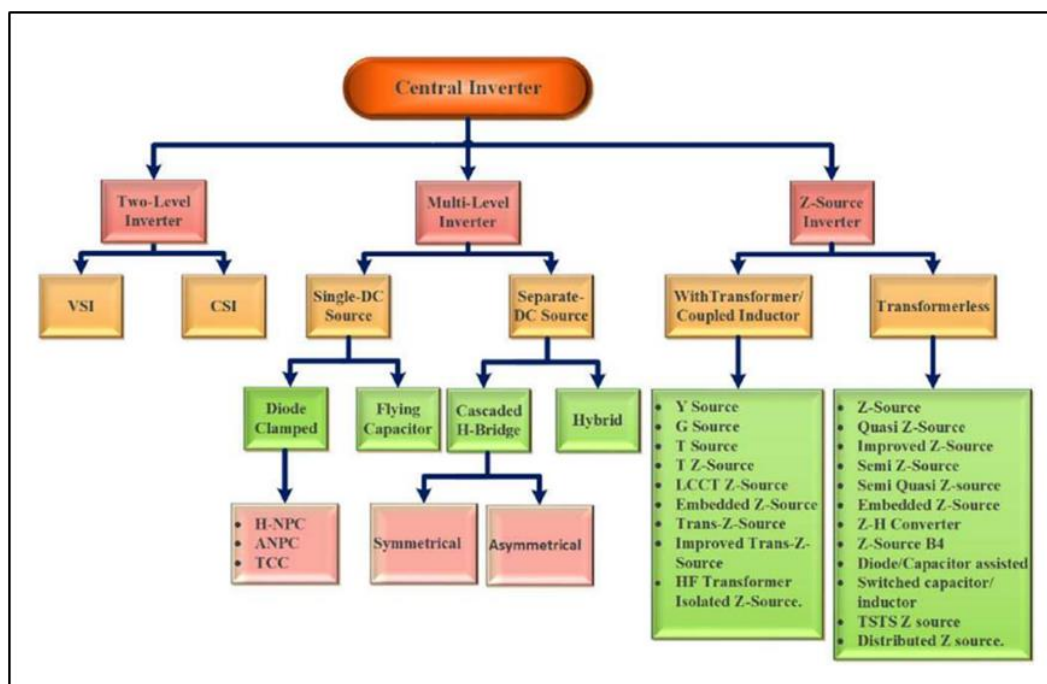
Σχήμα 2.19: Αρχιτεκτονικές ενός φωτοβολταϊκού συστήματος με βάση την ικανότητα διαχείρισης ισχύος (a) Κεντρικός Φ/Β μετατροπέας, (b) Φ/Β μετατροπέας σειράς, (c) Φ/Β μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών, (d) Φ/Β μετατροπέας μονάδας AC [43].

Στη βιβλιογραφία, διατίθενται διάφοροι τύποι τοπολογιών φωτοβολταϊκών μετατροπών συνδεδεμένων στο δίκτυο, τόσο μονοφασικοί όσο και τριφασικοί, οι οποίοι είναι ως εξής:

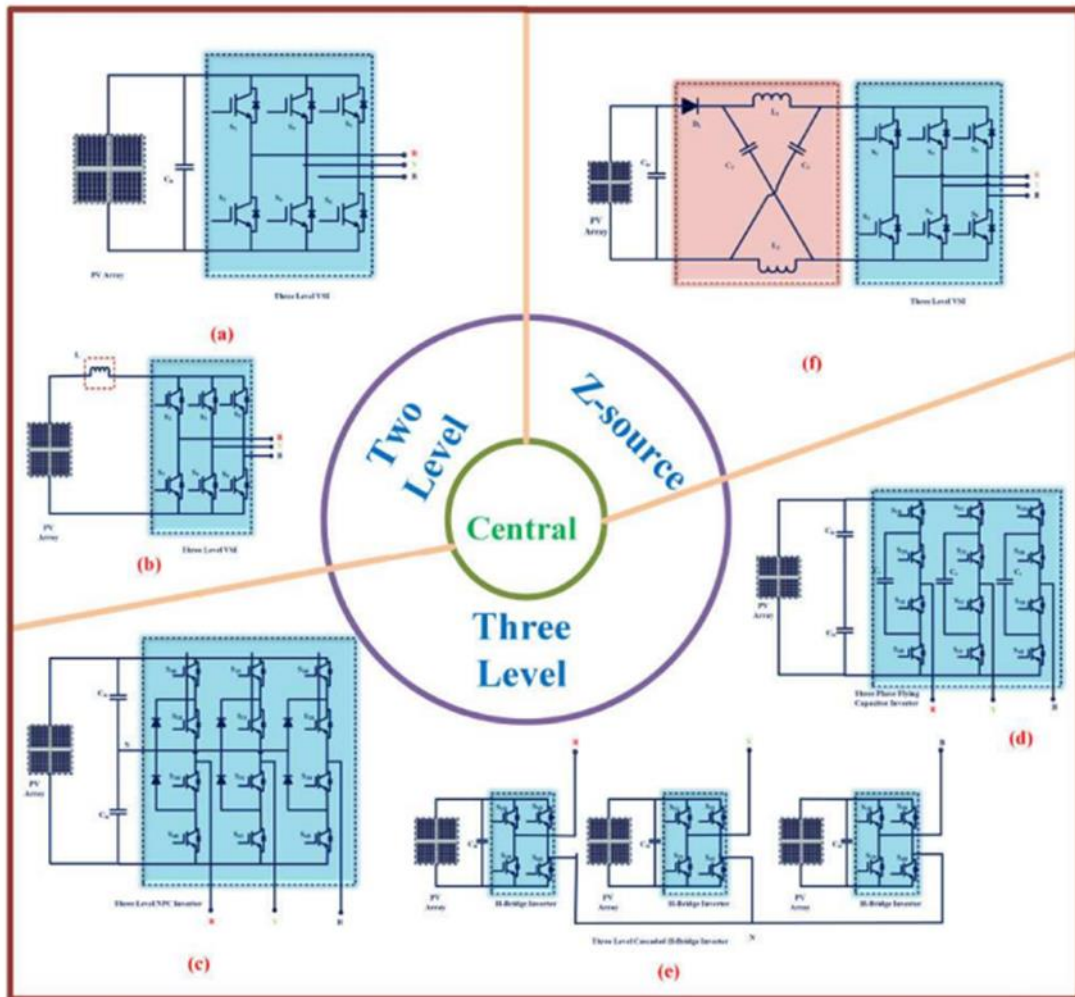
### 2.6.1. Κεντρικός Μετατροπέας

Σε μεγάλης κλίμακας συστήματα μετατροπής ισχύος Φ/Β, χρησιμοποιούνται κεντρικοί μετατροπείς που κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες κιλοβάτ έως μερικά

μεγαβάτ. Στο κουτί διακλάδωσης της γεννήτριας, οι στοιχειοσειρές φωτοβολταϊκών συνδέονται στο P χρησιμοποιώντας διόδους στοιχειοσειράς, απομονωτές και ασφάλειες για να μπλοκάρουν το αντίστροφο ρεύμα και να απομονώνουν τις στοιχειοσειρές όταν χρειάζεται. Μαζί με την ενσωμάτωση της Φ/Β γεννήτριας στο δίκτυο, ο κεντρικός μετατροπέας εκτελεί την καθολική λειτουργία MPPT. Πολύπλοκες εργασίες ελέγχου, όπως η ανίχνευση νησίδας, πρέπει να γίνονται από το σύστημα ελέγχου ενός κεντρικού μετατροπέα. Με τη χρήση ενός καλωδίου DC υψηλής τάσης και ενός ογκώδους πυκνωτή υψηλότερης βαθμολογίας στους ακροδέκτες εισόδου και εξόδου, αυξάνεται η απώλεια ασυμφωνίας μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονός που επηρεάζει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του μετατροπέα [43]



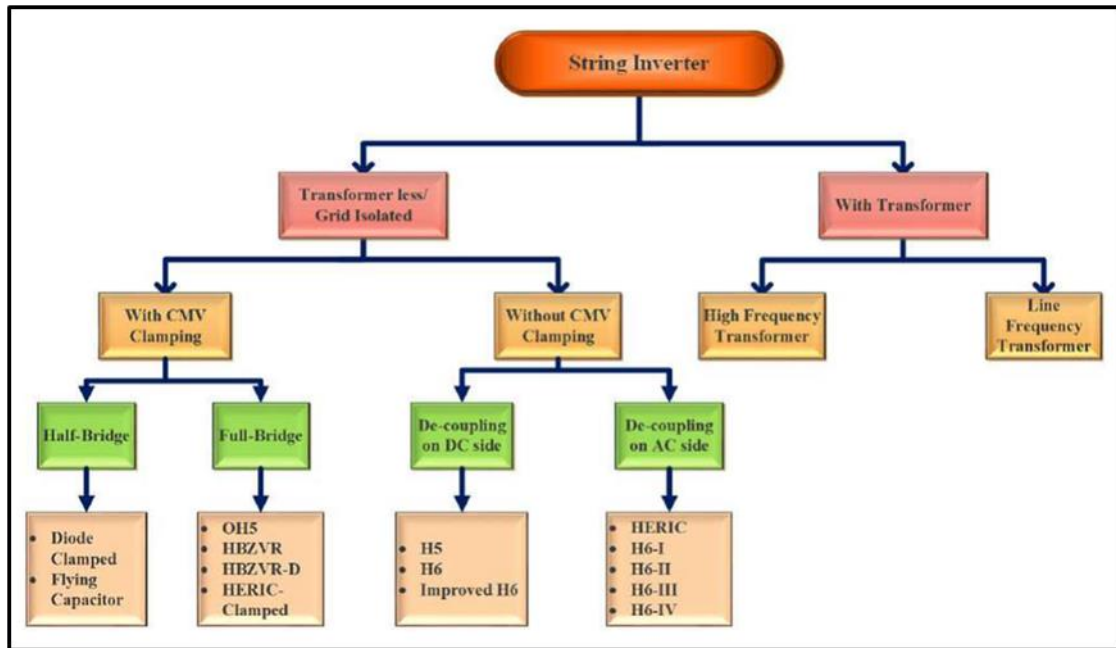
Εικόνα 2.1: Ταξινόμηση Φ/Β κεντρικού μετατροπέα [43].



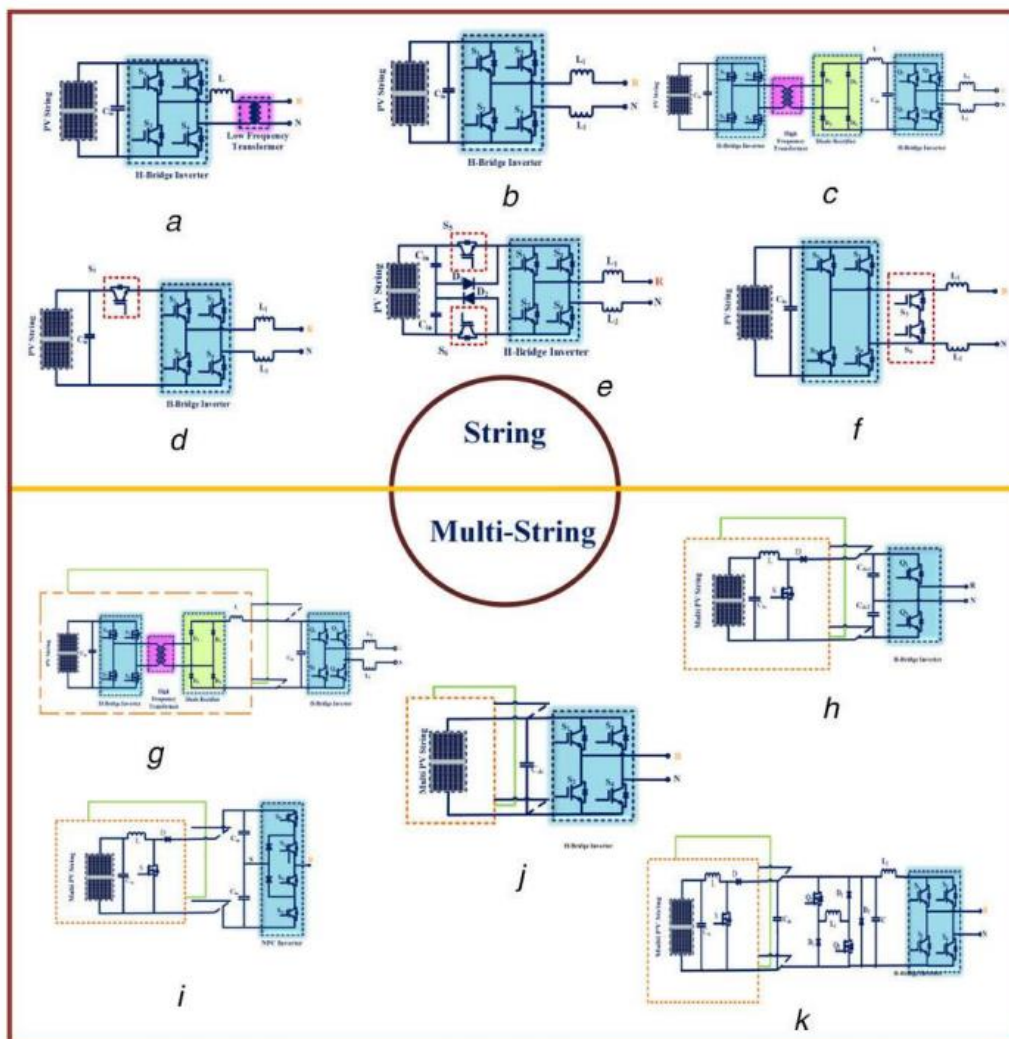
Εικόνα 2.2: Τοπολογίες κεντρικών μετατροπέων (a) VSI, (b) CSI, (c) NPC, (d) Flying πυκνωτής, (e) Cascaded H-bridge και, (f) Z- πηγή [43].

## 2.6.2. Μετατροπέας Στοιχειοσειρών

Πολλές φωτοβολταϊκές μονάδες είναι συνδεδεμένες σε S έως και 2–3 kW σε διαμόρφωση βασισμένη σε στοιχειοσειρά. Το εύρος τάσης αυτής της φωτοβολταϊκής στοιχειοσειράς κυμαίνεται μεταξύ 150 και 450 V. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς στοιχειοσειρών είναι οι μετατροπείς H-bridge ή full-bridge. Πολλές τοπολογίες κυκλοφόρησαν στην αγορά με την πρόοδο και τη βελτίωση των προαναφερθέντων μετατροπέων [44] και η ταξινόμησή τους είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Ταξινόμηση μετατροπών φωτοβολταϊκών στοιχειοσειρών [43].



Εικόνα 2.4: Τοπολογίες για χρήση μετατροπέα στοιχειοσειρών (α)Χαμηλής συχνότητας  $T/f$ , (b)H4, (c)Υψηλή συχνότητα  $T/f$ , (d)H5, (e)H6, (f)HERIC και μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών με χρήση, (g)Υψηλή συχνότητα



*T/f,(h)VSI που βασίζεται σε Boost,(i)NPC τριών επιπέδων με βάση ενίσχυση,(j) H-γέφυρα,(k) Μη απομονωμένη ώθηση σε δύο στάδια [43].*

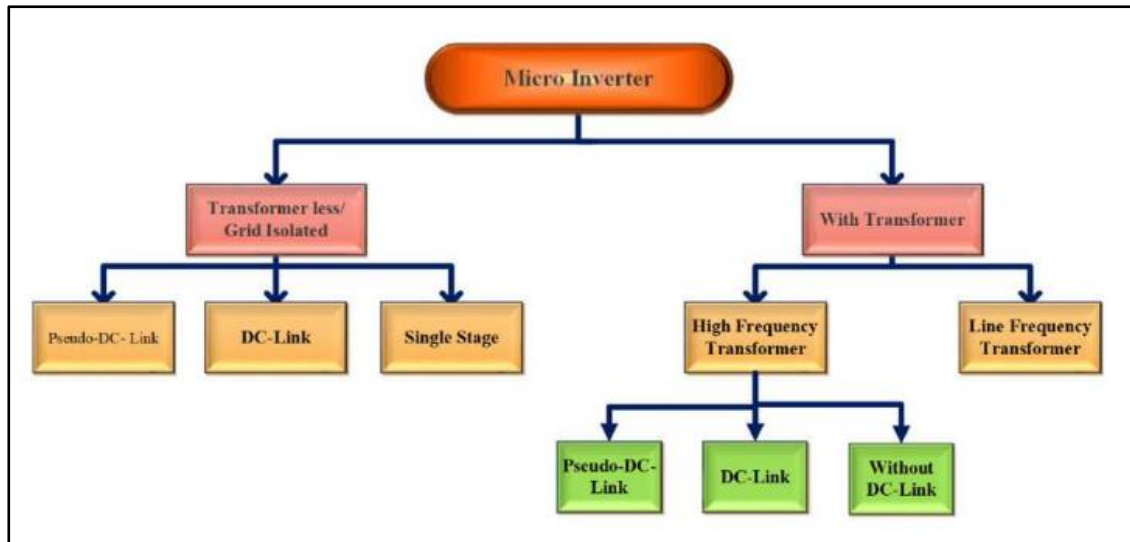
### 2.6.3. Μετατροπέας Πολλαπλών Στοιχειοσειρών

Ένα σύστημα μετατροπέα πολλαπλών στοιχειοσειρών έχει τα πλεονεκτήματα τόσο του μερικώς κατανεμημένου MPP (string) όσο και του μειωμένου αριθμού μετατροπέων (κεντρικός). Πολλές φωτοβολταϊκές στοιχειοσειρές συνδέονται στο συγκεκριμένο DC–DC και στη συνέχεια συνδέονται με έναν μετατροπέα που ονομάζεται μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών.

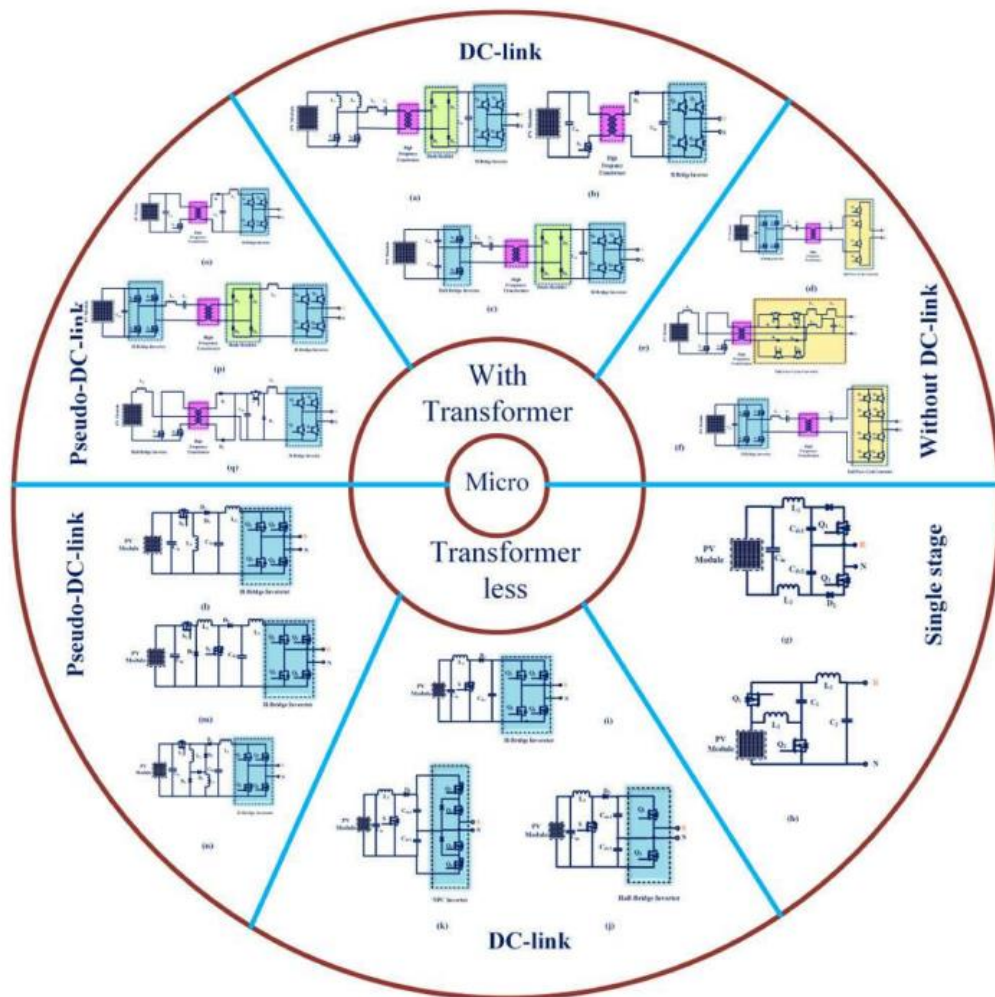
Ο βασικός μετατροπέας πολλαπλών στοιχειοσειρών είναι με γαλβανική απομόνωση που παρέχεται από μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας (High Frequency - HF) [45] όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 (g). Αυτή η δομή έχει το πλεονέκτημα ότι έχει ένα ευρύ φάσμα τάσεων εισόδου και τα μειονεκτήματα όπως μια πολύπλοκη στρατηγική ελέγχου και σχετικά υψηλές απώλειες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 (h), μια τοπολογία μετατροπέα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα ενίσχυσης [46] που εκτελεί τόσο ενισχυτική τάση εισόδου όσο και MPPT έχει μια απλή δομή και έλεγχο. Ένα VSI δύο επιπέδων συνδέεται μετά τον μετατροπέα DC– DC για να γίνει η λειτουργία αντιστροφής και στη συνέχεια συνδέεται στο δίκτυο. Για να μειωθεί η πίεση στους διακόπτες και να βελτιωθεί το σχήμα της κυματομορφής της τάσης εξόδου, το προαναφερθέν VSI μπορεί να αντικατασταθεί με έναν μετατροπέα NPC τριών επιπέδων [47] όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 (i).

### 2.6.4. Micro-Inverter

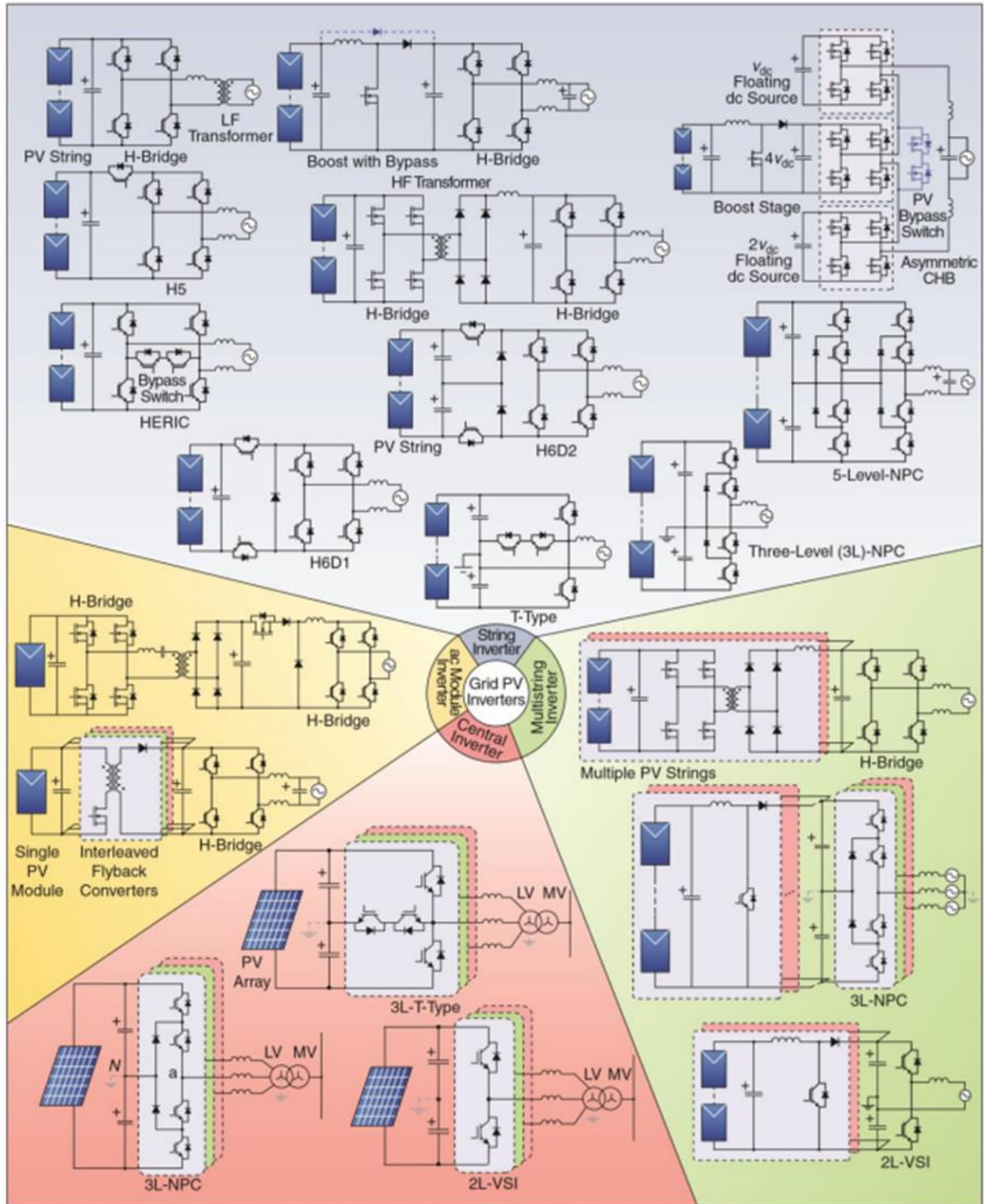
Τα χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού συστήματος microinverter βρέθηκαν ότι είναι καλύτερα από άλλες αρχιτεκτονικές φωτοβολταϊκών συστημάτων. Έτσι, σε αυτή την εργασία, έγινε μια διαφορετική ταξινόμηση τοπολογίας μετατροπέα. Για τη σύνδεση της Φ/Β μονάδας/κυψέλης με το δίκτυο, οι ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος του μικρο-μετατροπέα θα πρέπει να είναι συμβατές με τη σχετική φωτοβολταϊκή μονάδα και το δίκτυο. Για να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των μετατροπέων ισχύος, η Hpec-sys έχει τροποποιήσει ελαφρώς τη βασική διαμόρφωση του μετατροπέα χρησιμοποιώντας έναν «μικρο-μετατροπέα διπλού μετατροπέα» για να ενσωματώσει δύο συνδεδεμένες με PV μονάδες στο δίκτυο κοινής ωφέλειας χρησιμοποιώντας έναν μόνο μετατροπέα ισχύος [47]. Σε χώρες όπου δεν υπάρχει αυστηρός κανονισμός για την απομόνωση φορτίου και τα ρεύματα διαρροής γείωσης, ο μετατροπέας χωρίς μετασχηματιστή έχει την υψηλότερη απόδοση και πυκνότητα ισχύος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Για να συνεχίσει να αυξάνεται η απόδοση, χρησιμοποιείται η αξιοπιστία ενός μικρο-μετατροπέα DC-link. Έτσι, η περαιτέρω ταξινόμηση γίνεται με χρήση κυρίαρχης ρίζας, δηλαδή DC link. Όλες αυτές οι ταξινομήσεις τοπολογιών παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.5 και οι αντίστοιχες τοπολογίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.5: Ταξινόμηση μικρο-μετατροπέων [43].



Εικόνα 2.6: a) Push-pull, b) Fly-back, c) Half-bridge, d) Half-wave, e) και f) Full-wave cyclo-converters, g) Differential-mode operation, h) Quasi-Z-source, i) Full-bridge, j) Half-bridge, k) Three-level converters, l) Buck-boost, m) Two switch buck-boost, n) Switched inductor, o) Fly-back, p) Full-bridge, q) Push-pull [43].

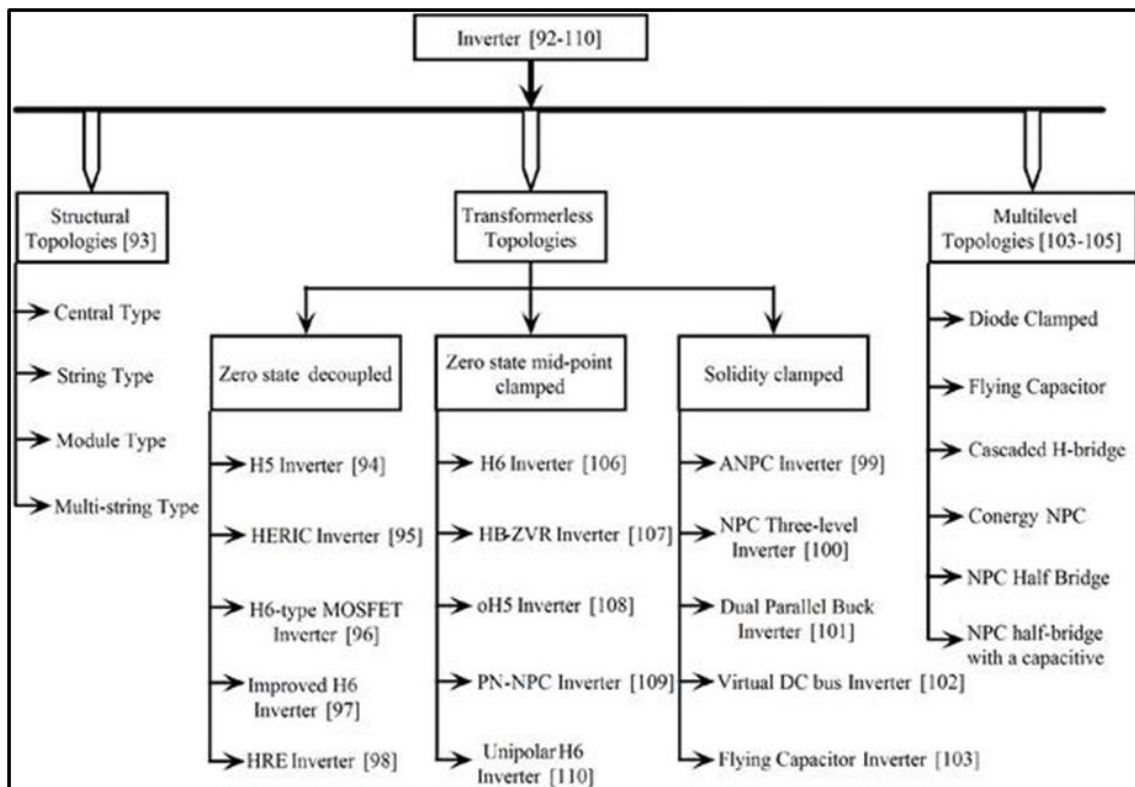


Εικόνα 2.7: Βιομηχανικές τοπολογίες μετατροπέα για διαμόρφωση μονάδας String, Multistring, Central και ac. (2L-VSI: μετατροπέας τάσης-πηγής δύο επιπέδων· MV: μέση τάση) [48]

## 2.7. Ταξινόμηση μετατροπέων σύνδεσης δικτύου (grid tie Inverters)

Οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες. δομική τοπολογία, τοπολογία χωρίς μετασχηματιστή και τοπολογία πολλαπλών επιπέδων όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Οι δομικές τοπολογίες ταξινομούνται περαιτέρω ως: κεντρικός τύπος, τύπος συμβολοσειράς, τύπος ενότητας και τύπος πολλαπλών χορδών. Ο κεντρικός μετατροπέας χρησιμοποιήθηκε

για εφαρμογές μέσης τάσης συνδυάζοντας σειρές και παράλληλες σειρές. Έχουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως μεγάλες απώλειες ισχύος λόγω του MPPT κώνου για πλήρη χορδή, κακή ποιότητα ισχύος και υψηλό κόστος. Οι μετατροπείς τύπου στοιχειοσειράς είναι πιο χρήσιμοι επειδή η τάση ενισχύεται από τη σειριακή σύνδεση των μετατροπέων σε μία στοιχειοσειρά. Οι μετατροπείς στοιχειοσειρών μπορούν να έχουν μεμονωμένα MPPT για κάθε μετατροπέα, έτσι ώστε να μπορούν να περιοριστούν οι απώλειες. Οι διαμορφωμένοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη μονάδα εναλλασσόμενου ρεύματος που κατασκευάζεται από ένα μόνο ηλιακό πάνελ. Το πρόβλημα ασυμφωνίας εξαλείφεται αλλά το κόστος εγκατάστασης αυξάνεται, γεγονός που μειώνει τη συνολική απόδοση. Τέλος, οι μετατροπείς πολλαπλών στοιχειοσειρών εμφανίστηκαν ως συνδυασμός όλων των πλεονεκτημάτων. Η μία χορδή είναι ένας συνδυασμός πολλών ηλιακών συλλεκτών που συνδέονται σε σειρά και συνδέονται με μετατροπέα DC-DC. Κάθε πίνακας σε μια συμβολοσειρά ελέγχεται από ξεχωριστό MPPT, έτσι ώστε κάθε ενότητα να μπορεί να λειτουργεί ξεχωριστά.



Εικόνα 2.8: Ταξινόμηση τοπολογιών μετατροπέων [49].

Οι φωτοβολταϊκοί μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες. Οι τοπολογίες χωρίς μετασχηματιστές ταξινομούνται περαιτέρω σε τρεις κατηγορίες με βάση τα χαρακτηριστικά του ρεύματος διαρροής και τις τεχνικές αποσύνδεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8 [49]. Οι αντιστροφείς με αποσύζευξη μηδενικής κατάστασης εξασφαλίζουν την αποσύζευξη του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια της περιόδου αποδέσμευσης. Και οι αντιστροφείς εκείνοι που εκτελούν αποσύζευξη και που συνδέονται με το μέσο σημείο του DC-συνδέσμου

έρχεται υπό μηδενική κατάσταση μέσου σημείου σφιγμένου. Ωστόσο, η στερεά σύσφιξη κατηγοριοποιείται χωριστά.

### 2.7.1. Απαίτηση του Grid-Tied PV System

Το συνδεδεμένο με το δίκτυο σύστημα πρέπει να εκτελέσει δύο σημαντικές εργασίες: (1) παρακολούθηση της μέγιστης ισχύος από τα ηλιακά πάνελ με τη βοήθεια κατάλληλου μετατροπέα MPP και (2) η τάση στο PCC πρέπει να είναι ημιτονοειδής και στο ίδιο επίπεδο με την τάση του δικτύου. Ορισμένα specific πρότυπα παρέχονται από τις διάφορες διεθνείς εταιρείες για τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ενέργειας σε όλο τον κόσμο.

Το πρότυπο IEEE 1547 επιβάλλει ορισμένα όρια για το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στο δίκτυο. Το όριο είναι πολύ μικρό (<0,5% του ονομαστικού ρεύματος) και μπορεί να βελτιωθεί με γαλβανική απομόνωση μεταξύ του φωτοβολταϊκού συστήματος και του δικτύου. Αλλά στην περίπτωση των μετατροπέων χωρίς μετασχηματιστή αποτελεί μεγάλη ανησυχία και πρέπει να καθοριστεί η τιμή του ρεύματος DC με κάποια ακρίβεια. Το πρότυπο EN 50106 ασχολείται με την επιτρεπόμενη απόκλιση της τάσης στο PCC. Το γερμανικό VDE-0126 είναι το μόνο πρότυπο που ασχολείται με το εύρος του ρεύματος διαρροής στις τοπολογίες χωρίς μετασχηματιστή. Έχουν επίσης defined το χρόνο αποσύνδεσης του μετατροπέα από το δίκτυο όταν το ρεύμα διαρροής αυξάνεται περισσότερο από 30 mA.

Με τη διαθεσιμότητα τόσων πολλών υφιστάμενων τοπολογιών, η επιλογή του αντιστροφέα είναι πολύ σημαντική στο φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο. Η απόδοση του συνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του αντιστροφέα. Η επιλογή γίνεται μόνο με τη σύγκριση διαφορετικών χαρακτηριστικών και επιλέγεται σύμφωνα με τις εφαρμογές τους. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη μια συγκριτική ανάλυση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1 [50]

Πίνακας 2.1: Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών τοπολογιών μετατροπών [50].

Τοπολογίες	Πυκνωτές εισόδου	Τάση εισόδου	Αριθμός διακοπών	Δίοδοι	Επίπεδο τάσης εξόδου	Αριθμός MPPT	Ρεύμα διαρροής	Μέγιστη αποδοτικότητα	Κόστος
<b>H5</b>	1	400 V	5	0	3	1	Χαμηλό	98.5	Υψηλό
<b>HERIC</b>	1	400 V	6	0	3	1	Χαμηλό	-	Υψηλό
<b>H6 type MOSFET</b>	1	400 V	6	2	3	1	Χαμηλό	98.3	Υψηλό
<b>Improved H6</b>	1	400 V	6	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	97.1	Υψηλό
<b>HRE</b>	1	400 V	6	6	3	1	Χαμηλό	99.3	Υψηλό
<b>H6</b>	2	400 V	6	2	3	1	Πολύ Χαμηλό	97.4	Υψηλό
<b>HB-ZVR</b>	2	400 V	5	5	3	1	Χαμηλό	94.9	Υψηλό
<b>oH5</b>	2	400 V	6	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	-	Χαμηλό
<b>PN-NPC</b>	2	400 V	8	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	97.8	Χαμηλό
<b>Unipolar H6</b>	1	400 V	4	0	3	1	Υψηλό	-	Μέτριο
<b>ANPC</b>	2	800 V	6	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	97.3	Υψηλό
<b>NPC three-level</b>	2	800 V	4	2	3	1	Πολύ Χαμηλό	98.2	Μέτριο
<b>Dual-parallel buck</b>	1	400 V	4	4	3	1	Χαμηλό	99.9	Μέτριο

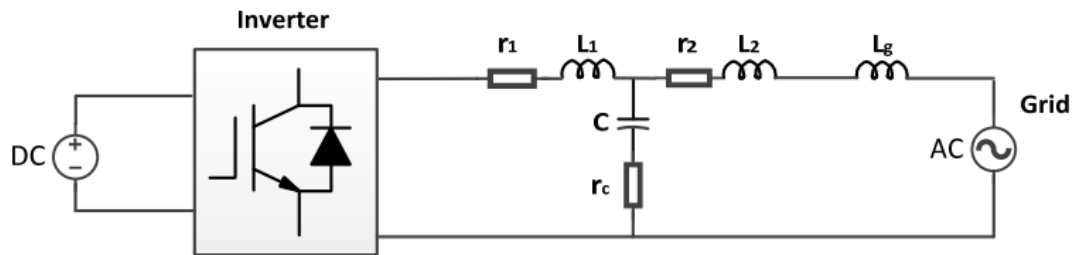
<b>Virtual DC bus</b>	2	400 V	5	0	3	1	Χαμηλό	-	Μέτριο
<b>Flying Capacitor</b>	3	800 V	4	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	-	Υψηλό
<b>Cascaded H-bridge</b>	N	400 V/n	2(n - 1)	2(n - 1)	2n - 1	N	Μέτριο	-	Υψηλό
<b>Diode Clamped</b>	$\frac{n-1}{2}$	400 V/n	2(n - 1)	$\frac{(n^2 - 1)}{2}$	2n - 1	n	Μέτριο	-	Χαμηλό
<b>Conergy NPC</b>	2	400 V	4	0	3	1	Πολύ Χαμηλό	97.7	Μέτριο
<b>NPC half-bridge</b>	2	400 V	4	2	3	1	Πολύ Χαμηλό	-	Χαμηλό

## 2.8. Μετατροπέας Active Front End (AFE)

Ο μετατροπέας Active Front End (AFE) είναι ένας αμφίδρομος μετατροπέας ροής ισχύος με υψηλής ποιότητας και σχεδόν ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος γραμμής με πολύ χαμηλή Total Harmonic Distortion (THDi). Το σύστημα διαθέτει ενεργούς διακόπτες ισχύος, όπως IGBT ή MOSFET, οι οποίοι ελέγχονται με βάση μια τεχνική Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμού PWM. Για τον έλεγχο του κυματισμού συχνότητας μεταγωγής, απαιτείται ένα μπροστινό πλευρικό φίλτρο, το οποίο μπορεί να είναι τύπου L, LC, LCL ή LCLL. Το φίλτρο LCL είναι ένα κοινό φίλτρο καθώς μπορεί να αφαιρέσει ρεύμα υψηλής συχνότητας από την πλευρά του δικτύου. Ωστόσο, λόγω των προβλημάτων συντονισμού του που επηρεάζουν τη σταθερότητα του μετατροπέα, απαιτείται μια σωστή μέθοδος απόσβεσης. Υπάρχουν πολλές ερευνητικές εργασίες που αφορούν την ανάδραση ρεύματος ενός βρόχου είτε από το δίκτυο είτε από την πλευρά του μετατροπέα [51]. Και στις δύο περιπτώσεις, η διακύμανση της σύνθετης αντίστασης δικτύου και οι παράμετροι του μετατροπέα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη σταθερότητα και την ευρωστία του συστήματος. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του συστήματος, μέθοδοι ενεργητικής και παθητικής απόσβεσης έχουν προταθεί με βάση πρόσθετες ανατροφοδοτήσεις αντίστασης ή βρόχου ελέγχου. Αν και οι ενεργές μέθοδοι μπορούν να σταθεροποιήσουν το σύστημα, απαιτούνται πρόσθετοι αισθητήρες υψηλής ποιότητας και ακρίβειας, οι οποίοι μπορούν να αυξήσουν το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου LCL και η καθυστέρηση ψηφιακής δειγματοληψίας θα μπορούσαν επίσης να επηρεάσουν τη σταθερότητα του συστήματος.

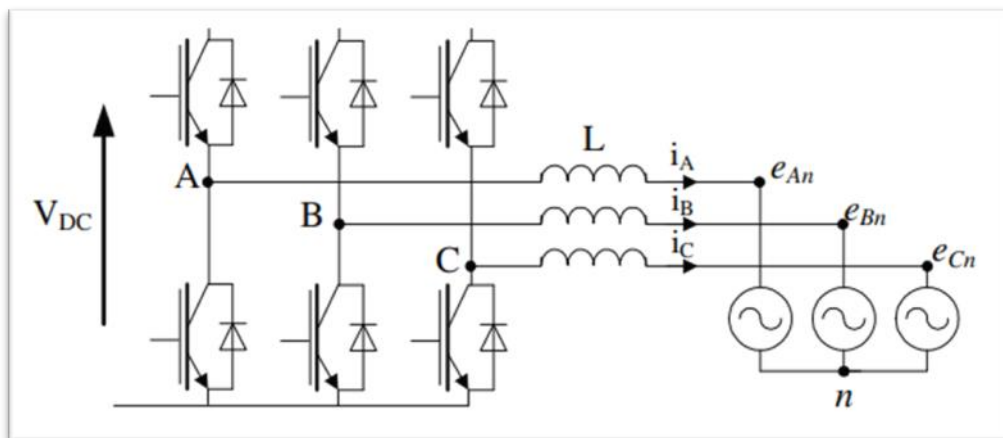
Ένας μετατροπέας AFE συνδεδεμένος στο δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 2.20. Η σύνθετη αντίσταση του δικτύου ( $L_g$ ) και τα χαρακτηριστικά (διακύμανση τάσης, μη ισορροπημένη, παραμόρφωση χαμηλής και υψηλής συχνότητας) επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία και τον έλεγχο του AFE. Σε σταθερή και σταθερή λειτουργία μετατροπέων AFE που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο, αναμένεται ότι οι τρέχουσες αρμονικές (κάτω από 2 kHz) που παράγονται από αυτούς τους μετατροπείς δεν είναι σημαντικές με μια αναμενόμενη THDi κάτω από 5%. Ωστόσο, όταν ένα υψηλό επίπεδο μετατροπέων AFE (ηλιακούς μετατροπείς οροφής) είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο διανομής, το επίπεδο των αρμονικών πρέπει να ελέγχεται κάτω από ένα επίπεδο συμβατότητας σύμφωνα με το IEC 61000-2-2. Έτσι, οι γωνίες φάσης όλων των αρμονικών θα πρέπει να διερευνηθούν προκειμένου να βρεθεί πιθανή ακύρωση αρμονικής σε επίπεδο συστήματος [52].





Σχήμα 2.20: Συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος - ο Active Front End [52].

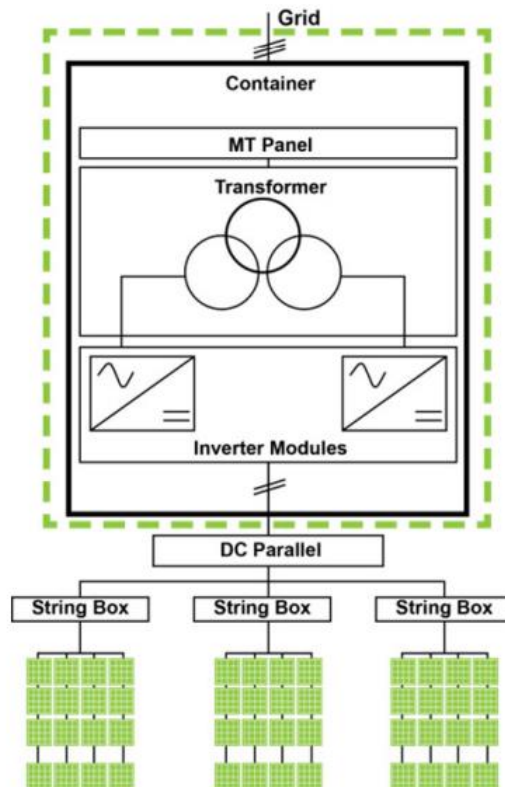
Ο Active Front End (AFE) είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής με πλεονεκτήματα όπως η παροχή αμφίδρομης ανταλλαγής ισχύος μεταξύ εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος και η αναγέννηση επαναχρησιμοποιήσιμης ισχύος στο δίκτυο για μείωση του κόστους ισχύος. Ο AFE χρησιμοποιεί διαμόρφωση PWM για να μειώσει σημαντικά τις διακριτές κορυφές ρεύματος και να σχηματίσει τέλειο ρεύμα ημιτονικού κύματος. Ο συντελεστής ισχύος διορθώνεται έως και 1, η αναλογία μεταξύ χωρητικότητας φορτίου και χωρητικότητας ισχύος είναι 1:1. Επιπλέον, το AFE εξαλείφει τις αρμονικές υψηλής τάξης, παρέχει πολύ χαμηλό αρμονικό ρεύμα THD<5% ενώ βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος, που σας επιτρέπει για να εξοικονομήσετε το κόστος αγοράς πρόσθετου ηλεκτρικού εξοπλισμού για καλύτερη ποιότητα ισχύος. Ο AFE προσφέρει επίσης σταθερή ποιότητα ισχύος χωρίς να επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις του ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί να εφαρμοστεί σε σειριακή σύνδεση.



Σχήμα 2.21: Τοπολογικό σχήμα αναφέρεται σε έναν μόνο μετατροπέα AFE [52].

#### Μετατροπή ισχύος: το Active Front End (AFE) στα φωτοβολταϊκά συστήματα:

- Φ/Β εγκαταστάσεις: η παραγωγή ενέργειας αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά τη διάρκεια των εποχών.
- Εύρος ισχύος από kW έως MW.
- Απαιτείται σύστημα μετατροπής ισχύος από DC σε AC για τη σύνδεση της εγκατάστασης σε ένα δίκτυο.



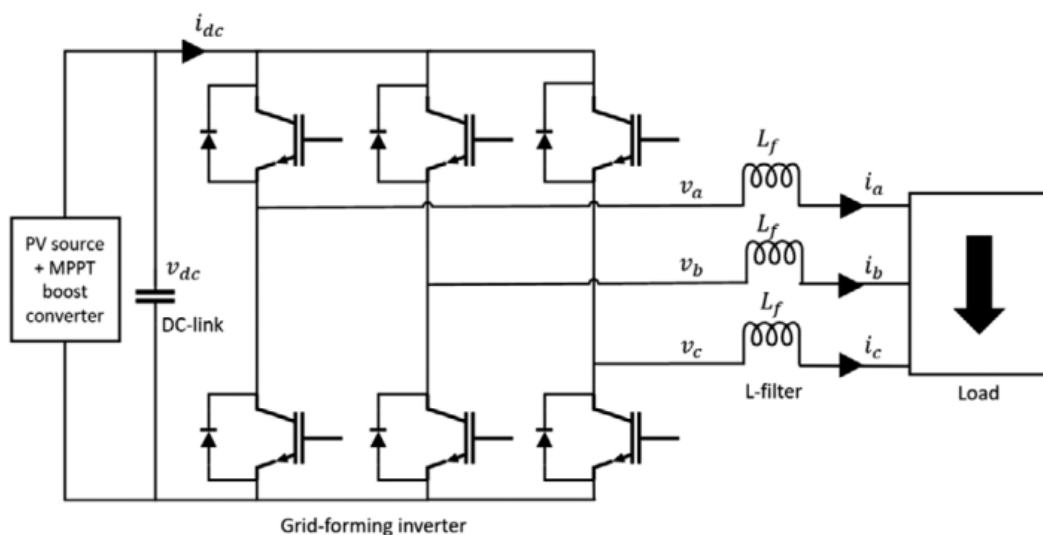
Σχήμα 2.22: Εφαρμογή AFE Φ/B σύστημα [52].

## 2.9. Grid-Forming Inverter (GFMI)- Ελεγκτές διαμόρφωσης πλέγματος

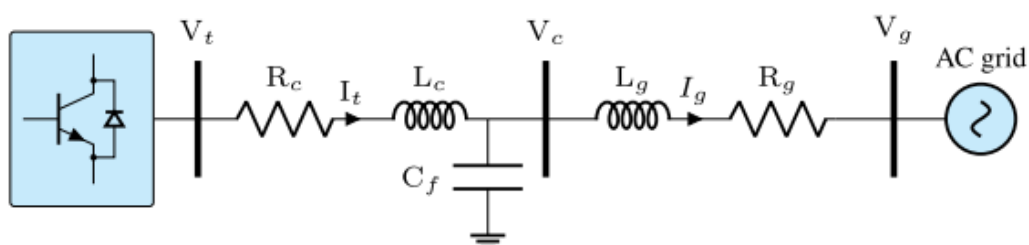
Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, έχουν αναπτυχθεί μια ποικιλία στρατηγικών σχηματισμού πλέγματος. Ο όρος σχηματισμός πλέγματος χρησιμοποιείται για οποιονδήποτε ελεγκτή μετατροπέα που ρυθμίζει τις στιγμιαίες τάσεις ακροδεκτών και μπορεί να συνυπάρχει με άλλους μετατροπείς που ακολουθούν και σχηματίζουν δίκτυο και σύγχρονη παραγωγή στο ίδιο σύστημα. Περιορίζουμε περαιτέρω τον ορισμό μας σε χειριστήρια μετατροπέα που δεν απαιτούν βρόχο κλειδώματος φάσης (Phase Lock Loop - PLL). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις μονάδες που ακολουθούν το δίκτυο που λειτουργούν ως πηγές ρεύματος, απαιτούν PLL και δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς εξωτερικά ρυθμιζόμενη τάση. Η χρήση του όρου σχηματισμός πλέγματος εξαιρείται επίσης από αυτόνομα συστήματα ενός μετατροπέα ή συστήματα πολλαπλών μετατροπέων που απαιτούν επικοινωνίες για να λειτουργήσουν. Κατ' αρχήν, οι μετατροπείς σχηματισμού δικτύου θα πρέπει να επιτρέπουν την υλοποίηση κλιμακούμενων και αποκεντρωμένων συστημάτων ισχύος AC όπου οι τάσεις και η συχνότητα του συστήματος ρυθμίζονται από τις συλλογικές αλληλεπιδράσεις των ίδιων των μονάδων διαμόρφωσης δικτύου. Με αυτή την έννοια, η σύγχρονη μηχανή αντιπροσωπεύει την καλά κατανοητή διεπαφή σχηματισμού πλέγματος. Κοιτάζοντας προς το μέλλον, αναζητούμε ελεγκτές μετατροπέων που σχηματίζουν δίκτυα, οι

οποίοι αποφέρουν οφέλη παρόμοια με εκείνα των μηχανών, ενώ σέβονται τις μοναδικές ιδιότητες των ηλεκτρονικών ισχύος.

Ένας μετατροπέας που σχηματίζει πλέγμα σε ένα δίκτυο που κυριαρχείται από αντιστροφείς θα πρέπει να λειτουργεί ως αποσπώμενη πηγή τάσης, κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί όταν ο μετατροπέας διασυνδέεται με μη γραμμικές πηγές συνεχούς ρεύματος, όπως φωτοβολταϊκές (PV) συστοιχίες. Παρόλο που τα GFMI αναπτύχθηκαν αρχικά για χρήση σε νησιωτικά μικροδίκτυα, η ιδέα μπορεί να προσαρμοστεί για εφαρμογές σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά στην ενοποίηση ηλιακών πάρκων. Δεδομένου ότι τα ηλιακά πάρκα βρίσκονται συχνά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, η αντίσταση γραμμής τείνει να είναι υψηλή. Τέτοια τμήματα του πλέγματος ονομάζονται πιο αδύναμα μέρη του πλέγματος. Η ρύθμιση της τάσης στο σημείο της κοινής ζεύξης (PCC), μέσω συμβατικών λύσεων, γίνεται προκλητική σε αδύναμα δίκτυα. Οι GFMI παρέχουν μια πολλά υποσχόμενη λύση σε αυτό το ζήτημα ενισχύοντας το δίκτυο [53]



Σχήμα 2.23: Μοντέλο κυκλώματος μετατροπέα σχηματισμού δικτύου με φίλτρο L [53].



Σχήμα 2.24: Το στάδιο ισχύος ενός GFMI [53].

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, οι υπάρχοντες ελεγκτές σχηματισμού πλέγματος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ευρέως ως ελεγκτές droop, εικονικές σύγχρονες

μηχανές (συχνά αποκαλούμενες συγχρονιστές) και ελεγκτές εικονικών ταλαντωτών, για να αναφέρουμε μερικούς. Θεωρούμε κάθε μέθοδο ως εξής [54]:

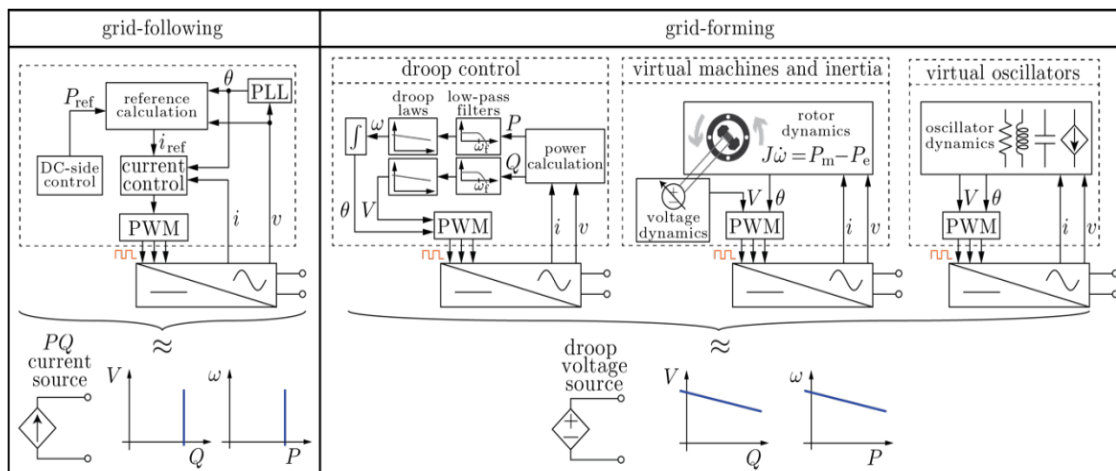
- **Droop control:** Η πιο καθιερωμένη μέθοδος σχηματισμού πλέγματος είναι ο έλεγχος της πτώσης, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Το βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι παρουσιάζει μια γραμμική αντιστάθμιση μεταξύ συχνότητας και τάσης έναντι πραγματικής και άεργου ισχύος, όπως κάνει μια τυπική σύγχρονη μηχανή σε σταθερή κατάσταση. Αυτοί οι λεγόμενοι «νόμοι πτώσης» αναφέρονται ως σχέσεις P-omega (πραγματική ισχύς-συχνότητα) και QV (άεργος ισχύς-τάση) και δημιουργούν τις ακόλουθες ιδιότητες ανεξάρτητα από το αν είναι μηχανές ή μετατροπείς:
  - ✓ Συγχρονισμός σε όλο το σύστημα: Όλες οι μονάδες έχουν την ίδια συχνότητα.
  - ✓ Διαμοιρασμός ισχύος: Κάθε μονάδα παρέχει ισχύ ανάλογα με τη χωρητικότητά της (ή την προγραμματιζόμενη κλίση πτώσης).

Αυτές οι ιδιότητες προκύπτουν ως αποτέλεσμα των δικτυωμένων αλληλεπιδράσεων από το πλέγμα και τους τοπικά προγραμματισμένους νόμους droop.

- **Εικονικές σύγχρονες μηχανές:** Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην εξομοίωση μιας σύγχρονης μηχανής εντός των στοιχείων ελέγχου ενός μετατροπέα. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις του τερματικού μετατροπέα τροφοδοτούνται ως είσοδοι σε ένα ψηφιακό μοντέλο σύγχρονης μηχανής του οποίου η εξομοιωμένη δυναμική αντιστοιχίζεται στην έξοδο του μετατροπέα σε πραγματικό χρόνο. Η πολυπλοκότητα της εικονικής μηχανής μπορεί να ποικίλλει πολύ, από λεπτομερή ηλεκτρομηχανικά μοντέλα έως απλοποιημένη δυναμική αιώρησης. Οι εφαρμογές που ταιριάζουν πολύ με τα χαρακτηριστικά της μηχανής, πιθανώς ακόμη και με τη δυναμική εικονικής ροής, έχουν χαρακτηριστικά QV και Pomega και συχνά ονομάζονται «συγχρονιστές». Στο άλλο άκρο του φάσματος, οι μέθοδοι εικονικής αδράνειας είναι απλούστερες και καταγράφουν μόνο τη δυναμική ενός εξομοιούμενου ρότορα και τη σταθερή κατάσταση P-omega droop του.
- **Ελεγκτές εικονικών ταλαντωτών:** Τα τελευταία χρόνια, έχει εμφανιστεί μια άλλη μέθοδος ελέγχου μετατροπέα που βασίζεται στην εξομοίωση μη γραμμικών ταλαντωτών. Όπως μια εικονική σύγχρονη μηχανή, οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο υποβάλλονται σε επεξεργασία από το ψηφιακά υλοποιημένο μοντέλο του οποίου οι μεταβλητές εξόδου διαμορφώνουν το στάδιο ισχύος του μετατροπέα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.9, η βασική διαφορά είναι ότι το μοντέλο έχει τη μορφή κυκλώματος ταλαντωτή με φυσική συχνότητα που συμπίπτει με την ονομαστική συχνότητα δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος και οι υπόλοιπες παράμετροί του ρυθμίζονται για να ρυθμίζουν την ονομαστική τάση και το εύρος ζώνης ελέγχου. Αν και ο

εικονικός ταλαντωτής μπορεί να φαίνεται ριζικά διαφορετικός, έχει αποδειχθεί ότι εμφανίζει τους νόμους της πτώσης QV και P-omega σε σταθερή κατάσταση.

- **Ενοποιημένες ιδιότητες ελεγκτών σχηματισμού πλέγματος:** Παρά τις διαφορές μεταξύ των droop controllers, των εικονικών σύγχρονων μηχανών και των εικονικών ταλαντωτών, και οι τρεις μέθοδοι έχουν παρόμοιες ιδιότητες που μας επιτρέπουν να τις εξετάσουμε. Συγκεκριμένα, η συμπεριφορά τερματικού εξόδου ενός μετατροπέα με οποιονδήποτε από αυτούς τους ελεγκτές σχηματισμού δικτύου μοιάζει με πηγή τάσης με πλάτος και συχνότητα που ποικίλλει ανάλογα με την παραγωγή άεργου ισχύος και το φορτίο του συστήματος, αντίστοιχα. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στους μετατροπείς που σχηματίζουν δίκτυο να προσαρμόζουν την ισχύ εξόδου σχεδόν ακαριαία για να εξισορροπούν τα φορτία, να ρυθμίζουν την τοπική τάση και να συμβάλλουν στον έλεγχο της συχνότητας. Αν και οι μετατροπείς που ακολουθούν το δίκτυο μπορούν να προγραμματιστούν ώστε να μιμούνται τις προαναφερθείσες ιδιότητες που ακολουθούν το δίκτυο, εντούτοις απαιτούν μια καλά καθορισμένη τάση ακροδεκτών ως αναφορά. Επί του παρόντος, οι μετατροπείς σχηματισμού δικτύου εμφανίζονται συνήθως σε μικροδίκτυα και σε εγκαταστάσεις εκτός δικτύου που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία.



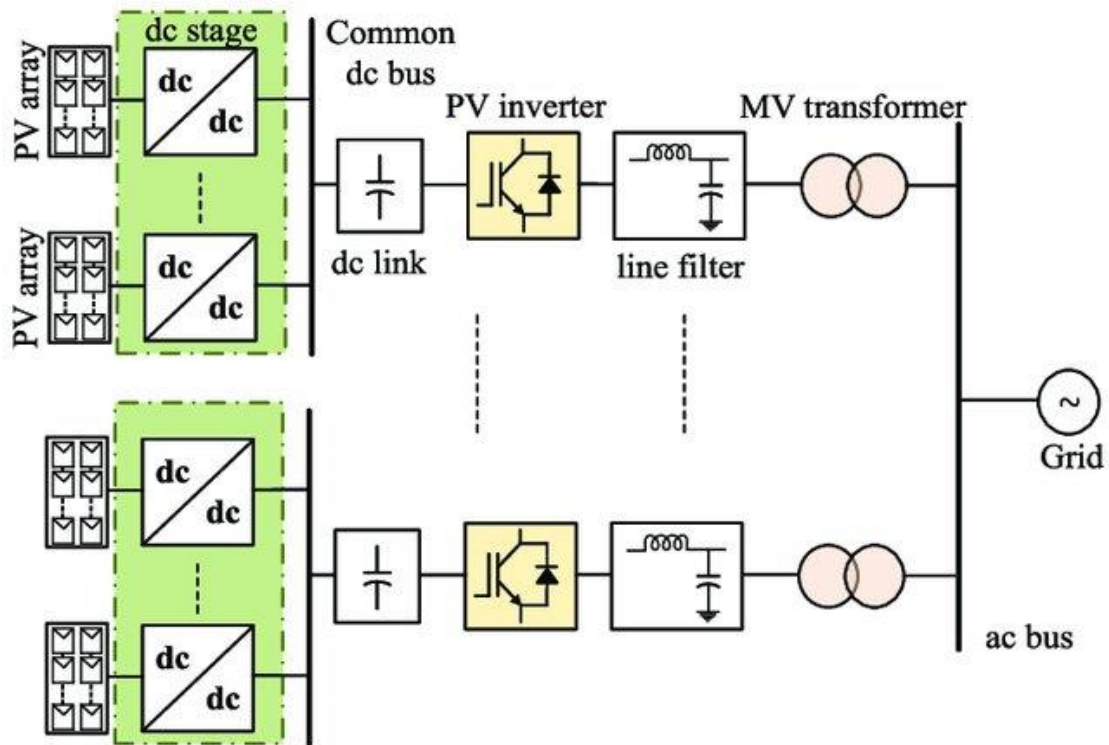
Εικόνα 2.9: Λειτουργικά διαγράμματα μετατροπέων που ακολουθούν και σχηματίζουν πλέγμα. Οι μετατροπείς που ακολουθούν το δίκτυο μιμούνται τις πηγές ρεύματος στους ακροδέκτες εξόδου τους, ενώ οι μετατροπείς που σχηματίζουν δίκτυο λειτουργούν όπως πηγές τάσης των οποίων η έξοδος συμμορφώνεται με τους νόμους πτώσης [55].

## 2.10. Medium voltage Inverter

Οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων μέσης τάσης (Mean Voltage - MV) θεωρούνται μια πολλά υποσχόμενη λύση για μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ) για την κάλυψη της ταχείας ζήτησης ενέργειας. Η μοναδική δομή της υπομονάδας του μετατροπέα παρέχει αρθρωτότητα, ανεξάρτητο έλεγχο της ανίχνευσης σημείου

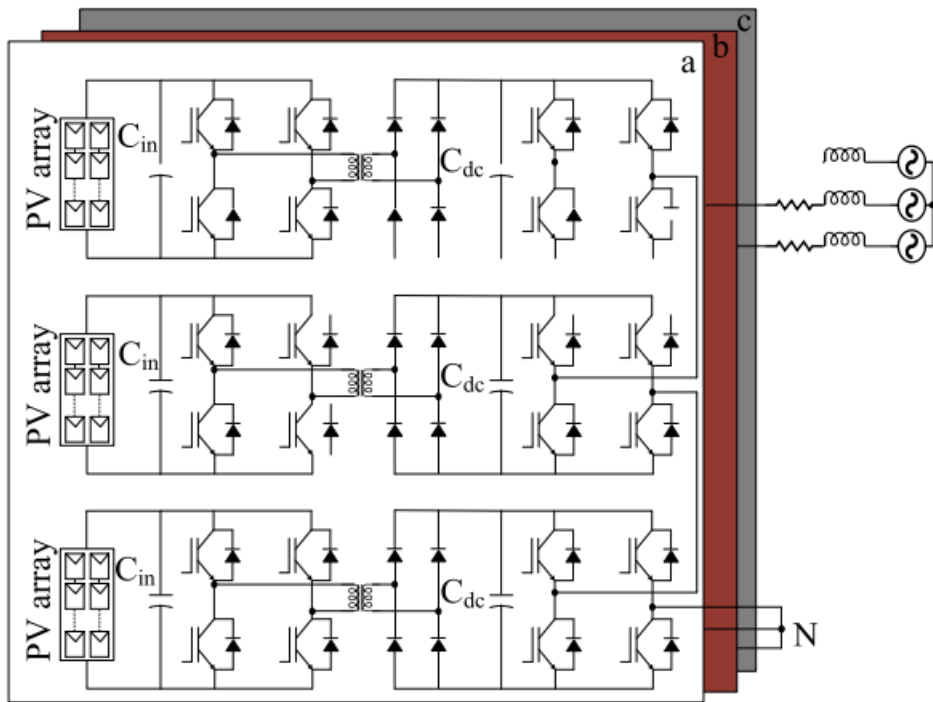
μέγιστης ισχύος (MPPT), γαλβανική απομόνωση κ.λπ. Η ενσωμάτωση των μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων σε φωτοβολταϊκά συστήματα υποφέρει από μη ισορροπημένη παραγωγή ενέργειας κατά τις συνθήκες μερικής σκίασης Φ/Β. Η κοινή δομή των μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκών σταθμών παραγωγής ενέργειας αποτελείται από ηλιακά φωτοβολταϊκά πλαίσια, μετατροπείς συνεχούς ρεύματος-dc, μετατροπείς φωτοβολταϊκών, φίλτρα γραμμής και μετασχηματιστή μέσης τάσης (MV). Ο Φ/Β μετατροπέας θεωρείται η καρδιά της ηλιακής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης καθώς διαχειρίζεται τη ροή ισχύος μέσω του συστήματος και τη σύνδεση με το δίκτυο. Οι κεντρικές τεχνολογίες μετατροπέων φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούνται εμπορικά για την κατασκευή φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, υποφέρουν από τις χαμηλές τιμές τάσης/ισχύος και την απώλεια απόδοσης λόγω του κεντρικού ελέγχου ανίχνευσης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Το Σχήμα 2.25 δείχνει την κοινή δομή του παραδοσιακού φωτοβολταϊκού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας. Ο μετασχηματιστής μέσης τάσης αποτελεί ουσιαστικό μέρος της εγκατάστασης και στόχος του είναι να παρέχει τόσο γαλβανική μόνωση για το Φ/Β σύστημα όσο και σύνδεση με το δίκτυο MV.

Παρ' όλα αυτά, ε μια προσπάθεια να επιτευχθούν περισσότερα επίπεδα τάσης και ισχύος, (διαμόρφωση αστεριού). έχουν επιλεγεί μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων για να αντικαταστήσουν τον μετατροπέα δύο επιπέδων εντός των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Οι μετατροπείς τριών επιπέδων σφικκτήρα ουδέτερου σημείου (NPC) εισάγονται για εφαρμογές φωτοβολταϊκών λόγω της απλότητας σχεδιασμού και της διαθεσιμότητας στην αγορά. Ωστόσο, η τοπολογία NPC απαιτεί μια κοινή σύνδεση συνεχούς ρεύματος που μειώνει τη σπονδυλωτότητα και την αποτελεσματικότητα του ελέγχου MPPT. Επιπλέον, ο υπερβολικός αριθμός διόδων σύσφιξης με την αύξηση του αριθμού των επιπέδων θα ήταν ένα κύριο μειονέκτημα για τις εφαρμογές του δικτύου MV [54].



Σχήμα 2.25: Τυπική δομή μιας μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής [54].

Ως εκ τούτου, απαιτούνται νέες αρθρωτές δομές φωτοβολταϊκών μετατροπέων υψηλής απόδοσης για να επιτευχθεί αρθρωτότητα, υψηλότερη απόδοση, πυκνότητα ισχύος και επίπεδα τάσης/ισχύς. Ως ανώτεροι υποψήφιοι, δύο κύριες τοπολογίες μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων, δηλαδή ο μετατροπέας Cascaded H-bridge (CHB) και ο Modular Multilevel Converter (MMC), παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση συνδυάζοντας όλες τις απαιτήσεις της νέας δομής Φ/Β μετατροπέα. Και οι δύο μετατροπείς διαθέτουν ανεξάρτητο έλεγχο MPPT, αρθρωτή δομή, μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε δίκτυα μέσης τάσης και υψηλότερη απόδοση σε σύγκριση με άλλες τοπολογίες πολλαπλών επιπέδων [56].



Σχήμα 2.26: Η δομή του μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων γέφυρας Cascade H [56].



### 3. Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Τεχνικές παρακολούθησης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές

Η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και του κόστους των καυσίμων είναι ο κύριος μοχλός πίσω από τις προσπάθειες χρήσης διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλιακής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι κατάλληλη γιατί είναι καθαρή, χωρίς εκπομπές ρύπων και μετατρέπεται εύκολα σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα φωτοβολταϊκό σύστημα (ΦΒ) [57]. Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά έχει επιδείξει αξιοσημείωτες δυνατότητες για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος δεν είναι τόσο συνηθισμένη λόγω του υψηλού κόστους εκκίνησης. Και πάλι, δεν υπάρχει διασφάλιση ότι η ενέργεια που παρέχεται από τα φωτοβολταϊκά παρουσιάζει σταθερή απόδοση, καθώς εξαρτάται πλήρως από τον προσανατολισμό της φωτοβολταϊκής μονάδας και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος των φωτοβολταϊκών μονάδων, την κυψέλη περιοχής και το φορτίο. Για την αποτελεσματική λειτουργία της φωτοβολταϊκής κυψέλης κάτω από τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, είναι απαραίτητος ένας κατάλληλος μηχανισμός για την εφαρμογή της μέγιστης ισχύος από αυτό, που στη βιβλιογραφία θεωρείται ως μέγιστη ισχύς ανίχνευσης σημείου (MPPT). Το MPPT (Maximum Power Point Tracking) αυξάνει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής της φωτοβολταϊκής μονάδας [58].

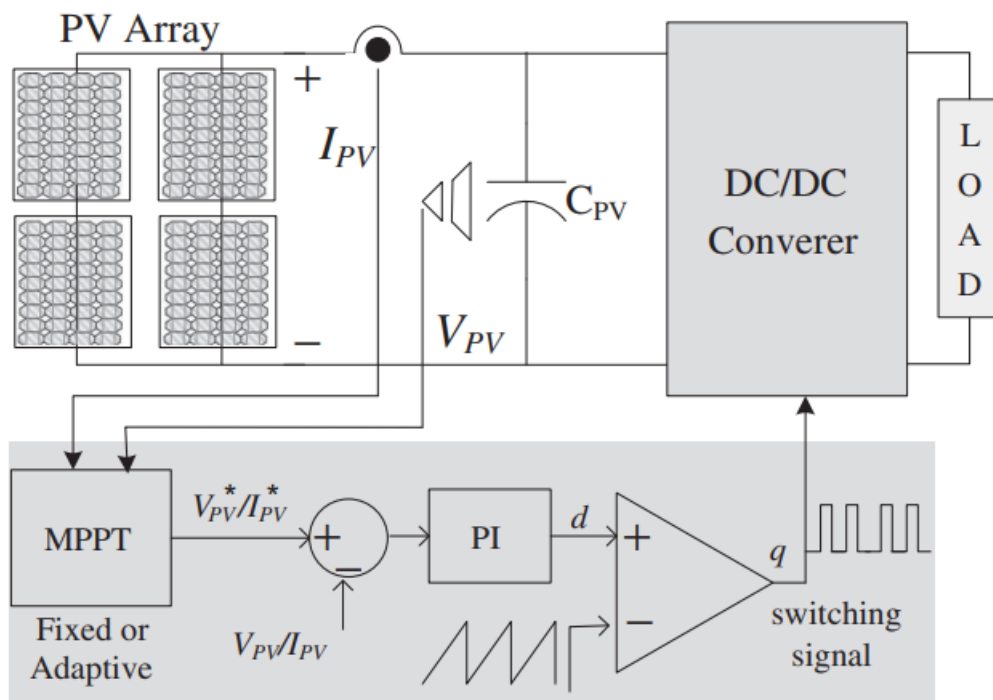
#### 3.1. MPPT για Φ/Β

Η συνολική αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να βελτιωθεί με τη λειτουργία του συστήματος στο MPP. Η παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος στην καμπύλη του φωτοβολταϊκού, ανεξάρτητα από περιβαλλοντικές αλλαγές όπως η θερμοκρασία και η ακτινοβολία, ονομάζεται παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος. Απαιτείται κατάλληλη μέθοδος MPPT για τη διατήρηση του σημείου λειτουργίας στο σημείο μέγιστης ισχύος, έτσι ώστε να μπορεί να εξαχθεί η μέγιστη ισχύς από το φωτοβολταϊκό σύστημα [50].

##### 3.1.1. Βασικά στοιχεία του MPPT

Ο στόχος της χρήσης MPPT είναι να διασφαλιστεί ότι σε οποιαδήποτε περιβαλλοντική κατάσταση (ιδιαίτερα ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία), η μέγιστη ισχύς εξάγεται από τις φωτοβολταϊκές μονάδες. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστοίχιση του MPP με την αντίστοιχη τάση και ρεύμα λειτουργίας του μετατροπέα. Το βασικό μπλοκ διάγραμμα ενός τυπικού φωτοβολταϊκού συστήματος με MPPT φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Αν και εδώ απεικονίζεται ένα αυτόνομο σύστημα dc-dc, η εφαρμογή μπορεί να επεκταθεί σε ένα σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο αντικαθιστώντας τον

μετατροπέα dc-dc με έναν μετατροπέα και συνδέοντας τον τελευταίο στο δίκτυο κοινής ωφέλειας.



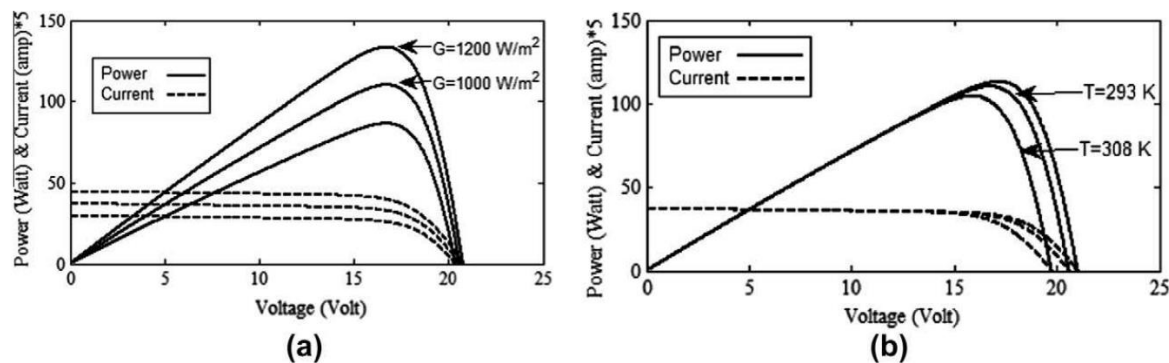
Σχήμα 3.1: Βασικό σύστημα MPPT με μετατροπέα [59].

Το MPPT λειτουργεί ως εξής: Πρώτον, το ρεύμα και η τάση της Φ/Β γεννήτριας ανιχνεύονται από έναν αισθητήρα ρεύματος και τάσης, αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές τροφοδοτούνται σε ένα μπλοκ MPPT που υπολογίζει το MPP σε αυτόν τον συγκεκριμένο κύκλο δειγματοληψίας. Μόλις βρεθεί, το μπλοκ MPPT παραδίδει τις τιμές αναφοράς για το ρεύμα ( $I$ ) και τάση ( $V$ ). Αυτές είναι τις τιμές που πρέπει να αντιστοιχιστούν από τον μετατροπέα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, επιλέγεται μόνο μία μεταβλητή (συνήθως τάση). Στη συνέχεια, η μετρούμενη τιμή ισχύος συγκρίνεται με την παρούσα τιμή του MPP. Εάν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο, ο κύκλος λειτουργίας (ρε) του μετατροπέα προσαρμόζεται σε μια προσπάθεια να μειωθεί η διαφορά. Ο έλεγχος πραγματοποιείται από έναν ελεγκτή PI ή υστέρησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο κύκλος λειτουργίας καθορίζεται απευθείας, δηλαδή χωρίς ελεγκτή PI. Μόλις το μετρούμενο εξισωθεί με τις τιμές αναφοράς, εξάγεται η μέγιστη ισχύς από τον πίνακα [59].

### 3.1.2. Χαρακτηριστικά I-V και P-V

Μια φωτοβολταϊκή μονάδα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πηγή ρεύματος που εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Η πολύπλοκη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας οδηγεί σε μη γραμμικά χαρακτηριστικά ρεύματος-τάσης. Μία τυπική I-V και P-V καμπύλη για τις διακυμάνσεις της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας εμφανίζεται στο Σχήμα 3.2. α

και  $\beta$ , αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το MPP δεν είναι ένα σταθερό σημείο καθώς κυμαίνεται συνεχώς όπως η θερμοκρασία ή η ακτινοβολία. Λόγω αυτής της δυναμικής, ο ελεγκτής πρέπει να παρακολουθεί το MPP ενημερώνοντας τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα σε κάθε δείγμα ελέγχου. Μια ταχύτερη απόκριση από τον ελεγκτή (για να ταιριάζει το MPP) θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη εξαγωγή της φωτοβολταϊκής ενέργειας και αντίστροφα [59].



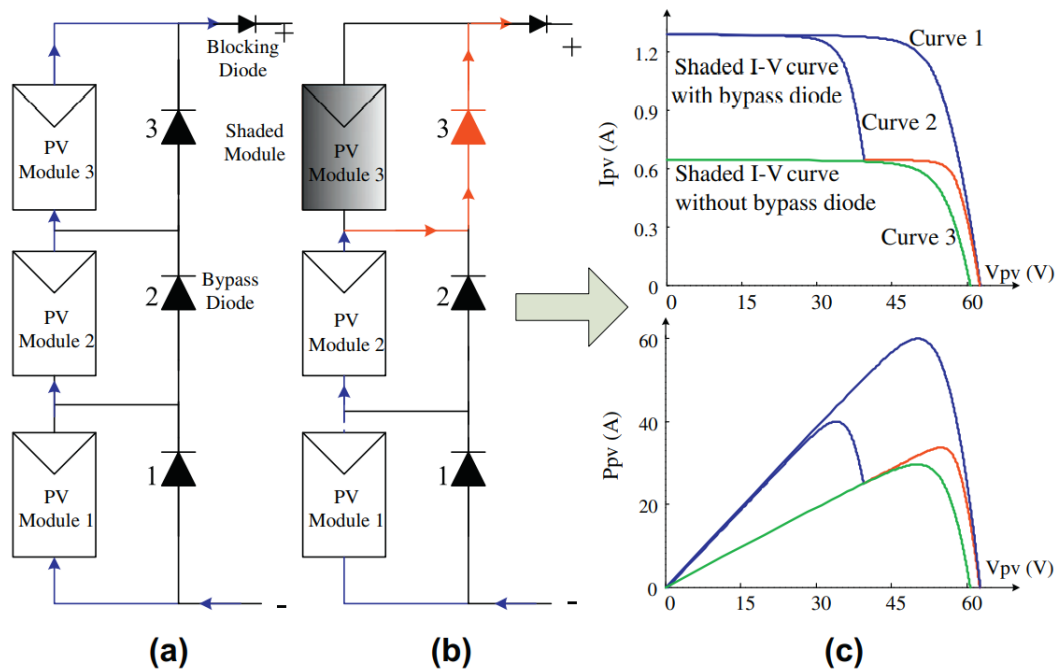
Σχήμα 3.2: (α)  $I-V$  και  $P-V$  καμπύλες κάτω από ποικίλη ηλιακή ακτινοβολία. (β)  $I-V$  και  $P-V$  καμπύλες κάτω από διαφορετικές θερμοκρασίες [59].

### 3.1.3. Μερική σκίαση

Η παρακολούθηση MPP γίνεται πιο περίπλοκη όταν ολόκληρη η φωτοβολταϊκή συστοιχία δεν λαμβάνει ομοιόμορφη ακτινοβολία. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή ως μερική σκίαση. Συνήθως, προκαλείται από τα σύννεφα που χτυπούν σε ορισμένα σημεία της ηλιακής συστοιχίας, ενώ άλλα μέρη αφήνονται ομοιόμορφα ακτινοβολημένα [60]. Μια άλλη πηγή χαρακτηριστικών που μοιάζουν με μερική σκίαση παρουσιάζεται από τις ανωμαλίες της μονάδας. ένα συνηθισμένο παράδειγμα θα ήταν η παρουσία ρωγμών σε μία ή περισσότερες μονάδες της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

Το Σχήμα 3.3α δείχνει μια φωτοβολταϊκή συστοιχία σε μια τυπική σειριακή-παράλληλη διαμόρφωση. Συνήθως, μια δίοδος παράκαμψης τοποθετείται κατά μήκος της μονάδας για να διασφαλιστεί ότι δεν θα εμφανιστεί hot spot εάν αυτή η μονάδα είναι σκιασμένη. Σε αυτό το παράδειγμα, τρεις μονάδες συνδέονται σε μία μόνο συμβολοσειρά. Σε κανονική κατάσταση, δηλαδή όταν η ηλιακή ακτινοβολία σε ολόκληρη τη Φ/Β γεννήτρια είναι ομοιόμορφη, η  $P-V$  καμπύλη εμφανίζει ένα μοναδικό σημείο μέγιστης ισχύος (καμπύλη 1 από Σχήμα 3.3c). Ωστόσο, κατά τη μερική σκίαση στο Σχήμα 3.3b, η διαφορά ακτινοβολίας μεταξύ δύο μονάδων ενεργοποιεί το bypass δίοδος. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται κυματομορφή ρεύματος δύο σκαλοπατιών στην  $I-V$  καμπύλη, ενώ η  $P-V$  καμπύλη χαρακτηρίζεται από πολλαπλά σημεία μέγιστου, όπως απεικονίζεται από την καμπύλη 2 του Σχήμα 3.3c. Το MPPT πρέπει να διασφαλίσει ότι το ανιχνευόμενο μέγιστο σημείο είναι η

πραγματική παγκόσμια κορυφή και όχι ένα από τα τοπικά μέγιστα. Εάν ο αλγόριθμος παγιδευτεί στην τοπική κορυφή, επέρχεται σημαντική απώλεια ισχύος.



Σχήμα 3.3: Λειτουργία της Φ/Β γεννήτριας (a) υπό ομοιόμορφη ακτινοβολία (b) υπό μερική σκίαση (c) η προκύπτουσα I-V και P-V καμπύλη για τα (a) και (b) [60].

### 3.2. Παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος

Οι τεχνικές MPPT χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή μέγιστης ισχύος ανεξάρτητα από τις περιβαλλοντικές αλλαγές (θερμοκρασία και πίεση). Γενικά υπάρχουν δύο τρόποι εξαγωγής της μέγιστης ισχύος από το φωτοβολταϊκό σύστημα: ο ένας είναι η μηχανική παρακολούθηση και ο άλλος η ηλεκτρική παρακολούθηση.

Η μηχανική παρακολούθηση θεωρείται φυσική παρακολούθηση. Σε αυτή τη διαδικασία ο προσανατολισμός του φωτοβολταϊκού συστήματος αλλάζει ανάλογα με τις αλλαγές στη θέση του ήλιου με κάποια προκαθορισμένη γωνία. Οι αλλαγές μπορούν επίσης να γίνουν για τις εποχές ενός ολόκληρου έτους. Οι αλλαγές προσανατολισμού γίνονται με τη βοήθεια κάποιας χειροκίνητης πρακτικής ή με κάποια αυτόματη διάταξη τύπου γκραναζιού. Στην ηλεκτρική παρακολούθηση η καμπύλη I-V παρακολουθείται με τη χρήση κάποιων αλγορίθμων. Οι φωτοβολταϊκές παράμετροι (τάση, ρεύμα, θερμοκρασία και ακτινοβολία) ανιχνεύονται και τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους. Η απαιτούμενη τεχνική MPPT υπολογίζει τις τιμές αναφοράς για τις διάφορες παραμέτρους. Οι υπολογισμένες τιμές αναφοράς συγκρίνονται με τις προηγούμενες τιμές στο τέλος του μετατροπέα. Στη συνέχεια, η παρούσα ισχύς στο MPP συγκρίνεται με τη μετρούμενη τιμή. Οι διαφορές μεταξύ αυτών των τιμών ελαχιστοποιούνται με την αλλαγή του λόγου λειτουργίας του μετατροπέα. Κυρίως χρησιμοποιείται ελεγκτής PI

ή ελεγκτής υστέρησης για τη ρύθμιση του λόγου λειτουργίας των μετατροπέων, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις ο λόγος λειτουργίας προσδιορίζεται απευθείας με τη χρήση διαφόρων αλγορίθμων [50].

### 3.3. Ελεγκτής MPPT

Οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές αλλαγές επιβάλλουν επιταγές στην παραγωγή ενέργειας από βιώσιμη πηγή ενέργειας. Ειδικότερα, αυτά είναι πιο σοβαρά στα συστήματα ηλιακής ενέργειας καθώς αντιμετωπίζουν προκλήσεις σχετικά με (i) μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και (ii) ενσωμάτωση του δικτύου. Στο εξής, τα συστήματα μετατροπής ηλιακής φωτοβολταϊκής ενέργειας υιοθετούν διαδικασίες MPPT για να παρέχουν υποστηρίσιμη ισχύ εξόδου [61]. Για το λόγο αυτό, πρέπει να διασφαλιστεί ότι υπάρχει MPP σε I-V και P-V καμπύλες για μεταβλητή ακτινοβολία και θερμοκρασία. Αυτό το MPP μετακινείται συνεχώς τη θέση του όταν συμβαίνει περιβαλλοντική αλλαγή. Ως εκ τούτου, οι ελεγκτές MPPT έχουν σχεδιαστεί για να συνεχίσουν την παρακολούθηση του MPP και αποτελούν απαραίτητο κομμάτι του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η παρουσία ενός ελεγκτή τροποποιείται επαρκώς στην αντίσταση που βλέπει ο πίνακας και κατά συνέπεια, προτρέπει τον πίνακα να εργαστεί πιο κοντά στο MPP [59]. Οι αποδοτικοί ελεγκτές MPPT είναι απαραίτητοι για την τροποποίηση του σημείου λειτουργίας του φορτίου που σχετίζεται με την αλλαγή του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα.

Για την παρακολούθηση του πραγματικού MPP του φωτοβολταϊκού συστήματος, έχουν παρουσιαστεί πολυάριθμες μέθοδοι MPPT σε πολυάριθμη ερευνητική βιβλιογραφία. Για την εύρεση του καλύτερου μεταξύ άλλων, οι παράμετροι επιλογής του ελεγκτή MPPT παίζουν ζωτικό ρόλο. Οι παράμετροι παρέχουν βασικές πληροφορίες σχετικά με το ποια μέθοδος είναι καλύτερη για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτές οι παράμετροι επιλογής μόνο για τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων κάθε κατηγοριοποιημένης μεθόδου MPPT και όχι για την ταξινόμηση των μεθόδων σε κατηγορίες. Έντεκα παράμετροι επιλογής λαμβάνονται υπόψη για τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων σε κάθε κατηγορία. Οι σύντομες λεπτομέρειες κάθε παραμέτρου παρουσιάζονται στον Πίνακας 3.1 [62] και μια σύγκριση μεταξύ των γενικών χρησιμοποιούμενων αναλογικών/ψηφιακών MPPT IC ή μικροελεγκτών δίνονται στον

Πίνακας 3.2.

Πίνακας 3.1: Περιγραφή πολλών παραμέτρων επιλογής ελεγκτών MPPT [62]

Επιλογή Παραμέτρων	Περιγραφές
Πολυπλοκότητα σχεδιασμού	Η ακρίβεια ενός αλγορίθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και την αποτελεσματικότητά του. Μια απλή και πιο εύκολη μέθοδος προσελκύει πάντα τον χρήστη παρά μια σύνθετη. Επομένως, αυτή η παράμετρος επιλογής έχει ισχυρή επιρροή κατά την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου MPPT.

<p><b>Παρακολούθηση αληθινού MPP</b></p>	<p>Τα πάνελ θα μπορούσαν να επηρεάσουν την κανονική λειτουργία του MPPT λόγω μερικής σκίασης πάνω τους. Οι πολλαπλές κορυφές στη χαρακτηριστική καμπύλη P – V του φωτοβολταϊκού συστήματος επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματικότητά του στην παρακολούθηση. Επομένως, η παρακολούθηση του πραγματικού MPP είναι μια πολύτιμη παράμετρος κατά την επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή MPPT.</p>
<p><b>Κόστος</b></p>	<p>Τα χαρακτηριστικά του συστήματος, η πολυπλοκότητα προγραμματισμού, ο απαιτούμενος αριθμός αισθητήρων, η επιλογή αναλογικής ή ψηφιακής δομής και το κόστος του υλικού επηρεάζουν το κόστος του συστήματος παρακολούθησης. Επομένως, αυτά τα χαρακτηριστικά θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του κατάλληλου ελεγκτή MPPT.</p>
<p><b>Εξάρτηση συστοιχίας φωτοβολταϊκών</b></p>	<p>Χωρίς να γνωρίζουμε το μέγεθος της ΦΒ διάταξης και τις διαμορφώσεις της, ένας αλγόριθμος MPPT θα πρέπει να παρακολουθεί το MPP. Ωστόσο, ορισμένες μέθοδοι όπως το FLC και το ANN εξαρτώνται από τη διάταξη. Αυτά τα προβλήματα εξαλείφονται με ορισμένες αριθμητικές μεθόδους, καθώς παρέχουν αξιοπιστία, ανεξάρτητα από τη συστοιχία φωτοβολταϊκών και μπορούν να παρακολουθούν αριθμητικά τη θέση του MPP.</p>
<p><b>Προηγούμενη εκπαίδευση</b></p>	<p>Πριν από την εφαρμογή του σχήματος, το ANN, η μέθοδος του πίνακα αναζήτησης κ.λπ. απαιτούν προηγούμενη εκπαίδευση. Ακόμη και πριν από το σχεδιασμό του MPPT, το FLC χρειάζεται κάποια προηγούμενη γνώση.</p>
<p><b>Ταχύτητα σύγκλισης</b></p>	<p>Αντί για διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας ή της θερμοκρασίας, ένας εξαιρετικά ευαίσθητος αλγόριθμος θα πρέπει να έχει υψηλή ταχύτητα σύγκλισης για να παρακολουθεί το πραγματικό MPP ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Για να αποφευχθούν οι απώλειες ενέργειας, αυτή η παράμετρος παίζει ζωτικό ρόλο. Επομένως, κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αυτή η παράμετρος παρακολουθείται πάντα πριν από την επιλογή μιας ακριβούς μεθόδου MPPT.</p>
<p><b>Αναλογικό/ψηφιακό</b></p>	<p>Τόσο ο αναλογικός όσο και ο ψηφιακός έλεγχος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη MPPT. Αυτές οι μέθοδοι όπως το κλασματικό SCC ή το OCV αποτελούνται από αναλογικό κύκλωμα αναφέρονται ως μέθοδοι αναλογικού MPPT και αποτελούνται από ψηφιακά κυκλώματα που αναφέρονται ως μέθοδοι ψηφιακής MPPT. Οι αναλογικές μέθοδοι μπορεί να είναι λιγότερο ακριβείς αλλά λιγότερο δαπανηρές, όπου οι ψηφιακές μέθοδοι είναι δαπανηρές και</p>

	ακριβείς. Επομένως, αυτή η παράμετρος είναι απαραίτητη για την επιλογή των κατάλληλων σχημάτων MPPT.
<b>Αισθητές παραμέτρους</b>	Ο αισθητήρας τάσης και ρεύματος είναι οι βασικές παράμετροι του ελεγκτή MPPT. Σε σύγκριση με τον αισθητήρα τάσης, οι αισθητήρες ρεύματος είναι πλούσιοι και ογκώδεις. Επομένως, κατά το στάδιο σχεδιασμού του MPPT, αυτά τα χαρακτηριστικά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.
<b>Περιοδικός συντονισμός</b>	Λόγω της ανομοιομορφίας της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πίνακα, των επιπτώσεων της σκόνης, η απόδοση του MPPT μειώνεται σκόπιμα. Η αναμενόμενη διάρκεια ζωής ενός ηλιακού πάνελ είναι τώρα περίπου 25 χρόνια. Ως εκ τούτου, ορισμένες μέθοδοι ενδέχεται να απαιτούν περιοδικό συντονισμό.
<b>Σταθερότητα</b>	Το MPP των συμβατικών μεθόδων γενικά διαταράσσεται από τη σταθερή τους κατάσταση, η οποία προκαλεί σοβαρή αλλαγή της απόδοσης. Επομένως, η σταθερότητα γίνεται ζωτικής σημασίας παράμετρος πριν από την επιλογή των μεθόδων.
<b>Αποδοτικότητα</b>	Η αποδοτικότητα των τεχνικών MPPT αξιολογήθηκε υποκειμενικά εν όψει των ανανεώσεων λαμβάνοντας υπόψη τη διαρκή απόκριση σταθερής κατάστασης του συστήματος. Αυτή η παράμετρος είναι μία από τις σημαντικές παραμέτρους για την επιλογή ενός κατάλληλου ελεγκτή MPPT.

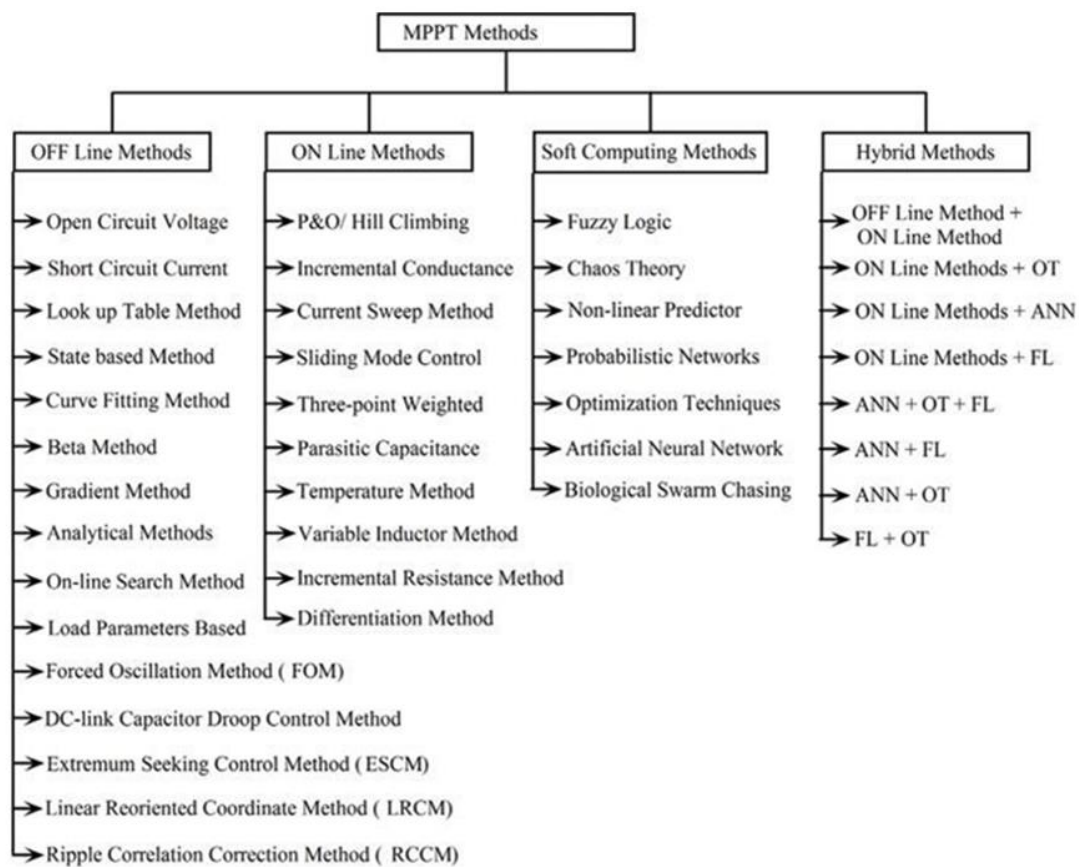
Πίνακας 3.2: Σύγκριση μεταξύ των κοινών χρησιμοποιούμενων αναλογικών/ψηφιακών MPPT IC ή μικροελεγκτών [63]

ICs/μικροελεγκτής	Ταχύτητα παρακολούθησης	Χρησιμοποιείται σε μεθόδους MPPT
<b>FPGA XC2C384</b>	85 ms	P&O
<b>Μικροελεγκτής Intel 87196</b>	500 ms	INC
<b>αναλογικό κύκλωμα</b>	20 ms	ESM
<b>DSP TMSF28335</b>	80 ms	MPPT με βάση το ρεύμα φορτίου
<b>DSP TMS320F28335</b>	1.5 s	P&O που βασίζεται σε FLC
<b>FPGA Virtex II</b>	30 ms	ANFIS
<b>DSP TMS320F240</b>	20 ms	PI που βασίζεται σε P&O
<b>H/Y PENTIUM IV 2,4 GHz</b>	16 ms	INC

### 3.4. Ταξινόμηση των μεθόδων MPPT

Οι μέθοδοι MPPT ταξινομούνται με βάση διάφορα χαρακτηριστικά, όπως στρατηγικές ελέγχου, μεταβλητές ελέγχου, κυκλώματα, κόστος κ.λπ. Οι στόχοι όλων

των διαθέσιμων τεχνικών στη βιβλιογραφία είναι οι ίδιοι, αλλά διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα, την ταχύτητα σύγκλισης, την ακρίβεια παρακολούθησης, το κόστος κ.λπ. Από την άποψη της εφαρμογής, οι τεχνικές Perturb and Observe (P&O), Hill Climbing και Incremental Conductance (INC) χρησιμοποιούνται ευρέως για εφαρμογές συνδεδεμένες στο δίκτυο και αυτόνομες εφαρμογές. Εκτός αυτού, υπάρχουν και ορισμένες άλλες μέθοδοι όπως η τάση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, οι οποίες είναι χρήσιμες για εφαρμογές χαμηλού κόστους λόγω του μικρότερου αριθμού αισθητήρων που απαιτούνται. Ορισμένες άλλες μέθοδοι είναι επίσης διαθέσιμες στη βιβλιογραφία, οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται πρακτικά, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον με ορισμένες βελτιώσεις. Σε γενικές γραμμές, οι μέθοδοι MPPT ταξινομούνται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Ευρεία κατηγοριοποίηση των μεθόδων MPPT [48]

Η πρώτη κατηγορία (Μέθοδοι OFF-Line) απαιτεί μοντελοποίηση των ηλιακών φωτοβολταϊκών και συνήθως εξαρτάται από τις παραμέτρους και τις χαρακτηριστικές καμπύλες του δελτίου δεδομένων. Αυτές οι γνωστές παράμετροι εφαρμόζονται σε ορισμένους μαθηματικούς εμπειρικούς τύπους για την παραγωγή σημάτων ελέγχου για το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτά τα σήματα ελέγχου παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του MPPT [62].



Η δεύτερη κατηγορία (Μέθοδοι ON-Line) απαιτούσε μόνο στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος για την παραγωγή των σημάτων ελέγχου. Μια μικρή διαταραχή εισάγεται στο ρεύμα, την τάση ή τον λόγο λειτουργίας για να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισχύς εξόδου. Η κατεύθυνση του σήματος ελέγχου επιτυγχάνεται με την παρατήρηση της απόκρισης της διαταραχής στην ισχύ εξόδου (είτε αύξηση είτε μείωση). Γι' αυτό το λόγο το σήμα ελέγχου δεν μπορεί να θεωρηθεί σταθερό όπως οι off-line μέθοδοι και το σύστημα θα ταλαντεύεται πάντα γύρω από το MPP [64].

Η τρίτη κατηγορία (Soft Computing Methods) ανήκει στις ευφυείς τεχνικές. Οι μέθοδοι Soft Computing χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ακρίβειας του συστήματος, καθώς είναι σε θέση να χειρίζονται τα μη γραμμικά προβλήματα [59]. Η διαθεσιμότητα των εργαλείων μαλακού υπολογισμού προσελκύει το ενδιαφέρον των ερευνητών προς αυτές τις γρήγορες, αξιόπιστες, ευέλικτες και στιβαρές. Φυσικά, η μη γραμμική καμπύλη ΦΒ μπορεί εύκολα να παρακολουθηθεί με τη βοήθεια των μεθόδων soft computing. Η μερική σκίαση και η ταχεία μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελούν μείζονα προβλήματα του ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος. Η ελαστική φύση των τεχνικών soft computing επιτρέπει την παρακολούθηση του MPP υπό αυτές τις συνθήκες [65]. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN), ο Έλεγχος Ασαφούς Λογικής (FLC) και οι Τεχνικές Βελτιστοποίησης (ΟΤ) είναι οι πιο δημοφιλείς μεταξύ των μεθόδων soft computing [66]

Η τέταρτη κατηγορία (υβριδικές μέθοδοι) φέρνει συνήθως δύο αλγόριθμους ταυτόχρονα. Γενικά το πρώτο μέρος των υβριδικών μεθόδων ανήκει στην ομάδα OFF-Line και υπολογίζει τη σταθερή τιμή της επιθυμητής παραμέτρου εισόδου. Οι σταθερές τιμές υπολογίζονται με τη χρήση βρόχου set-point σε καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Το τμήμα αυτό θα ακολουθεί κατά προσέγγιση το MPP και πρέπει να ανταποκρίνεται γρήγορα σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες συνθήκες του περιβάλλοντος. Αργότερα το δεύτερο μέρος ανήκει στην ομάδα ON-Line ή στην ομάδα Soft computing. Αυτό το μέρος παρακολουθεί το MPP με μεγάλη ακρίβεια και μειώνει το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Οι περιβαλλοντικές μεταβολές αντιμετωπίζονται επίσης με ένα βρόχο ρύθμισης που δημιουργείται από κάποιους έξυπνους και γρήγορα ανταποκρινόμενους χώρους αναζήτησης [67]. Τα πρακτικά σενάρια εξετάζονται επίσης από τους ερευνητές. Ως εκ τούτου, στη βιβλιογραφία αναφέρονται επίσης η εξέταση μερικής σκίασης και η στατιστική ανάλυση διαφόρων μεθόδων MPPT [68].

Η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων MPPT εξηγήθηκε σύμφωνα με τις στρατηγικές ελέγχου, τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο, τους τύπους κυκλωμάτων, την πολυπλοκότητα, την ταχύτητα σύγκλισης και το κόστος υλοποίησης υλικού.

Πίνακας 3.3: Συγκριτική ανάλυση διαφορετικών μεθόδων MPPT [67].

Τεχνική MPPT	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	Y	V	N	Y	S	Χαμηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Εκτός δικτύου	Και οι δύο
Ρεύμα βραχυκυκλώματος	Y	I	N	Y	S	Χαμηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Εκτός δικτύου	Και οι δύο
Πίνακας αναζήτησης	Y	V, I, Ir, T	N	N	S	Χαμηλή	Γρήγορη	Χαμηλή	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Με βάση το κράτος	Y	V, Ir	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Και οι δύο
Καμπύλη fitting	Y	V	N	N	S	Χαμηλή	Γρήγορη	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Μέθοδος Beta	Y	V, I	Y	N	M	Υψηλή	Γρήγορη	Μέτρια	Πλέγμα	Ψηφιακή
Μέθοδος κλίσης	Y	V, I	N	N	M	Υψηλή	Γρήγορη	Χαμηλή	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Αναλυτική μέθοδος	N	V, I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Online αναζήτηση	N	V, I	Y	N	M	Υψηλή	Γρήγορη	Χαμηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Παράμετροι φορτίου με βάση	N	V ή I	N	N	S	Υψηλή	Γρήγορη	Χαμηλή	Και οι δύο	Αναλογικό
FOM	N	V ή I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Πλέγμα	Αναλογικό
Πυκνωτής DC-link Droop	N	V	N	N	C	Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Πλέγμα	Και οι δύο
ESCM	N	V, I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
LRCM	Y	V, I	N	N	C	V. Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
RCCM	N	V ή I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Εκτός δικτύου	Αναλογικό
Έλεγχος ενός κύκλου	Y	I	N	N	M	Υψηλή	Γρήγορη	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Και οι δύο
P&O/Hill Climbing	N	V, I	Y	N	S	Μέτρια	Ποικίλλει	Μέτρια	Και οι δύο	Και οι δύο
Αυξητική αγωγιμότητα	N	V, I	Y	N	M	Υψηλή	Ποικίλλει	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή

Τρέχουσα σάρωση	N	I	Y	N	C	Μέτρια	Αργή	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Αναλογικό
Λειτουργία ολίσθησης	N	V ή I	Y	N	M	Μέτρια	Γρήγορη	Μέτρια	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Τρία σημεία σταθμισμένα	N	V, I	N	N	M	Υψηλή	Αργή	Χαμηλή	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Παρασιτική χωρητικότητα	N	V, I	Y	N	M	V. Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Και οι δύο	Και οι δύο
Θερμοκρασία	N	V, Ir, T	Y	N	C	Υψηλή	Μέτρια	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Μεταβλητό πηνίο	N	V, I	Y	N	M	Μέτρια	Ποικίλλει	Μέτρια	Και οι δύο	Ψηφιακή
Αυξητική αντίσταση	N	V, I	Y	N	M	Υψηλή	Ποικίλλει	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Μέθοδος διαφοροποίησης	N	V ή I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή
Ασαφής λογική	Y	V ή I	Y	N	C	V. Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Θεωρία του Χάους	N	V ή I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Μη γραμμικός προβλεπτικός παράγοντας	N	V ή I	Y	N	S	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Πιθανοτικά δίκτυα	N	V ή I	Y	N	C	Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Τεχνικές βελτιστοποίησης	N	V ή I	Y	N	M	V. Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο	Y	V ή I	Y	Y	M	V. Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Και οι δύο	Ψηφιακή
Βιολογική καταδίωξη σμήνους	N	V, I, Ir, T	Y	N	C	V. Υψηλή	Γρήγορη	Υψηλή	Εκτός δικτύου	Ψηφιακή

### 3.5. Grid Tie Inverter και MPPT

Ο Grid Tie Inverter (GTI) είναι ένας ειδικός τύπος μετατροπέα ισχύος που μετατρέπει DC σε AC και το τροφοδοτεί σε ένα υπάρχον σύστημα ηλεκτρικού δικτύου. Οι περισσότερες κατοικημένες περιοχές θα χρησιμοποιούν Φ/Β σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο. Ο GTI χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει την ηλιακή ενέργεια που παράγεται από τα πάνελ με την ισχύ του δικτύου, ρυθμίζει επίσης την τάση και το ρεύμα που λαμβάνεται από τους ηλιακούς συλλέκτες. Κάθε GTI που είναι εγκατεστημένο στις κατοικημένες περιοχές θα διασφαλίζει ότι η ισχύς παρέχεται στον πίνακα διανομής του σπιτιού θα είναι σε φάση με την τροφοδοσία του δικτύου. Ο GTI όταν ληφθεί υπόψη με ηλιακούς συλλέκτες, η λειτουργικότητά του μπορεί να εξεταστεί τόσο με συστήματα On-Grid και Off-Grid όσο και με ταξινομήσεις φωτοβολταϊκών μετατροπέων. On-Grid σημαίνει ότι το ποσό θα καταβληθεί για την ισχύ που χρησιμοποιείται στην οικιστική περιοχή. Off-Grid σημαίνει ότι η ενέργεια που χρησιμοποιείται θα παράγεται από τον ίδιο τον καταναλωτή από ηλιακούς συλλέκτες ή από αιολική ενέργεια. Στο σύστημα αντιστροφέα ηλιακού δικτύου, η μέγιστη ισχύς πρέπει να λαμβάνεται από τον πίνακα, έτσι οι τεχνικές παρακολούθησης MPP [69] έχουν συζητηθεί λεπτομερώς για να κατανοηθεί πώς προέρχεται η ισχύς από την έξοδο του συστήματος. Η παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος είναι μια τεχνική που χρησιμοποιούν οι μετατροπείς, οι φορτιστές ηλιακών μπαταριών και παρόμοιες συσκευές για να λάβουν τη μέγιστη ισχύ από τα ηλιακά πάνελ. Τα ηλιακά κύτταρα έχουν μια πολύπλοκη σχέση μεταξύ της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας και της συνολικής αντίστασης που παράγει μη γραμμική απόδοση εξόδου ονομάζεται καμπύλη I-V. Ο σκοπός του συστήματος MPPT είναι η δειγματοληψία της εξόδου των κυψελών και η εφαρμογή του κατάλληλου φορτίου για τη λήψη της μέγιστης ισχύος για οποιαδήποτε περιβαλλοντική συνθήκη.

Οι κύριες τεχνικές MPPT για τους GTI είναι Σταθερός κύκλος λειτουργίας, σταθερή τάση, Perturb and Observer (P&O) και Modified P&O, Incremental Conductance (IC) και Modified IC, Ripple correlation και system oscillation method[11] όπου αναλύονται ως εξής [70]:

- 1) **Σταθερός κύκλος λειτουργίας:** Είναι η απλούστερη μέθοδος και έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί σύστημα ανάδρασης όπου η σύνθετη αντίσταση φορτίου ρυθμίζεται μόνο μία φορά για την παρακολούθηση της μέγιστης ισχύος.
- 2) **Μέθοδος σταθερής τάσης:** Χρησιμοποιεί εμπειρικά αποτελέσματα, υποδεικνύοντας ότι η τάση στο MPP είναι υψηλή σε ανοιχτό κύκλωμα Φ/Β ατμοσφαιρική κατάσταση. Σε ποικίλες ατμοσφαιρικές συνθήκες, η τάση στους ακροδέκτες της μονάδας ποικίλλει πολύ λίγο ακόμα και όταν αλλάζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, η τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος τροποποιείται αυστηρά με τις αλλαγές θερμοκρασίας, έτσι, το σημείο

λειτουργίας δεν είναι ποτέ ακριβώς στο MPP και διαφορετικά δεδομένα πρέπει να υιοθετηθούν και να δοκιμαστούν για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και περιοχές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα πίσω από αυτή τη μέθοδο είναι η χρήση αισθητήρα τάσης εδώ χρησιμοποιείται μόνο ένας αισθητήρας τάσης και παρουσιάζει πολύ καλή απόδοση για χαμηλές μονώσεις.

- 3) **Perturb and Observe (P&O)**: Η μέθοδος P&O λειτουργεί περιοδικά αυξάνοντας ή μειώνοντας την τάση τερματικού εξόδου του φωτοβολταϊκού και συγκρίνοντας την ισχύ που λαμβάνεται στον τρέχοντα κύκλο με την ισχύ του πολύτιμου κύκλου. Εάν η τάση μεταβάλλεται και η ισχύς αυξάνεται, το σύστημα ελέγχου αλλάζει το σημείο λειτουργίας προς αυτή την κατεύθυνση, διαφορετικά αλλάζει το σημείο λειτουργίας στην αντίθετη κατεύθυνση. Μόλις γίνει γνωστή η κατεύθυνση της αλλαγής του ρεύματος, το ρεύμα μεταβάλλεται με σταθερό ρυθμό. Αυτός ο ρυθμός είναι η παράμετρος που πρέπει να προσαρμοστεί για να επιτρέψει την ισορροπία μεταξύ ταχύτερων αποκρίσεων με λιγότερες διακυμάνσεις στη σταθερή κατάσταση.
- 4) **Modified P&O**: Το τροποποιημένο P&O λαμβάνεται όταν τα βήματα αλλάζουν ανάλογα με την απόσταση του MPP, με αποτέλεσμα υψηλότερη απόδοση είναι το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου διαταράσσεται η τάση ακροδέκτη εξόδου του φωτοβολταϊκού σε κάθε κύκλο MPPT ακόμα και όταν επιτευχθεί το MPP με αποτέλεσμα την απώλεια ισχύος.
- 5) **Incremental Conductance**: Η μέθοδος IC βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση ισχύος του το ΦΒ είναι μηδενικό στο MPP, θετικό στα αριστερά και αρνητικό μέσα το δικαίωμα, λόγω αυτής της συνθήκης, το MPP μπορεί να βρεθεί σε όρους της αύξησης της αγωγιμότητας της διάταξης. Αυτή η μέθοδος αναζητά το MPP με τον ίδιο τρόπο όπως το P&O και διαθέτει επίσης μια τροποποιημένη έκδοση, αλλά δεν είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου των ΦΒ και παρουσιάζει πολύ καλές μεταβατικές επιδόσεις όταν υπόκεινται σε ταχείες αλλαγές στις ατμοσφαιρικές συνθήκες.
- 6) **Ripple Correlation**: Η συσχέτιση κυματισμού βασίζεται στην αρχή του MPPT και χρησιμοποιεί τις ταλαντώσεις σε ισχύ μέσω όλων των φίλτρων διέλευσης για να αποκτήσει το βέλτιστο σημείο και ο κυματισμός υψηλής συχνότητας σε ισχύ και τάση συλλαμβάνεται στη συνέχεια χρησιμοποιώντας φίλτρα υψηλής συχνότητας, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του φωτοβολταϊκού ισχύς κλίση. Στη συνέχεια, το πρόσημο αυτής της παραγώγου χρησιμοποιείται σε μια συνάρτηση αριθμού για να υποδείξει τη σωστή περιοχή λειτουργίας και ένας ολοκληρωτής διασφαλίζει επίσης το MPPT.

- 7) **System Oscillation**: Η μέθοδος ταλάντωσης συστήματος βασίζεται στην αρχή του MPPT και χρησιμοποιεί τις ταλαντώσεις για να καθορίσει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Στο MPP ο λόγος του πλάτους της ταλάντωσης και της μέσης τάσης είναι σταθερός. Αυτή η μέθοδος απαιτεί μόνο ανίχνευση τάσης συστοιχίας και εφαρμογή της χαρακτηρίζεται βασικά από τη χρήση φίλτρων. Έχει λοιπόν ένα πλεονέκτημα ότι μπορεί να υλοποιηθεί με αναλογικά κυκλώματα.

## 4. Κεφάλαιο 4ο: Σύγκριση διασταυρούμενων περιπτώσεων inverter

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ανησυχίας για την κλιματική αλλαγή και την αύξηση των τιμών του πετρελαίου, η οποία έχει οδηγήσει πολλές χώρες να υιοθετήσουν νέους κανονισμούς για την προώθηση αυτού του είδους ενέργειας. Στους μετατροπείς ισχύος για ΑΠΕ, και ιδιαίτερα σε Φ/Β μετατροπείς συνδεδεμένους στο δίκτυο, η απόδοση και το κόστος είναι βασικοί παράγοντες. Σ' αυτό το κεφάλαιο αναλύονται και συγκρίνονται διαφορετικοί τύποι inverter που έχουν προαναφερθεί.

### 4.1. Inverter σύστημα εμπορικής χρήσης ανά κατηγορία για Φ/Β σύστημα

#### 4.1.1. On-Grid Solar Inverter

Όταν το ηλιακό φως χτυπά την επιφάνεια των ηλιακών πάνελ, τα φωτοβολταϊκά τους στοιχεία απορροφούν την ενέργεια και τη μετατρέπουν σε συνεχές ρεύμα (DC). Τις περισσότερες φορές, αυτή η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε τράπεζα μπαταριών για μελλοντική χρήση. Αν και αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για ορισμένους σκοπούς, οι περισσότερες συσκευές σε ένα τυπικό σπίτι λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Εδώ είναι χρήσιμος ένας ηλιακός μετατροπέας. Με απλά λόγια, ένας μετατροπέας λειτουργεί όπως ο εγκέφαλος του ηλιακού σας συστήματος. Δεν διαχειρίζονται μόνο τη ροή της ενέργειας μέσω του συστήματός, αλλά μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που συλλαμβάνουν οι ηλιακοί συλλέκτες σε χρησιμοποιήσιμη ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ένας μετατροπέας σύνδεσης δικτύου προχωρά τα πράγματα ένα βήμα παραπέρα. Οι μετατροπείς σύνδεσης δικτύου μετατρέπουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα και διασφαλίζουν ότι η τάση είναι κατάλληλη για ενσωμάτωση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντιστοιχούν με ακρίβεια στις απαιτήσεις του ηλεκτρικού δικτύου, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει το ηλιακό σύστημα να μπορεί να συνδεθεί με ασφάλεια σε έναν παραδοσιακό ηλεκτρικό μετρητή. Καθώς το ηλιακό σύστημα παράγει ενέργεια, το σύστημά θα τροφοδοτεί την ηλεκτρική ενέργεια στο τοπικό δίκτυο. Στη συνέχεια, η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που συνεισφέρετε στο δίκτυο θα αφαιρεθεί από την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας χρέωσης στους μηνιαίους λογαριασμούς κοινής ωφέλειας ή η τοπική εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας θα προσφέρει μια ισοδύναμη έκπτωση σε μετρητά. Με άλλα λόγια, ένας μετατροπέας δικτύου επιτρέπει την τροφοδότηση του σπιτιού με φιλική προς το περιβάλλον ηλιακή ενέργεια, η οποία θα εξοικονομήσει χρήματα και θα μειώσει το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα.

Οι καλύτεροι On-Grid Solar Inverter είναι οι εξής [71]:

### 1) SMA Sunny Boy 7.7-US 7700W Grid Tie Inverter

Ο SMA Sunny Boy 7.7-US 7700W είναι ένα βήμα παραπάνω από το λίγο παλαιότερο 7.5-US 7700W. Όπως το 7,5-US 7700W, είναι ένα πλήρως «Grid-Tie» σύστημα, που σημαίνει ότι έχει σχεδιαστεί για να τοποθετείται στο εξωτερικό του σπιτιού και να συνδέεται με το υπάρχον ηλεκτρικό σας σύστημα χωρίς επιπλέον καλώδια ή πρόσθετο υλικό. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχουν θορυβώδη, ακατάστατα και δύσκολα στην εγκατάσταση ηλεκτρικά καλώδια μέσα στο σπίτι ή το γκαράζ. Ο μετατροπέας έχει σχεδιαστεί για να συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός αποκλειστικού καλωδίου "δέσμευσης δικτύου" και είναι συμβατός με τα πρότυπα IEEE802.3at-2010 και IEEE802.3at-2011.

Ο SBG77700W είναι μια μονάδα μετατροπής ισχύος που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ισχύ συνεχούς ρεύματος για χρήση στην τράπεζα μπαταρίας και σε ισχύ συνεχούς ρεύματος για χρήση στο φορτίο. Αυτό το μηχάνημα 5000 Watt έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται εργασίες βαρέως τύπου. Όταν η ισχύς του δικτύου σας μειωθεί, ο Sunny Boy θα είναι εκεί για να τροφοδοτήσει ό,τι χρειάζεται.



Μάρκα: SMA

Ισχύς σε βατ: 7,7 KW

Διαστάσεις αντικειμένου: ΜxΠxΥ  
21,1 x 7,8 x 28,5 ίντσες

Συνολικές πρίζες: 1

Τάση εισόδου: 600 Volt

Σχετικά με αυτό το στοιχείο:

Ισχύς: 5000

Volt AC: 208, 240

Volt DC: 600

Τύπος: Transformerless, Disconnect, Inverter

Βάρος αντικειμένου: 57 λίρες

- **Πλεονεκτήματα:**



1. Ο Secure Power Supply παρέχει εφεδρική ηλεκτρική ενέργεια όταν χάνετε ρεύμα
  2. Εξαιρετική υποστήριξη πελατών
  3. Δεν χρειάζεστε τους βελτιστοποιητές ισχύος που είναι υποχρεωτικοί με άλλα παρόμοια συστήματα.
- **Μειονεκτήματα:**
    1. Θα χρειαστούν από 4 έως 6 ηλιακού συλλέκτες για να λειτουργήσει σωστά αυτή η μονάδα.
    2. Το σύστημα χρειάζεται πλήρες ηλιακό φως, επομένως τα πάνελ πρέπει να έχουν την ίδια κατεύθυνση.
    3. Μπορεί να είναι δύσκολο στην εγκατάσταση από μόνο ένα άτομα λόγω του βάρους (57 λίβρες)

## 2) ECO-WORTHY 1000W SOLAR GRID TIE INVERTER

Ο Eco-Worthy 1000W Grid Tie Inverter είναι ο πρώτος ηλιακός μετατροπέας της SunJack που έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές πλέγματος και είναι καλός. Έχει βαθμολογηθεί στα 1.000 W συνεχούς ισχύος και η ποιότητα κατασκευής του είναι εφάμιλλη με τους καλύτερους μετατροπείς σύνδεσης δικτύου της αγοράς. Η ενσωματωμένη οθόνη παρέχει πολλές πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ενέργειας, καθώς και πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για πράγματα όπως η τάση, η θερμοκρασία και η κατάσταση ημερομηνίας/ώρας. Η ψύκτρα της μονάδας μπορεί να ζεσταθεί πολύ (έως και 176 βαθμούς Φαρενάιτ) υπό ορισμένες συνθήκες. Μπορεί να συνδεθεί ή να στοιβάζεται σε πολλαπλάσια αν τη χρειάζεται για μεγαλύτερες συστοιχίες. Είναι πάντα ωραίο να μπορείς να χρησιμοποιείς την ίδια μονάδα παράλληλα.



Watt: 1000

Volt AC: 110

Volt DC: 22/65

Τύπος: 110 VOLT

Βάρος αντικειμένου: 11,45  
λίρες

- **Πλεονεκτήματα:**
  1. Πολύ εύκολη εγκατάσταση
  2. Εξαιρετική οθόνη με σχετικές πληροφορίες
  3. Σχεδίαση με δυνατότητα στοίβαξης σημαίνει ότι μπορείτε να έχετε πολλές μονάδες για μεγαλύτερες συστοιχίες
- **Μειονεκτήματα:**
  1. Περιέργως, ο μετατροπέας δεν μπορεί να συνδεθεί σε τράπεζα μπαταριών
  2. Ορισμένοι αγοραστές ανέφεραν ζητήματα ποιότητας σχετικά με την αναφερόμενη ισχύ εξόδου, αλλά δεν αντιμετωπίσαμε αυτό το πρόβλημα
  3. Η μονάδα μπορεί να ζεσταθεί πολύ μερικές φορές.

### **3) EPREC 600W GRID TIE SOLAR INVERTER**

Έτσι, σε αντίθεση με ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα, δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένα υπάρχον ηλιακό πάνελ για τη σύνδεση της ηλιακής ενέργειας με μια τράπεζα μπαταριών. Αυτό επιτρέπει την επιλογή από μια μεγαλύτερη ποικιλία φωτοβολταϊκών πλαϊσίων, αντί να χρειάζεται η αποθήκευση πολλών ηλιακών πάνελ. Πρώτον, ο EpRec 600 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση ποικίλων πηγών στο δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων συσσωρευτών μπαταριών, ηλιακών συλλεκτών, ανεμογεννητριών, ακόμη και μικρών ηλιακών θερμοσιφώνων. Δεύτερον, αυτός ο μετατροπέας έχει μέγιστη ονομαστική ισχύ 600 Watt, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να παράγει αρκετή ισχύ για να λειτουργεί μικρού έως μεσαίου μεγέθους συσκευές όπως ψυγείο, πλυντήριο και στεγνωτήριο. Ο EpRec 600W Grid Tie Inverter κυκλοφόρησε το φθινόπωρο του περασμένου έτους και έχει αποδειχθεί δημοφιλής. Αυτός ο μετατροπέας είναι μια μορφή συστήματος σύνδεσης δικτύου που είναι ένα πλήρως ενσωματωμένο και αυτόνομο προϊόν.



Watt: 600

Volt AC: 90 – 140

Volt DC: 11 – 32

Τύπος: 110 VOLT

Βάρος αντικειμένου: 3,74  
λίρες

- **Πλεονεκτήματα:**

1. Απλός σχεδιασμός και εύκολο στην εγκατάσταση
2. Αποδίδει όπως αναμένεται
3. Αρκετά ελαφρύ για να τοποθετηθεί οπουδήποτε

- **Μειονεκτήματα:**

1. Η μονάδα δεν φαίνεται να έχει τεκμηρίωση που να εξηγεί τις λυχνίες LED.
2. Μπορεί να μην είναι ήσυχο μερικές φορές
3. Δεν θα λειτουργεί με μπαταρία 12 Volt. χρειάζεται μπαταρία τουλάχιστον 24 Volt.

#### **4) GRID TIE INVERTER 1000W / 300W/ 500W / 600W**

Τα μοντέλα iMeshbean 1000W / 300W/ 500W / 600W είναι διαθέσιμα τόσο για εφαρμογές σύνδεσης δικτύου όσο και για εφεδρικές εφαρμογές μπαταρίας. Είναι σχεδιασμένα για συνεχή ηλιακή είσοδο και περιλαμβάνουν λειτουργία αυτοδιάγνωσης για γρήγορη αντιμετώπιση προβλημάτων. Το σύστημα 1000W, για παράδειγμα, είναι ικανό να τροφοδοτήσει ένα τυπικό νοικοκυριό και ζυγίζει μόνο 20 κιλά. Το σύστημα 1000W περιλαμβάνει ένα ηλιακό πάνελ 1000W, διακόπτη MPPT 20W και μέγιστη ισχύ 300W. Το σύστημα 1000W περιλαμβάνει επίσης τρεις φορτιστές MPPT 10W, καθώς και έναν ηλιακό ελεγκτή φόρτισης 1.000W. Οι μετατροπείς iMeshbean είναι ισχυρές μονάδες που έχουν σχεδιαστεί για να συνεργάζονται με το σύστημά σας σύνδεσης δικτύου για να μεγιστοποιήσουν την

απόδοσή σας και διατίθενται σε μια εύχρηστη στοιβαζόμενη μορφή για ευκολότερη εγκατάσταση. Δεν απαιτούνται μπαταρίες για τη χρήση της συσκευής.



Watt: 500

Volt AC: 90 – 140

Volt DC: 10,5 / 30

Τύπος: 120 VOLT

Βάρος αντικειμένου: 63 λίρες

- **Πλεονεκτήματα:**

1. Η αποσπώμενη οθόνη είναι ωραία και ευανάγνωστη.
2. Καμία ρύθμιση εγκεφάλου
3. Στοιβαζόμενο σχέδιο

- **Μειονεκτήματα:**

1. Μερικοί πελάτες έχουν αναφέρει μονάδες DOA
2. Δεν είμαστε σίγουροι αν πρόκειται για απλή παρεξήγηση, αλλά ορισμένοι αγοραστές ανέφεραν ότι η μονάδα είναι αναποτελεσματική. Η καλύτερη εικασία μας είναι ότι θα χρειαστείτε ένα πιο ισχυρό πάνελ εάν χρειάζεστε μια συγκεκριμένη ποσότητα ισχύος. Για παράδειγμα, εάν περιμένετε 500 Watt, τότε θα χρειαστείτε ένα πάνελ που να μπορεί να αποδίδει τουλάχιστον 635 Watt.

## 5) Y&H Grid Tie Inverter 600W Stackable DC11-32V

Ο Y&H μπορεί να τροφοδοτήσει τηλεοράσεις, φορητούς υπολογιστές, ψυγεία, ανεμιστήρες και άλλες συσκευές που χρειάζονται 600 Watt για να λειτουργήσουν. Έρχεται επίσης με καλώδιο τροφοδοσίας τύπου τούβλου και βύσμα DC. Είναι ένας εξαιρετικός μετατροπέας για αυτό που είναι. Είναι ένα δημοφιλές μοντέλο επειδή προσφέρει υψηλό επίπεδο ισχύος, είναι αρκετά μικρό και είναι σχετικά προσιτό. Ο 600 Watt Y&H Grid Tie Inverter είναι μια εξαιρετική επιλογή για ιδιοκτήτες σπιτιού που αναζητούν έναν οικονομικό μετατροπέα για την τροφοδοσία των οικιακών τους αναγκών. Είναι πολύ πιο ισχυρό από όσο νομίζει το αγοραστικό κοινό.



Watt: 600

Volt AC: 90 – 140

Volt DC: 11/32

Τύπος: 110 VOLT

Βάρος αντικειμένου: 4,1  
κιλά

- **Πλεονεκτήματα:**

1. Στοιβάζεται και διαθέτει διαχείριση ισχύος MPPT
2. Έχει εξαιρετική προστασία έναντι της θερμοκρασίας και ψυκτική ικανότητα
3. Καλή εξυπηρέτηση πελατών

- **Μειονεκτήματα:**

1. Αρκετοί αγοραστές ανέφεραν ότι η μονάδα παράγει πολλές ραδιοπαρεμβολές.
2. Ορισμένα προβλήματα ποιότητας εντοπίστηκαν μετά από μερικούς μήνες όπου η μονάδα σταματά να λειτουργεί εντελώς.
3. Η μονάδα λειτουργεί μόνο με μπαταρίες 24 Volt

Πίνακας 4.1: Σύγκριση των On-Grid Solar Inverter

1. SMA SUNNY BOY 7.7-US 7700W GRID TIE  
INVERTER

- **Ασφαλές Τροφοδοτικό**
- **Εξαιρετική υποστήριξη πελατών**
- Δεν χρειάζεστε τους βελτιστοποιητές ισχύος που είναι υποχρεωτικοί με άλλα παρόμοια συστήματα

2. ECO-WORTHY 1000W SOLAR GRID TIE  
INVERTER

- Πολύ εύκολη εγκατάσταση
- Εξαιρετική οθόνη με σχετικές πληροφορίες
- Σχεδίαση με δυνατότητα στοίβαξης σημαίνει ότι μπορείτε να έχετε

	πολλές μονάδες για μεγαλύτερες συστοιχίες
3. EPREC 600W GRID TIE SOLAR INVERTER	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απλός σχεδιασμός και εύκολο στην εγκατάσταση</li> <li>• Αποδίδει όπως αναμένεται</li> <li>• Αρκετά ελαφρύ για να τοποθετηθεί οπουδήποτε</li> </ul>
4. GRID TIE INVERTER 1000W / 300W / 500W / 600W	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Η αποσπώμενη οθόνη είναι ωραία και ευανάγνωστη</li> <li>• Καμία ρύθμιση brainer</li> <li>• Στοιβαζόμενο σχέδιο</li> </ul>
5. Y&H GRID TIE INVERTER 600W STACKABLE DC11-32V	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Στοιβάζεται και διαθέτει διαχείριση ισχύος MPPT</li> <li>• Έχει εξαιρετική προστασία έναντι της θερμοκρασίας και ψυκτική ικανότητα</li> <li>• Καλή εξυπηρέτηση πελατών</li> </ul>

#### 4.1.2. Off-Grid Solar Inverter

Ένας μετατροπέας εκτός δικτύου διαχειρίζεται τη ροή ισχύος σε όλο το σύστημά εκτός δικτύου. Ένας ηλιακός μετατροπέας εκτός δικτύου είναι μια συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) από τα ηλιακά πάνελ μέσω της τράπεζας μπαταριών σε χρησιμοποιήσιμο εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) για χρήση σε RV, κατασκηνώσεις, σπίτια εκτός δικτύου, καμπίνες, υπόστεγα, θαλάσσια χρήση κ.λπ. Διατίθενται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, αλλά λειτουργούν όλα με τον ίδιο τρόπο, τροφοδοτώντας την ισχύ συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τα ηλιακά πάνελ μέσω των ηλιακών μπαταριών λιθίου ή οποιουδήποτε τύπου μπαταρίας χρήσης.

Όταν προσδιοριστεί το μέγεθος ενός συστήματος εκτός δικτύου, είναι σημαντικός ο υπολογισμός των απαιτήσεων ισχύος των συσκευών που θα τροφοδοτούνται από το σύστημα, τόσο για το καλοκαίρι όσο και για το χειμώνα. Η ισχύς κάθε συσκευής βρίσκεται στην ετικέτα της και η τάση του συστήματος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή συσκευών. Η έκθεση στην ηλιακή ενέργεια θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ως παράγοντας, η τοποθεσία, το κλίμα, ο προσανατολισμός και η σκιά και κατά τη διάρκεια κακών καιρικών συνθηκών, ποιες εφεδρικές επιλογές ενέργειας υπάρχουν στη θέση, όπως μια ηλιακή γεννήτρια. Απαιτείται υπολογισμός του αθροίσματος της ισχύος όλων των συσκευών, καθώς και των φώτων, για να

προσδιοριστεί πόση ισχύ θα χρειαστεί εάν όλα ήταν ανοιχτά και λειτουργούσαν ταυτόχρονα. Συνιστάται η εγκατάσταση έναν μετατροπέα με υψηλότερη ισχύ από αυτή που παράγουν οι συσκευές διότι, εάν χρειαστεί η επέκταση του συστήματος στο μέλλον προσθέτοντας περισσότερα ηλιακά πάνελ, αυτό θα επιτρέψει την υλοποίηση του. Είναι επίσης επωφελές οικονομικά, αν πρέπει να αναβαθμιστεί κάθε φορά που επεκτείνεται το σύστημά. Ως αναφορά, η επιλογή μετατροπέα μπορεί να γίνει ευκολότερη χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες οδηγίες του Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Οδηγίες εγκατάστασης ενός Off Grid Solar Inverter [72]

Τύποι συσκευών	Οδηγός inverter kW	Τοποθεσία εκτός πλέγματος
Lap top, φώτα και ανεμιστήρας	<1 kW	Μικρές καμπίνες, RV, Marine, ακόμη και κάμπινγκ
Όλα τα παραπάνω συν τηλεόραση και ψυγείο	1-2 kW	Μικρές καμπίνες, RVs, Marine
Όλες οι μεγάλες συσκευές συν AC	2-4 kW	Μικρά σπίτια εκτός δικτύου, μεγάλα σκάφη
Όλες οι μεγάλες συσκευές συν AC και πηγάδια	4-8 kW	Τα περισσότερα σπίτια εκτός δικτύου
Όλες οι μεγάλες συσκευές συν AC και πηγάδια	8-16 kW	Μεγάλα σπίτια εκτός δικτύου, αγροκτήματα και μικρά εμπορικά κτίρια

Για τη χωρίς σύνδεση στο δίκτυο κοινής ωφέλειας, θα χρειαστεί ο καλύτερος μετατροπέας εκτός δικτύου για την εξασφάλιση σταθερής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τους ηλιακούς σας συλλέκτες στο σπίτι. Η κύρια λειτουργία των μετατροπέων εκτός δικτύου είναι να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος σε χρησιμοποιήσιμο AC που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις οικιακές μας συσκευές. Ωστόσο, παρακάτω επισυνάπτονται οι καλύτεροι μετατροπείς εκτός δικτύου all-in-one του 2022 μπορούν να κάνουν πολλά περισσότερα από αυτό.

Οι 9 μετατροπείς εκτός δικτύου από 1,3 kW έως 12 kW για να ικανοποιήσουν κάθε είδους χρήση από τη μικρή εξωτερική καμπίνα με ψυγείο και τηλεόραση έως μεγάλα σπίτια εκτός δικτύου με πολλαπλές μονάδες AC είναι οι εξής [73]:

### 1) 1,3kW VICTRON ENERGY EASYSOLAR 12/1600

Η Victron Energy είναι μια ολλανδική εταιρεία με εμπειρία δεκαετιών στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα προϊόντα τους είναι από τα πιο καινοτόμα και αξιόπιστα της αγοράς. Με τον EasySolar 12/1600, έναν μετατροπέα all-in-one που περιλαμβάνει έναν ελεγκτή ηλιακής φόρτισης MPPT και έναν μετατροπέα καθαρού ημιτονοειδούς κύματος. Το μόνο που χρειάζεται είναι η σύνδεση των μπαταριών και τους ηλιακούς συλλέκτες. Οι μπαταρίες μπορούν να φορτιστούν από τα ηλιακά πάνελ ή μια εξωτερική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος (γεννήτρια, ηλεκτρικό δίκτυο) ως εφεδρικό.



Ισχύς AC εξόδου: 1,3kW συνεχής – 3kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση μετατροπέα: 92%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου Φ/Β: 700W

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 98%

Τάση μπαταρίας: 12V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 70A (840W)

Εγγύηση: 5 χρόνια στάνταρ (έως 10)

Τιμή: 1465 \$

## 2) 3kW GroWatt SPF 3000TL

Η GroWatt είναι μια παγκόσμια κορυφαία μάρκα μετατροπέων με περισσότερα από 10 χρόνια εμπειρίας στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας. Ο GroWatt SPF 3000TL είναι ένας καλός μετατροπέας εισόδου εκτός δικτύου. Περιλαμβάνει έναν ελεγκτή ηλιακής φόρτισης και έναν μετατροπέα καθαρού ημιτονοειδούς κύματος υψηλής απόδοσης (93%). Μπορεί να διαμορφωθεί ώστε να δέχεται κατά προτεραιότητα την ηλεκτροδότηση/εφεδρική γεννήτρια (AC) ή την ηλιακή ενέργεια. Ως επιλογή, μπορεί να προστεθεί μια μονάδα WIFI για σκοπούς παρακολούθησης. Ένα από τα σπουδαία χαρακτηριστικά του είναι η επεκτασιμότητα του, καθώς υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης έως και 6 μονάδες παράλληλα. Είναι επίσης ένας από τους φθηνότερους μετατροπείς εκτός δικτύου στη λίστα.





Ισχύς AC εξόδου: 3kW συνεχής – 6kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση μετατροπέα: 93%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 2000W

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 97%

Τάση μπαταρίας: 24V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 80A (2000W)

Εγγύηση: 2 χρόνια

Τιμή: 899 \$

### 3) 3,5kW All-in-one Eco Worthy

Η Eco-worthy είναι μια μάρκα λευκής ετικέτας για μετατροπείς. Αυτός ο φθηνός μετατροπέας είναι η τέλεια επιλογή για ένα σύστημα DIY. Συνδυάζει έναν αποδοτικό ελεγκτή ηλιακής φόρτισης MPPT και έναν μετατροπέα καθαρού ημιτονοειδούς κύματος. Δέχεται γρήγορη φόρτιση (έως 4 kW) για να απορροφά μεγάλη ηλιακή παραγωγή κατά τις ώρες αιχμής του ήλιου. Επιπλέον, υπάρχουν 3 τρόποι φόρτισης: ηλιακή μόνο, εφεδρική προτεραιότητα, ηλιακή + εφεδρική. Είναι όλα προγραμματιζόμενα και θα εναλλάσσεται από τη μία λειτουργία στην άλλη σε συνάρτηση με τη διαθέσιμη πηγή ενέργειας για να εξασφαλίσει απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.



Ισχύς AC εξόδου: 3,5kW συνεχής – 7kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση μετατροπέα: 95%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 4200W

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 98%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 80A (4000W)

Εγγύηση: 14 ημέρες

Τιμή: 589 \$

#### **4) 4KW VICTRON ENERGY EASYSOLAR-II 48/5000/70-50 MPPT 250/100 GX**

Το EASYSOLAR-II είναι η τελευταία ενημέρωση της σειράς EasySolar της Victron. Ένας υψηλής ποιότητας μετατροπέας all-in-one που περιλαμβάνει έναν αποδοτικό ηλιακό φορτιστή MPPT (έως 5800W ισχύος Φ/Β) και έναν έξυπνο μετατροπέα. Το EasySolar-II μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα στο δίκτυο κοινής ωφέλειας και σε εφεδρική γεννήτρια. Μπορεί να ρυθμιστεί εύκολα η προτεραιότητα εφεδρικής ισχύος (δίκτυο ή γεννήτρια) και ο μετατροπέας θα εκκινήσει αυτόματα τη γεννήτρια εάν χρειαστεί.



Ισχύς AC εξόδου: 4,8kW συνεχής – 10kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση μετατροπεία: 97,6%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 10.400 W (2\*MPPT ηλιακός ελεγκτής)

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 99,9%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 120A (6000W)

Εγγύηση: 10 χρόνια στάνταρ

Τιμή: 4500\$

#### 5) 5kW Sol-Ark SA-5K-1P-N

Η Sol-Ark είναι μια αμερικανική εταιρεία που κατασκευάζει υψηλής ποιότητας μετατροπείς. Ο Sol-Ark-SA-5K συνδυάζει έναν υψηλής απόδοσης ηλιακό φορτιστή και έναν μετατροπεία καθαρού ημιτονοειδούς κύματος σε μια προ-καλωδιωμένη λύση. Αυτό το προϊόν είναι γεμάτο με καινοτομία, περιλαμβάνει 2 από τους πιο αποτελεσματικούς ηλιακούς φορτιστές MPPT (99,9%) για την επίτευξη ισχύος 10 kW φωτοβολταϊκών. Είναι επίσης ευέλικτο, καθώς θα μπορούσε να λειτουργήσει σε διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, όπως: full off-grid, grid sell, meter zero, time of use και peak sharing. Διαθέτει επίσης μια εφαρμογή παρακολούθησης και προγραμματισμού cloud. Τελικά συνοδεύεται από 10ετή εγγύηση που δείχνει τη σιβαρότητα του προϊόντος. Ως μειονέκτημα είναι λίγο ακριβό, αλλά εξαιρετική ποιότητα.



Ισχύς AC εξόδου: 6,5kW συνεχής – 13kW αιχμής

Μέγιστη Αποτελεσματικότητα: >92%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 10kW (5000W\*2)

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 98%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο, μολυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 120A (6000W)

Εγγύηση: 2 χρόνια

Τιμή: 1999 \$

#### 6) 6,5kW PHOCOS ANY-GRID PSW-H

Η Phocos είναι μια γερμανική εταιρεία με περισσότερα από 20 χρόνια εμπειρίας στην κατασκευή προϊόντων σχετικών με την ηλιακή ενέργεια. Η ευελιξία και η αξιοπιστία είναι τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του μετατροπέα all-in-one εκτός δικτύου. Ενσωματώνει δύο ελεγκτές ηλιακής φόρτισης MPPT υψηλής τάσης που επιτρέπουν τη σύνδεση φωτοβολταϊκών μονάδων σε σειρά μιας ή δύο στοιχειοσειρών. Με 6,5 kW θα έχει αρκετή ισχύ για ένα μέσο σπίτι εκτός δικτύου και αν χρειάζεται περισσότερη, υποστηρίζει έως και 9 μονάδες παράλληλα.



Ισχύς AC εξόδου: 6,5kW συνεχής – 13kW αιχμής

Μέγιστη Αποτελεσματικότητα: >92%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 10kW (5000W\*2)

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 98%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 120A (6000W)

Εγγύηση: 2 χρόνια

Τιμή: 1999 \$

#### 7) 9kW Sol-Ark SA-12K

Ο SA-12K είναι ο πιο ισχυρός μετατροπέας εκτός δικτύου που αναπτύχθηκε από τη Sol-Ark. Με 9 kW, δεν έχει κανένα πρόβλημα να τροφοδοτήσει ένα σπίτι πλήρως εκτός δικτύου. Διαθέτει 2 ελεγκτές ηλιακής φόρτισης MPPT που επιτρέπουν έως και 13 kW ηλιακών συλλεκτών. Αυτό είναι υπεραρκετό για να καλύψει τις καθημερινές ανάγκες του μέσου αμερικανικού σπιτιού. Είναι ένας ευέλικτος μετατροπέας, καθώς δέχεται φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος από το βοηθητικό πρόγραμμα ή μια εφεδρική γεννήτρια. Επιπλέον, είναι φορτωμένο με αισθητήρες που διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία και την αποδοτική μεταφορά ενέργειας ακόμα και σε υψηλά αμπέρ. Επιπλέον, σχεδιάστηκε για να διαρκεί περισσότερα από 20 χρόνια και συνοδεύεται από τυπική εγγύηση 10 ετών.



Ισχύς AC εξόδου: 9kW συνεχής –  
16kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση: 96,5%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 13 kW

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης:  
99,9%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο,  
μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας:  
185A (9000W)

Εγγύηση: 10 χρόνια

Τιμή: 6900\$

#### **8) 10kW SOLAR EDGE ENERGY HUB SE-11400H-US**

Η SolarEdge είναι μια ισραηλινή εταιρεία που ειδικεύεται σε μετατροπείς και συσκευές παρακολούθησης ηλιακής ενέργειας. Με περισσότερα από 10 kW, ο μετατροπέας εκτός δικτύου Energy Hub είναι γεμάτος ισχύ. Αυτή είναι η τέλεια επιλογή για ένα μεγάλο σπίτι εκτός δικτύου με πολλαπλές μονάδες κλιματισμού. Είναι ο πιο αποδοτικός μετατροπέας εκτός δικτύου στην αγορά, αγγίζοντας το 99%. Περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία για την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας με ενσωματωμένους μετρητές. Έχει καλή τιμή (κάτω από 4.500 \$) και συνοδεύεται από 12 χρόνια τυπική εγγύηση (έως 25 χρόνια), τη μεγαλύτερη στην αγορά.



Ισχύς AC εξόδου: 10,3kW συνεχής – 20kW μέγιστη

Μέγιστη Απόδοση: 99%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ: 22.800W

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής φόρτισης: 99%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο, μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης μπαταρίας: 80A (10.000W)

Εγγύηση: 12 έως 25 χρόνια

Τιμή: 3837 \$

#### **9) Μετατροπέας δικτύου διαχωρισμού φάσης 12 kW Growatt**

Αυτός ο μετατροπέας δέχεται έως και 7 kW ηλιακής ενέργειας που θα ήταν αρκετό για να καλύψει τις ανάγκες ενός μεσαίου μεγέθους σπιτιού εκτός δικτύου. Είναι πλήρως προγραμματιζόμενος και θα εναλλάσσεται αυτόματα μεταξύ ηλιακής λειτουργίας και φόρτισης AC όταν χρειάζεται. Ως μειονέκτημα, συνοδεύεται από εγγύηση μόνο 2 ετών και η απόδοση του μετατροπέα είναι από τις χαμηλότερες (88%).



Ισχύς AC εξόδου: 12kW συνεχής –  
36kW αιχμής

Μέγιστη Απόδοση: 88%

Μέγιστη Ισχύς εισόδου ΦΒ:  
7000W

Απόδοση ελεγκτή ηλιακής  
φόρτισης: 97%

Τάση μπαταρίας: 48V (λίθιο,  
μόλυβδο-οξύ)

Μέγιστο ρεύμα φόρτισης  
μπαταρίας: 120A (6100W)

Εγγύηση: 2 χρόνια

Τιμή: 2409 \$

#### 4.1.3. Hybrid Solar Inverter

Η κύρια δουλειά ενός μετατροπέα στο δίκτυο είναι να μετατρέπει την ισχύ συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε χρησιμοποιήσιμη ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι υβριδικοί μετατροπείς προχωρούν ένα βήμα παραπέρα και λειτουργούν με μπαταρίες για να αποθηκεύουν επίσης την υπερβολική ισχύ. Στον αναπτυσσόμενο κόσμο, οι υβριδικοί μετατροπείς είναι περισσότερο απαραίτητοι για να αντισταθμίσουν τα αδύναμα ή διακοπτόμενα δίκτυα ή την έλλειψη ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Ο αλληλεπιδραστικός μετατροπέας δικτύου αποτελείται από πολλά στοιχεία υλικού. Ο διαδραστικός μετατροπέας δικτύου ελέγχει και παρακολουθεί τη σύνδεση της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, ελέγχει επίσης την αποσύνδεση της πλεονάζουσας ισχύος από τις εγκαταστάσεις. Εξασφαλίζει την αποστολή ισχύος την ώρα αιχμής με βάση τη ζήτηση.

Ενώ οι κανονικοί ηλιακοί μετατροπείς απλώς μετατρέπουν την είσοδο ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος σε έξοδο εναλλασσόμενου ρεύματος, ο υβριδικός μετατροπέας για το ηλιακό σύστημα μπορεί να μετατρέψει ισχύ DC και ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Με άλλα λόγια, ο υβριδικός ηλιακός μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και ως φορτιστής και ως μετατροπέας. Κατά τη διάρκεια των χρήσεων, το υβριδικό ηλιακό σύστημα αντιστροφέα μπορεί ταυτόχρονα να διαχειρίζεται την ηλεκτρική ενέργεια τόσο από



τα ηλιακά πάνελ όσο και από τις συστοιχίες μπαταριών. Και οι μπαταρίες που συνδέονται με τον υβριδικό ηλιακό μετατροπέα μπορούν να φορτιστούν είτε με ηλεκτρική ενέργεια που συλλέγεται από ηλιακούς συλλέκτες είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο. Έχοντας τη δυνατότητα να εγκατασταθεί χωρίς μπαταρίες, ο υβριδικός ηλιακός μετατροπέας, σε αντίθεση με τον κανονικό ηλιακό μετατροπέα, μπορεί εύκολα να επιτύχει περαιτέρω επέκταση, γεγονός που καθιστά τον εαυτό του τέλειο για συστήματα ισχύος εκτός δικτύου και αυτόνομα.

Υπάρχουν πολλές μάρκες και μοντέλα υβριδικών ηλιακών μετατροπέων στην αγορά, η επιλογή του σωστού μοντέλου θα μπορούσε να είναι μια δύσκολη δουλειά για τους περισσότερους χρήστες. Σε αυτήν την ανασκόπηση θα προτείνονται αρκετοί μετατροπέες κορυφαίας βαθμολογίας και τα ασυναγώνιστα χαρακτηριστικά τους [74].

### 1) Ηλιακός μετατροπέας εκτός δικτύου: LXP SNA5000WPV

Ένας τέλειος συνδυασμός υψηλής απόδοσης και κόστους αποτελεσματικότητας. Ισχυρή ικανότητα εξόδου με μέγιστη συνεχή ισχύ 5 kW και μέγιστη ισχύ 10 kW, μπορεί να πάρει εύκολα σχεδόν όλες τις οικιακές συσκευές. Μπορεί να στοιβαχτεί έως και 12 μονάδες για να δώσει απίστευτη μέγιστη συνεχή απόδοση 60 kW.



Τύπος: Εκτός δικτύου

Χρόνος εναλλαγής: 10 mS

Διάσταση(ΠxΥxΒ): 330x504x135mm

Ονομαστική/Μέγιστη ισχύς:  
5kW/10kW

Οθόνη: LED+LCD

Βάρος: 14 kg

## 2) Ηλιακός υβριδικός μετατροπέας: LXP 4K

Ένα καταπληκτικό προϊόν που μπορεί να λειτουργήσει τέλεια τόσο σε εφαρμογές εντός και εκτός δικτύου. Διαθέτει βαθμό προστασίας IP65 και όλα τα κύρια πιστοποιητικά σύνδεσης στο δίκτυο. Είναι ένας πολύ δημοφιλής μετατροπέας στην αγορά του Ηνωμένου Βασιλείου.



Τύπος: On and Off grid hybrid inverter

Χρόνος εναλλαγής: 10 mS

Διάσταση(ΠxΥxΒ):  
455x476x181mm

Ονομαστική/Μέγιστη ισχύς:  
5kW/10kW

Οθόνη: LED+LCD

Βάρος: 20 kg

## 3) Μετατροπέας ζεύγους AC: LXP ACS3600

Ένας μετατροπέας μπαταρίας ειδικά σχεδιασμένος για την εκ των υστέρων προσαρμογή του υπάρχοντος ηλιακού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο σε σύστημα ηλιακής ενέργειας συν αποθήκευσης για να βοηθήσει τον χρήστη να αξιοποιήσει στο έπακρο την ηλιακή ενέργεια που παράγει μόνος του.



Τύπος: Μετατροπέας μπαταρίας συνδεδεμένο AC

Χρόνος εναλλαγής: 10 mS

Διάσταση (ΠxΥxΒ):  
650x440x220mm

Μέγιστη ισχύς AC προς/από το δίκτυο:  
3,6kW/6kW

Οθόνη: LED+LCD

Βάρος: 15,6 kg

#### 4) Μετατροπέας υψηλής ισχύος: LXP-LB-US-12kW

Ένας πολύ ισχυρός μετατροπέας υψηλής ισχύος για εφεδρική εφαρμογή ολόκληρου του σπιτιού. Με το ενσωματωμένο ρελέ παράκαμψης 200A και τη στιβαρή ισχύ 12 kW, δεν χρειάζεται πλέον να ανησυχία για το πώς να προετοιμαστεί μια οικογένειά για μείωση φορτίου ή απρόβλεπτες διακοπές ρεύματος.



Τύπος: On and Off grid hybrid inverter

Χρόνος εναλλαγής: 10 mS

Διάσταση(ΠxΥxΒ): 455x476x181mm

Ονομαστική/Μέγιστη ισχύς:  
5kW/10kW

Οθόνη: LED+LCD

Βάρος: 20 kg

#### 5) Υβριδικός ηλιακός μετατροπέας δικτύου υψηλής συχνότητας ON/OFF (AN-SCI02-EX-PRO)

Οι ηλιακοί υβριδικοί μετατροπείς ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της σειράς AN-EX-PRO είναι οι πιο πρόσφατοι μετατροπείς υψηλής συχνότητας που αναπτύχθηκαν

από την Aneer, με ονομαστική ισχύ 7,2 kw, 8,2 kw και 10,2 kw. Αυτός ο μετατροπέας καθαρού ημιτονοειδούς κύματος EX-PRO χρησιμοποιεί έναν ολόκληρο ελεγκτή MPPT, με είσοδο ενός καναλιού και η ελεγχόμενη συνοχή του μηχανήματος είναι καλύτερη. Υιοθετήστε τη λειτουργία διπλής εξόδου: η κύρια έξοδος μπορεί να συνδεθεί στο φορτίο ονομαστικής ισχύος και η δεύτερη έξοδος μπορεί να συνδεθεί σε φορτίο ίσο με το ένα τρίτο της ονομαστικής ισχύος. Η διπλή είσοδος φωτοβολταϊκών είναι πιο βολική για την καλωδίωση ηλιακών πάνελ και μειώνει τη χρήση κουτιών συνδυασμού [75]

Ξεκινώντας απευθείας χωρίς μπαταρίες, ο μετατροπέας που λειτουργεί χωρίς μπαταρίες μπορεί επίσης να βοηθήσει στη μείωση του κόστους στα συστήματα ηλιακής ενέργειας. Υπάρχει η λειτουργία παρακολούθησης WIFI, όπου ανά πάσα στιγμή ελέγχεται η κατάσταση λειτουργίας του υβριδικού μετατροπέα για το ηλιακό σύστημα μέσω της εφαρμογής APP και να πραγματοποιηθεί απομακρυσμένη λειτουργία.



4.1: Έλεγχος κατάστασης λειτουργίας του υβριδικού μετατροπέα.

#### Βασικά χαρακτηριστικά του Υβριδικού Ηλιακού Μετατροπέα Δικτύου ON/OFF υψηλής συχνότητας [75]

- Ο μετατροπέας καθαρού ημιτονοειδούς κύματος (Ζώνη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης), μπορεί να μετατραπεί σε μια ποικιλία διαφορετικών φορτίων ισχύος.
- Ιδιοκατανάλωση και τροφοδοσία στο δίκτυο
- Επαναφορά με ένα κλικ στις εργοστασιακές ρυθμίσεις
- Ενσωματωμένη μπαταρία λιθίου αυτόματη ενεργοποίηση
- Ενσωματωμένος ηλιακός φορτιστής 160A(για 7,2KW/8,2KW)/180A(για 10,2KW)MPPT
- Υψηλή τάση εισόδου ΦΒ (90~500VDC)
- Ενσωματωμένο κιτ κατά του σούρουπου για σκληρό περιβάλλον
- Επικοινωνία με το WIFI για IOS και Android

- Η διπλή είσοδος και έξοδος φωτοβολταϊκών είναι πιο βολικές για την καλωδίωση ηλιακών πάνελ και μειώνουν τη χρήση κουτιών συνδυασμού.
- Επαφή με το κουμπί

Πίνακας 4.3: Βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων του AN-SCI02-EX-PRO [75].

Μοντέλο	EX-Pro-7200	EX-Pro-8200	EX-Pro-10200
<b>Μέγιστη ισχύς εισόδου ΦΒ</b>	8200W	8200W	10200W
<b>Ονομαστική ισχύς εξόδου</b>	7200W	8200W	10200W
<b>Μέγιστο ρεύμα ηλιακής φόρτισης</b>	160A	160A	180A
<b>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ</b>			
<b>Είσοδος Φ/Β (DC)</b>			
<b>Ονομαστική τάση DC/Μέγιστη τάση DC</b>	360VDC/500VDC		
<b>Τάση εκκίνησης/Τάση αρχικής τροφοδοσίας</b>	90VDC/120VDC		
<b>Μέγιστη τάση DC</b>	500 VDC		
<b>Εύρος τάσης MPPT</b>	90V-450VDC		
<b>Αριθμός MPPT Trackers/Μέγιστο ρεύμα εισόδου</b>	1/27A		
<b>Έξοδος δικτύου (AC)</b>			
<b>Ονομαστική τάση εξόδου</b>	220/230/240 VAC		
<b>Εύρος τάσης εξόδου</b>	195-253VAC		
<b>Ονομαστικό ρεύμα εξόδου</b>	31,3A	35,6A	44,3A
<b>Απόδοση (Αιχμή) Μπαταρία σε INV.</b>	94%		
<b>Συντελεστής ισχύος</b>	>0,99		
<b>Εύρος συχνότητων τροφοδοσίας δικτύου</b>	49~51±1Hz		
<b>Ισχύς εξόδου δύο φορτίων</b>			
<b>Πλήρες φορτίο</b>	7200W	8200W	10200W
<b>Μέγιστο κύριο φορτίο</b>	7200W	8200W	10200W
<b>Μέγιστο δεύτερο φορτίο (λειτουργία μπαταρίας)</b>	2400W	2733W	3400W
<b>Τάση αποκοπής κύριου φορτίου</b>	44 VDC	44 VDC	44 VDC
<b>Τάση επιστροφής κύριου φορτίου</b>	48 VDC	48 VDC	48 VDC
<b>ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΚΤΟΣ ΔΙΚΤΥΟΥ</b>			
<b>Είσοδος AC</b>			
<b>AC Τάση εκκίνησης/Τάση αυτόματης επανεκκίνησης</b>	120-140VAC/180VAC		
<b>Αποδεκτό εύρος τάσης εισόδου</b>	90-280VAC ή 170-280VAC		
<b>Μέγιστο ρεύμα εισόδου AC</b>	40A	40A	50A

<b>Ονομαστική Συχνότητα Λειτουργίας</b>	50/60Hz		
<b>Ισχύς υπέρτασης</b>	14400 W	16400 W	20400 W
Έξοδος λειτουργίας μπαταρίας			
<b>Ονομαστική τάση εξόδου</b>	48 VDC	48 VDC	48 VDC
<b>Κυματομορφή εξόδου</b>	Καθαρό ημιτονοειδές κύμα		
<b>Απόδοση (DC σε AC)</b>	94%		
Φορτιστής μπαταρίας			
<b>Ονομαστική τάση DC</b>	48 VDC	48 VDC	48 VDC
<b>Μέγιστο ρεύμα ηλιακής φόρτισης</b>	160A	160A	180A
<b>Μέγιστο ρεύμα φόρτισης AC</b>	140A	140A	160A
ΦΥΣΙΚΟΣ			
<b>Διάσταση, Π x Π x Υ (mm)</b>	537*390*130 χλστ		
<b>Καθαρό βάρος (κιλά)</b>	14.2	14.2	14.5
<b>Διεπαφή επικοινωνίας</b>	WIFI		

#### 4.2. Active Front-end (AFE) ή Grid-tie Inverter;

Στην Oztek, ορίζουν τα AFE ως μετατροπείς που αναπτύσσουν μια ρυθμιζόμενη σύνδεση DC και τα GTI ως μετατροπείς που μεταφέρουν ισχύ από μια σύνδεση DC σε μια γραμμή AC, αλλά αυτό είναι στην πραγματικότητα μόνο μια γενίκευση. Η πραγματική διαφορά είναι η εφαρμογή, όχι ο ίδιος ο μετατροπέας. Η αίτηση μπορεί να υπαγορεύει τις απαιτήσεις έγκρισης του φορέα ή τις τρέχουσες αρμονικές απαιτήσεις. Μπορεί να υπαγορεύει πώς επιτρέπεται να ρέει η ισχύς ή πώς θα ανταποκρίνεται το σύστημα υπό ορισμένες συνθήκες σφάλματος, αλλά ακόμα και με αυτές και άλλες διαφορές εφαρμογής, πουθενά δεν θα βρείτε έναν σαφή, διαφοροποιητικό παράγοντα στον ίδιο τον μετατροπέα.

Τόσο τα GTI όσο και τα AFE (γνωστά και ως ενεργοί ανορθωτές) μετατρέπονται ενεργά μεταξύ εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος. Οι κοινές τοπολογίες είναι πλήρως ικανές να μεταφέρουν ισχύ και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο περιορισμός της ροής ισχύος προς μία κατεύθυνση, όπως απαιτείται συνήθως για εφαρμογές μετατροπέων σύνδεσης δικτύου, διασφαλίζεται μέσω ελέγχου και δεν αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό του μετατροπέα. Τόσο τα GTI όσο και τα AFE πρέπει να παρουσιάζουν υψηλή σύνθετη αντίσταση στη γραμμή AC, καθώς η τάση καθορίζεται από άλλες πηγές. Αυτή είναι η βασική διαφορά από τους μετατροπείς πηγών τάσης, οι οποίοι είναι σχεδιασμένοι να έχουν χαμηλή σύνθετη

αντίσταση πηγής για την οδήγηση φορτίων AC. Αν και δεν είναι η μόνη μέθοδος υλοποίησης, χρησιμοποιούμε έλεγχο βρόχου ρεύματος για να παρέχουμε μια κατάλληλα υψηλή αντίσταση AC στη συχνότητα γραμμής. Ένας μετατροπέας πηγής τάσης, από την άλλη πλευρά, θα χρησιμοποιήσει ανάδραση τάσης.

Ένας απλός ορισμός του Active Rectifier είναι «ένας μη απομονωμένος μετατροπέας AC-DC με δύο βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα παθητικά συστήματα ανορθωτή. ρύθμιση τάσης εξόδου και μείωση αρμονικής εισόδου εναλλασσόμενου ρεύματος.» Ο όρος "Active Front-end" περιγράφει το ίδιο πράγμα, ενώ εξαλείφει τον όρο "ανορθωτής", ο οποίος νομίζω ότι εσφαλμένα υπονοεί έναν μετατροπέα μονής κατεύθυνσης. Αντί για "τάση εξόδου", μου αρέσει να χρησιμοποιώ τον όρο "τάση ζεύξης DC", καθώς όπως έχουμε σημειώσει, ο μετατροπέας είναι εγγενώς αμφίδρομος και επομένως η πλευρά DC μπορεί να είναι η έξοδος ή η είσοδος. Μπορείτε να δείτε πού πηγαίνει αυτό. Ονομάστε το όπως θέλετε, ένας ενεργός μπροστινός ή ενεργός ανορθωτής έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει ισχύ από τη σύνδεση DC στη γραμμή AC, η οποία είναι ουσιαστικά η ίδια λειτουργία που εκτελεί ένας μετατροπέας σύνδεσης δικτύου.

Φαίνεται λοιπόν ότι η ρύθμιση της σύνδεσης DC είναι πραγματικά ο βασικός παράγοντας διαφοροποίησης. Οι μετατροπείς σύνδεσης δικτύου δεν χρειάζεται να ρυθμίζουν τη σύνδεση DC τους. Αντίθετα, η λειτουργία τους είναι απλώς να μεταφέρουν ισχύ από τη σύνδεση DC στη γραμμή AC, αλλά ισχύει πάντα αυτό; Η τροφοδοσία ενός μετατροπέα σύνδεσης δικτύου απευθείας από μια έξοδο ηλιακού πάνελ μπορεί να είναι μια τυπική διαμόρφωση, αλλά δεν είναι η μόνη. Συχνά, καλύτερη απόδοση του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί ρυθμίζοντας την πηγή με έναν μετατροπέα DC-DC (σκεφτείτε τη μεταβλητότητα στην έξοδο ενός ηλιακού πάνελ ή ανεμογεννήτριας), επιτρέποντας στον μετατροπέα να λειτουργεί υπό πολύ πιο αυστηρά καθορισμένες συνθήκες. Μια κοινή εφαρμογή είναι η διαμόρφωση του μετατροπέα DC-DC ώστε να ρυθμίζει την τάση εξόδου του. Αυτό εξακολουθεί να έχει τον μετατροπέα σύνδεσης δικτύου που λειτουργεί από μια πηγή τάσης, αλλά αυτή δεν είναι πάντα η καλύτερη επιλογή.

Πρέπει επίσης να εξεταστεί η παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) για πολλά συστήματα, και με ένα σύστημα δύο σταδίων, αυτό συχνά εφαρμόζεται καλύτερα στον μετατροπέα DC-DC. Με την καθαρή έννοια, αυτό οδηγεί σε έναν μετατροπέα DC-DC με μεταβαλλόμενη έξοδο ρεύματος, όχι τάση εξόδου, αλλά δεν μπορούμε να αφήσουμε την τάση σύνδεσης DC ανεξέλεγκτη. Μια λύση είναι η προσθήκη ενός πρόσθετου βρόχου ρύθμισης τάσης, αλλά από μόνο του, αυτό παρεμβαίνει στο MPPT. Μια εναλλακτική λύση είναι η επαναφορά της ρύθμισης τάσης σύνδεσης DC στον μετατροπέα σύνδεσης δικτύου, μετατρέποντάς τον σε AFE από την άποψη της ονοματολογίας. Στην πραγματικότητα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο μετατροπέας σύνδεσης δικτύου να αποδίδει τόση ισχύ στη γραμμή AC όση θα

υποστηρίζει ο μετατροπέας DC-DC – ακριβώς ο στόχος του συστήματος. Και η διαφορά μεταξύ GTI και AFE σε αυτή την περίπτωση; Σχεδόν τίποτα [76]

#### 4.3. Διαφορά μεταξύ του μετατροπέα πηγής τάσης (VSI) και του μετατροπέα πηγής ρεύματος (CSI)

Οι μετατροπείς αυτομετατροπής μπορεί να είναι μετατροπέας πηγής τάσης (Voltage Source Inverter - VSI) ή μετατροπέας πηγής ρεύματος (Current Source Inverter - CSI) με βάση τις κυματομορφές τάσης ή ρεύματος στην πλευρά DC εισόδου τους. Στο VSI, η πλευρά εισόδου είναι μια πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος, η τάση εισόδου διατηρεί την ίδια πολικότητα, η μέση κατεύθυνση ροής ισχύος μέσω του μετατροπέα καθορίζεται από την πολικότητα του ρεύματος DC εισόδου και στην πλευρά εξόδου, μια κυματομορφή τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος μπορούν να ληφθούν το σταθερό πλάτος και το μεταβλητό πλάτος. Για τον περιορισμό της ροής ρεύματος από τον μετατροπέα προς το δίκτυο κοινής ωφέλειας χρησιμοποιείται ένας επαγωγέας γραμμής σύνδεσης μαζί με το VSI. Οι πλευρικοί ακροδέκτες DC εισόδου ενός VSI συνδέονται συνήθως παράλληλα με έναν σχετικά μεγάλο πυκνωτή που μοιάζει με πηγή τάσης. Στο CSI, η πλευρά εισόδου είναι μια πηγή ρεύματος συνεχούς ρεύματος, το ρεύμα εισόδου διατηρεί την ίδια πολικότητα, και επομένως η μέση κατεύθυνση ροής ισχύος μέσω του μετατροπέα καθορίζεται από την πολικότητα της τάσης εισόδου και στην πλευρά εξόδου μπορεί να ληφθεί μια κυματομορφή ρεύματος AC σταθερού πλάτους και μεταβλητού πλάτους. Η πλευρά DC εισόδου του CSI συνδέεται συνήθως σε σειρά με ένα σχετικά μεγάλο επαγωγέα που διατηρεί τη συνέχεια του ρεύματος. Ένα VSI μπορεί να λειτουργήσει σε λειτουργία ελέγχου τάσης καθώς και σε λειτουργία ελέγχου ρεύματος και πολλές φορές, το VSI με λειτουργία ελέγχου ρεύματος προτιμάται για Φ/B σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο.

Στον Πίνακα 4.4/Πίνακα 5.4, παρουσιάζονται ορισμένες βασικές διαφορές μεταξύ ενός VSI και ενός CSI. Ο Πίνακας 4.5 δείχνει τις διαφορές μεταξύ της λειτουργίας ελέγχου τάσης και της λειτουργίας ελέγχου ρεύματος ενός μετατροπέα πηγής τάσης. Για τον μετατροπέα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς σύνδεση στο δίκτυο, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η λειτουργία ελέγχου τάσης. Ωστόσο, τόσο η λειτουργία ελέγχου τάσης όσο και η λειτουργία ελέγχου ρεύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετατροπέα φωτοβολταϊκού συστήματος που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Στο συνδεδεμένο στο δίκτυο φωτοβολταϊκό σύστημα, ο μετατροπέας με τη λειτουργία ελέγχου ρεύματος χρησιμοποιείται εκτενώς επειδή ένας υψηλός συντελεστής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με ένα απλό κύκλωμα ελέγχου, καθώς και η καταστολή του μεταβατικού ρεύματος είναι δυνατή όταν συμβαίνουν οποιοδήποτε διαταραχές στο δίκτυο.

Πίνακας 4.4: Διαφορά μεταξύ του μετατροπέα πηγής τάσης και του μετατροπέα πηγής ρεύματος [77]

Παράμετρος	Voltage Source Inverter (VSI)	Current Source Inverter (CSI)
------------	-------------------------------	-------------------------------



Πηγή ενέργειας	Η είσοδος του VSI είναι μια πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος με μικρή ή αμελητέα αντίσταση	Η είσοδος ενός CSI είναι μεταβλητό ρεύμα από μια πηγή τάσης συνεχούς ρεύματος με υψηλή σύνθετη αντίσταση
Παράμετρος εισαγωγής	Η τάση εισόδου διατηρείται σταθερή. Οι πλευρικοί ακροδέκτες εισόδου DC ενός VSI συνδέονται παράλληλα με έναν πυκνωτή και ο πυκνωτής DC είναι μικρός, φθηνός και αποδοτικός αποθήκευσης ενέργειας	Το ρεύμα εισόδου είναι σταθερό αλλά ρυθμιζόμενο. Η πλευρά DC εισόδου ενός CSI συνδέεται σε σειρά με έναν επαγωγέα και ο επαγωγέας DC είναι ογκώδης, ακριβό και συνεισφέρει περισσότερες απώλειες
Εξάρτηση από το φορτίο	Το πλάτος της τάσης εξόδου δεν εξαρτάται από το φορτίο. Αντίθετα, η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου καθώς και το μέγεθός του εξαρτάται από τη φύση της σύνθετης αντίστασης φορτίου.	Το πλάτος του ρεύματος εξόδου δεν εξαρτάται από το φορτίο. Αντίθετα, η κυματομορφή της τάσης εξόδου καθώς και το μέγεθός της εξαρτάται από τη φύση της σύνθετης αντίστασης φορτίου.
Σχετική απώλεια	Υψηλή απώλεια μεταγωγής αλλά χαμηλή απώλεια αγωγιμότητας. Έτσι η συνολική απώλεια ισχύος είναι χαμηλή.	Χαμηλή απώλεια μεταγωγής αλλά υψηλή απώλεια αγωγιμότητας. Έτσι, η συνολική απώλεια ισχύος είναι υψηλή.

Πίνακας 4.5: Διαφορά μεταξύ της λειτουργίας ελέγχου τάσης και της λειτουργίας ελέγχου ρεύματος του μετατροπέα πηγής τάσης [31]

Παράμετρος	Λειτουργία ελέγχου τάσης	Λειτουργία ελέγχου ρεύματος
Τύπος μετατροπέα	Αυτο-μετατροπέας	Μετατροπέας πηγής τάσης
Παράμετρος ελέγχου	AC τάση	AC ρεύμα
Ρεύμα βραχυκυκλώματος σφάλματος	Υψηλό	Χαμηλό (Περιορισμένο στο ονομαστικό ρεύμα)

#### 4.4. Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τοπολογιών φωτοβολταϊκών μετατροπέων βασισμένες στην αρχιτεκτονική

Υπάρχουν πολλοί τύποι διαμόρφωσης συστοιχιών φωτοβολταϊκών στη βιβλιογραφία, όπως σειρές, κυψελωτές, παράλληλες, συνδεδεμένες με γέφυρα κ.λπ. Μεταξύ αυτών, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις είναι οι συνδέσεις σειράς ή παράλληλες. Εάν τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους, ονομάζεται συμβολοσειρά και εάν συνδέονται παράλληλα, σχηματίζει μια συστοιχία. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες διατάσσονται σε τέσσερις τύπους διαμορφώσεων με βάση τον τύπο μετατροπέα όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και τα κύρια χαρακτηριστικά αυτών των

μετατροπών επεξηγούνται και συγκρίνονται αντίστοιχα στους Πίνακες Πίνακας 4.6. και Πίνακας 4.7.

Πίνακας 4.6: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τοπολογιών μετατροπών [37]

Τοπολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Κοστολόγηση	Βαθμολογία ισχύος
<b>Centralized</b>	Χαμηλό κόστος λόγω κεντρικού μετατροπέα	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Απώλειες DC σε καλώδια DC υψηλής τάσης</li> <li>2. Απώλεια ισχύος λόγω κεντρικού MPPT, διόδων στοιχειοσειρών και ασυμφωνίας σε Φ/Β μονάδες</li> <li>3. Η λειτουργία της ηλιακής μονάδας διακυβεύεται λόγω μερικής σκίασης</li> <li>4. Σε περίπτωση βλάβης του μετατροπέα δεν υπάρχει δυνατότητα τροφοδοσίας ρεύματος στο δίκτυο κοινής ωφέλειας</li> <li>5. Χαμηλή αξιοπιστία</li> <li>6. Μη ευέλικτο σχέδιο</li> </ol>	Χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τον μετατροπέα στοιχειοσειρών	30– 50– 1 MW
<b>String</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Μείωση των ενεργειακών απωλειών που προκύπτουν από τη μερική σκίαση</li> <li>2. Οι απώλειες στις διόδους χορδών εξαλείφονται</li> <li>3. Καλύτερη σταθερότητα και ασφάλεια έναντι αστοχίας καθώς το σήμα AC προέρχεται από κάθε</li> </ol>	Χρησιμοποιείται για χαμηλές τιμές ισχύος	Μεγαλύτερο κόστος σε σύγκριση με την κεντρική τοπολογία	1–2– 5 kW /σειρά

	<p>φωτοβολταϊκή μονάδα σε έναν κοινό δίαυλο AC</p> <p>4. Καλή αξιοπιστία</p> <p>5. Ευέλικτο στο σχέδιο</p>			
<b>Multi-string</b>	<p>1. Μείωση των ενεργειακών απωλειών που προκύπτουν από τη μερική σκίαση</p> <p>2. Οι απώλειες στις διόδους χορδών εξαλείφονται</p> <p>3. Ο έλεγχος MPPT και ρεύματος διαχωρίζονται</p> <p>4. Η ενίσχυση τάσης μπορεί να επιτευχθεί από τον μετατροπέα DC-DC</p>	<p>1. Όλες οι στοιχειοσειρές συνδέονται σε έναν ενιαίο μετατροπέα και έτσι η αξιοπιστία του συστήματος μειώνεται</p> <p>2. Πρόσθετες απώλειες στο εσωτερικό του μετατροπέα DC-DC</p>	<p>Το κόστος είναι υψηλότερο σε σύγκριση με την κεντρική τοπολογία</p>	50 kW
<b>AC module</b>	<p>1. Κατάλληλο για οικιακές εφαρμογές όπου η μερική σκίαση είναι κρίσιμο ζήτημα</p> <p>2. Δεν υπάρχουν απώλειες αναντιστοιχίας μεταξύ των μονάδων</p> <p>3. Εύκολη ανίχνευση αστοχίας των μονάδων</p> <p>4. Ευέλικτο &amp; επεκτάσιμο στο σχεδιασμό</p> <p>5. Καλό για μαζική παραγωγή, όπως είναι τα αρθρωτά</p> <p>6. Η μέση διάρκεια ζωής είναι 25 χρόνια λόγω της εξάλειψης του bulk ηλεκτρολυτικού πυκνωτή</p>	<p>Η αντικατάσταση του μετατροπέα σε περίπτωση βλάβης δεν είναι εύκολη</p>	<p>Το κόστος είναι χαμηλό, αλλά σε επίπεδα μάζας το κόστος είναι υψηλό σε σύγκριση με τον μετατροπέα στοιχειοσειρών</p>	Άνω των 500– 600 W

Πίνακας 4.7: Πίνακας 5.7. Αξιολόγηση απόδοσης φωτοβολταϊκών μετατροπέων [78]

Επίδοση	Central	String	Multi-String	AC Module
Πολύ υψηλή	Διακύμανση της τάσης εισόδου DC	-	-	Συντήρηση Κόστος εγκατάστασης Αποδοτικότητα MPPT Ευκαμψία Αξιοπιστία
Υψηλή	Κόστος καλωδίων Εξισορρόπηση τάσης Απώλεια ισχύος DC Απώλεια μεταγωγής Αναντιστοιχία πάνελ Ευρωστία	Κόστος εγκατάστασης Αποδοτικότητα MPPT Ευκαμψία Αξιοπιστία	Διακύμανση της τάσης εισόδου DC	Κόστος καλωδίων AC Απώλεια εναλλασσόμενου ρεύματος
Μέτρια	Κόστος εγκατάστασης	Κόστος καλωδίων DC Διακύμανση τάσης DC Απώλεια εναλλασσόμενου ρεύματος Εξισορρόπηση τάσης	Συντήρηση Αποδοτικότητα MPPT Ευκαμψία Αξιοπιστία Ευρωστία Απώλεια ισχύος DC και AC Απώλεια μεταγωγής Κόστος εγκατάστασης και καλωδίων	-
Χαμηλή	Αποδοτικότητα MPPT Ευκαμψία Αξιοπιστία Συντήρηση Απώλεια εναλλασσόμενου ρεύματος	Ευρωστία Κόστος καλωδίων Απώλεια ισχύος DC Απώλεια μεταγωγής Αναντιστοιχία πάνελ	Εξισορρόπηση τάσης Αναντιστοιχία πάνελ	Εξισορρόπηση τάσης
Πολύ χαμηλή	-	-	-	Ευρωστία Κόστος καλωδίων Διακύμανση τάσης DC Απώλεια ισχύος DC

				Απώλεια μεταγωγής Αναντιστοιχία πάνελ
Αξιολόγηση ισχύος	1–50 MW	1–5 kW/σειρά	1–50 kW	500–600 W
Κόστος	Χαμηλότερο κόστος	Ακριβότερο από τον κεντρικό μετατροπέα	Ακριβότερο από τον κεντρικό μετατροπέα	Το υψηλότερο κόστος

Σημείωση: Το κείμενο με πράσινο χρώμα δείχνει τα εφικτά χαρακτηριστικά, το κείμενο με κόκκινο δείχνει τα μειονεκτήματα μη εφικτά χαρακτηριστικά και το κείμενο με μπλε δείχνει τα μέτρια χαρακτηριστικά

## 5. Κεφάλαιο 5ο: Μελέτη Περίπτωσης

### 5.1. Γιατί να βάλει κανείς ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής ενέργειας με μπαταρίες.

Ένα σπίτι στην Ελλάδα έχει διάφορες ανάγκες όσον αφορά τη χρήση ενέργειας. Ανάλογα με την περιοχή και το μέγεθος του σπιτιού, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να είναι πολύ υψηλή και απαιτεί τη χρήση ενός συστήματος υποστήριξης για την παραγωγή ενέργειας. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλιακών πάνελ είναι μια πολύ καλή επιλογή για την παραγωγή ενέργειας σε ένα σπίτι. Η χρήση ηλιακών πάνελ μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ενέργειας του σπιτιού και μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος των λογαριασμών του ηλεκτρικού ρεύματος. Για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μέσω ηλιακών πάνελ, απαιτείται η χρήση μιας σειράς συσκευών, όπως ηλιακοί συλλέκτες, μπαταρίες αποθήκευσης ενέργειας, inverter και φορτιστές μπαταριών. Η εγκατάσταση και η συντήρηση του συστήματος απαιτεί την εμπλοκή ειδικών τεχνικών και ηλεκτρολόγων μηχανικών έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος.

Στην Ελλάδα, τα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής μέσω ηλιακών πάνελ είναι εξαιρετικά χρήσιμα, καθώς ο ήλιος είναι πλούσιος στην περιοχή και οι ηλιόλουστες μέρες είναι συχνές. Η επιλογή της κατάλληλης εξοπλιστικής λύσης εξαρτάται από τις ανάγκες του σπιτιού, τον αριθμό των κατοίκων και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η επένδυση σε ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μέσω ηλιακών πάνελ είναι μια οικονομικά αποδοτική επιλογή για τη μείωση των ενεργειακών εξόδων. Η αρχική επένδυση μπορεί να είναι υψηλή, αλλά οι ηλιακοί συλλέκτες έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και συνεπώς αποτελούν μια βιώσιμη και αποδοτική λύση στο μακροπρόθεσμο. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρήση ηλιακής ενέργειας είναι μια βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική λύση για την ενεργειακή ανεξαρτησία ενός σπιτιού. Η χρήση αυτής της τεχνολογίας μειώνει την εξάρτηση από τα παραδοσιακά καύσιμα, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η εγκατάσταση ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των λογαριασμών ηλεκτροδότησης και να επιτρέψει στους καταναλωτές να εξοικονομήσουν χρήματα στο μακροπρόθεσμο.

Ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής ενέργειας με μπαταρίες μπορεί να είναι χρήσιμο για πολλούς λόγους. Οι πιο σημαντικοί λόγοι περιλαμβάνουν:

- 1) Ανεξαρτησία από το δίκτυο: Με ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπαταριών, μπορούμε να απομονωθούμε από το δίκτυο ηλεκτροδότησης και να έχουμε ανεξάρτητη παροχή ενέργειας. Αυτό μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμο σε περιοχές με αστάθεια στο δίκτυο ή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπου η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να διακοπεί.

- 2) Αποθήκευση ενέργειας: Με ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπαταριών, μπορούμε να αποθηκεύσουμε την ενέργεια που παράγουμε και να τη χρησιμοποιήσουμε αργότερα. Αυτό μπορεί να μας επιτρέψει να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια όταν είναι διαθέσιμη, ακόμα και όταν δεν υπάρχει αρκετή ζήτηση για την ενέργεια αυτήν τη στιγμή.
- 3) Εξοικονόμηση χρημάτων: Με ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπαταριών μπορούμε να εξοικονομήσουμε χρήματα στο μακροπρόθεσμο, καθώς δεν θα χρειάζεστε η αγορά ενέργειας από το δίκτυο. Επιπλέον, με την αποθήκευση της ενέργειας που παράγουμε με το σύστημα μπαταριών, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την ενέργεια όταν οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλές, εξοικονομώντας έτσι περαιτέρω χρήματα.
- 4) Περιβαλλοντική φιλικότητα: Με ένα σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μπαταριών μειώνουμε την κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο και να χρησιμοποιήσουμε την ηλιακή ενέργεια. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση της ρύπανσης του αέρα και της υπερθέρμανσης του πλανήτη.

## 5.2. Τεχνική Έκθεση

- ❖ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ Φ/Β ΣΤΑΘΜΟΥ ΙΣΧΥΤΟΣ 8,64kWp
- ❖ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ: ΙΩΑΝΝΙΝΑ, ΒΟΤΑΝΙΚΟΣ, ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ , 45221
- ❖ ΙΩΑΝΝΙΝΑ, Π.Ε.ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ, ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΗΠΕΙΡΟΥ

### 5.2.1. Γεωγραφική θέση έργου:

Η θέση εγκατάστασης του (φ/β) σταθμού είναι στην περιοχή του βοτανικού, διεύθυνση του Δήμου Ιωαννιτών. Το φωτοβολταϊκό σύστημα θα τοποθετηθεί στη στέγη ιδιωτικής κατοικίας του αυτοπαραγωγού (ΟΝΟΜΑΤΕΠΟΝΥΜΟ).

### 5.2.2. Περιγραφή έργου

#### 5.2.2.1. Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φωτοβολταϊκά πανελα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι 16 πλαίσια φωτοβολταϊκών μοντέλων ECO DELTA ECO-540M-72LHC, με συνολική ισχύ 8,64 kWp και ισχύ κάθε πλαισίου στα 540Wp. Τα πλαίσια έχουν πιστοποίηση σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61215 και IEC 61730 από την TÜV RHEINLAND, καθώς και πιστοποίηση συστήματος διαχείρισης ποιότητας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9001. Τα πλαίσια έχουν διαστάσεις 2287x1133x35mm και είναι κατάλληλα για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα σε οριζόντιο ή κατακόρυφο προσανατολισμό.

#### **5.2.2.2. Μετατροπείς (inverters)**

Τα Φ/Β πλαίσια διατάσσονται σε δύο (2) συστοιχίες (strings). Για την εγκατάσταση θα χρησιμοποιηθεί ένας (3) μετατροπείς (inverter) της εταιρίας VICTRON ENERGY, τύπου MULTIPPLUS-II 230V ονομαστικής ισχύος 5kWp ο καθένας στους οποίους θα συνδεθούν 16 Φ/Β πλαίσια σε 2 συστοιχίες (strings). Ο κάθε μετατροπέας διαθέτει μέγιστο 2 εισόδους DC ζευγαριών καλωδίων. Ο μετατροπέας είναι κατάλληλος για τοποθέτηση τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους και θα τοποθετηθεί σε ειδικά διαμορφωμένη βάση, οι οποία θα τοποθετηθεί σε εξωτερικό σημείο σε στεγασμένο σημείο εντός οικοπέδου.

Ο μετατροπέας ελέγχει την κατάσταση του δικτύου και μόλις ανιχνεύσει κάποιο σφάλμα (υπόταση, υπέρταση, διακοπή φάσης κλπ.) τίθεται αυτομάτως εκτός λειτουργίας για να προστατευτεί η εγκατάσταση και το δίκτυο. Η λειτουργία του μετατροπέα είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές VDE 0126 για την αποφυγή του φαινομένου της νησιδοποίησης, καθώς επίσης και με τις απαιτήσεις της ΔΕΗ και μπορεί να συνδεθεί στο δίκτυό της.

#### **5.2.2.3. Υποπίνακες**

Οι έξοδοι των μετατροπέων (φάσεις, ουδέτερος, γείωση) θα οδηγούνται σε έναν (1) υποπίνακα ο καθένας (String Box) και θα περιλαμβάνει έναν (1) αυτόματο τριπολικό διακόπτη ισχύος, μία (1) ενδεικτική λυχνία για κάθε φάση, ασφάλειες τύπου φυσιγγίου, μαχαιρωτές ή αυτόματες για την προστασία του AC καλωδίου, και αντικεραυνική προστασία με διάταξη στάθμης προστασίας T2.

#### **5.2.2.4. Κεντρικός Πίνακας**

Ο κεντρικός πίνακας του Φ/Β σταθμού θα τοποθετηθεί δίπλα από τον μετατροπέα. Θα είναι πιστοποιημένος κατά τα πρότυπα IEC και τους διεθνείς κανονισμούς και θα έχει υψηλή ηλεκτρική και μηχανική αντοχή. Επίσης ο κεντρικός πίνακας για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του Φ/Β σταθμού θα περιλαμβάνει έναν (1) αυτόματο διακόπτη, μία (1) ενδεικτική λυχνία για κάθε φάση, μπάρα ισοδυναμικής γείωσης, και αντικεραυνική προστασία με διάταξη στάθμης προστασίας T1+T2.

#### **5.2.2.5. Μπαταρίες**

Οι μπαταρίες της εταιρίας V-TAC είναι λιθίου (Lithium) μπαταρίες 51,2V. Η τεχνολογία λιθίου προσφέρει υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μπαταρίες. Η μπαταρία είναι σχεδιασμένη για να αντέχει σε ακραίες συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες και κραδασμούς. Επιπλέον, η μπαταρία είναι ελαφριά και έχει χαμηλό προφίλ, καθιστώντας την ιδανική για χρήση σε ηλιακά συστήματα και άλλες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία.



Η μπαταρία της V-TAC διαθέτει επίσης προστασία από υπερφόρτιση και υποφόρτιση, καθιστώντας την ασφαλή και αξιόπιστη για χρήση σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Τέλος, είναι σχεδιασμένη για να είναι εύκολη στη χρήση και στη συντήρηση, με δυνατότητα ελέγχου και παρακολούθησης μέσω ενός ειδικού λογισμικού.

#### **5.2.2.6. Ρυθμιστές φόρτισης (*charger controllers*)**

Οι έξυπνοι φορτιστές (2 σε αριθμό)( GS-MPPT-60M-200V της MORNINGSTAR είναι εξαιρετικά αποδοτικοί και αξιόπιστοι φορτιστές ηλιακής ενέργειας, ικανοί να διαχειριστούν τη φόρτιση μπαταριών από φωτοβολταϊκά πάνελ. Η σειρά GenStar διαθέτει διάφορα μοντέλα, όπως ο GenStar 100/30 και ο GenStar 200/80, οι οποίοι έχουν ικανότητες φόρτισης έως και 100A και μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο ηλιακών πάνελ ισχύος έως και 4800W για το μοντέλο 200/60 και έως και 6400W για το μοντέλο 200/80. Οι φορτιστές GenStar είναι επίσης εξοπλισμένοι με πολλές λειτουργίες προστασίας, όπως προστασία από υπέρταση, υπόταση, υπερφόρτωση, βραχυκύκλωμα και αντίστροφη πολικότητα, για να διασφαλίσει τη μέγιστη ασφάλεια του συστήματος φόρτισης. Επιπλέον, οι φορτιστές GenStar διαθέτουν ενσωματωμένο Bluetooth για ασύρματη σύνδεση με το smartphone σας και τη δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος μέσω της εφαρμογής MORNINGSTAR.

#### **5.2.2.7. Καλωδιώσεις**

Τα καλώδια διαστασιολογήθηκαν βάσει DIN VDE 0298-4, DIN VDE 0100 μέρος 410, 430 ακολουθώντας τη βέλτιστη δυνατή διαδρομή από τα Φ/Β πλαίσια προς τους μετατροπείς και τους πίνακες ελαχιστοποιώντας τις απώλειες. Η σύνδεση κάθε συστοιχίας Φ/Β πλαισίων με τον αντίστοιχο μετατροπέα θα γίνει με καλώδια τύπου H07RN-F 1x6mm<sup>2</sup>. Τέλος, τα καλώδια επικοινωνίας και μεταφοράς δεδομένων μεταξύ των μετατροπέων και της μονάδας ελέγχου, θα είναι τύπου LiY-CY 2x2x0,50 mm<sup>2</sup>, σύμφωνα με το πρότυπο DIN VDE 0245, 0812. Τα καλώδια θα τοποθετηθούν σε ειδικούς σωλήνες που θα τα οδηγούν με ασφάλεια και θα τα προστατεύουν από τα καιρικά φαινόμενα και λοιπές εξωτερικές επεμβάσεις. Κανένα καλώδιο δεν θα οδεύει χωρίς προστασία ή κατάλληλη επίχωση εντός του εδάφους..

#### **5.2.2.8. Αντικεραυνικά**

Για την προστασία από έμμεσα κεραυνικά πλήγματα θα τοποθετηθούν δύο (2) στάθμες αντικεραυνικής προστασίας από την πλευρά του AC. Η πρώτη στάθμη (T1+T2) στον κεντρικό πίνακα και η δεύτερη στάθμη (T2) στον μετατροπέα, βάσει των προτύπων EN 61643-11 και IEC 61643-1.

### 5.2.2.9. Γείωση

Η γείωση του Φ/Β σταθμού θα είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς και τα πρότυπα EN 50164-1,2, IEC 61024-1, DIN 57185 / VDE 0185, IEC 60364-5-4, VDE 0100, DIN 48852. Η γείωση θα συνδέεται με τις καθόδους με σφικκτήρες, βάσει του EN 50164-1 (100kA, 10/350μs). Το σύστημα γείωσης θα συνδεθεί με τις μεταλλικές βάσεις στήριξης των Φ/Β πλαισίων, ώστε να γειωθούν και αυτά, λόγω του ότι εφάπτονται στις μεταλλικές βάσεις. Ηλεκτρόδιο γείωσης θα συνδεθεί σε όλα τα μεταλλικά μέρη του μετατροπέα, του υποπίνακα, του κεντρικού πίνακα, καθώς και του μετρητή της ΔΕΗ.

Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης της γείωσης θα πραγματοποιηθεί μέτρηση της αντίστασης γείωσης και θα πρέπει η τιμή της να είναι μικρότερη των 10Ω

### 5.2.3. Ανάλυση κυκλώματος

Αυτό το σύστημα μπορεί να παράγει μέχρι και 8,64 kWp όταν το φως του ηλίου είναι σε πλήρη ένταση. Τα 16 πάνελ διαμορφώνονται σε δυο σειρές (strings) με 16 πάνελα από 8 το κάθε ένα, τα οποία έχουν συνολική ισχύ  $16 \times 540\text{Wr} = 8.640 \text{Wr}$ . Κάθε ρυθμιστής φόρτισης έχει μέγιστη ισχύ 60A και ελέγχει τα strings. Τα 3 inverter της Victron έχουν συνολική ισχύ  $3 \times 5\text{kVA} = 15\text{kVA}$  και η συνολική χωρητικότητα των μπαταριών λιθίου είναι  $2 \times 5.12\text{kWh} = 10.24\text{kWh}$ . Για να λειτουργήσουν τα 3 inverter της Victron πρέπει να συνδεθούν σε ένα dc-bus επίσης της Victron, η συνολική τάση των μπαταριών πρέπει να είναι 51,2V. Αυτό σημαίνει ότι οι 2 μπαταρίες λιθίου 51,2V πρέπει να συνδεθούν πάνω στο dc-bus ώστε να έχουμε καλύτερη διαχείριση της ενέργειας για να αποφύγουμε επιστροφή της παραγωγής μας στο δίκτυο. Έτσι λειτουργήσει το σύστημα τα 3 inverter πρέπει να είναι 5kVA. Αυτά τα inverter λειτουργούν στην τάση εισόδου των 8V-72V και παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα στα 230VAC.

### 5.2.4. Σημαντικές λειτουργίες του inverter

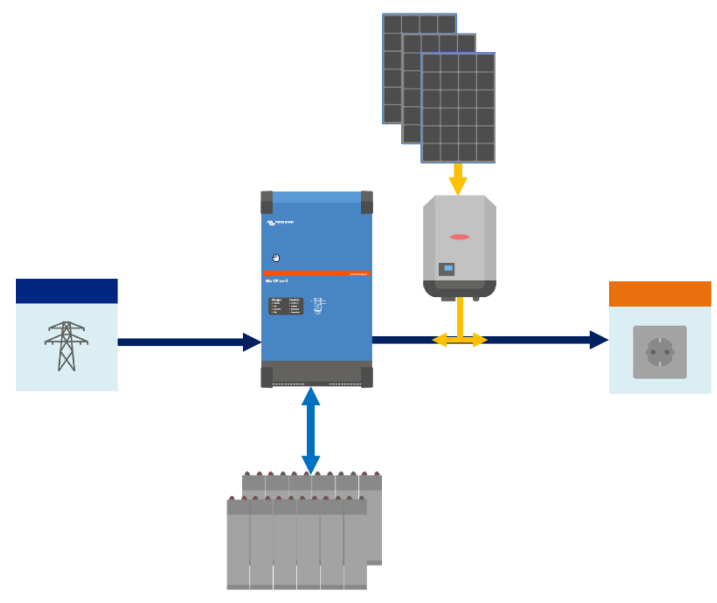
#### 5.2.4.1. ESS

Το ESS, ή Energy Storage System, είναι μια τεχνολογία που μπορεί να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται η ενέργεια στο σπίτι και στη βιομηχανία. Με το ESS, ο χρήστης μπορούν να αποθηκεύσει ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές όπως τα ηλιακά και τα αιολικά συστήματα και να τη χρησιμοποιήσει όταν τα χρειάζεται, για παράδειγμα κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Αυτό μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από το δίκτυο, να μειώσει το κόστος ενέργειας και να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών αερίων από μονάδες παραγωγής πετρελαίου κτλ. Το MultiPlus-II 230V είναι ένα προηγμένο σύστημα φορτιστή και inverter που παρέχει εξαιρετική απόδοση και αξιοπιστία. Η συμβατότητα του με το σύστημα ESS εξασφαλίζει την ασφαλή και

αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος ESS, καθώς και τη δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος στις ανάγκες του χρήστη. Επιπλέον, η συνεργασία των δύο συστημάτων επιτρέπει τη διαχείριση της ενέργειας στο σπίτι μας με πολύ αποτελεσματικό τρόπο, επιτρέποντας την αποθήκευση ενέργειας από το σύστημα φωτοβολταϊκών και τη χρήση της ενέργειας αυτής κατά τις ώρες που υπάρχει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας στο σπίτι.

#### **5.2.4.2. OFF-GRID/PV FIRST**

Το σύστημα OFF-GRID, όπως υποδηλώνει και το όνομά του, είναι ένα σύστημα που σχεδιάζεται έτσι ώστε η πρώτη πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται να είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα εκμεταλλεύεται τη δωρεάν ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο και μειώνει την κατανάλωση από άλλες πηγές ενέργειας, όπως οι μπαταρίες ή το δίκτυο διανομής ενέργειας. Σε περίπτωση που η παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ δεν είναι αρκετή για να καλύψει τις ανάγκες ενέργειας του συστήματος, τότε η ενέργεια παράγεται από τις μπαταρίες ή από το δίκτυο διανομής ενέργειας, σύμφωνα με τη ρύθμιση που έχει γίνει στο σύστημα. Ωστόσο, καθώς η παραγωγή ενέργειας από τα πάνελ αυξάνεται, η χρήση των μπαταριών και του δικτύου διανομής μειώνεται αντίστοιχα, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι πιο αποδοτικό και οικονομικό. Συνολικά, το σύστημα OFF-GRID είναι μια έξυπνη επιλογή για την παραγωγή ενέργειας, καθώς επιτρέπει στο σύστημα να χρησιμοποιεί την ενέργεια απευθείας από τα φωτοβολταϊκά πάνελ όταν είναι διαθέσιμη, προτού απευθυνθεί στην αποθήκευση στις μπαταρίες ή ακόμη και στο δίκτυο διανομής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο, το σύστημα επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της χρήσης της ηλιακής ενέργειας και μειώνει την εξάρτηση από το δίκτυο ενέργειας. Ωστόσο, η ρύθμιση του συστήματος OFF-GRID πρέπει να γίνεται με προσοχή, καθώς η λανθασμένη ρύθμιση μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση του συστήματος ή σε ανεπιθύμητες επιπτώσεις στα συστήματα των παραγωγών ή του δικτύου ενέργειας. Επιπλέον, οι παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες και η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη ρύθμιση του συστήματος OFF-GRID.



Εικόνα 5.1 Στη φωτογραφία βλέπουμε τη συνδεσμολογία off-grid [79].

#### 5.2.4.3. CHARGE ALGORITHM

Το MultiPlus-II 230V της Victron Energy είναι ένας συνδυαστής ηλεκτρικής ενέργειας και φορτιστής για συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο φορτιστής χρησιμοποιεί την τεχνολογία Charge Algorithm της Victron Energy για να φορτίζει τις μπαταρίες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και για να επιλέγει το βέλτιστο ρεύμα φόρτισης για την κάθε μπαταρία. Το Charge Algorithm χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο φόρτισης πολυσταδιακής φόρτισης, ο οποίος προσαρμόζεται αυτόματα στην κατάσταση της μπαταρίας και στις ανάγκες του συστήματος. Η πολυσταδιακή φόρτιση περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικές φάσεις φόρτισης: Bulk, Absorption, Float και Storage. Καθένας από αυτούς τους σταδιοδρομητές παρέχει μια διαφορετική ροή ρεύματος φόρτισης στην μπαταρία, ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας. Ο φορτιστής επίσης διαθέτει μια λειτουργία αυτόματης αναγνώρισης του τύπου της μπαταρίας που χρησιμοποιείται, για να επιλέξει το βέλτιστο Charge Algorithm για τη συγκεκριμένη μπαταρία. Αυτό εξασφαλίζει τη μέγιστη απόδοση και διάρκεια ζωής της μπαταρίας, καθώς η φόρτιση γίνεται με ακρίβεια και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κάθε μπαταρίας. Ο φορτιστής χρησιμοποιεί διαφορετικά Charge Algorithms για μπαταρίες μολύβδου-οξέος, μολύβδου-ασβεστίου, AGM, Gel και λιθίου, εξασφαλίζοντας την κατάλληλη φόρτιση για κάθε τύπο μπαταρίας. Αυτό βοηθάει στη διατήρηση της υγείας της μπαταρίας και εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή απόδοση της.

**I) Bulk:** Κατά τη διάρκεια της φάσης Bulk, ο φορτιστής παρέχει τη μέγιστη δυνατή ρευματική ισχύ στη μπαταρία, μέχρις ότου φτάσει στην ικανότητά της. Σε αυτό το στάδιο, η τάση της μπαταρίας αυξάνεται αργά.

**II) Absorption:** Στη φάση της Absorption, η τάση της μπαταρίας διατηρείται στο μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο, ενώ η ρευματική ισχύς μειώνεται σταδιακά μέχρις ότου η μπαταρία φορτιστεί πλήρως.

**III) Float:** Κατά τη διάρκεια της φάσης Float, η τάση της μπαταρίας μειώνεται σε μια χαμηλότερη τιμή από την τιμή της φάσης Absorption και η ρευματική ισχύς παρέχεται μόνο για τη διατήρηση της φόρτισης της μπαταρίας.

**IV) Storage:** Κατά τη διάρκεια της φάσης Storage, ο φορτιστής διατηρεί την τάση της μπαταρίας σε ένα χαμηλό επίπεδο, για να διατηρήσει τη φόρτιση της μπαταρίας σε μια μακροπρόθεσμη αποθήκευση.

#### **5.2.4.4. TEMPERATURE COMPENSION**

Το MultiPlus-II 230V της Victron Energy διαθέτει επίσης μια λειτουργία θερμοκρασιακής αντιστάθμισης (Temperature Compensation), η οποία ρυθμίζει την τάση φόρτισης ανάλογα με τη θερμοκρασία της μπαταρίας. Αυτό εξασφαλίζει ότι η μπαταρία φορτίζεται με το βέλτιστο ρυθμό, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασία της μπαταρίας ελέγχεται από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας που πρέπει να εγκατασταθεί στην μπαταρία. Με αυτόν τον τρόπο, η λειτουργία θερμοκρασιακής αντιστάθμισης βελτιστοποιεί τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και μειώνει τον κίνδυνο υπερφόρτισης ή υποφόρτισης της μπαταρίας.

#### **5.2.4.5. SETTINGS**

Για να λειτουργήσει ένα σύστημα με ηλιακούς συλλέκτες και μπαταρίες με τον inverter MultiPlus-II 230V της Victron Energy, απαιτούνται κάποιες βασικές ρυθμίσεις. Αρχικά, πρέπει να επιλεγεί η λειτουργία "Solar" στο μενού ρυθμίσεων του inverter, ώστε να ενεργοποιηθεί η λειτουργία φόρτισης μπαταρίας από ηλιακό συλλέκτη. Επίσης, πρέπει να ρυθμιστεί η τάση φόρτισης της μπαταρίας στην επιθυμητή τιμή, ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση μας 51.2V. Στη συνέχεια, πρέπει να συνδεθούν οι ηλιακοί συλλέκτες στον ενσωματωμένο φορτιστή MPPT του inverter, έτσι ώστε να αξιοποιηθεί η ηλιακή ενέργεια για τη φόρτιση της μπαταρίας. Επίσης, μπορεί να γίνει σύνδεση του inverter με έναν εξωτερικό έλεγχο μέσω Bluetooth ή Wi-Fi, για περισσότερη ευκολία στη ρύθμιση των παραμέτρων. Τέλος, για τη βέλτιστη απόδοση και διάρκεια ζωής της μπαταρίας, συνιστάται η χρήση της λειτουργίας Battery Life που διαθέτει το inverter. Αυτή η λειτουργία ελαχιστοποιεί την πρόωρη φθορά της μπαταρίας, χρησιμοποιώντας ένα ειδικό αλγόριθμο φόρτισης που προσαρμόζεται στην κατάσταση της μπαταρίας. Αυτό μειώνει την υπερφόρτιση και την

υποφόρτιση της μπαταρίας, που μπορεί να προκαλέσει σημαντική ζημιά και να μειώσει τη διάρκεια ζωής της. Η λειτουργία Battery Life είναι κατάλληλη για χρήση σε συστήματα ηλιακής ενέργειας και άλλες εφαρμογές όπου η μπαταρία είναι κρίσιμη για τη λειτουργία του συστήματος.

#### 5.2.4.6. TECHNICAL SPECIFICATIONS

MultiPlus-II	24/5000/120-50	48/5000/70-50	48/8000/110-100/ 100	48/10000/140-100 /100
PowerControl / PowerAssist	Yes		Yes	
AC input	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz		Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz	
Maximum feed through current	50 A		100 A	
INVERTER				
Input voltage range	19 – 33 V	38 – 66 V	38 – 66 V	38 – 66 V
Output (1)	Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1%		Output voltage: 230 VAC ± 2% Frequency: 50 Hz ± 0,1%	
Cont. output power at 25°C / 77°F (3)	5000 VA		8000 VA	10000 VA
Cont. output power at 25°C / 77°F	4000 W		6400 W	8000 W
Cont. output power at 40°C / 104°F	3700 W		5500 W	7000 W
Cont. output power at 65°C / 150°F	3000 W		4000 W	6000 W
Maximum feed-in power	5000 VA		8000 VA	10000 VA
Peak power	9000 W		15000 W	18000 W
Maximum efficiency	96 %		95 %	96 %
Zero-load power	18 W		29 W	38 W
Zero-load power in AES mode	12 W		19 W	27 W
Zero-load power in Search mode	2 W		3 W	4 W
CHARGER				

Εικόνα 5.2 Τεχνικές Προδιαγραφές [80].

MultiPlus-II	24/5000/120-50	48/5000/70-50	48/8000/110-100/ 100	48/10000/140-100 /100
AC input	Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz Power factor: 1		Input voltage range: 187-265 VAC Input frequency: 45 – 65 Hz Power factor: 1	
Charge voltage 'absorption'	28,8 / 57,6 V		28,8 / 57,6 V	
Charge voltage 'float'	27,6 / 55,2 V		27,6 / 55,2 V	
Storage mode	26,4 / 52,8 V		26,4 / 52,8 V	
Charge current house battery (4)	120 A	70 A	110 A	140 A
GENERAL				
Auxiliary output	Yes (32 A) Default setting: switches off when in inverter mode		Yes (50 A) Default setting: switches off when in inverter mode	
External AC current sensor (optional)			100 A	
Programmable relay (5)	Yes		Yes	
Protection (2)	a - g		a - g	
VE.Bus communication port	For parallel and three phase operation, remote monitoring and system integration		Three phase operation, remote monitoring and system integration	
General purpose com. port	Yes, 2x		Yes, 2x	
Common Characteristics	Operating temp.: -40 to +65°C (-40 – 150°F) (fan assisted cooling) Humidity (non-condensing): max 95%		Operating temp.: -40 to +65°C (-40 – 150°F) (fan assisted cooling) Humidity (non-condensing): max 95%	
ENCLOSURE				
Material & Colour	Steel, blue RAL 5012 Protection category: IP22 Pollution degree 2, OVC3		Steel, blue RAL 5012 Protection category: IP22 Pollution degree 2, OVC3	
Battery-connection	M8 bolts		Four M8 bolts (2 plus and 2 minus connections)	
230 VAC-connections	Screw terminals 16 mm <sup>2</sup> (6 AWG)		Bolts M6	Bolts M6
Weight	30 kg	30 kg	41.2 kg	48.8 kg
Dimensions (hwxwd)	607 x 330 x 149	565 x 320 x 149	642 x 363 x 206	677 x 363 x 206
STANDARDS				
Safety	EN 60335-1, EN 60335-2-29, IEC62109-1, IEC62109-2		EN 60335-1, EN 60335-2-29, IEC62109-1, IEC62109-2	
Emission / Immunity	EN 55014-1, EN 55014-2, EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3 IEC 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3		EN 55014-1, EN 55014-2, EN-IEC 61000-3-2, EN-IEC 61000-3-3 IEC 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3	
Uninterruptible power supply	Please consult the certificates on our website.		Please consult the certificates on our website.	
Anti-islanding	Please consult the certificates on our website.		Please consult the certificates on our website.	

Εικόνα 5.3 Τεχνικές Προδιαγραφές [80].

#### 5.2.4.7. CONFIGURATION

Ο Multipower II 230V της Victron Energy διαθέτει ένα πλήρες σύστημα ρύθμισης και παραμετροποίησης, που επιτρέπει στον χρήστη να προσαρμόσει τις ρυθμίσεις του inverter στις ανάγκες του συγκεκριμένου συστήματος. Μπορούμε να αλλάξουμε το

Charge Algorithm για να ταιριάζει στον τύπο της μπαταρίας που χρησιμοποιούμε, να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους του ηλιακού φορτιστή μας, να επιλέξουμε την έξοδο AC και να διαμορφώσουμε τις παραμέτρους της μπαταρίας. Μέσω της εφαρμογής VictronConnect μπορούμε να συνδέσουμε το Multipower II 230V με το smartphone μας και να προσαρμόσουμε τις ρυθμίσεις μας σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, γίνεται να χρησιμοποιήσουμε τον υπολογιστή μας για να προσαρμόσουμε τις ρυθμίσεις μέσω του λογισμικού VEConfigure. Αυτό σας δίνει πλήρη έλεγχο και παρακολούθηση του συστήματός μας, ενώ επίσης εξασφαλίζει ότι οι ρυθμίσεις μας είναι συμβατές με τις προδιαγραφές του inverter και δεν θα προκαλέσουν ζημία στο σύστημά μας.

#### 5.2.4.8. Τιμές τάσης για την ρύθμιση του inverter

i) inverter voltage η δυνατότητα προσαρμογής της μπορεί να είναι από 210-245 Volt.

#### 5.2.5. Σημαντικές λειτουργίες της μπαταρίας

Η μπαταρία λιθίου 51.2V της V-TAC Energy παρέχει μια σειρά σημαντικών λειτουργιών για την αποθήκευση και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μερικές από τις σημαντικές λειτουργίες της μπαταρίας περιλαμβάνουν:

- I) **Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα:** Η μπαταρία λιθίου παρέχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με άλλους τύπους μπαταριών, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να αποθηκεύσει περισσότερη ενέργεια σε μικρότερο χώρο.
- II) **Μεγάλη διάρκεια ζωής:** Η μπαταρία λιθίου έχει μια μεγάλη διάρκεια ζωής σε σχέση με άλλες μπαταρίες, καθώς μπορεί να αντέξει πολλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.
- III) **Υψηλός βαθμός απόδοσης:** Η μπαταρία λιθίου έχει υψηλό βαθμό απόδοσης σε σχέση με άλλους τύπους μπαταριών, καθώς διατηρεί την ικανότητά της να αποδίδει υψηλά επίπεδα ισχύος κατά τη διάρκεια της ζωής της.
- IV) **Χαμηλό βάρος:** Η μπαταρία λιθίου έχει χαμηλό βάρος σε σχέση με άλλες μπαταρίες, πράγμα που την καθιστά κατάλληλη για χρήση σε φορητές συσκευές και άλλες εφαρμογές όπου το βάρος είναι σημαντικός παράγοντας.
- V) **Ασφάλεια:** Η μπαταρία λιθίου έχει σχεδιαστεί να είναι ασφαλής κατά τη διάρκεια της χρήσης της, και διαθέτει προστασίες κατά της υπερφόρτισης, της υποφόρτισης και της υπερθέρμανσης.
- VI) **Εύκολη συντήρηση:** Η μπαταρία λιθίου δεν απαιτεί σχεδόν καμία συντήρηση, σε αντίθεση με άλλους τύπους μπαταριών που απαιτούν τακτική συντήρηση, όπως η αλλαγή των υγρών ηλεκτρολυτών.



Συνολικά, η μπαταρία λιθίου 51.2V της V-TAC είναι μια προηγμένη μπαταρία με πολλές σημαντικές λειτουργίες και πλεονεκτήματα, που την καθιστούν κατάλληλη για χρήση σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών.

#### 5.2.5.1. Κοστολόγηση

Πίνακας 5.1 Κοστολόγηση

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ	ΤΙΜΗ ΤΕΜΑΧΙΟΥ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ
MULTIPLUS-II 230V	2.611,00 €	3	7.983,00 €
V-TAC Battery 51,2V	2.673,95€	2	5.347,9€
SOLAR PANEL ECO DELTA 540W	199,00 €	16	3.184,00 €
charge-controller GENSTAR	992,00€	2	1.984,00 €
Ρελέ διαρροής, DC ασφάλειες, Αντικεραυνικά	140,00€	3	420,00€
ΓΕΝΙΚΟΣ ΠΙΝΚΑΣ	94,63€	1	94,63 €
ΓΕΙΩΣΗ	18,31€	1	18,31 €
Καλωδιώσεις	8,38€	1 (ανάλογα τα μετρά)	8,38 €

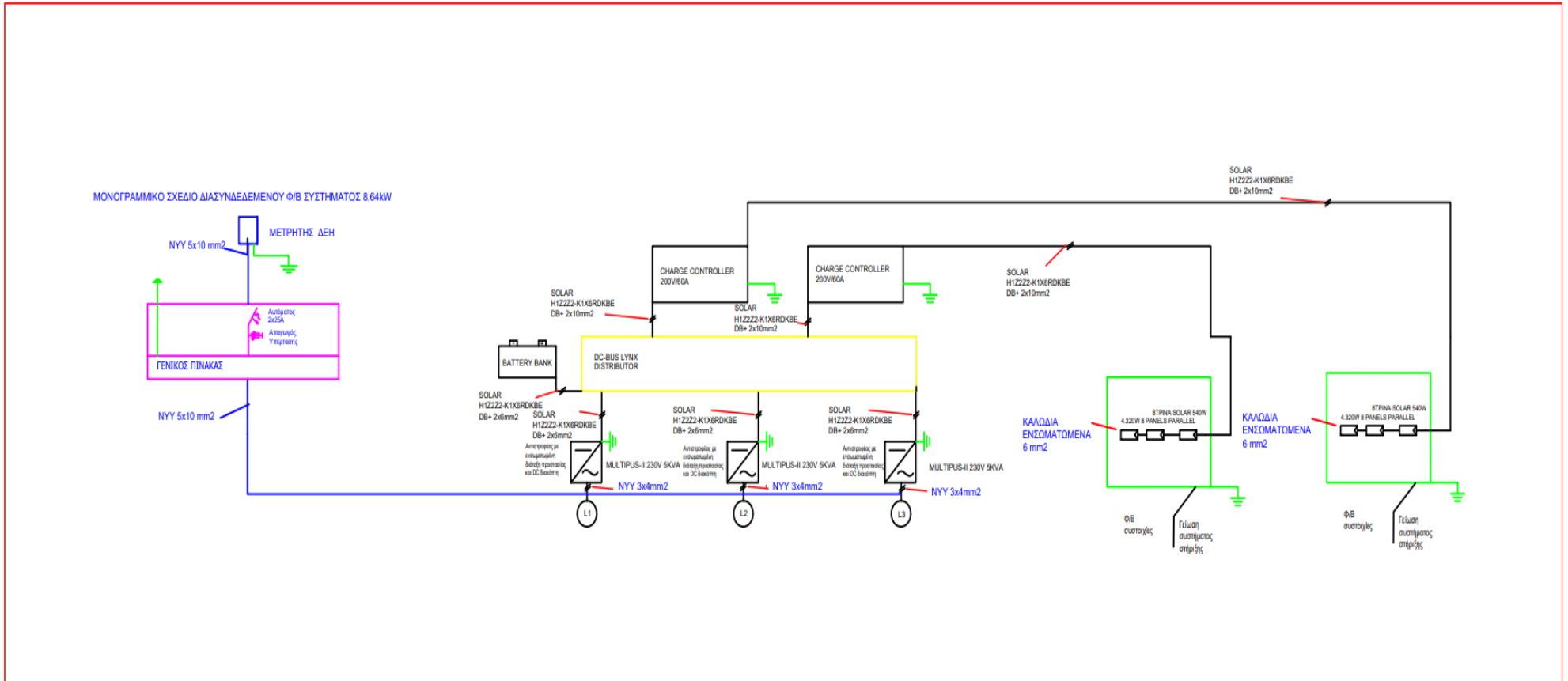
❖ Γείωση και πίνακας είναι τιμές ενδεικτικές οι οποίες παρεκκλίνουν από την πραγματικότητα διότι δεν έχουμε δεδομένα για ασφάλειες κτλ.

**ΤΕΛΙΚΗ ΤΙΜΗ\*:** Είναι η τιμή + Φ.Π.Α.

Τελικά συμφέρει η εγκατάσταση διότι εάν κοστολογήσουμε τις δαπάνες που έχει ένα σπίτι και σύμφωνα με τον νομό περί πράσινης ενέργειας και το επιδοτούμενο πρόγραμμα οι μπατάρεις έχουν 100% επιδότηση αρά 5.347,9€ ακόμα υπάρχει

επιδότηση για μια οικογένεια η οποία έχει έως 40.000€ ετήσιο εισόδημα έχει 25-35% επιδότηση 2.600€ και 3.600€ ανοιχτά. Εν τέλη το ποσό εγκατάστασης που έχει μείνει να πληρώσει ο καταναλωτής είναι κοντά στα 6 με 8 χιλιάδες ευρώ και με βάση τις χρεώσεις οπότε ένα σπίτι έχει είναι ετήσιος στα 8,64kw στη περίπτωση μας είναι προσεγγιστικά 200kwh αρά σύμφωνα με τις χρεώσεις της ΔΕΗ είναι 0,788€ ανά κλοβατώρα έως 500kwh άρα η απόσβεση του συστήματος υπολογίζεται στα 4-5 χρονιά επομένως είναι μια εγκατάσταση η οποία συμφέρει

5.2.5.2. Σχεδιασμός



Εικόνα 5.4 Σχεδιασμός

## 6. Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία υπάρχει μέσα ένα προσεγγιστικό παράδειγμα για ένα αυτόνομο σπίτι στο οποίο χρησιμοποιήσαμε τους μετατροπείς της εταιρείας Victron energy διότι είναι μια εταιρία η οποία είναι αξιόπιστη και ο συγκεκριμένος μετατροπέας MultiPlus-II υποστηρίζει ένα αυτόνομο αυτοπαραγωγό σύστημα το οποίο θα μπορεί να συντηρείτε από μόνο του να παράγει και να καταναλώνει και τις ώρες αιχμής και τις περιόδους όπου υπάρχει σκίαση στην περιοχή να αντλεί ενέργεια από τις μπαταρίες. Ακόμα οι μετατροπείς έχουν ένα πολύ έξυπνο και φιλικό λογισμικό το οποίο μπορεί ο κάθε πολίτης να το διαχειριστεί υπάρχουν μέσα λειτουργίες όπως η ess που βοηθάει στην βέλτιστη κατανομή ενέργειας.

Έπειτα οι μπαταρίες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας v-tac με τάση 51,2volt όπου είναι μπαταρίες λιθίου που συνεργάζονται με τον μετατροπέα και είναι φιλικές προς το περιβάλλον διότι έχουν μεγάλο κύκλο ζωής. Από πάνελα χρησιμοποιήθηκαν τα πάνελα της εταιρίας eco-delta ισχύος 540 watt το καθένα με συνολική ονομαστική ισχύ 8.640 watt τα πάνελα συνδέθηκαν παράλληλα έτσι ώστε να κρατήσουμε την τάση στα 50volt και να συνδεθούν πάνω σε ένα dc-bus της Victron energy το οποίο βοήθαγε στην γρηγορότερη φόρτιση των μπαταριών.

Το dc-bus που χρησιμοποιήσαμε ήταν πάνω στα 50 volt κατά προσέγγιση που συνδέθηκαν τα πάνελα οι μετατροπείς και τα chargers. Τα chargers ήταν της Morningstar integrated series μοντέλο GS-MPPT-60M-200V, όπου έχει μέγιστη τάση εισόδου 200 volt και εύρος τάσης μπαταρίας από 8-72 volt. Το συμπέρασμα είναι από το σύστημα ότι μπορεί ένα απλό νοικοκυριό να παράγει δικιά του ενεργεία και να καταναλώνει τις ώρες που δεν υπάρχει ηλιοφάνεια από τις μπαταρίες χωρίς να επιστρέφει ενέργεια στο δυτικό.

Επίσης θα έχουμε συνδέσει και μια συσκευή cerbo gx, μια συσκευή παρακολούθησης έτσι ώστε να είναι πιο φιλική στα ματιά του καταναλωτή και ένα ρούτερ για να έχουμε πλήρη γνώση και διαχείριση του συστήματος μας ποτέ και ποια στιγμή χρησιμοποιείται ποια φάση με το ανάλογο μετατροπέα.

Την τεchnοοικονομική μελέτη που έλαβε θέση στην εργασία και έχοντας υπόψη ότι η Ελλάδα υποστηρίζει τα ευρωπαϊκά πρότυπα την πράσινη ενέργεια και γνωρίζοντας ότι υπάρχουν προγράμματα επιδότησης μπορεί κάποιος να αντιληφθεί ότι το παραπάνω σύστημα συμφέρει τον αυτοπαραγωγού καταναλωτή

Ακόμα αυτή η εργασία παρουσίασε λεπτομερή ανάλυση διαφορετικών τοπολογιών μετατροπέων και των χαρακτηριστικών τους, όπως η Δυνατότητα λειτουργίας με σύνδεση στο δίκτυο/αυτόνομη λειτουργία, απομόνωση, αποσύνδεση ισχύος, αριθμός σταδίων επεξεργασίας, δυνατότητα διπλής γραφής, ικανότητα χειρισμού

ισχύος, πλήθος εξαρτημάτων, μέγεθος, ευρύ φάσμα δυνατοτήτων λειτουργία και το επίπεδο πολυπλοκότητας της στρατηγικής ελέγχου για ηλιακές εφαρμογές. Ως τελευταίο σημείο, συζητήθηκαν επίσης οι στοιχειώδεις απαιτήσεις που ορίζει ο χρήστης, όπως το χαμηλό κόστος, η μεγάλη διάρκεια ζωής και η υψηλή απόδοση. Τα συμπεράσματα από τις ταξινομήσεις είναι διαθέσιμα ως εξής:

- Ο κεντρικός μετατροπέας προτιμάται σε περίπτωση μεγάλης κλίμακας ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς το κόστος του μετατροπέα είναι μικρότερο σε σχέση με άλλες διαμορφώσεις. Οι μονοβάθμιοι κεντρικοί μετατροπείς θα πρέπει να αποφεύγονται, εκτός εάν η αρκετά υψηλή τάση είναι διαθέσιμη στην είσοδο για να αποφευχθεί περαιτέρω ενίσχυση της τάσης. Σε περίπτωση μεγάλης κλίμακας διαμορφώσεων Φ/Β κεντρικού επιπέδου, οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων θα ήταν η καλύτερη επιλογή για τη διαχείριση ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων υψηλής/μέσης τάσης ή/και ισχύος.
- Οι μετατροπείς πολλαπλών σταδίων είναι ο καλύτερος υποψήφιος για κυψέλες εναλλασσόμενου ρεύματος και μονάδες εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς μπορούν να προσφέρουν υψηλή τάση.
- Σε περίπτωση διαμόρφωσης στοιχειοσειρών, οι μετατροπείς δύο σταδίων ή οι μετατροπείς μονού σταδίου με δυνατότητα χειρισμού μέσης ισχύος είναι η καλύτερη επιλογή. Τέλος, εάν πρόκειται να συνδεθούν πολλές χορδές στο πλέγμα, η ιδέα πολλών χορδών φαίνεται να είναι η προφανής επιλογή.
- Οι μετατροπείς συχνότητας γραμμής είναι κατάλληλοι για χαμηλή ισχύ, π.χ. για διαμορφώσεις μονάδων εναλλασσόμενου ρεύματος. Από την άλλη πλευρά, μια μεταγωγή VSI υψηλής συχνότητας είναι επίσης κατάλληλη και για φωτοβολταϊκά συστήματα χαμηλής και μέσης ισχύος, όπως οι διαμορφώσεις πολλαπλών στοιχειοσειρών, στοιχειοσειρών και μονάδας εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Τα συστήματα ενός σταδίου είναι γενικά καλοί υποψήφιοι όσον αφορά την αποτελεσματικότητα. Ο μετατροπέας μονοβάθμιας HERIC και Η5 προσφέρουν καλύτερη απόδοση μεταξύ όλων των μονοβάθμιων τοπολογιών. Προσφέρουν επίσης καλύτερη απόδοση.
- Τοπολογίες που παρουσιάστηκαν προσφέρουν καλύτερη αποσύνδεση ισχύος. Ως εκ τούτου, αυτές οι τοπολογίες που αναπτύχθηκαν με μόνο μικρού μεγέθους πυκνωτή εισόδου (πυκνωτές), έχουν ως αποτέλεσμα την παροχή βελτιωμένης διάρκειας ζωής.
- Σε περίπτωση συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων θα πρέπει να τηρούνται τα πρότυπα που επιβάλλονται από τις εταιρείες κοινής ωφέλειας.
- Για την τήρηση των προτύπων ποιότητας, οι μετατροπείς ενίσχυσης/ενίσχυσης ενός σταδίου ή μετατροπέα πολλαπλών σταδίων με τη γραμμή μετατροπέας συχνότητας είναι η καλύτερη επιλογή για να πληρωθούν τα πρότυπα ποιότητας. Σε άλλες περιπτώσεις, πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πλευρικό φίλτρο εναλλασσόμενου ρεύματος για να πληρωθούν τα πρότυπα του δικτύου.

## 7. Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] M. Asif and T. Muneer, "Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 7, pp. 1388–1413, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.RSER.2005.12.004.
- [2] M. Z. A. Ab Kadir, Y. Rafeeu, and N. M. Adam, "Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3023–3031, Dec. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2010.07.062.
- [3] N. D. Kaushika, A. Mishra, and A. K. Rai, *Solar Photovoltaics Technology, System Design, Reliability and Viability*. Springer, 2018.
- [4] Bhattachargee S, *Solar energy generation*. Narosa Publishing House Ltd., 2015.
- [5] M. Goel, V. S. Verma, and N. G. Tripathi, "Solar Resource: Assessment and Utilization," *Green Energy and Technology*, pp. 27–37, 2022, doi: 10.1007/978-981-19-2099-8\_3/FIGURES/4.
- [6] Β. Δ. Μπιτζιώνης, *Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας*. Τζιόλα, 2010.
- [7] Μ. Τζιουβάρας, "«Μελέτη απόδοσης των φωτοβολταϊκών πάρκων στο Νομό Θεσσαλονίκης»." Mar. 2014.
- [8] Κ. Θ. Δέρβος, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα: από τη Θεωρία στην Πράξη," 2013, Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: [www.ntua.gr/ntuapress](http://www.ntua.gr/ntuapress)
- [9] P. (Prabha) Kundur and O. P. Malik, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 2022. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260473544>
- [10] S. A. Azmi, G. P. Adam, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Grid interfacing of multimegawatt photovoltaic inverters," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 6, pp. 2770–2784, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2219072.
- [11] G. N. Tiwari and A. T. Shyam, "Energy Systems in Electrical Engineering Handbook of Solar Energy Theory, Analysis and Applications," 2016. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13509>
- [12] Κ. Παπάζογλου, "«Προσομοίωση πρότυπου ηλιακού συλλέκτη με ανάπτυξη υπολογιστικού κώδικα»." Mar. 2013.
- [13] ΣΤΕΦΑΝΟΣ Ε. ΤΕΤΕΛΕΝΗΣ, "Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων," ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, 2011.
- [14] Ι. Ε. Φραγκιαδάκης, "Φωτοβολταϊκά Συστήματα," *Εκδόσεις Ζήτη*, 2007. <https://ziti.gr/vivlio/fragkiadakis-ioannis-fotovoltaika-systimata-1/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [15] P. Arun, R. Banerjee, and S. Bandyopadhyay, "Optimum sizing of photovoltaic battery systems incorporating uncertainty through design space approach," *Solar Energy*, vol. 83, no. 7, pp. 1013–1025, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.SOLENER.2009.01.003.
- [16] "ΚΑΠΕ: Ενέργεια & Πολίτης - Φωτοβολταϊκά Συστήματα." [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_photovol.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_photovol.htm) (accessed Mar. 09, 2023).
- [17] Δ. Πυλαρινός, *Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος*. 2016.

- [18] S. Alotaibi and A. Darwish, "Modular Multilevel Converters for Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems: A Review," *Energies* 2021, Vol. 14, Page 6213, vol. 14, no. 19, p. 6213, Sep. 2021, doi: 10.3390/EN14196213.
- [19] M. Rabiul Islam, A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "State-of-The-Art of the Medium-Voltage Power Converter Technologies for Grid Integration of Solar Photovoltaic Power Plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 372–384, Mar. 2019, doi: 10.1109/TEC.2018.2878885.
- [20] Κ. Σιδεράκης, "Ηλεκτρονικά Ισχύος σε Φωτοβολταϊκά Συστήματα" • Ανοικτή Βιβλιοθήκη. 2013. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.openbook.gr/ilektronika-isxyos-se-fwtovoltaika-systimata/>
- [21] K. Zipp, "Solar Power World," <https://www.solarpowerworldonline.com/>.
- [22] Βαλεντίνος Γρηγορίου, "Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο: Τι είναι και πως εξυπηρετεί τη ζωή μας!," Jul. 22, 2016. <http://energy.reporter.com.cy/article/71477/fotovoltaiko-fainomeno-tieinai-kai-pos-exypiretei-ti-zoi-mas-> (accessed Mar. 09, 2023).
- [23] "Energy Informative," <https://energyinformative.org/>. 2012.
- [24] Y. S. Mohammed, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 527–539, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.04.022.
- [25] D. P. Kaundinya, P. Balachandra, and N. H. Ravindranath, "Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power—A review of literature," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2041–2050, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.RSER.2009.02.002.
- [26] B. Srinivas, S. Balaji, M. N. Babu, and Y. Reddy, "Review on present and advance materials for solar cells," *International Journal of Engineering Research-Online*, vol. 3, pp. 178–182, 2015.
- [27] Jason Svarc, "Clean Energy Reviews," 2021. <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/what-is-a-hybrid-inverter> (accessed May 25, 2023).
- [28] Φ. Στεργιόπουλος, Μ. Δαμιανίδης, Γ. Κατσαρός, and Μ. Τόλης, "Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων," Θεσσαλονίκη, Apr. 2011.
- [29] Y. Xue, L. Chang, S. B. Kjaer, J. Bordonau, and T. Shimizu, "Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: An overview," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 19, no. 5, pp. 1305–1314, Sep. 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.833460.
- [30] R. Margolis, "A review of pv inverter technology cost and performance projections." 2006.
- [31] T. Ishikawa, "Grid-connected photovoltaic power systems: survey of inverter and related protection equipments," Dec. 2002. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/22119643>
- [32] H. H. Photovoltaik, "Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen." VDE Verlag Berlin, 2007.
- [33] M. Calais and V. G. Agelidis, "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," *IEEE International Symposium*

- on *Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No.98TH8357)*, vol. 1, pp. 224–229, 1998, doi: 10.1109/ISIE.1998.707781.
- [34] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, “A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sep. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.853371.
- [35] R. A. Stmicroelectronics *et al.*, “Review on Single-phase PV Inverters for Grid-connected Applications Power converters for Fuel Cell based energy generation View project HF Resonant converters View project Review on Single-phase PV Inverters for Grid-connected Applications,” in *IASME/WSEAS International Conference on ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT (EEESD'08)*, Algarve, Jun. 2008. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267953468>
- [36] S. Saha and V. P. Sundarsingh, “Novel grid-connected photovoltaic inverter,” *IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 2, pp. 219–224, 1996, doi: 10.1049/IP-GTD:19960054.
- [37] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, “A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sep. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.853371.
- [38] G. Bopp, “Inwieweit tragen PV-Anlagen zum Elektrosmog bei?, 14 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie,” *Staffelstein, Germany*, 1999.
- [39] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli, and S. Tenconi, “A Nonconventional Power Converter for Plasma Stabilization,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 5, no. 2, pp. 212–219, 1990, doi: 10.1109/63.53158.
- [40] V. G. Agelidis, D. M. Baker, W. B. Lawrance, and C. V. Nayar, “Multilevel PWM inverter topology for photovoltaic applications,” *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 589–594, 1997, doi: 10.1109/ISIE.1997.649027.
- [41] J. Mahdavi, M. Tabandeh, and A. K. Shahriari, “Comparison of conducted RFI emission from different unity power factor AC/DC converters,” *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 1979–1985, 1996, doi: 10.1109/PESC.1996.548852.
- [42] Παπανικολάου Ν., “Σημειώσεις στο μάθημα «Ειδικές Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Ισχύος»,” 2017.
- [43] D. Kolantla, S. Mikkili, S. R. Pendem, and A. A. Desai, “Critical review on various inverter topologies for PV system architectures,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 17, pp. 3418–3438, Dec. 2020, doi: 10.1049/IET-RPG.2020.0317.
- [44] Y. K. Wu, J. H. Lin, and H. J. Lin, “Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, no. 4, pp. 3205–3216, Jul. 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2680409.
- [45] Bruno Burger and Dirk Kranzer, “Extreme high efficiency PV-power converters | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore,” in *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Barcelona, Spain: IEEE, Sep. 2009. Accessed: Mar. 09, 2023. [Online]. Available: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5279115?casa\\_token=3Bk0syVLRIsAAAAA:LXadog0wy2uyw3A1Vx5tHD0ABZJSUCpxO5Mslor5NECX5ICGgJvnlq rZKFble6bR2ODAMq3YZNXv](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5279115?casa_token=3Bk0syVLRIsAAAAA:LXadog0wy2uyw3A1Vx5tHD0ABZJSUCpxO5Mslor5NECX5ICGgJvnlq rZKFble6bR2ODAMq3YZNXv)



- [46] T. Boutot and L. Chang, "Development of a single-phase inverter for small wind turbines," in *Conference: 11. IEEE Canadian conference on electrical and computer engineering, Waterloo (Canada), 25-28 May 1998; Other Information: DN: Published in 2 vols. IEEE Catalogue No: 98TH8341; PBD: 1998; Related Information: Is Part Of Conference Proceedings...*, Nov. 1998, pp. 305–308.
- [47] T. Brückner, S. Bernet, and H. Güldner, "The active NPC converter and its loss-balancing control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 855–868, Jun. 2005, doi: 10.1109/TIE.2005.847586.
- [48] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 47–61, Mar. 2015, doi: 10.1109/MIE.2014.2376976.
- [49] M. Islam, S. Mekhilef, and M. Hasan, "Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 69–86, May 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.01.009.
- [50] A. Kumar, N. Gupta, and V. Gupta, "A Comprehensive Review on Grid-Tied Solar Photovoltaic System," *Journal of Green Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 213–254, Jan. 2017, doi: 10.13052/JGE1904-4720.71210.
- [51] R. Sharma, F. Zare, D. Nestic, and A. Ghosh, "A Hidden Block in a Grid Connected Active Front End System: Modelling, Control and Stability Analysis," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11852–11866, Jun. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2719055.
- [52] F. Zare, J. Yaghoobi, K. Gharani, and D. Kumar, "Harmonic Cancellations in Parallel Active Front End Inverters in Distribution Networks: IEC 61000-3-16 and Phase-Angles," *Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP*, vol. 2020-July, Jul. 2020, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177919.
- [53] D. B. Rathnayake *et al.*, "Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114781–114807, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3104617.
- [54] A. I. Elsanabary, G. Konstantinou, S. Mekhilef, C. D. Townsend, M. Seyedmahmoudian, and A. Stojcevski, "Medium Voltage Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223686–223699, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3044882.
- [55] Y. Lin *et al.*, "Research Roadmap on Grid-Forming Inverters With editing and support from Hariharan Krishnaswami." [Online]. Available: [www.nrel.gov/publications](http://www.nrel.gov/publications).
- [56] F. Shahnazian, J. Adabi, E. Pouresmaeil, and J. P. S. Catalão, "Interfacing modular multilevel converters for grid integration of renewable energy sources," *Electric Power Systems Research*, vol. 160, pp. 439–449, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.EPSR.2018.03.014.
- [57] N. K. Roy and A. Das, "Prospects of Renewable Energy Sources," pp. 1–39, 2018, doi: 10.1007/978-981-10-7287-1\_1.

- [58] M. Mosa, M. B. Shadmand, R. S. Balog, and H. A. Rub, "Efficient maximum power point tracking using model predictive control for photovoltaic systems under dynamic weather condition," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 11, pp. 1401–1409, Sep. 2017, doi: 10.1049/IET-RPG.2017.0018.
- [59] Z. Salam, J. Ahmed, and B. S. Merugu, "The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review," *Appl Energy*, vol. 107, pp. 135–148, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.APENERGY.2013.02.008.
- [60] M. C. Di Piazza and G. Vitale, "Photovoltaic field emulation including dynamic and partial shadow conditions," *Appl Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 814–823, Mar. 2010, doi: 10.1016/J.APENERGY.2009.09.036.
- [61] J. P. Ram, T. S. Babu, and N. Rajasekar, "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 826–847, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.076.
- [62] P. Joshi and S. Arora, "Maximum power point tracking methodologies for solar PV systems – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 1154–1177, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.12.019.
- [63] N. Vijayalakshmi and P. Maruthupandi, "An optimal low power digital controller for portable solar applications," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 5, p. 053702, Oct. 2018, doi: 10.1063/1.5043500.
- [64] A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433–443, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2012.11.052.
- [65] Anjana P., Kumar A., Gupta N., Gupta V., and Tiwari H. P., "Optimization Based Shunt APF Controller to Mitigate Reactive Power, Burden of Neutral Conductor, Current Harmonics and Improve  $\cos\phi$ ," *J. Electrical Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 134–142, 2017.
- [66] M. A. Eltawil and Z. Zhao, "MPPT techniques for photovoltaic applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 793–813, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.05.022.
- [67] S. E. Babaa, M. Armstrong, and V. Pickert, "Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 2014, no. 08, pp. 59–72, Aug. 2014, doi: 10.4236/JPEE.2014.28006.
- [68] T. L. Nguyen and K. S. Low, "A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3456–3467, Oct. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2039450.
- [69] C. L. Chen *et al.*, "Modeling, analysis, and implementation of a photovoltaic grid-tie inverter system," *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, pp. 1494–1501, 2012, doi: 10.1109/APEC.2012.6166018.
- [70] S. Narendiran, "Grid tie inverter and MPPT - A review," *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2013*, pp. 564–567, 2013, doi: 10.1109/ICCPCT.2013.6529017.

- [71] Anthony Joseph Lalonde, "Best Grid-Tie Inverter in 2023 (Reviews and Comparison) - Solar Energy Hub," 2022. <https://solarenergyhub.com/best-grid-tie-inverter/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [72] "5 Best Off-Grid Solar Inverters 2023 - Mark Green World," Jul. 21, 2022. <https://markgreenworld.com/5-best-off-grid-solar-inverters> (accessed Mar. 09, 2023).
- [73] Romain Metaye, "9 Best Off-grid Inverters (Complete 2023 List) - Climatebiz," Feb. 12, 2023. <https://climatebiz.com/best-off-grid-inverters/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [74] "Best Solar Hybrid Inverters Review and Buying Guide," Apr. 22, 2022. <https://luxpowertek.com/blog/best-solar-hybrid-inverters> (accessed Mar. 09, 2023).
- [75] "On/Off Grid Hybrid Solar Inverter with MPPT Charge Controller, Hybrid Solar Company | Anern." <https://www.anerngroup.com/products/high-frequency-on-off-grid-hybrid-solar-inverter/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [76] John O'Connor, "Active Front-end or Grid-tie Inverter? - Oztek," Jan. 27, 2011. <https://oztekcorp.com/active-front-end-or-grid-tie-inverter/> (accessed Mar. 09, 2023).
- [77] S. A. Azmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "Comparative analysis between voltage and current source inverters in grid-connected application," *IET Conference Publications*, vol. 2011, no. 579 CP, p. 101, 2011, doi: 10.1049/CP.2011.0138/CITE/REFWORKS.
- [78] K. Zeb *et al.*, "A comprehensive review on inverter topologies and control strategies for grid connected photovoltaic system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 1120–1141, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.06.053.
- [79] "SLD-Multiplus-II-AC-PV-and-grid-backup." Accessed: May 25, 2023. [Online]. Available: [https://www.victronenergy.com/upload/documents/SLD-Multiplus-II-AC-PV-and-grid-backup-2019-05-2-\(1\).pdf](https://www.victronenergy.com/upload/documents/SLD-Multiplus-II-AC-PV-and-grid-backup-2019-05-2-(1).pdf)
- [80] "MultiPlus-II 230V," *Victron Energy Blue Power*. 2023.
- [81] Z. Batool, S. Biricik, H. Komurcugil, T. Ngo, and T. V. Vu, "Photovoltaic Supplied T-Type Three- Phase Inverter with Harmonic Current Compensation Capability," *2nd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy, SGRE 2019 - Proceedings*, Nov. 2019, doi: 10.1109/SGRE46976.2019.9020673.