



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

# «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Κυριάκος Γ. Σιδεράκης  
Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Κρήτης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΚΑΙΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΝΩΣΕΩΝ ΑΠΟΦΟΙΤΩΝ

## «ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Το πρόγραμμα συνδιοργανώνεται από:

Το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Το Τμήμα Χημείας του Πανεπιστημίου Κρήτης



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Η ΠΡΑΞΗ ΥΛΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΕΙΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΝΩΣΗ (ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ – ΕΚΤ) ΚΑΙ ΑΠΟ ΕΘΝΙΚΟΥΣ ΠΟΡΟΥΣ ΕΣΠΑ 2007-2013

**Στοιχεία επικοινωνίας**

*Εισηγητής:* Κυριάκος Γ. Σιδεράκης

Επίκουρος Καθηγητής

*Εργαστήριο* Ενεργειακών και Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

*Ίδρυμα:* Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

*Τηλ:* +30 2810379231

*Fax:* +30 2810379222

*Email:* ksiderakis@staff.teicrete.gr

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 3.....	4
3.1 Εισαγωγή.....	4
3.2 Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.....	4
3.2.1. Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος.....	5
3.2.2. Σήματα και συστήματα αναφοράς.....	7
3.2.3. Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος και ποιότητα ισχύος.....	8
3.2.4. Διακοπτική λειτουργία στην περίπτωση των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος.....	11
3.3 Σύγχρονα ΦΒ συστήματα.....	12
3.3.1. Λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας.....	14
3.3.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.....	15
3.3.3. Διασύνδεση με το φορτίο.....	16
3.3.4. Διασύνδεση με το δίκτυο.....	18
3.4 Βασικές λειτουργίες μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος σε ΦΒ συστήματα.....	18
3.4.1. Μετατροπή DC σε DC.....	18
3.4.2. Μετατροπή DC σε AC.....	23
3.4.3. Τοπολογίες μετατροπέων DC σε AC.....	28
3.5 Λειτουργίες MPPT και Anti- Islanding.....	33
3.5.1. Εύρεση σημείου μέγιστης παραγωγής.....	33
3.5.2. Λειτουργία νησιδοποίησης.....	35
3.6 Τοπολογίες διασυνδεδεμένων ΦΒ συστημάτων.....	36
3.6.1. Λειτουργία με κύριο αντιστροφέα.....	36
3.6.2. Διαμόρφωση αλυσίδας.....	39
3.6.3. Διαμόρφωση πολλαπλής αλυσίδας.....	39
3.6.4. Αντιστροφή ανά πάνελ.....	40
3.7 Συμπεράσματα.....	41
3.8 Βιβλιογραφία.....	41

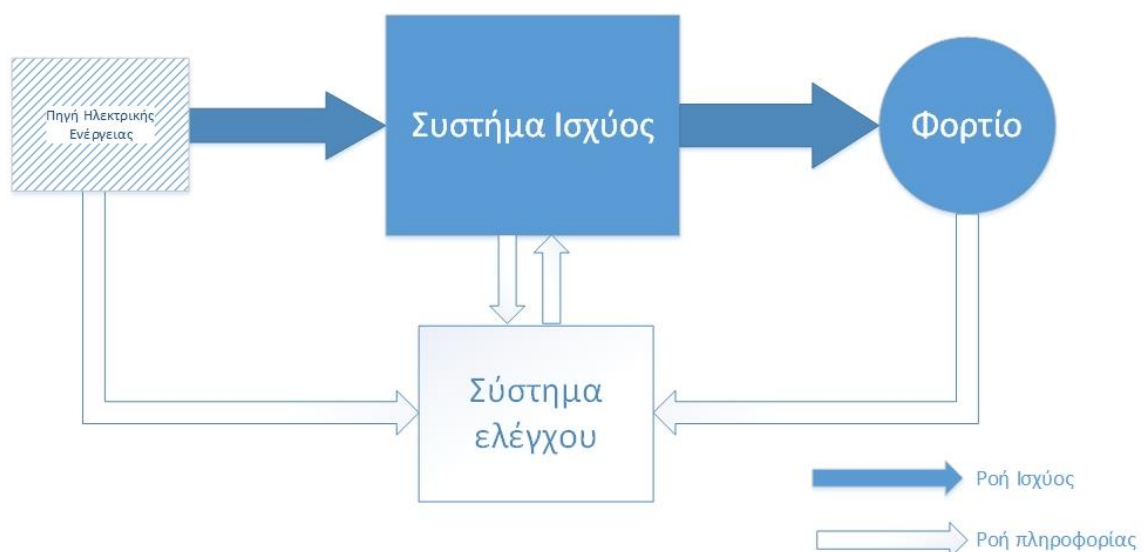
## Κεφάλαιο 3.

### 3.1 Εισαγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, είναι εφικτή με την ανάπτυξη συστημάτων μετατροπής ενέργειας, από την βασική πρωτογενή μορφή, π.χ. την ηλιακή ακτινοβολία, σε ηλεκτρική, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο. Η μετεξέλιξη όμως των συστημάτων αυτών, σε αξιόπιστες πηγές, ικανές να παρέχουν ενέργεια με τις προδιαγραφές που σήμερα τίθενται, επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος, γνωστών και ως μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Τα συστήματα αυτά αναλαμβάνουν τον ρόλο της διεπιφάνειας (interface), ανάμεσα στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στο φορτίο, ενώ πιο εξελιγμένες μορφές υλοποιούν και επιπλέον λειτουργίες, όπως για παράδειγμα, η εύρεση του σημείου μεγίστης ισχύος (MPPT), σε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ. Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στους τύπους και τις λειτουργίες, μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος, που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα.

### 3.2 Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος

Η βασική δομή ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, ανεξάρτητα από την λειτουργία που εξυπηρετεί, φαίνεται στο σχήμα 3.1. Ουσιαστικά διακρίνονται δύο βασικά δομικά στοιχεία, το τμήμα ισχύος και το τμήμα ελέγχου. Το πρώτο κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν ηλεκτρική ενέργεια. Το δεύτερο, επίσης κατασκευάζεται από ηλεκτρονικά στοιχεία, εστιάζεται όμως στην επεξεργασία δεδομένων και άρα λειτουργεί σε αισθητά χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, σε σχέση με το πρώτο. Ουσιαστικά αναλαμβάνει την υλοποίηση της λογικής ελέγχου του συστήματος ισχύος. Αποτελεί δηλαδή την "νοημοσύνη" του μετατροπέα, η οποία πρέπει να λάβει υπόψη τις προδιαγραφές της πηγής και του φορτίου, την πραγματική και την επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας και αυτά, να μετασχηματιστούν στην συνέχεια, σε εντολές λειτουργίας προς το σύστημα ισχύος.

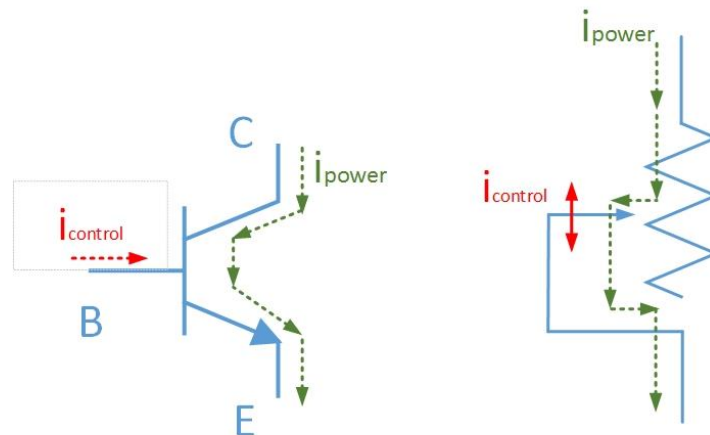


Σχήμα 3.1 Δομικό διάγραμμα μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος

## 3.2.1. Ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος

Για την κατασκευή του συστήματος ισχύος, όπως αναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται κατάλληλα ηλεκτρονικά στοιχεία, ικανά να διαχειριστούν ηλεκτρική ενέργεια, δηλαδή να λειτουργήσουν σε σχετικά υψηλότερα επίπεδα τάσης και ρεύματος. Κάποια από αυτά βασίζονται στα αντίστοιχα στοιχεία σήματος, όπως για παράδειγμα το MOSFET, ενώ κάποια άλλα σχεδιάστηκαν εξ αρχής με σκοπό την λειτουργία σε συστήματα ισχύος, όπως το IGBT. Σε κάθε περίπτωση, ενδιαφέρουν, ο **τρόπος ελέγχου του στοιχείου (οδήγηση)**, η **ευκολία μετάβασης από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής και αντίθετα (συχνότητα λειτουργίας)** και οι **αντίστοιχες απώλειες κατά τις μεταβάσεις (διακοπτικές απώλειες) και την λειτουργία σε αγωγή (απώλειες αγωγής)**.

Για να είναι σαφής η λειτουργία ενός στοιχείου ηλεκτρονικών ισχύος, μπορούμε να το θεωρήσουμε ως μια μεταβλητή αντίσταση, η τιμή της οποίας μεταβάλλεται μέσω κάποιας διαδικασίας ελέγχου (Σχήμα 3.2). Ο έλεγχος μπορεί να υλοποιείται από το ίδιο το σύστημα ισχύος, (μη ελεγχόμενο στοιχείο όπως η δίοδος) ή από το σύστημα ελέγχου που αναφέρθηκε παραπάνω, όπου διακρίνουμε την περίπτωση του **μερικού και του πλήρους ελέγχου**. Σε ένα μερικώς ελεγχόμενο στοιχείο, μπορούμε να διεγείρουμε την έναυση του, δηλαδή την μετάβαση από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής, η αντίθετη πορεία όμως (σβέση) ελέγχεται από το σύστημα (Line commutated). Αντίστοιχα, σε ένα πλήρως ελεγχόμενο στοιχείο, είναι δυνατός ο έλεγχος τόσο της έναυσης όσο και της σβέσης μέσω του συστήματος ελέγχου. Τυπικά παραδείγματα είναι τα στοιχεία MOSFET και IGBT.



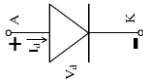
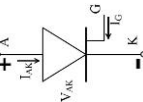
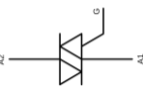
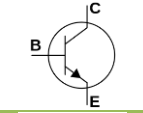
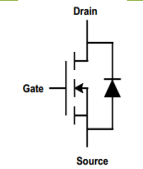
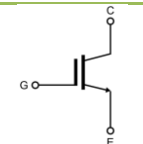
Σχήμα 3.2 Αναπαράσταση ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος ως ελεγχόμενη ωμική αντίσταση

Επιπλέον, όσον αφορά την οδήγηση διακρίνουμε τα στοιχεία ως **οδηγούμενα από ρεύμα ή από τάση**. Θεωρώντας πάλι το στοιχείο ως μια μεταβλητή αντίσταση, η μεταβολή της τιμής της μπορεί να γίνει, είτε εισάγοντας - αποσύροντας φορτία στον όγκο του στοιχείου, είτε αναδιατάσσοντας τα ήδη διαθέσιμα φορτία. Η πρώτη περίπτωση αφορά τα στοιχεία οδηγούμενα από ρεύμα, ενώ η δεύτερη αντίστοιχα τα στοιχεία που οδηγούνται από τάση. Επίσης στον πίνακα 3.1 καταγράφονται τα γνωστότερα στοιχεία ηλεκτρονικών ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη την διάκριση αυτή, η οποία έχει ιδιαίτερη σημασία, όσον αφορά την κατασκευή ενός μετατροπέα.

Συγκεκριμένα, το βασικό μειονέκτημα ενός στοιχείου οδηγούμενου από ρεύμα, είναι εξάρτηση του ρεύματος ελέγχου από το ρεύμα ισχύος. Αν για παράδειγμα ο παράγοντας αναλογίας είναι  $\beta=10$  και έχουμε ένα στοιχείο με ρεύμα αγωγής 100A, τότε αυτό πρέπει να οδηγηθεί από ένα κύκλωμα ελέγχου, ικανό να τροφοδοτεί με ρεύμα 10A, γεγονός που το καθιστά επίσης ως ένα κύκλωμα ισχύος. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει σημαντικά την κατασκευή του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα. Από την άλλη μεριά αποτελεί πλεονέκτημα η χαμηλή αντίσταση αγωγής που

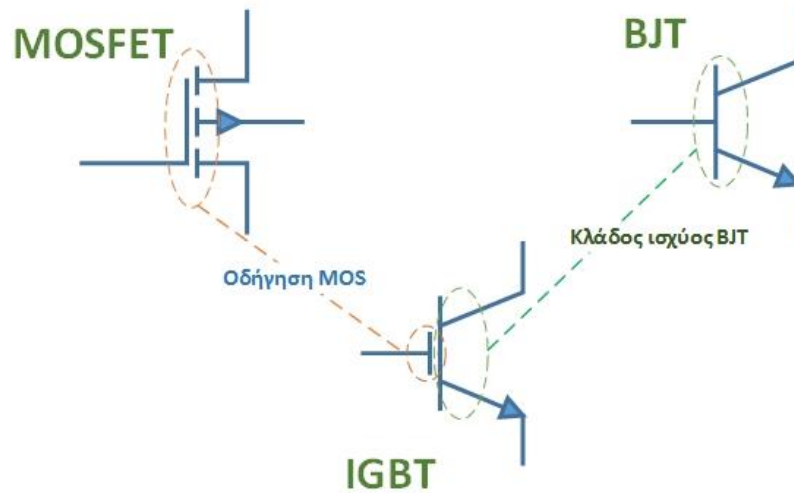
εμφανίζουν τα υπόψη στοιχεία, δεδομένης της εισαγωγής φορτίων στο πλακίδιο, για την διαμόρφωση αγωγιμότητας. Και στην περίπτωση αυτή όμως καταγράφεται το μειονέκτημα της συγκριτικά περιορισμένης συχνότητας λειτουργίας, δεδομένου ότι οι μεταβάσεις μεταξύ σβέσης και αγωγής, απαιτούν την κίνηση φορτίων, τα οποία έχουν πεπερασμένη ταχύτητα. Ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιου στοιχείου είναι το διπολικό τρανζίστορ (BJT).

**Πίνακας 3.1** Ημιαγωγικά στοιχεία και μηχανισμός ελέγχου

Όνομασία στοιχείου	Σύμβολο	Έλεγχος		
<b>Δίοδος</b>		Μη	ελεγχόμενο	
<b>Θυρίστορ</b>		Ημι-	ελεγχόμενο	Από ρεύμα
<b>Triac</b>		Ημι -	ελεγχόμενο	Από ρεύμα
<b>Διπολικό τρανζίστορ (BJT)</b>		Πλήρως	ελεγχόμενο	Από ρεύμα
<b>MOSFET</b>		Πλήρως	ελεγχόμενο	Από τάση
<b>IGBT</b>		Πλήρως	ελεγχόμενο	Από τάση

Από την άλλη μεριά, τα στοιχεία ελεγχόμενα από τάση, δεν απαιτούν υψηλές τιμές ρεύματος για την έναυση τους, δεδομένου ότι η διαμόρφωση της αγωγιμότητας, επιτυγχάνεται με την κατάλληλη αναδιάταξη των φορτίων, που ήδη υπάρχουν στο πλακίδιο. Έτσι, το κύκλωμα ελέγχου, βλέπει ουσιαστικά στην πύλη ελέγχου του στοιχείου ένα πυκνωτή (πυκνωτής MOS), με την φόρτιση του οποίου, επιτυγχάνεται η αναδιάταξη των φορτίων, δια του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται. Συνεπώς, τα υπόψη στοιχεία μπορούν ευκολότερα να ελεγχθούν από ένα κύκλωμα ελέγχου και να λειτουργούν με υψηλότερη συχνότητα. Παράλληλα όμως, σύμφωνα και με την παραπάνω παράγραφο, η αναμενόμενη αντίσταση αγωγής και οι σχετικές απώλειες, θα είναι υψηλότερες. Ένα τυπικό παράδειγμα τέτοιου στοιχείου είναι το MOSFET.

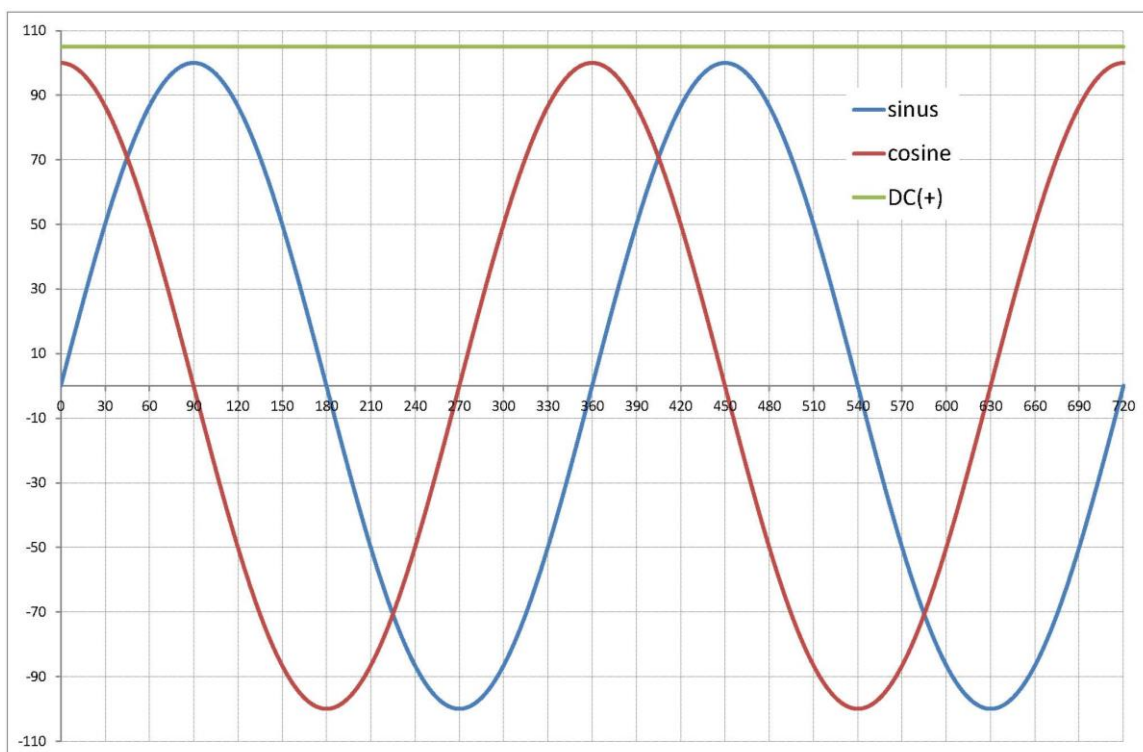
Συνδυάζοντας τα παραπάνω, τα τελευταία χρόνια, διατίθεται για την κατασκευή μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος, το στοιχείο IGBT, στο οποίο συνδυάζονται το διπολικό τρανζίστορ και το MOSFET. Δηλαδή το υπόψη στοιχείο ελέγχεται από τάση αλλά συμπεριφέρεται στην πλευρά ισχύος όπως το διπολικό τρανζίστορ. Ο συνδυασμός αυτός αντικατοπτρίζεται και στο σύμβολο που συνήθως χρησιμοποιείται για το IGBT (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Βασική φιλοσοφία του διπολικού τρανζιστορ απομονωμένης πύλης (IGBT)

### 3.2.2. Σήματα και συστήματα αναφοράς

Στο πεδίο των ενεργειακών ηλεκτρικών συστημάτων, θεωρούμε ως σήματα αναφοράς, το συνεχές (DC) με σταθερό εύρος και πολικότητα και το εναλλασσόμενο ημιτονικό (AC), με την βιομηχανική συχνότητα των 50Hz (ή 60Hz). Σε ειδικές περιπτώσεις, όπως τα ηλεκτρικά συστήματα σε αεροπλάνα, συναντάται και η συχνότητα των 400Hz. Έτσι, μια ιδανική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας θα παρέχει ενέργεια με τον συνδυασμό τάσεων και ρευμάτων τα οποία θα ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά των σημάτων αναφοράς. Κάθε τυχόν απόκλιση μπορεί να θεωρηθεί ως υποβάθμιση της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σχήμα 3.4 περιγράφονται τα σήματα αναφοράς.



Σχήμα 3.4 Σήματα αναφοράς στα σύγχρονα ηλεκτρικά συστήματα

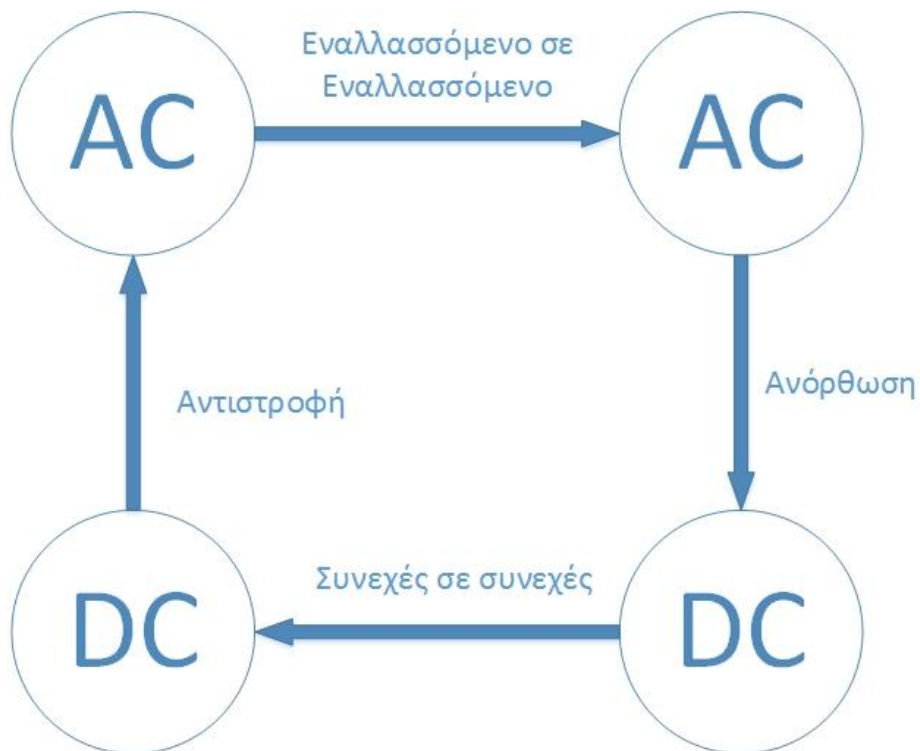
Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, μας επιτρέπουν την διασύνδεση συστημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τα σήματα αναφοράς. Καταγράφουμε τέσσερις βασικές λειτουργίες (Σχήμα 3.5):

Ανόρθωση: η μετατροπή ενός συστήματος εναλλασσόμενης τάσης (AC) (ή ρεύματος), σε συνεχή (DC),

Αντιστροφή: η μετατροπή ενός συστήματος συνεχούς τάσης (DC) (ή ρεύματος), σε εναλλασσόμενη (AC),

Συνεχές σε συνεχές: η μετατροπή ενός συστήματος συνεχούς τάσης (DC) (ή ρεύματος), σε συνεχή (DC), με διαφορετικό εύρος ή πολικότητα,

Εναλλασσόμενο σε εναλλασσόμενο: Ανόρθωση: η μετατροπή ενός συστήματος εναλλασσόμενης τάσης (AC) (ή ρεύματος), σε εναλλασσόμενη (AC), με διαφορετικό εύρος ή συχνότητα ή φάση.

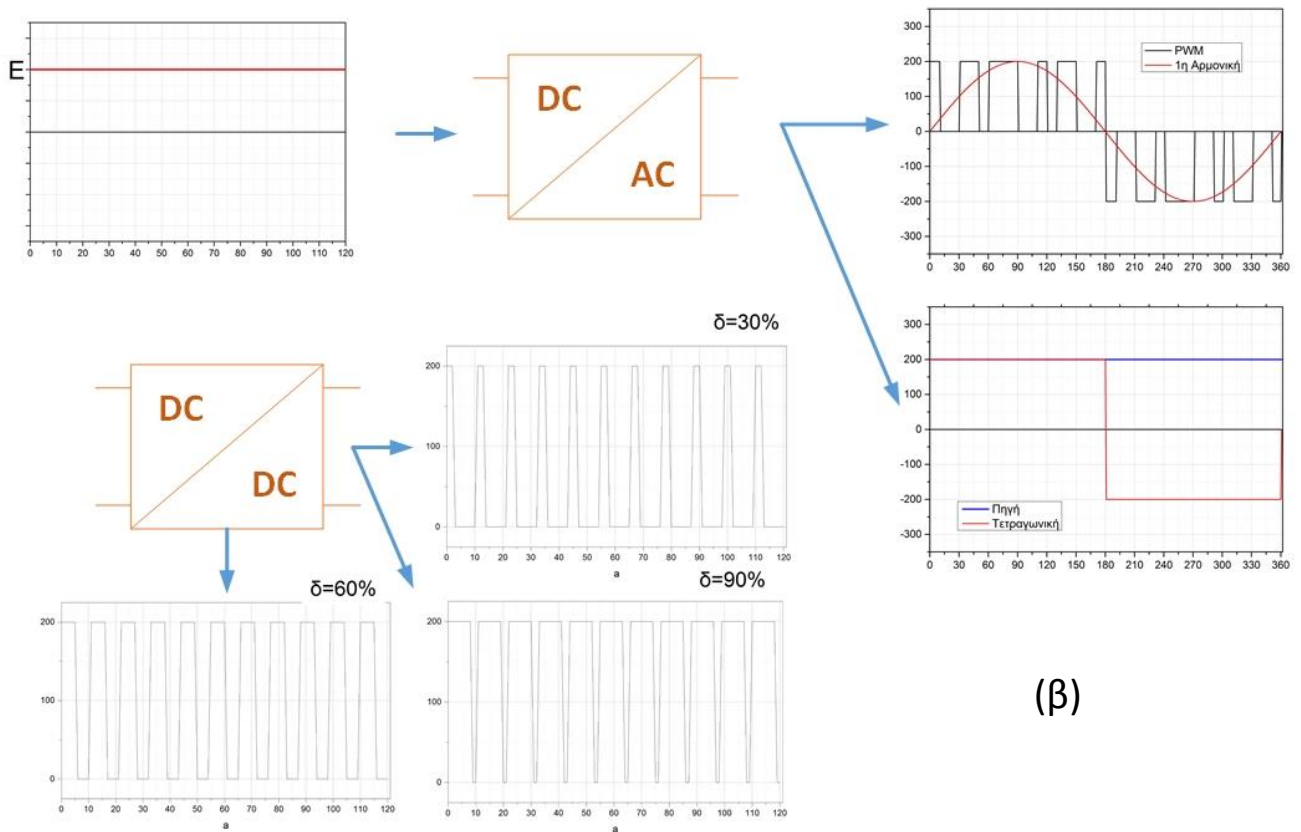
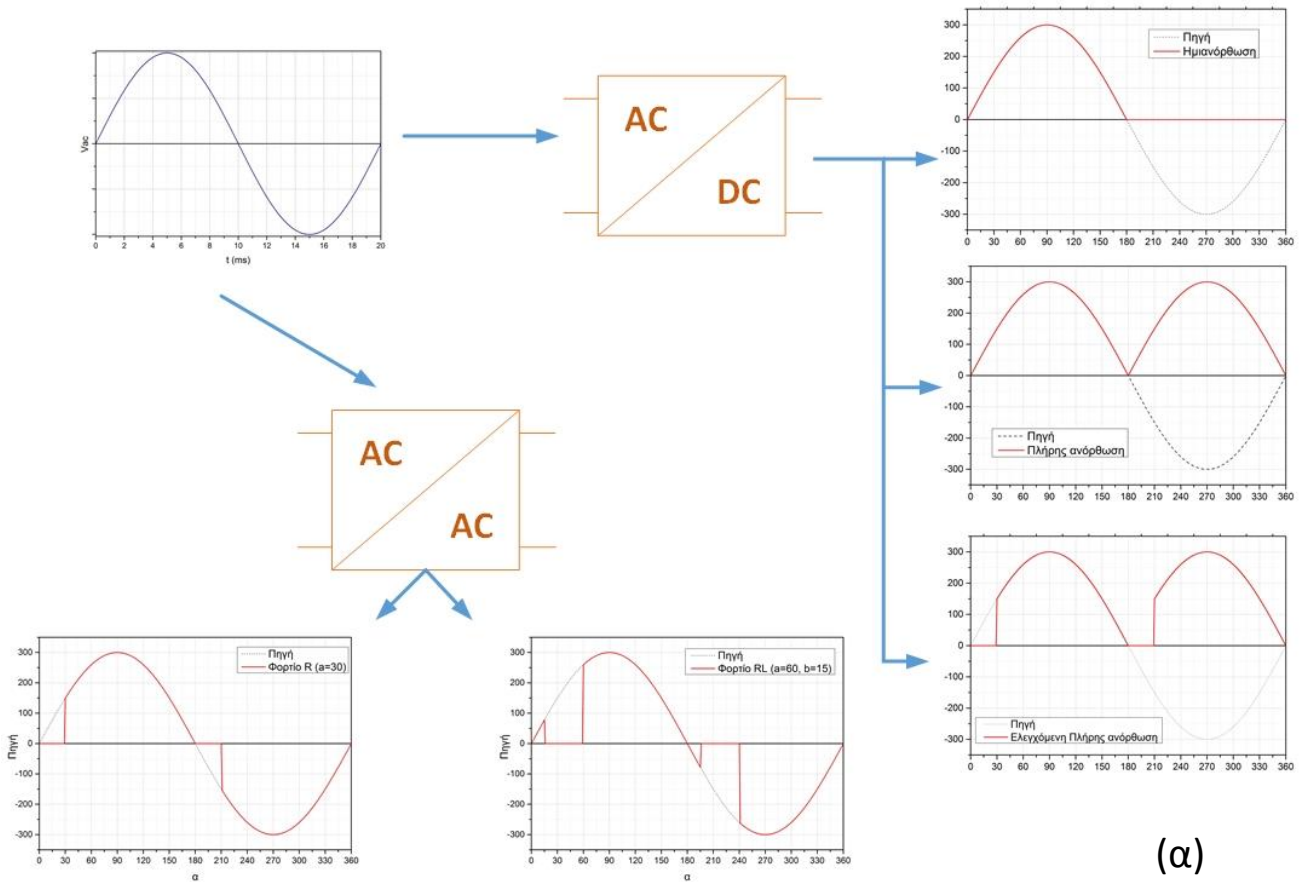


Σχήμα 3.5 Βασικές λειτουργίες μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος

### 3.2.3. Μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος και ποιότητα ισχύος

Στο σχήμα 3.6, καταγράφεται η είσοδος και η έξοδος ενός μετατροπέα, για κάθε μια από τις παραπάνω βασικές λειτουργίες. Από την μορφή των σημάτων εξόδου, εύκολα κανείς συμπεραίνει, ότι η λειτουργία των μετατροπέων συνεπάγεται την δημιουργία παραμορφωμένων τάσεων ή ρευμάτων και ως εκ τούτου, η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας υποβαθμίζεται.

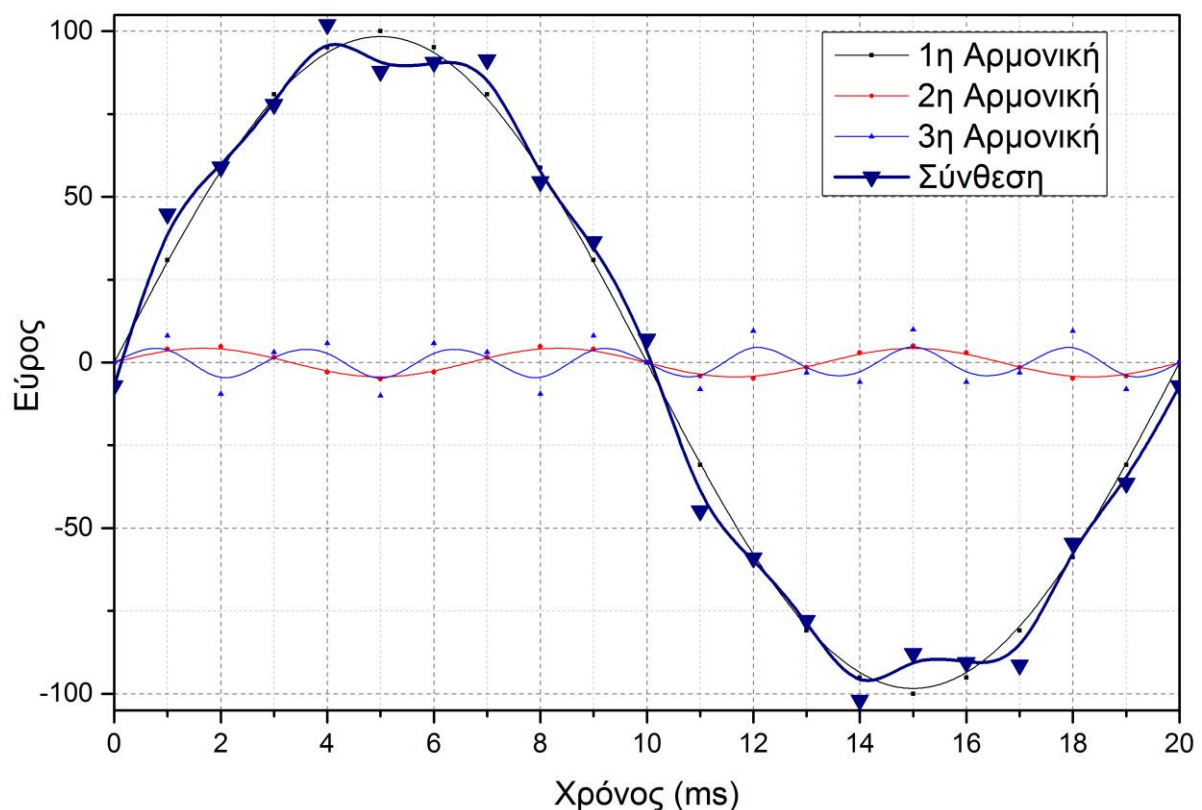




Σχήμα 3.6 Σήματα εισόδου και εξόδου σε μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος (α) με αφετηρία πηγή AC και (β) πηγή DC

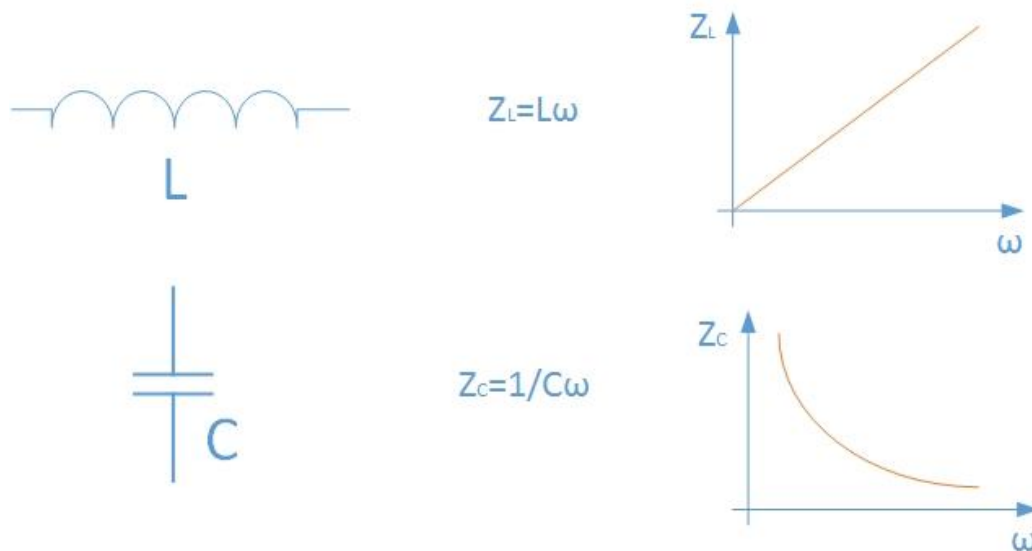
Για την αποτίμηση αυτής της υποβάθμισης, χρησιμοποιείται ένα μαθηματικό εργαλείο γνωστό ως ανάλυση Fourier, το οποίο μας επιτρέπει την αντιστοίχιση ενός μη ιδανικού σήματος, σε ένα άθροισμα συνιστωσών, εκ των οποίων μια αντιστοιχεί σε ένα συνεχές σήμα αναφοράς (μέση τιμή) και οι υπόλοιπες είναι ημιτονικά σήματα, αντίστοιχα του σήματος αναφοράς, με συχνότητες πολλαπλάσια μιας βασικής. Αυτές οι ημιτονικές συνιστώσες χαρακτηρίζονται ως αρμονικές και μπορούν να μετρηθούν χρησιμοποιώντας κατάλληλα μετρητικά συστήματα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σε πραγματικές συνθήκες, η απόκλιση από την ιδανική κατάσταση προκύπτει γενικότερα όταν στο σύστημα μετέχουν μη γραμμικά στοιχεία. Για παράδειγμα η παρουσία ενός μαγνητικού συστήματος, όπως ένα πηνίο, επίσης μπορεί να συνεισφέρει στο περιεχόμενο των αρμονικών, δεδομένου σε συστήματα βιομηχανικής συχνότητας χρησιμοποιούνται μαγνητικοί πυρήνες, η συμπεριφορά των οποίων περιγράφεται από την μη γραμμική χαρακτηριστική της υστέρησης. Στο σχήμα 3.7 αναλύεται μια τυπική παραμόρφωση στην περίπτωση αυτή.



Σχήμα 3.7 Σύνθεση κυματομορφής από τρεις αρμονικές που καταγράφονται σε μαγνητικά συστήματα

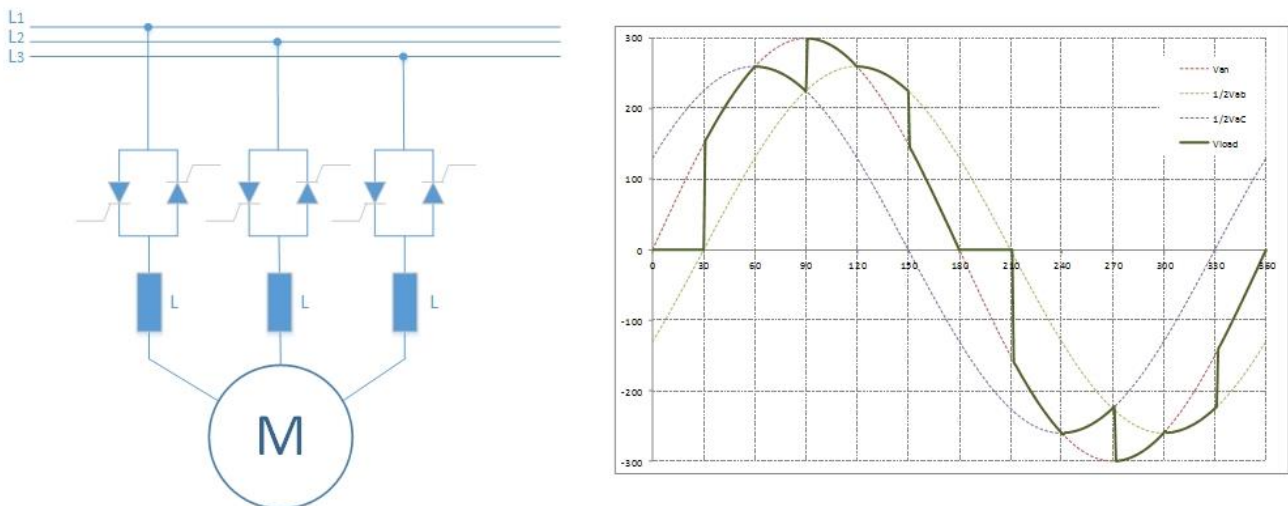
Σε κάθε περίπτωση η παρουσία των αρμονικών, εκλαμβάνεται ως άεργος ισχύς και ως εκ τούτου απαιτείται ο περιορισμός τους, κάτι που είναι εφικτό συνδυάζοντας αφενός την κατάλληλη τεχνική ελέγχου του μετατροπέα και αφετέρου διατάξεις φίλτρων, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά σήματος. Σημειώνεται βέβαια ότι η δυνατές υλοποιήσεις φίλτρων περιορίζονται από την απαιτούμενη ισχύ των συστημάτων του φίλτρου, δεδομένου ότι στην περίπτωση αυτή αφορούν συστήματα ισχύος. Η πιο απλή υλοποίηση φίλτρου είναι ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο, όπως περιγράφεται στο σχήμα 3.8, λαμβάνοντας υπόψη την σχέση ανάμεσα στην εμπέδηση των υπόψη στοιχείων και την συχνότητα.



Σχήμα 3.8 Συσχέτιση της εμπέδησης βασικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε φίλτρα με την συχνότητα

3.2.4. Διακοπτική λειτουργία στην περίπτωση των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος

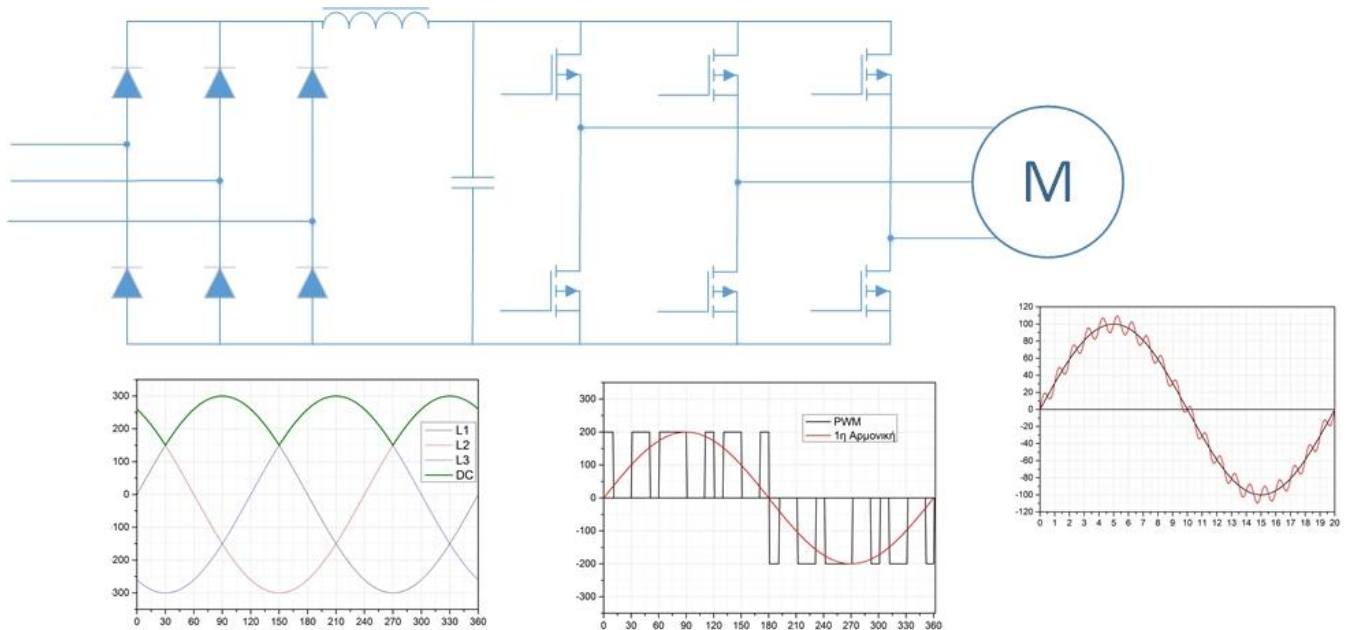
Το πρόβλημα των αρμονικών, όπως τέθηκε παραπάνω, αποτελεί ουσιαστικά την βασική αρχή λειτουργίας πολλών μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος. Δηλαδή, αν έχω ένα σύστημα - πηγή ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο μαζί με το σήμα αναφοράς που μας ενδιαφέρει, εμπεριέχονται και πλήθος αρμονικών, τότε προφανώς η πηγή αυτή είναι χαμηλής ποιότητας. Αν όμως είναι δυνατή η εξάλειψη των αρμονικών, είτε με φίλτρα που τοποθετούνται επιπλέον, είτε εκμεταλλευόμενοι το ίδιο το σύστημα που τροφοδοτείται ως φίλτρο, τότε είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν τόσο ο έλεγχος της πηγής όσο και οι απαιτήσεις - προδιαγραφές του φορτίου. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί ένα κινητήριο σύστημα με ένα κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως αυτό του σχήματος 3.9.



Σχήμα 3.9 Κυματομορφή της τάσης σε κινητήριο σύστημα με AC/AC μετατροπέα

Στην πρώτη περίπτωση τροφοδοτείται από έναν AC - AC μετατροπέα, ο οποίος ελέγχει την ενεργό τιμή της τάσης, ελέγχοντας το τμήμα της κυματομορφής που περνάει από την πηγή στο φορτίο. Η τροφοδοτούμενη τάση εμπεριέχει αρμονικές και κατ' αντιστοιχία και το τροφοδοτούμενο ρεύμα. Δεδομένου όμως ότι ο ίδιος ο κινητήρας αποτελεί ένα μεγάλο πηνίο, λειτουργεί παράλληλα ως φορτίο και φίλτρο μαζί. Οπότε οι αρμονικές του ρεύματος εξαλείφονται και δεν περνούν στην

αναπτυσσόμενη μαγνητική ροή, επιτρέποντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, αυξάνοντας την συχνότητα των αρμονικών είναι εφικτή η επίτευξη καλύτερης λειτουργίας, όπως προκύπτει για παράδειγμα σε ένα μετατροπέα τύπου PWM, όπως αυτός του σχήματος 3.10, όπου καταγράφονται οι κυματομορφές της τάσης στην είσοδο και στην έξοδο του μετατροπέα καθώς και το ρεύμα στον κινητήρα.



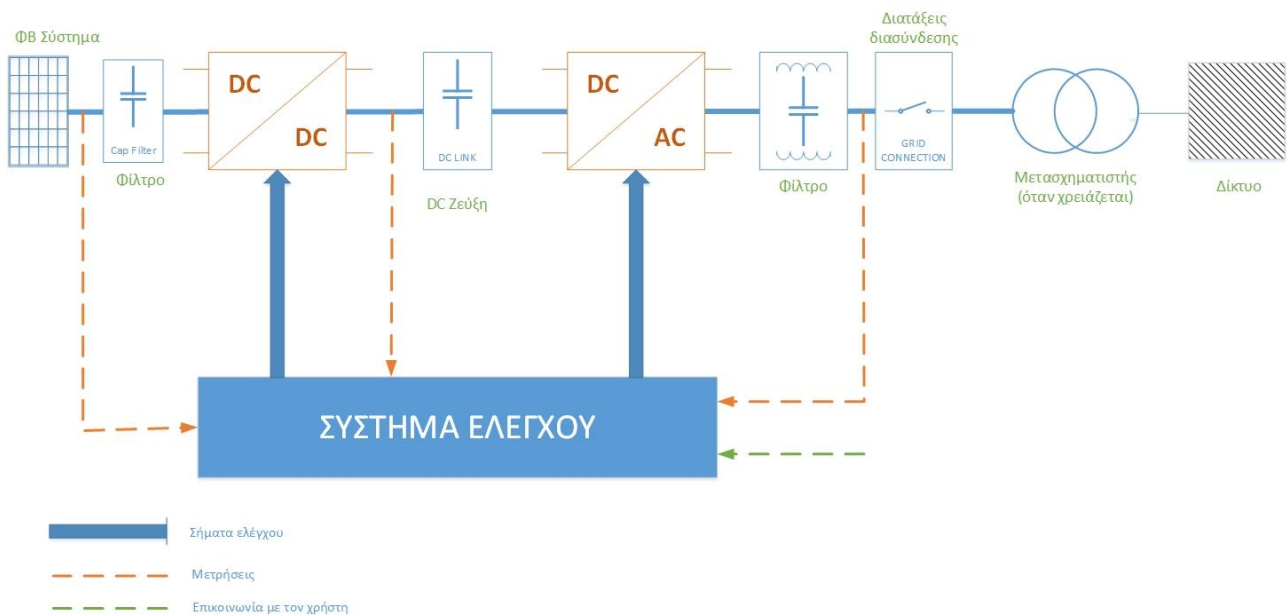
**Σχήμα 3.10** Κινητήριο σύστημα AC με μετατροπέα AC/DC/AC (inverter) (α) τάση στην είσοδο (ac και dc), (β) στην έξοδο του αντιστροφέα και (γ) το ρεύμα στον κινητήρα.

Περαιτέρω η διακοπτική λειτουργία είναι συνήθης τεχνική στους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος και μάλιστα, σε συνδυασμό με στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας όπως πηνία και πυκνωτές, επιτρέπουν την υλοποίηση μετατροπών, όπως για παράδειγμα την μετατροπή από DC σε DC μεγαλύτερου εύρους (μετατροπέας Boost), που διαφορετικά είναι μη εφικτές ή εξαιρετικά δύσκολες. Έτσι, στην πλειοψηφία των εφαρμογών, τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος λειτουργούν ως διακόπτες, είτε δηλαδή άγουν με την μέγιστη αγωγιμότητα είτε δεν άγουν. Η ενδιάμεση λειτουργία, γνωστή και ως γραμμική περιοχή συναντάται σπάνια. Μια γνωστή εφαρμογή είναι τα γραμμικά τροφοδοτικά (linear power supplies).

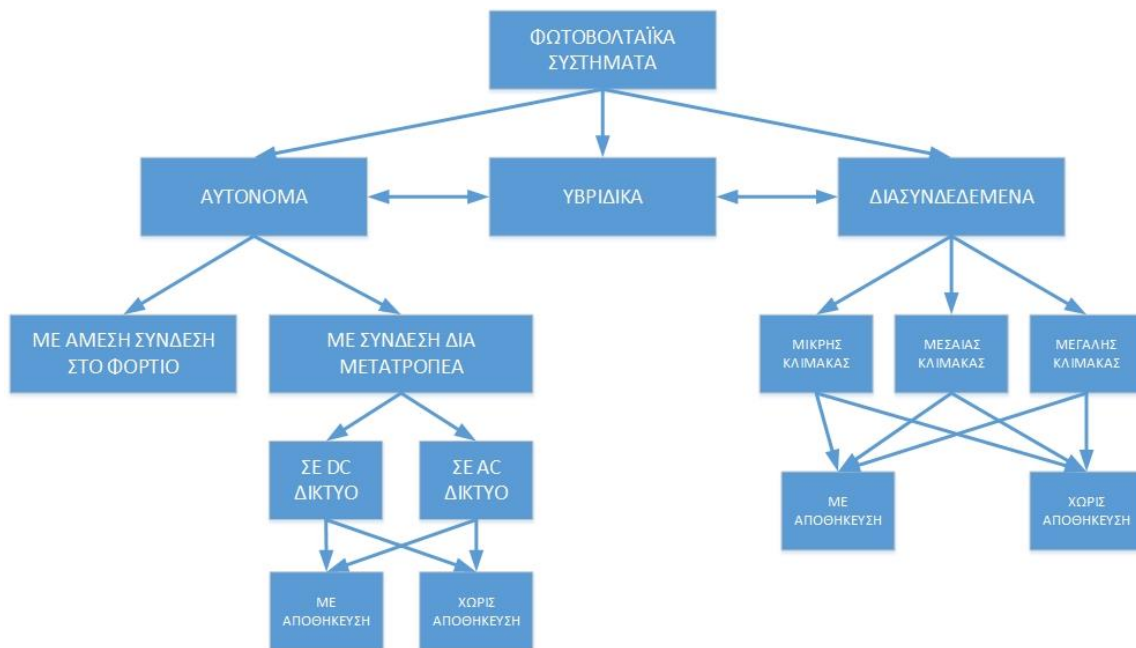
### 3.3 Σύγχρονα ΦΒ συστήματα

Στο σχήμα 3.11 φαίνεται σε μορφή δομικού διαγράμματος, η γενική αναπαράσταση ενός σύγχρονου ΦΒ συστήματος. Κεντρική συνιστώσα, αποτελεί η διάταξη μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία αποτελείται από πλήθος φωτοβολταϊκών κυττάρων, τα οποία και ομαδοποιούνται σε ομάδες (πάνελς, αλυσίδες (strings), συστοιχίες), ώστε να είναι ικανά να παρέχουν ενέργεια στα επιθυμητά επίπεδα. Στην συνέχεια, η βασική φωτοβολταϊκή υποδομή, εμπλουτίζεται από συστήματα, τα οποία αναλαμβάνουν αφενός να βελτιστοποιήσουν την λειτουργία της γεννήτριας και αφετέρου να προσαρμόσουν την παραγόμενη ενέργεια στις απαιτήσεις του φορτίου. Η βασική διάκριση η οποία γίνεται, είναι αν το υπόψη σύστημα διασυνδέεται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή όχι. Επιπλέον εξετάζεται αν συμπεριλαμβάνεται στο υπόψη σύστημα, διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που ήταν συνήθως απαραίτητο στα μη διασυνδεδεμένα συστήματα, αποτελεί όμως εναλλακτική σήμερα και στα διασυνδεδεμένα. Το τελευταίο προκύπτει, λαμβάνοντας υπόψη αφενός την ανάγκη εγγυημένης

παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αφετέρου την αδυναμία ελέγχου της πρωτογενούς πηγής, δηλαδή της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι στο σχήμα 3.12 καταγράφονται οι διάφορες κατηγορίες ΦΒ συστημάτων.



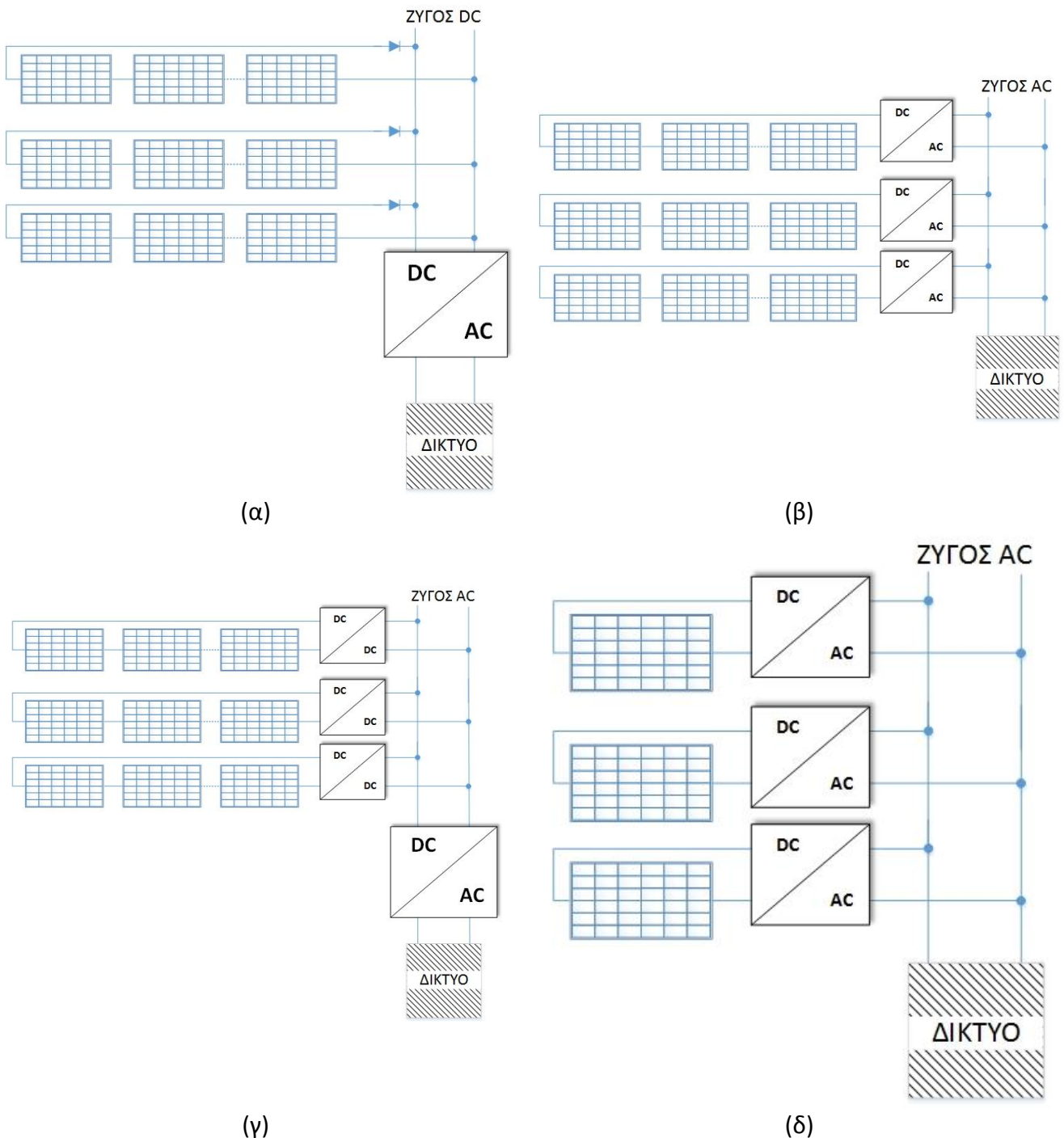
Σχήμα 3.11 Δομικό διάγραμμα σύγχρονου φωτοβολταϊκού συστήματος



Σχήμα 3.12 Διάκριση σύγχρονων φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ιδιαίτερα στα διασυνδεδεμένα συστήματα, όπου και τα επίπεδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερα, διακρίνουμε επίσης τις παρακάτω τέσσερις περιπτώσεις, οι οποίες αναλύονται παρακάτω, στην παράγραφο 3.6:

- (α) Λειτουργία με κύριο αντιστροφέα (σχήμα 3.13α)
- (β) διαμόρφωση αλυσίδας (string configuration) (σχήμα 3.13β)
- (γ) διαμόρφωση πολλαπλής αλυσίδας (multi string configuration) (σχήμα 3.13γ)
- (δ) διαμόρφωση AC module (σχήμα 3.13δ)

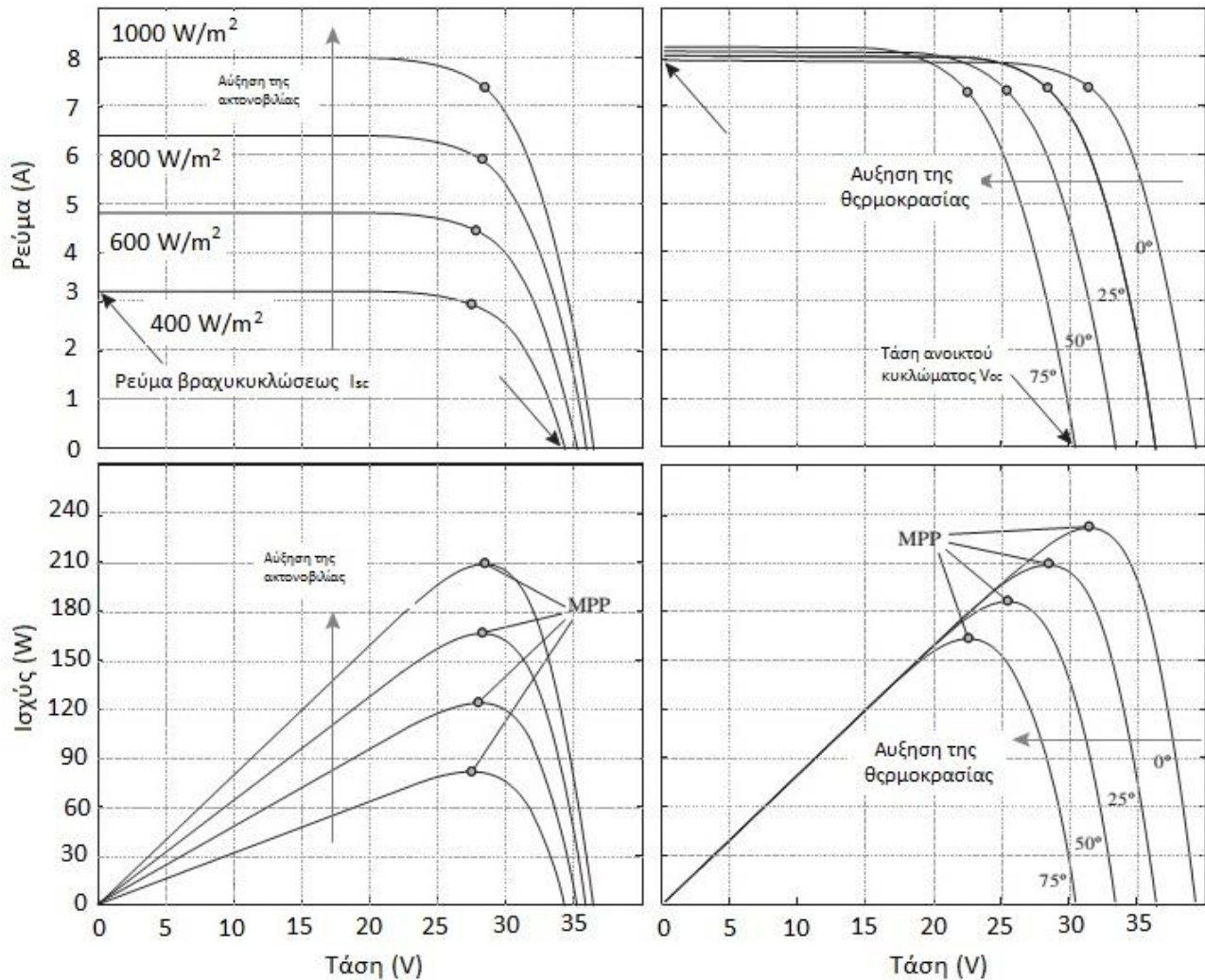


**Σχήμα 3.13** Τοπολογίες διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων (α) Λειτουργία με κύριο αντιστροφέα, (β) διαμόρφωση αλυσίδας (string configuration) (γ) διαμόρφωση πολλαπλής αλυσίδας (multi string configuration) και (δ) διαμόρφωση AC module

### 3.3.1. Λειτουργία της φωτοβολταϊκής γεννήτριας

Η ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής γεννήτριας προϋποθέτει την διασύνδεση πλήθους ΦΒ κυττάρων σε σύνδεση εν σειρά και εν παράλληλω, με σκοπό να αυξηθούν τα επίπεδα της παραγόμενης τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Για κάθε τέτοιο συνδυασμό, η συμπεριφορά της γεννήτριας περιγράφεται από μια I-V χαρακτηριστική, όπως αυτή του σχήματος 3.14α. Η χαρακτηριστική αυτή μεταβάλλεται με την μεταβολή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στα σχήματα 3.14α και 3.14β. Έτσι σε συνθήκες λειτουργίας πρέπει να επιτυγχάνεται η λειτουργία της γεννήτριας στο

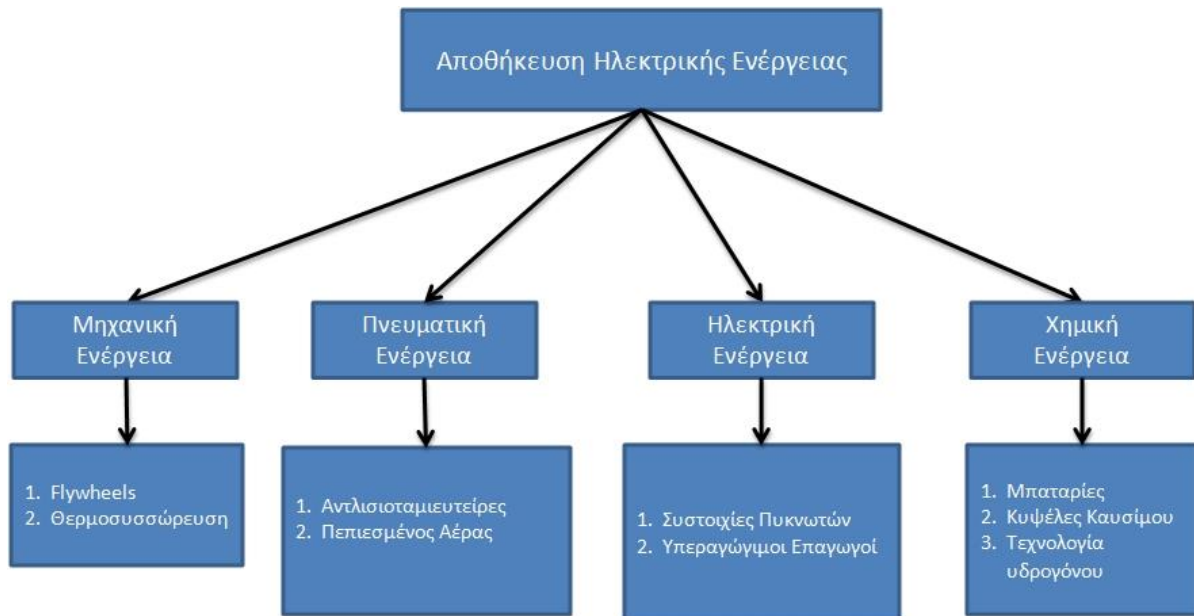
σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος (MPP) σχήματα 3.14γ και 3.14δ, κάτι που είναι εφικτό δια της ρύθμισης του φορτίου της γεννήτριας. Δηλαδή, ανεξάρτητα από το πραγματικό φορτίο που έχει το ΦΒ σύστημα, η διάταξη των ΦΒ κυττάρων πρέπει να "βλέπει" ένα εικονικό φορτίο, με τιμή τέτοια ώστε η γεννήτρια να λειτουργεί στο MPP σημείο. Παρεμβάλλεται συνεπώς ένας μετατροπέας ο οποίος δέχεται συνεχή τάση στην είσοδο του και αποδίδει συνεχή ή εναλλασσόμενη, αλλά ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ΦΒ γεννήτρια να λειτουργεί με το φορτίο MPP και άρα να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική.



**Σχήμα 3.14** Τυπικές χαρακτηριστικές φωτοβολταϊκού πάνελου (α) I-V όπου φαίνεται η μεταβολή με την ακτινοβολία, (β) I-V όπου φαίνεται η μεταβολή με την θερμοκρασία, (γ) P-V όπου φαίνεται η μεταβολή με την ακτινοβολία και (δ) P-V όπου φαίνεται η μεταβολή με την θερμοκρασία

### 3.3.2. Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας

Το ζήτημα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, απασχολεί τον χώρο της ενεργειακής τεχνολογίας εδώ και πάρα πολλά χρόνια, έχει αποκτήσει όμως ιδιαίτερο ενδιαφέρον τελευταία, με την εισαγωγή στον ενεργειακό χάρτη των Α.Π.Ε.. Ένα σύστημα αποθήκευσης συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη εγγυημένης παραγωγής από ένα σύστημα Α.Π.Ε. και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στο σχήμα 3.15, καταγράφονται τα γνωστότερα συστήματα αποθήκευσης Η.Ε. που είναι διαθέσιμα σήμερα σε βιομηχανικό ή ερευνητικό επίπεδο. Μεταξύ αυτών, οι μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου έχουν σημαντική εφαρμογή στα ΦΒ συστήματα.



Σχήμα 3.15 Τεχνικές και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Είναι σημαντικό ότι και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για συστήματα DC, γεγονός που διευκολύνει την διασύνδεση τους με την ΦΒ γεννήτρια. Όμως και στην περίπτωση αυτή υπάρχουν προδιαγραφές και απαιτήσεις που εξασφαλίζουν την βέλτιστη λειτουργία και των συστημάτων αυτών. Σημειώνεται ότι τόσο οι μπαταρίες όσο και οι κυψέλες καυσίμου αντιπροσωπεύουν σημαντικό τμήμα της σχετικής επένδυσης, συνεπώς η εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής διάρκειας ζωής αποτελεί ανάγκη και όχι απλά επιθυμία.

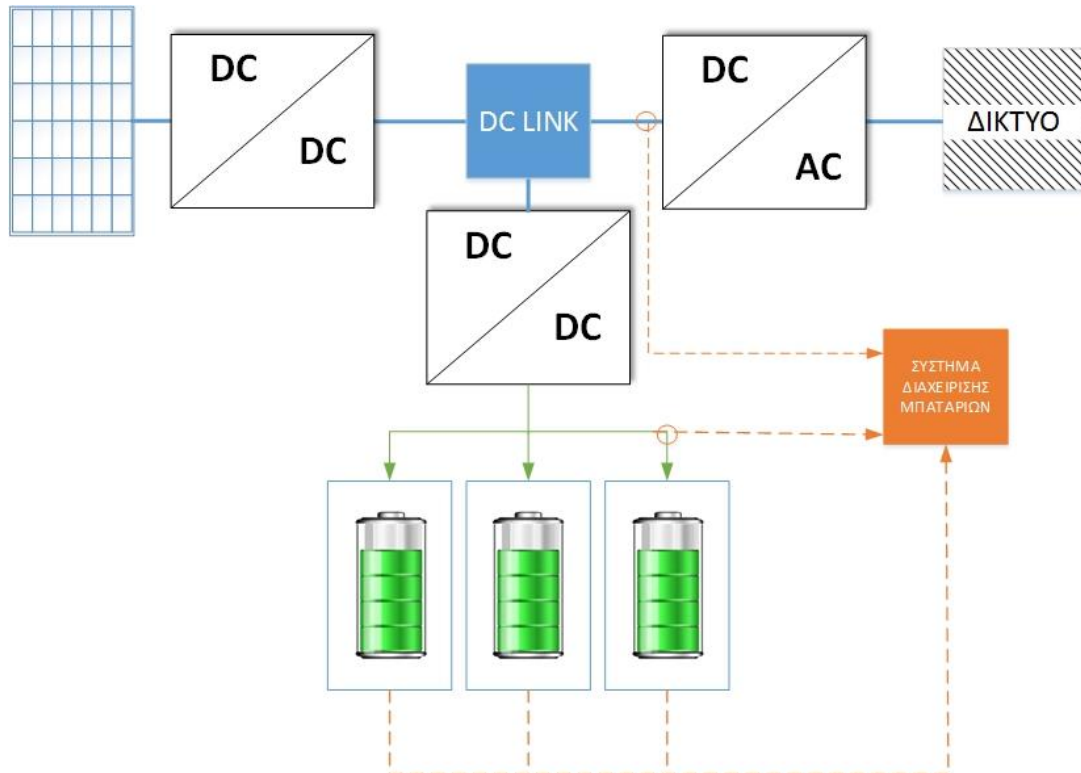
Έτσι μαζί με το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας συμπεριλαμβάνεται και ένας ή περισσότεροι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, υπό τον όρο σύστημα διαχείρισης, οι οποίοι αναλαμβάνουν τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος (σχήμα 3.16). Ιδιαίτερα στην περίπτωση των μπαταριών, το σύστημα διαχείρισης αναλαμβάνει:

- τον έλεγχο της διαδικασίας φόρτισης, ώστε να αποφθεχθεί το ενδεχόμενο υπερφόρτισης,
- τον έλεγχο της διαδικασίας εκφόρτισης, ώστε να εξασφαλιστεί το ασφαλές βάθος εκφόρτισης, σύμφωνα με τον τύπο της μπαταρίας και
- την συντήρηση της μπαταρίας, καθώς και την παροχή χρήσιμων πληροφοριών στον χρήστη.

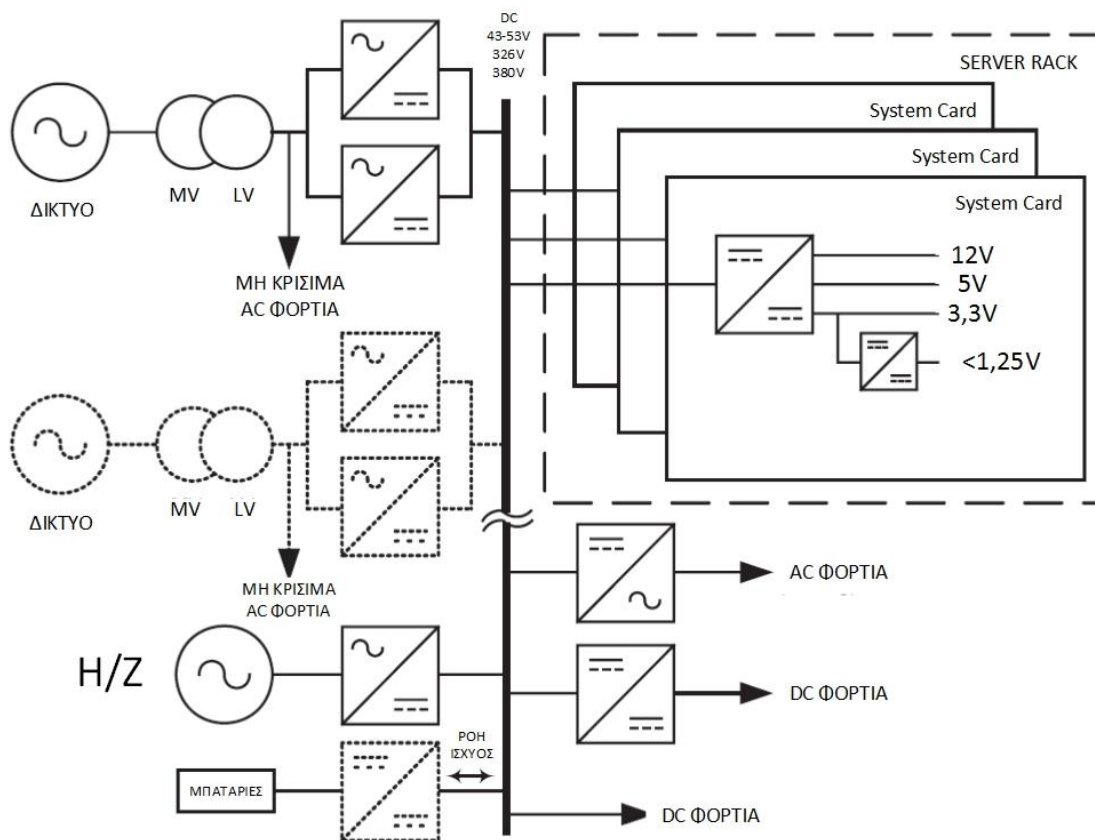
### 3.3.3. Διασύνδεση με το φορτίο

Για την διασύνδεση του ΦΒ συστήματος με το φορτίο, λαμβάνονται υπόψη οι προδιαγραφές που θέτει το τελευταίο και εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του. Μια βασική διάκριση αφορά το είδος της τάσης που απαιτεί το φορτίο, δηλαδή συνεχής ή εναλλασσόμενη και σε δεύτερο βαθμό το επίπεδο της τάσης και του ρεύματος που απαιτεί. Σήμερα τα περισσότερα φορτία απαιτούν καταρχήν την τροφοδότηση με AC τάση, δεδομένου ότι σχεδιάζονται με σκοπό την λειτουργία στον υπάρχων σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο διαθέτει 230V AC τάση σε συχνότητα 50Hz. Σε πάρα πολλά όμως εξ αυτών, περιλαμβάνονται μετατροπείς AC σε DC (ανορθωτές) και DC σε DC, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία λειτουργούν σε DC. Τυπική περίπτωση είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Έτσι σε εγκαταστάσεις όπου τέτοια φορτία κυριαρχούν, υπάρχει σήμερα συζήτηση σχετικά με την λειτουργία συστημάτων διανομής με DC. Τυπικό παράδειγμα τα Κέντρα Δεδομένων (Data Centers) (σχήμα 3.17).





Σχήμα 3.16 Δομικό διάγραμμα ΦΒ συστήματος με αποθήκευση σε μπαταρίες και σύστημα διαχείρισης μπαταριών



Σχήμα 3. 17 Δομικό διάγραμμα data center με σύστημα διανομής συνεχούς τάσης

## 3.3.4. Διασύνδεση με το δίκτυο

Για την διασύνδεση ενός ΦΒ συστήματος με το δίκτυο, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι προδιαγραφές που το δίκτυο θέτει, ώστε να είναι ομαλή η ένταξη του υπόψη συστήματος και παράλληλα η επίδραση που μπορεί το δίκτυο να έχει στο ΦΒ σύστημα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μεταβατικής λειτουργίας. Η προσαρμογή αυτή υλοποιείται από τον μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος καταρχήν αναλαμβάνει την μετατροπή της DC τάσης που παράγεται σε AC και επιπλέον αναλαμβάνει:

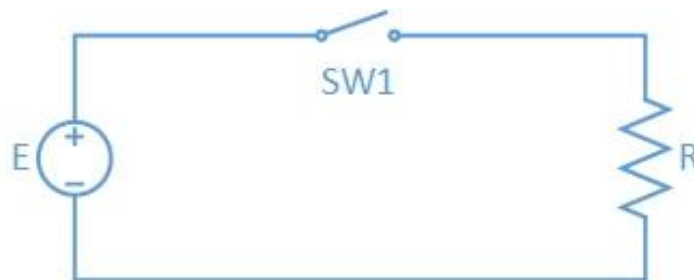
- (α) το συγχρονισμό του συστήματος με το δίκτυο,
- (β) την αντίδραση σε περιπτώσεις μη κανονικής λειτουργίας, όπως σε περιπτώσεις σφάλματος στο δίκτυο,
- (γ) την αντιμετώπιση του ενδεχομένου νησιδοποίησης (islanding),
- (δ) εξασφάλιση του ελάχιστο επιπέδου ποιότητας ισχύος (αρμονικές, flicker κτλ) και
- (ε) την συνεργασία με το δίκτυο, στο επίπεδο του ελέγχου

## 3.4 Βασικές λειτουργίες μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος σε ΦΒ συστήματα

## 3.4.1. Μετατροπή DC σε DC

## 3.5.1.a. Λειτουργία υποβιβασμού συνεχούς τάσης

Στο σχήμα 3.18 φαίνεται η βασική δομή ενός μετατροπέα DC σε DC, με αντικείμενο τον υποβιβασμό της τάσης. Ο υποβιβασμός επιτυγχάνεται δια της διακοπτικής λειτουργίας του στοιχείου S1, το οποίο σε ένα πραγματικό σύστημα, θα ήταν ένα πλήρως ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο (π.χ. MOSFET, IGBT, BJT κτλ). Θεωρώντας ωμικό φορτίο, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος φαίνονται στο σχήμα 3.19. Υπολογίζεται η τάση και το ρεύμα στο φορτίο, ως συνάρτηση της περιόδου λειτουργίας, του χρόνου αγωγής του στοιχείου και της τάσης εισόδου (εξισώσεις 3.1 και 3.2).



**Σχήμα 3.18** Βασική τοπολογία διακοπτικού μετατροπέα DC σε DC υποβιβασμού τάσης

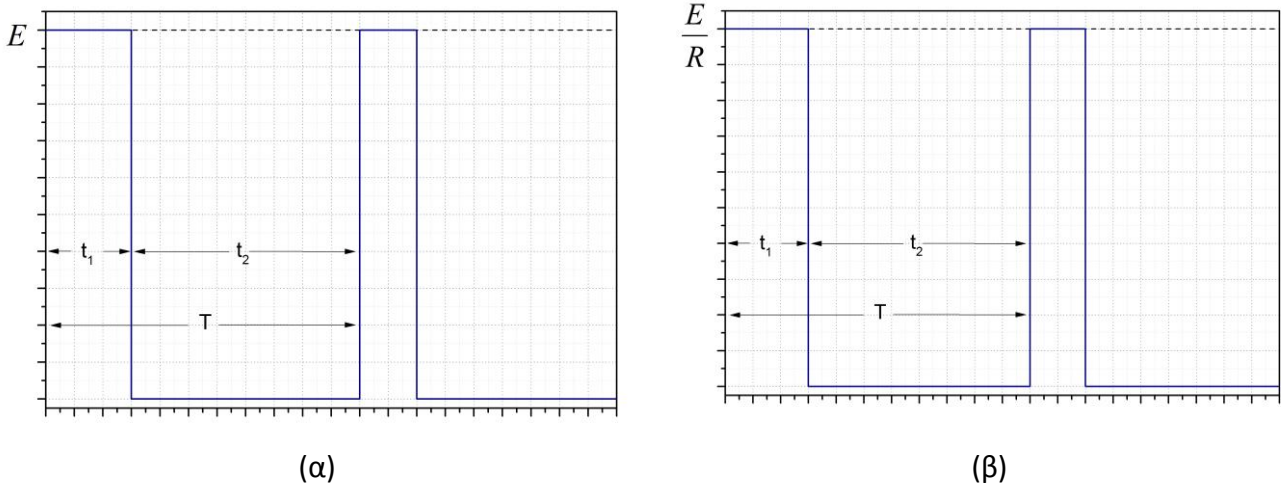
$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{t_{ON}}{T} E = \delta E \quad (3.1)$$

και

$$I_L = \frac{V_L}{R} = \frac{t_{ON}}{TR} E = \frac{\delta E}{R} \quad (3.2)$$

όπου ως  $\delta$  ορίζεται ο λόγος κατάτμησης (duty cycle):

$$\delta = \frac{t_{ON}}{T} \quad (3.3)$$



**Σχήμα 3.19** Κυματομορφές της τάσης (α) και του ρεύματος (β) σε ένα διακοπτικό DC σε DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης με ωμικό φορτίο

Επιπλέον, η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο και η ισχύς υπολογίζονται ως:

$$V_{L,RMS} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T (u(t)^2) dt \right)^{1/2} = \sqrt{\delta E} \quad (3.4)$$

$$P = EI = E \frac{\delta E}{R} = \delta \frac{E^2}{R} \quad (3.5)$$

Ακόμη, η αντίσταση εισόδου που "βλέπει" η πηγή υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{IN} = \frac{E}{I_L} = \frac{E}{\frac{\delta E}{R}} = \frac{R}{\delta} \quad (3.6)$$

Συνεπώς από την σχέση 3.1:

- θεωρώντας μια ορισμένη τάση εισόδου  $E$ , μπορούμε να ελέγξουμε την τάση στο φορτίο με έλεγχο του  $\delta$ ,
- θεωρώντας ότι η τάση στην είσοδο μεταβάλλεται, μπορούμε ελέγχοντας το  $\delta$ , να εξασφαλίσουμε μια ορισμένη τάση στο φορτίο

**Έτσι στην περίπτωση ΦΒ παραγωγής, όπου η τάση μεταβάλλεται, η παρεμβολή ενός μετατροπέα DC σε DC μπορεί να αποκρύψει την μεταβαλλόμενη λειτουργία της ΦΒ γεννήτριας και το φορτίο να "βλέπει" σταθερή τάση τροφοδοσίας.**

Παράλληλα για την μεταβολή του  $\delta$  είναι δυνατό:

- να μεταβάλλουμε την διάρκεια αγωγής διατηρώντας την περίοδο (διακοπτική συχνότητα) σταθερή. Στην περίπτωση αυτή η τεχνική ελέγχου χαρακτηρίζεται ως διαμόρφωση του εύρους των παλμών (Pulse Width Modulation, PWM) και συνηθίζεται, δεδομένου ότι η σταθερή συχνότητα επιτρέπει την εύκολη σχεδίαση των φίλτρων.

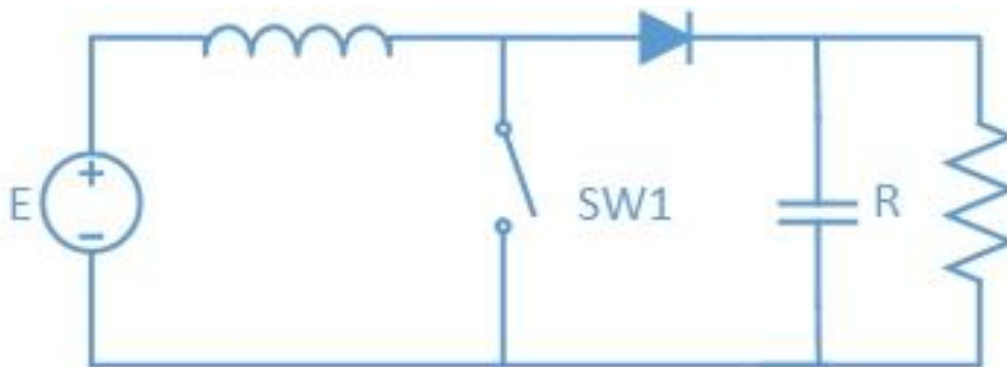
- να μεταβάλλουμε την περίοδο (συχνότητα), διατηρώντας τον χρόνο αγωγής σταθερό. Στην περίπτωση αυτή η τεχνική ελέγχου χαρακτηρίζεται ως διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation). Χρησιμοποιείται σπάνια δεδομένου ότι η σχεδίαση των φίλτρων είναι δυσκολότερη.

Επίσης από την σχέση 3.6:

- θεωρώντας ένα ορισμένο φορτίο στην έξοδο του μετατροπέα DC σε DC, μπορούμε μεταβάλλοντας το  $\delta$  να "δίνουμε" στην ΦΒ γεννήτρια το φορτίο που θα την φέρει στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος.

### 3.5.1.b. Λειτουργία ανύψωσης συνεχούς τάσης

Η δυσκολία ανύψωσης επιπέδου της τάσης σε ένα σύστημα DC αποτελεί βασικό μειονέκτημα και μάλιστα είναι μεταξύ των λόγων επικράτησης των συστημάτων AC στα σημερινά δίκτυα. Σήμερα όμως, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, μας επιτρέπει με την χρήση διακοπτικών μετατροπέων την ανύψωση και στην περίπτωση της DC τάσης, σε σχετικά χαμηλά επίπεδα ισχύος όμως. Η ικανότητα αυτή προκύπτει χρησιμοποιώντας κάποιο στοιχείο αποθήκευσης, όπως ένας πυκνωτής, ένα πηνίο ή μια ομάδα συζευγμένων πηνίων. Μάλιστα στην τελευταία περίπτωση υπάρχει η επιπλέον δυνατότητα ρύθμισης μέσω του λόγου των σπειρών των πηνίων. Στο σχήμα 3.20 φαίνεται η βασική τοπολογία ενός μετατροπέα DC σε DC με δυνατότητα ανύψωσης τάσης.



Σχήμα 3.20 Βασική τοπολογία διακοπτικού μετατροπέα DC σε DC ανύψωσης τάσης με ωμικό φορτίο

Η λειτουργία του μετατροπέα αναλύεται σε δύο διαστήματα λειτουργίας, ήτοι στο πρώτο διάστημα όπου το διακοπτικό στοιχείο S είναι σε αγωγή και στο δεύτερο όπου το διακοπτικό στοιχείο S είναι σε αποκοπή.

*1<sup>ο</sup> διάστημα: Στοιχείο S σε αγωγή*

Στο διάστημα αυτό παρατηρείται ροή ρεύματος από την πηγή, μέσω του πηνίου L και του στοιχείου S. Η υπόψη ροή ρεύματος, συνεπάγεται την μεταφορά ενέργειας από την πηγή στο πηνίο και την αποθήκευση εκεί με την μορφή μαγνητικού πεδίου. Παράλληλα η δίοδος D είναι ανάστροφα πολωμένη, και ως εκ τούτου το φορτίο είναι αποκομμένο από το κύκλωμα σε αγωγή.

*2<sup>ο</sup> διάστημα: Στοιχείο S σε αποκοπή*

Στο διάστημα αυτό αποκόπτεται η ροή ρεύματος δια του στοιχείου S. Έτσι στο φορτίο περνάει η τάση της πηγής προσαυξημένη από την τάση του πηνίου. Έτσι η τάση στο φορτίο αποκτά τιμές μεγαλύτερες από την τάση στην πηγή (ανύψωση).

Η μεταβολή της ενέργειας στο πηνίο, επιβεβαιώνεται από την κυματομορφή του ρεύματος, που το διαρέει. Η εξίσωση 3.7, χαρακτηρίζεται ως η τερματική σχέση του πηνίου, σύμφωνα με την οποία η

τάση στα άκρα του είναι ανάλογη με την μεταβολή του ρεύματος που το διαρρέει στον χρόνο. Έτσι στην πρώτη φάση, στα άκρα του πηνίου εφαρμόζεται η τάση της πηγής, θεωρώντας το διακοπτικό στοιχείο ιδανικό και άρα με μηδενική τάση στα άκρα του, σε κατάσταση αγωγής. Οπότε το ρεύμα αυξάνει γραμμικά με τον χρόνο και άρα αυξάνει και η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο. Η κατάσταση αυτή περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.8 – 3.9.

$$U_L = L \frac{di}{dt} \quad (3.7)$$

$$\Delta I = \frac{U_L}{L} t_{ON} \quad (3.8)$$

$$i_L(t) = \frac{U_L}{L} t + I_1 \quad (3.9)$$

όπου  $I_1$  το ρεύμα στην μόνιμη κατάσταση

Αντίστοιχα στην δεύτερη φάση, η τάση στα άκρα του πηνίου είναι η διαφορά ανάμεσα στην πηγή και το φορτίο. Θεωρώντας σταθερή την τάση και στο φορτίο, κάτι που ισχύει με την σύνδεση ενός πυκνωτή στην έξοδο, η αναμενόμενη μεταβολή του ρεύματος πάλι θα είναι γραμμική αλλά φθίνουσα, γεγονός που αναδεικνύει την μείωση της ενέργειας στο πηνίο. Η κατάσταση αυτή περιγράφεται από τις εξισώσεις 3.10 – 3.11. Επιπλέον οι κυματομορφές των ρευμάτων φαίνονται στο σχήμα 3.21.

$$U_L = E + L \frac{di}{dt} \quad (3.10)$$

$$i_L(t) = \frac{U_L - E}{L} t + I_2 \quad (3.11)$$

όπου  $I_2$  το ρεύμα στην μόνιμη κατάσταση

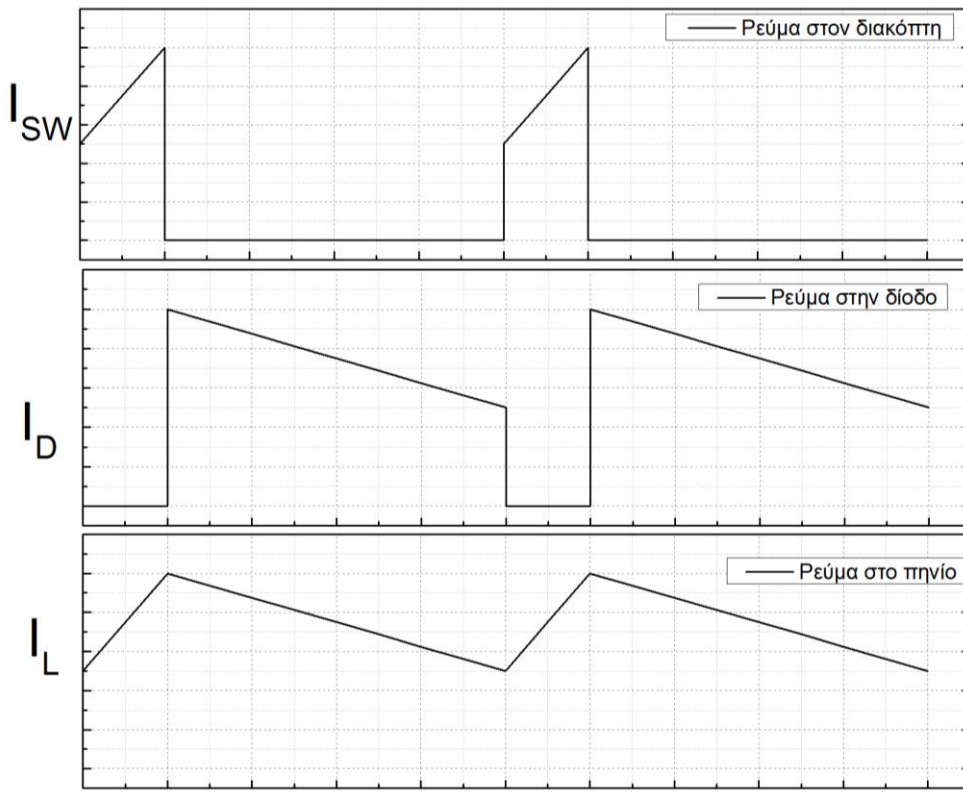
Έτσι η μέση τιμή της τάσης στην έξοδο, δίνεται από την εξίσωση 3.12, όπου λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι  $0 \leq \delta \leq 1$ , αποδεικνύεται ότι η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου.

$$U_L = E + L \frac{\Delta I}{t_{OFF}} = E \frac{1}{1 - \delta} \quad (3.12)$$

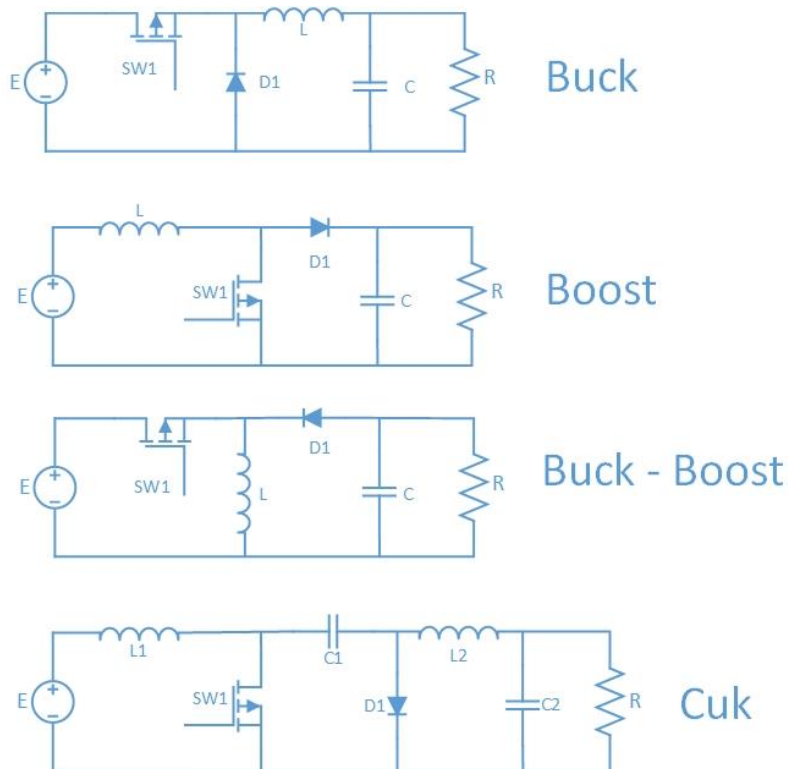
### 3.5.1.c. Πραγματικές τοπολογίες μετατροπών DC σε DC

Βλέποντας την έξοδο των παραπάνω δυο τοπολογιών, εύκολα διαπιστώνεται ότι η μορφή της παραγόμενης τάσης διαφέρει σημαντικά από την μορφή αναφοράς και ως εκ τούτου η ποιότητα αυτής είναι χαμηλή. Έτσι στις παραπάνω τοπολογίες συμπεριλαμβάνονται επιπλέον στοιχεία όπως

πηνία και πυκνωτες αλλά και άλλα ημιαγωγικά όπως δίοδοι, ώστε να βελτιωθεί η λειτουργία και η αποτελεσματικότητα των μετατροπέων. Στο σχήμα 3.22, φαίνονται οι μετατροπείς τύπου buck, boost, buck - boost και Cuk.



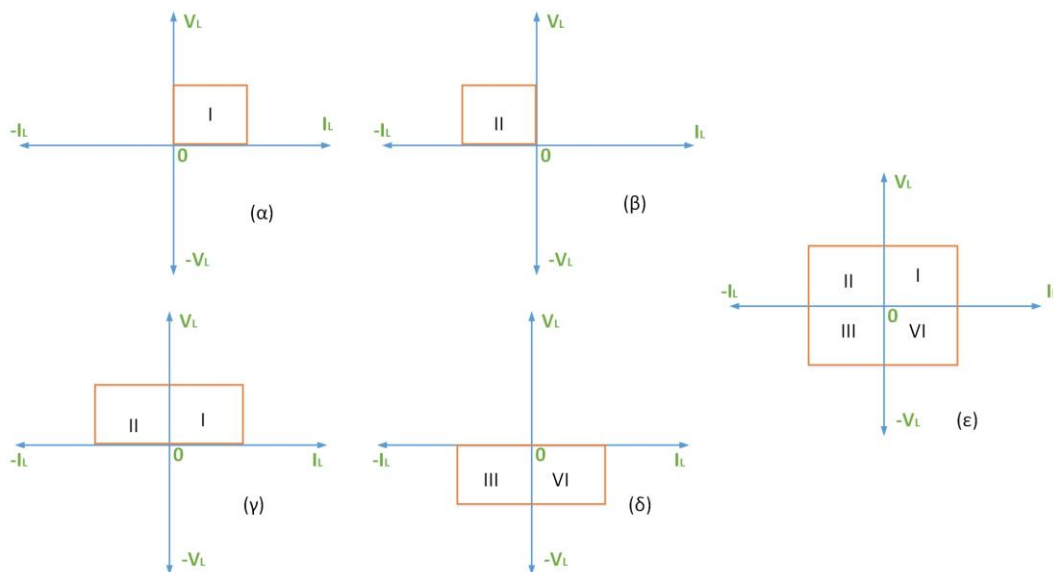
Σχήμα 3.21 Βασικές κυματομορφές ρευμάτων σε διακοπτικό μετατροπέα DC σε DC ανύψωσης τάσης με ωμικό φορτίο



Σχήμα 3.22 Πραγματικές τοπολογίες DC/DC μετατροπέων

Επιπλέον η πολυπλοκότητα των μετατροπών αυξάνει συμπεριλαμβάνοντας συζευγμένα πηνία ή περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία ώστε να είναι δυνατή, παράλληλα με την μεταβολή του εύρους και η μεταβολή του προσήμου της τάσης ή του ρεύματος. Έτσι οι μετατροπές διακρίνονται σε 5 κατηγορίες, θεωρώντας ότι οι τιμές ρεύματος και τάσης στο φορτίο, διατάσσονται σε ένα επίπεδο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.23. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

1. Μετατροπές πρώτου τεταρτημορίου
2. Μετατροπές δευτέρου τεταρτημορίου
3. Μετατροπές πρώτου και δευτέρου τεταρτημορίου
4. Μετατροπές τρίτου και τετάρτου τεταρτημορίου
5. Μετατροπές τεσσάρων τεταρτημορίων

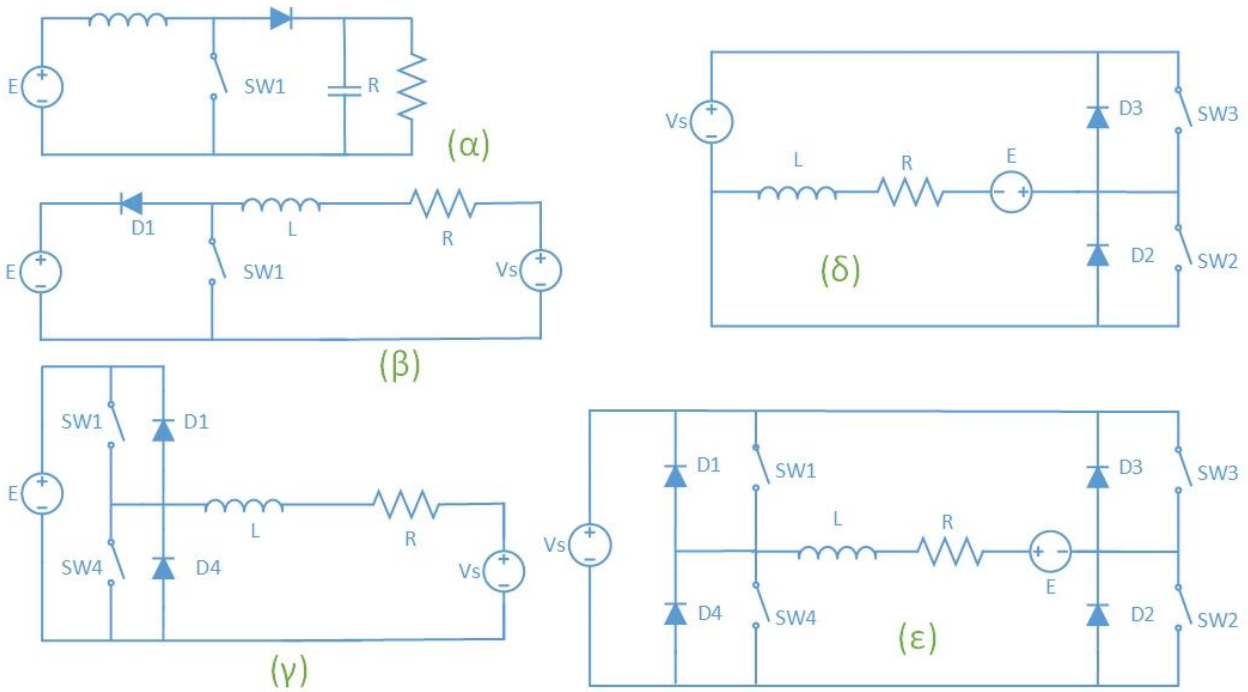


Σχήμα 3.23 Τεταρτημόρια λειτουργίας μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος

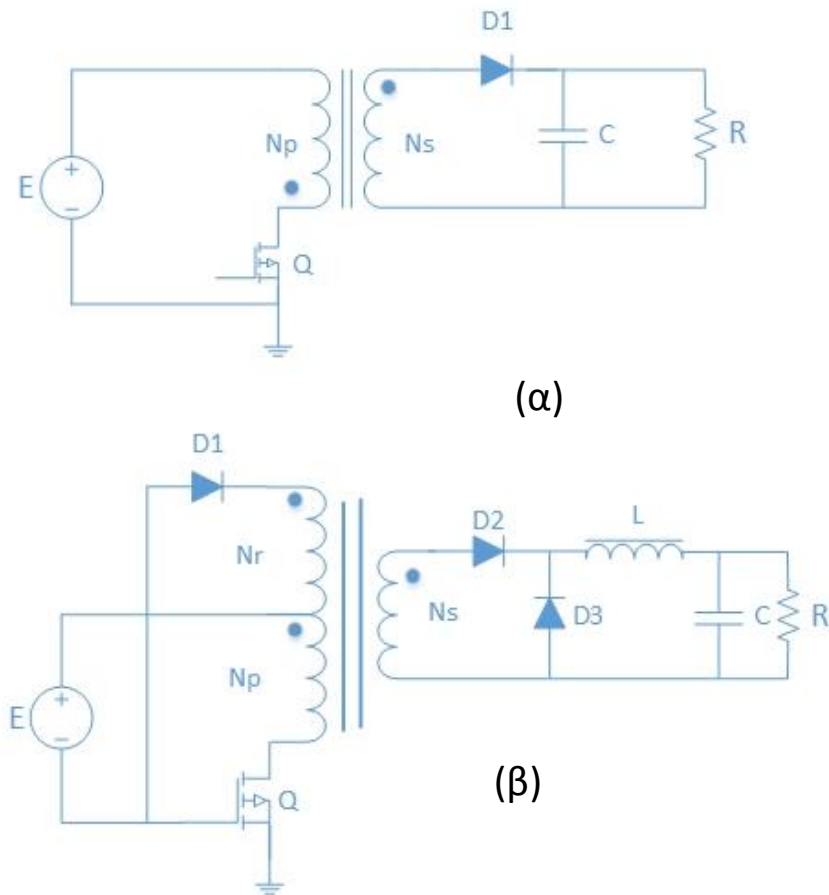
Τυπικές τοπολογίες για τους παραπάνω μετατροπές φαίνονται στο σχήμα 3.24. Επίσης στο σχήμα 3.25 φαίνονται οι μετατροπές τύπου forward και flyback, στους οποίους επιπλέον περιλαμβάνονται συζευγμένα πηνία, τα οποία χαρακτηρίζονται ως μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας. Έτσι εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες του μαγνητικού στοιχείου, επιτυγχάνονται τα παραπάνω και επιπλέον προσφέρεται και απομόνωση.

### 3.4.2. Μετατροπή DC σε AC

Η μετατροπή DC σε AC υλοποιείται από μετατροπές ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται αντιστροφείς (Inverters). Η βασική δομή και λειτουργία ενός αντιστροφέα μπορεί να μελετηθεί χρησιμοποιώντας μια από τις τοπολογίες του σχήματος 3.26, δηλαδή την τοπολογία ημιγέφυρας και γέφυρας. Στην πρώτη περίπτωση, συνδέεται στην πηγή ένας χωρητικός κλάδος (εν σειρά σύνδεση δύο πυκνωτών) και ένας κλάδος με δύο διακοπτικά στοιχεία. Έτσι από το μέσο του κάθε κλάδου δημιουργείται ένας ακροδέκτης, ήτοι δύο, οι οποίοι αποτελούν και τους ακροδέκτες στην έξοδο του αντιστροφέα και στους οποίους συνδέεται το φορτίο AC. Ο χωρητικός κλάδος λειτουργεί ως χωρητικός καταμεριστής και άρα διαιρεί την τάση  $E$  δια δύο. Επιπλέον, παράλληλα σε κάθε διακοπτικό στοιχείο συνδέεται μια δίοδος (στην περίπτωση των MOSFET υπάρχει ήδη από την κατασκευή του στοιχείου), δεδομένου ότι ανάλογα με το φορτίο, αναμένεται να υπάρχει διαφορά φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα εξόδου.

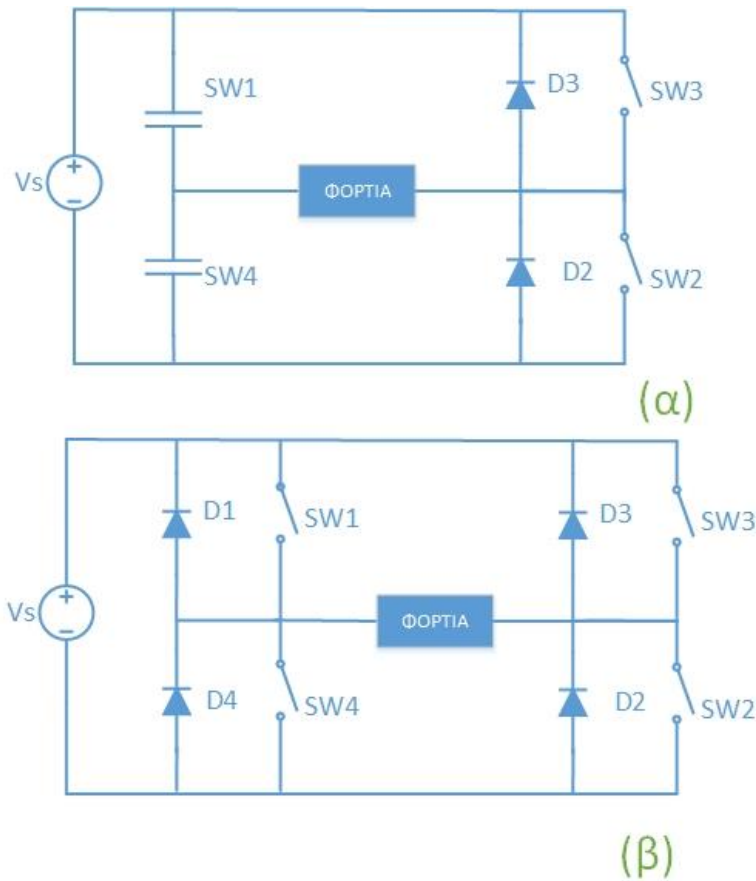


Σχήμα 3.24 Διακοπτικό μετατροπέας (α) 1<sup>ο</sup> τεταρτημορίου, (β) 2<sup>ο</sup> τεταρτημορίου (γ) 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> τεταρτημορίου (δ) 3<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> τεταρτημορίου και (ε) τεσσάρων τεταρτημορίων



Σχήμα 3.25 Μετατροπείς τύπου (α) forward και (β) flyback





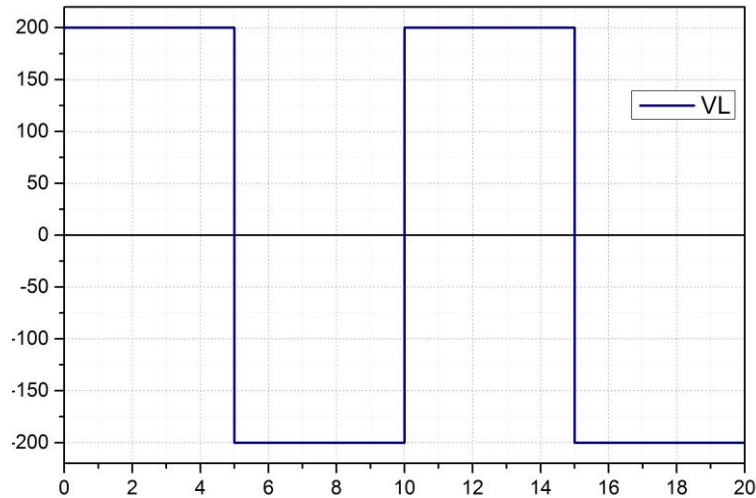
**Σχήμα 3. 26** Βασικές τοπολογίες μονοφασικών αντιστροφών (α) ημιγέφυρας και (β) γέφυρας

Έτσι, όταν το διακοπτικό στοιχείο S1 είναι σε αγωγή τότε το φορτίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή C1, άρα δέχεται τάση E/2, ενώ όταν το S2 είναι σε αγωγή, τότε το φορτίο συνδέεται παράλληλα με τον πυκνωτή C2, αλλά δέχεται τάση -E/2. Έτσι η παραγόμενη τάση, εναλλάσσεται σε πρόσημο και έχει εύρος E/2. Για την λειτουργία αυτή, η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο δίνεται από την εξίσωση 3.13.

$$\begin{aligned}
 U_L &= \left( \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{E}{2} \right)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \\
 U_L &= \left( \frac{1}{T} \left( \int_0^{\frac{T}{2}} \left( \frac{E}{2} \right)^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^T \left( -\frac{E}{2} \right)^2 dt \right) \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \\
 U_L &= \left( \frac{2}{T} \left( \int_0^{T/2} (E/2)^2 dt \right) \right)^{1/2} = \frac{E}{2} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

Η κυματομορφή της τάσης στο φορτίου φαίνεται στο σχήμα 3.27, όπου εύκολα διαπιστώνεται ότι η τάση αυτή είναι τετραγωνικής μορφής και διαφέρει από την επιθυμητή ημιτονική μορφή. Ως εκ τούτου η παραγόμενη τάση αναλύεται με την ανάλυση Fourier σε μια βασική αρμονική, συχνότητας  $f=1/T$  με την εξίσωση 3.14. Αντίστοιχη ανάλυση μπορεί να γίνει και για το ρεύμα, όπου όμως πρέπει

να ληφθεί υπόψη και το φορτίο. Θεωρώντας για παράδειγμα ένα ωμικό - επαγωγικό φορτίο, το ρεύμα φορτίου δίνεται από την εξίσωση 3.15.



Σχήμα 3.27 Κυματομορφή της τάσης σε αντιστροφέα ημιγέφυρας και ωμικό φορτίο (εύρος  $E/2$ )

$$U_L = \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \frac{2E}{n\pi} \sin \omega t \quad (3.14)$$

όπου σημειώνεται ότι για  $n=2,4,6,..$   $U_L=0$ .

$$I_L = \sum_{n=1,3,5,..}^{\infty} \frac{2E}{n\pi (\sqrt{R^2 + (\omega L)^2})} \sin(\omega t - \theta_n) \quad (3.15)$$

όπου σημειώνεται ότι για  $n=2,4,6,..$   $I_L=0$  και  $\theta_n = \tan^{-1}(\omega L/R)$ .

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να είναι σαφές ότι ενεργό ισχύ στο φορτίο παρέχουν μόνο η βασική αρμονική της τάσης και του ρεύματος. Οι υπόλοιπες συνιστώσες συνεισφέρουν στην άεργο ισχύ. Συγκεκριμένα, στην έξοδο του μετατροπέα καταγράφονται τρεις τύποι ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες στην συνέχεια συνθέτουν την φαινόμενη ισχύ  $S(VA)$ . Η πρώτη είναι η ενεργός  $P(W)$  και προκύπτει από τις συνιστώσες ρεύματος και τάσης στην βασική συχνότητα, σύμφωνα με την εξίσωση 3.16. Οι άλλες δύο αφορούν την άεργο ισχύ στην βασική συχνότητα  $Q(VAr)$ , η οποία δίνεται στην εξίσωση 3.17 και την άεργο ισχύ λόγω της παρουσίας αρμονικών  $D(VAr)$ , η οποία δίνεται στην εξίσωση 3.18. Σημειώνεται ότι η φαινόμενη ισχύς δίνεται από το γινόμενο των ενεργών τιμών ρεύματος και τάσης, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν με όργανα TRUE RMS, τα οποία συμπεριλαμβάνουν στην μέτρηση το σύνολο των αρμονικών.

$$P = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.16)$$

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (3.17)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (3.18)$$

όπου

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (3.19)$$

Έτσι ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- ❑ Συνολικός συντελεστής ισχύος ( $PF_{tot}$ ):

$$PF_{tot} = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1}{V_{RMS} I_{RMS}} \cos \varphi_1 \quad (3.20)$$

- ❑ Συντελεστής ισχύος μετατόπισης (DPF):

$$DPF = \cos \varphi_1 \quad (3.21)$$

- ❑ Συντελεστής ισχύος παραμόρφωσης (TPF):

$$TPF = \frac{V_1 I_1}{V_{RMS} I_{RMS}} \quad (3.22)$$

Έτσι ισχύει:

$$PF_{tot} = DPF \cdot TPF \quad (3.23)$$

Επιπλέον, όσον αφορά την τάση και το ρεύμα ορίζονται οι παρακάτω συντελεστές:

- ❑ Συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD):

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h}}{V_1} \quad (3.24)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h}}{I_1} \quad (3.24)$$

Στον μετατροπέα πλήρους γέφυρας, ο χωρητικός καταμεριστής αντικαθίσταται από ένα κλάδο με δύο επιπλέον ημιαγωγικά στοιχεία, δημιουργώντας ένα σύνολο τεσσάρων στοιχείων, τα οποία λειτουργούν ανά ζεύγη, (1-2, 3- 4 στο σχήμα 3.26). Έτσι η μέγιστη τιμή της τάσης στην έξοδο είναι διπλάσια ( $E$ ), η κυματομορφή της τάσης δίνεται από την σχέση 3.25, ενώ η ενεργός τιμή δίνεται από την σχέση 3.26.

$$U_L = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} \sin \omega t \quad (3.25)$$

όπου σημειώνεται ότι για  $n=2,4,6,\dots$   $U_L=0$ .

$$U_L = \left( \frac{2}{T} \left( \int_0^{T/2} (E)^2 dt \right) \right)^{1/2} = E \quad (3.26)$$

Η εξέλιξη των αντιστροφέν περεταίρω, αφορά τον τρόπο ελέγχου των διακοπτικών στοιχείων. Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Μονοπαλμική διαμόρφωση του εύρους παλμού (σχήμα 3.28)
- Πολυπαλμική διαμόρφωση του εύρους παλμού (σχήμα 3.29)
- Ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμού (σχήμα 3.30)
- Τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμού (σχήμα 3.31)
- Τραπεζοειδής διαμόρφωση (σχήμα 3.32)
- Κλιμακωτή διαμόρφωση (σχήμα 3.33)
- Βηματική διαμόρφωση (σχήμα 3.34)
- Έγχυσης αρμονικών (σχήμα 3.35)
- Διαμόρφωση δέλτα (σχήμα 3.36)

### 3.4.3. Τοπολογίες μετατροπέν DC σε AC

Η πρώτη βασική διάκριση των τοπολογιών αντιστροφέν αφορά τον τύπο της πηγής που τροφοδοτεί τον αντιστροφέα. Διακρίνονται έτσι σε:

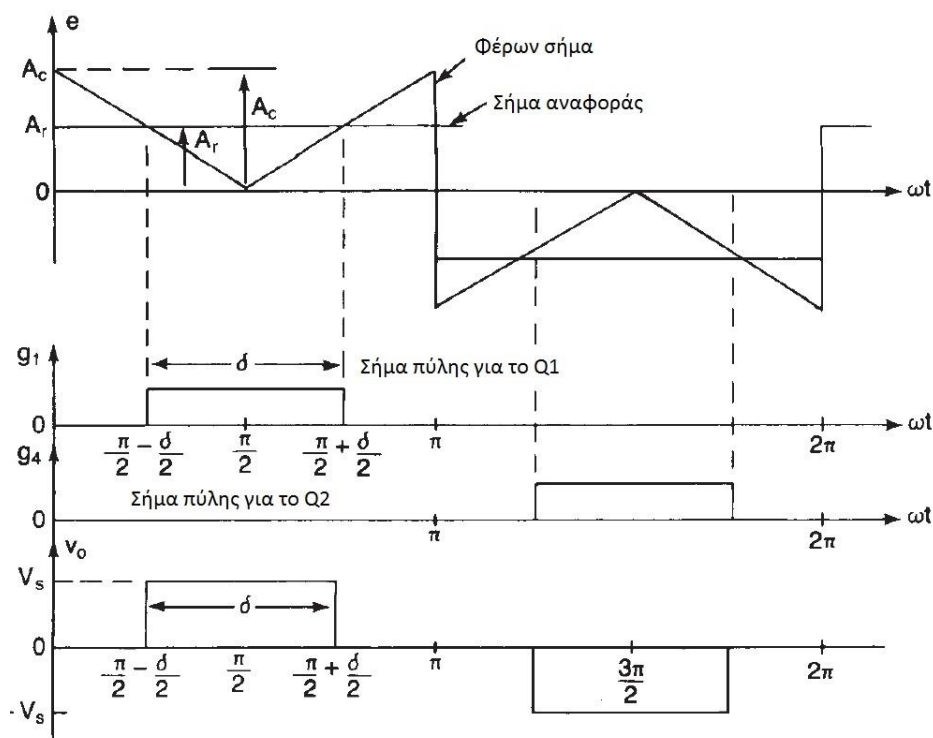
- Αντιστροφείς πηγής τάσης, όταν τροφοδοτούνται από πηγή τάσης και
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος αντίστοιχα

Διακρίνονται με βάση την λειτουργία τους σε αντιστροφείς:

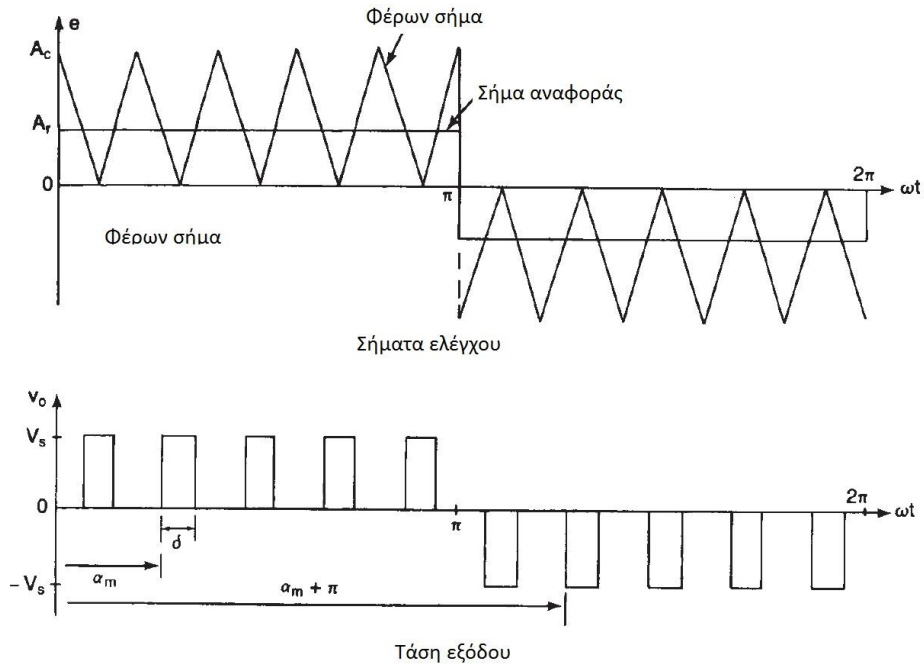
- οδηγούμενους από το δίκτυο (line commutated)
- οδηγούμενους από το δίκτυο (self commutated)

Με βάση την τοπολογία, διακρίνονται σε αντιστροφείς:

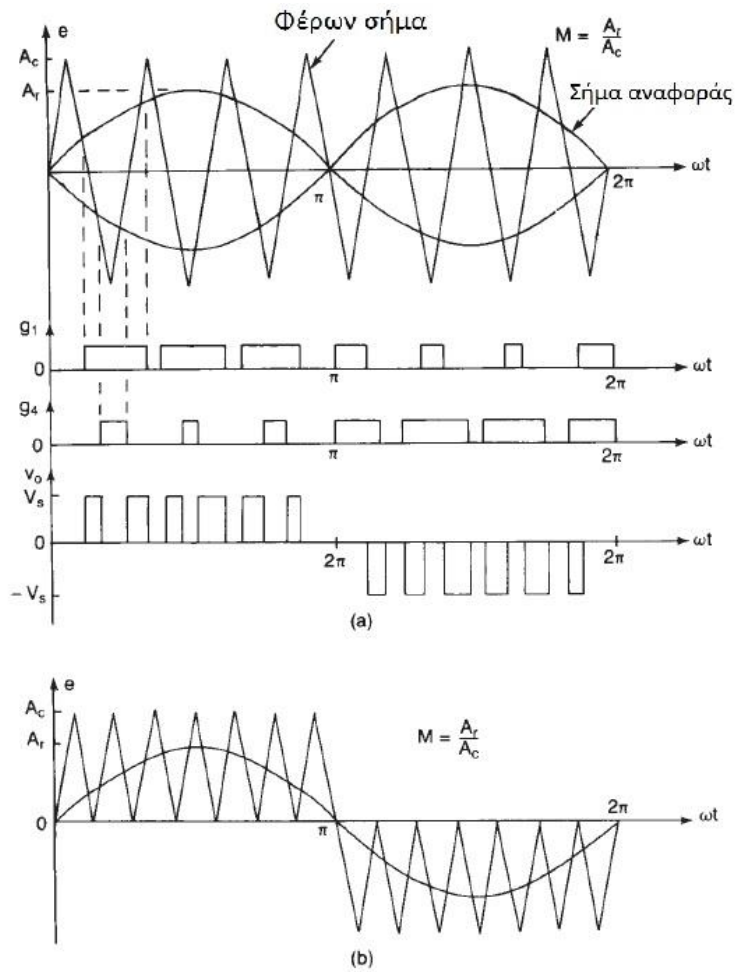
- Χωρίς απομόνωση
- Με μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας
- Με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας
- Πολυεπίπεδους



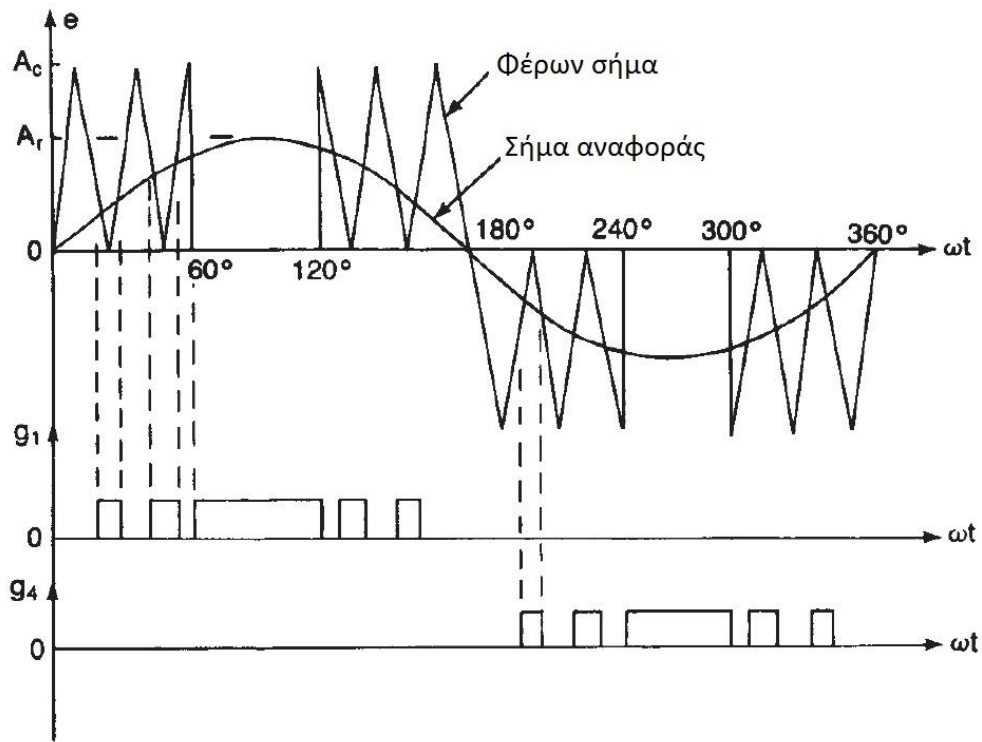
Σχήμα 3. 28 Μονοπαλμική διαμόρφωση του εύρους παλμού



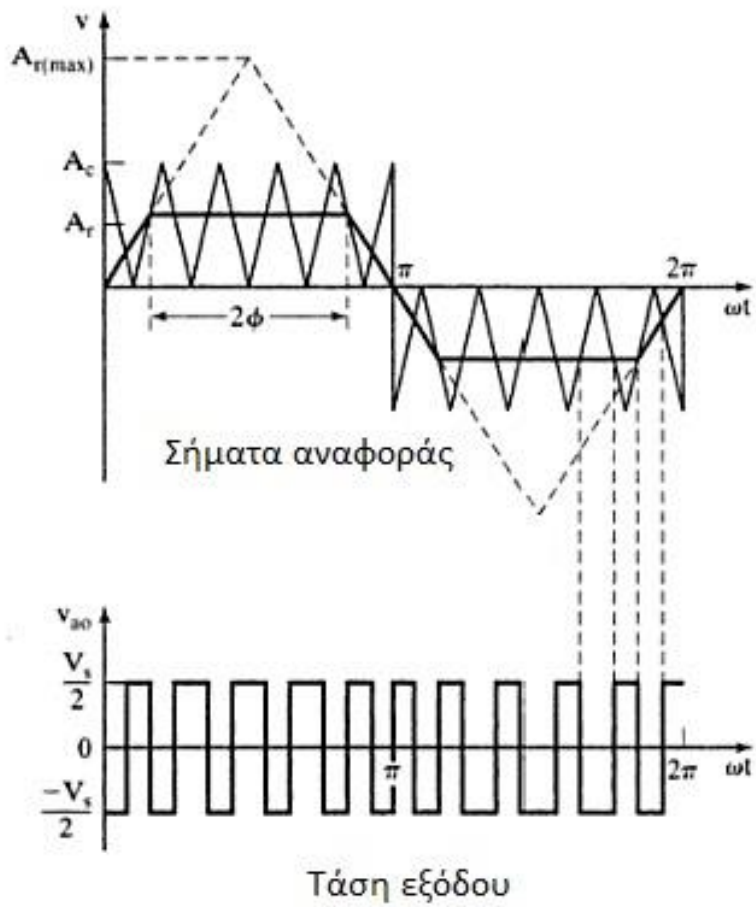
Σχήμα 3.29 Πολυπαλμική διαμόρφωση του εύρους παλμού



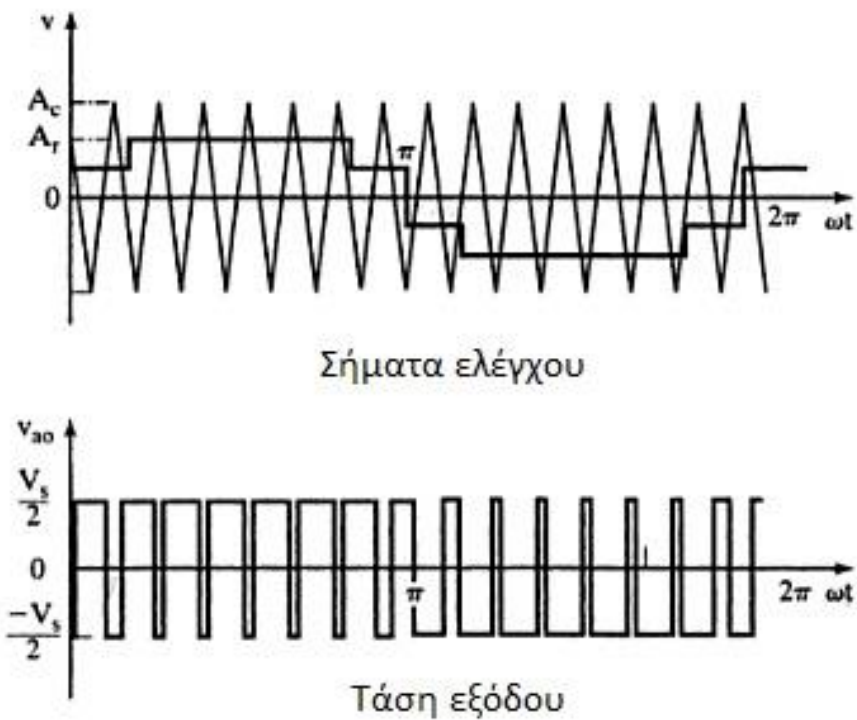
Σχήμα 3.30 Ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμού



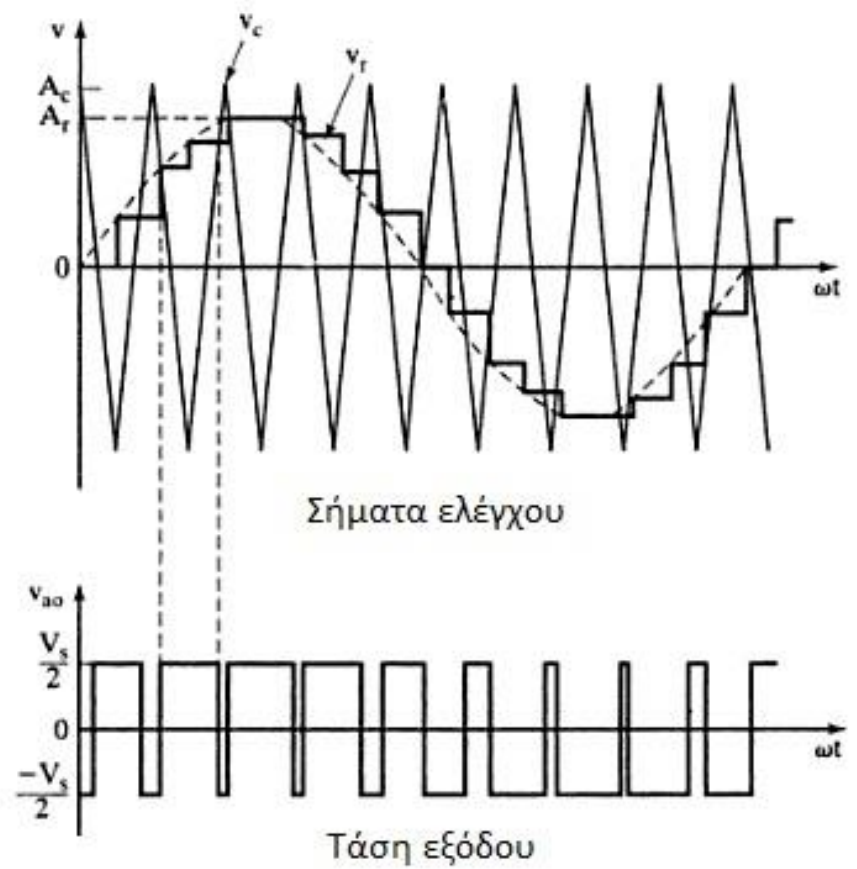
Σχήμα 3.31 Τροποποιημένη ημιτονοειδής διαμόρφωση του εύρους παλμού



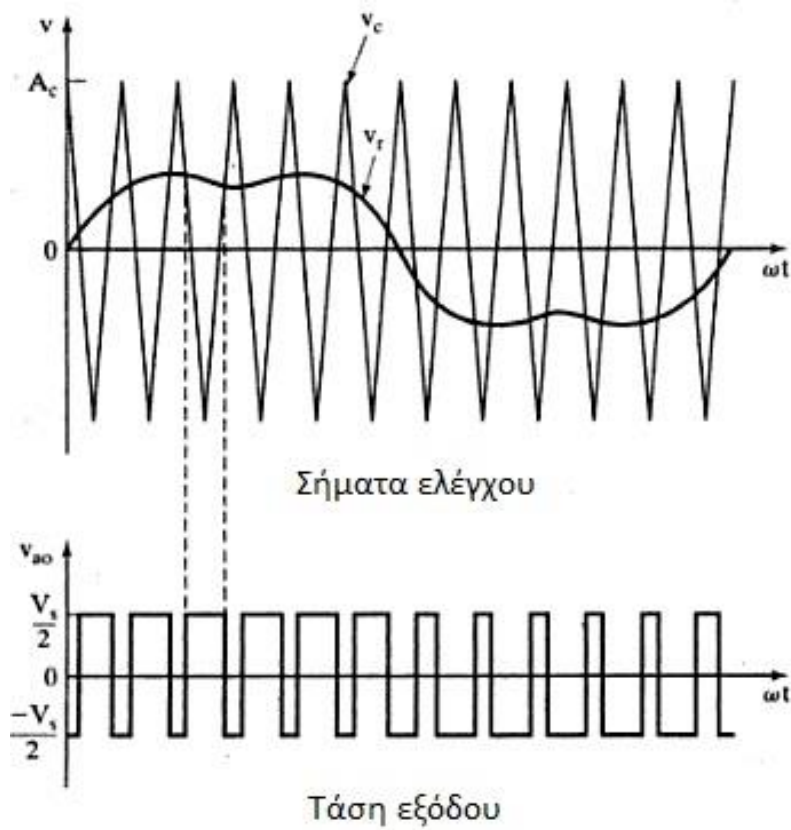
Σχήμα 3.32 Τραπεζοειδής διαμόρφωση



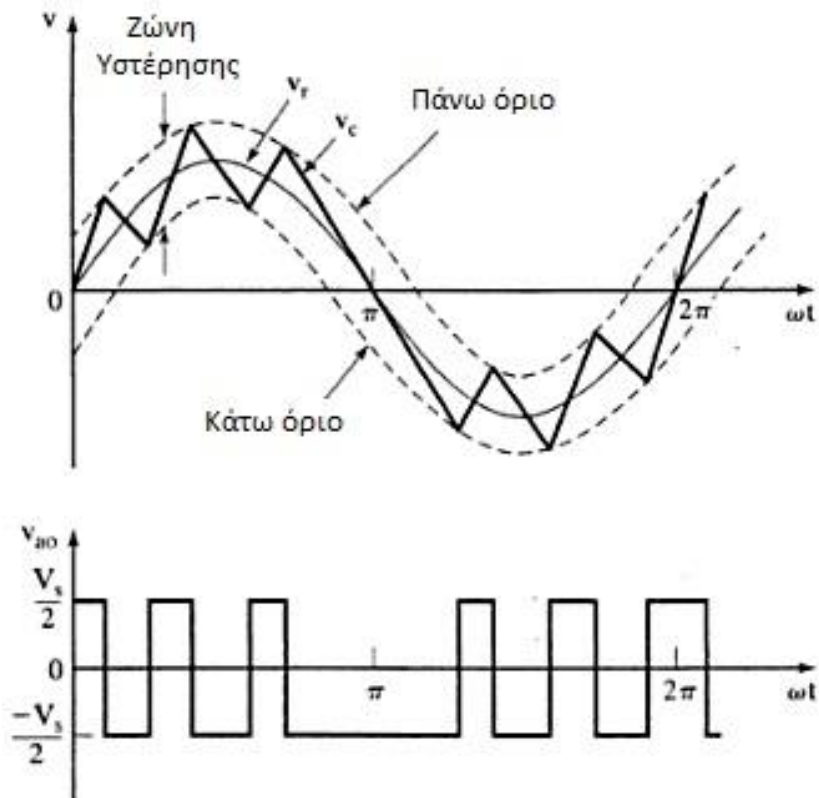
Σχήμα 3.33 Κλιμακωτή διαμόρφωση



Σχήμα 3.34 Βηματική διαμόρφωση



Σχήμα 3.35 Έγχυσης αρμονικών



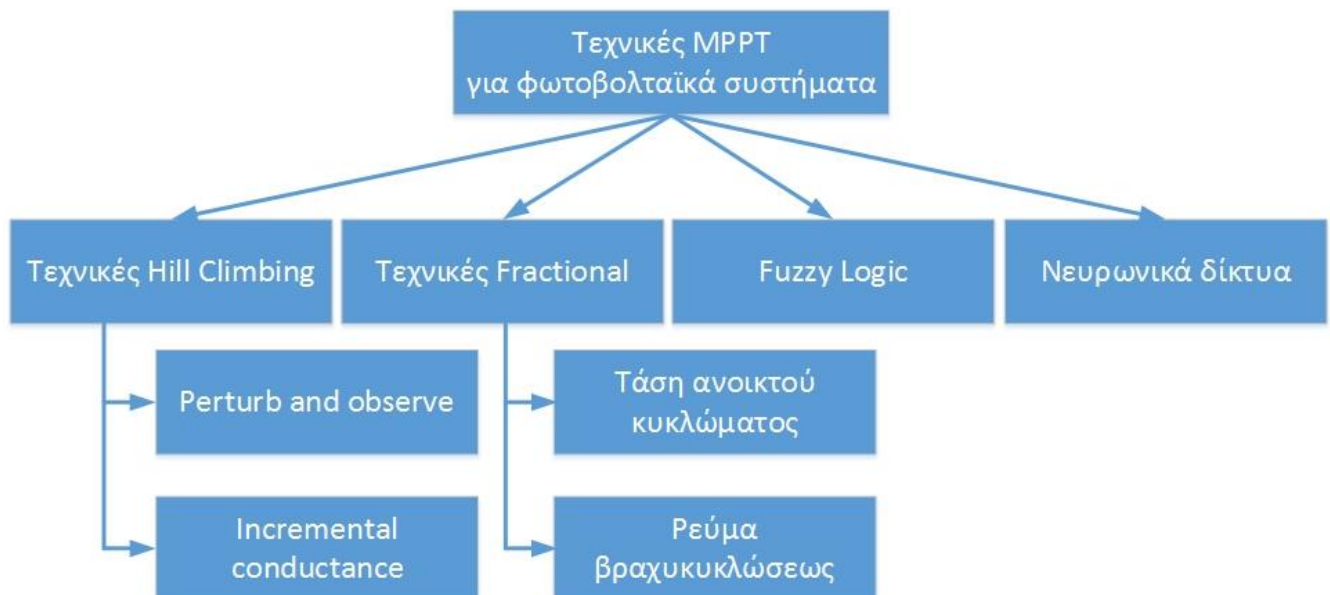
Σχήμα 3.36 Διαμόρφωση δέλτα



### 3.5 Λειτουργίες MPPT και Anti- Islanding

#### 3.5.1. Εύρεση σημείου μεγίστης παραγωγής

Η λειτουργία της συστοιχίας στο σημείο μεγίστης παραγωγής ισχύος εξασφαλίζει την βέλτιστη δυνατή εκμετάλλευση του εγκατεστημένου εξοπλισμού και είναι ως εκ τούτου αναγκαία. Η επίτευξη της λειτουργίας αυτής προκύπτει με έλεγχο του φορτίου που "βλέπει" η ΦΒ γεννήτρια. Έτσι, δεδομένου ότι το μέγεθος του πραγματικού φορτίου εξαρτάται από διαφορετικούς παράγοντες από ότι η θέση του σημείου μεγίστης ισχύος, είναι απαραίτητη η εμπλοκή στο σύστημα ενός στοιχείου διασύνδεσης - προσαρμογής, ώστε ανεξάρτητα από το πραγματικό φορτίο, η ΦΒ γεννήτρια να βλέπει κάθε φορά το φορτίο που αντιστοιχεί στο σημείο μεγίστης ισχύος. Τον ρόλο αυτό μπορεί να αναλάβει τόσο ένας μετατροπέας DC σε DC (εξίσωση 3.6) όσο και ένας μετατροπέας DC σε AC, με συνηθέστερη επιλογή την πρώτη. Συνεπώς το πρόβλημα που τίθεται είναι ο τρόπος ελέγχου του μετατροπέα, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία. Για την εύρεση του σημείου μεγίστης ισχύος, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, οι σημαντικότερες εκ των οποίων καταγράφονται στο σχήμα 3.37.

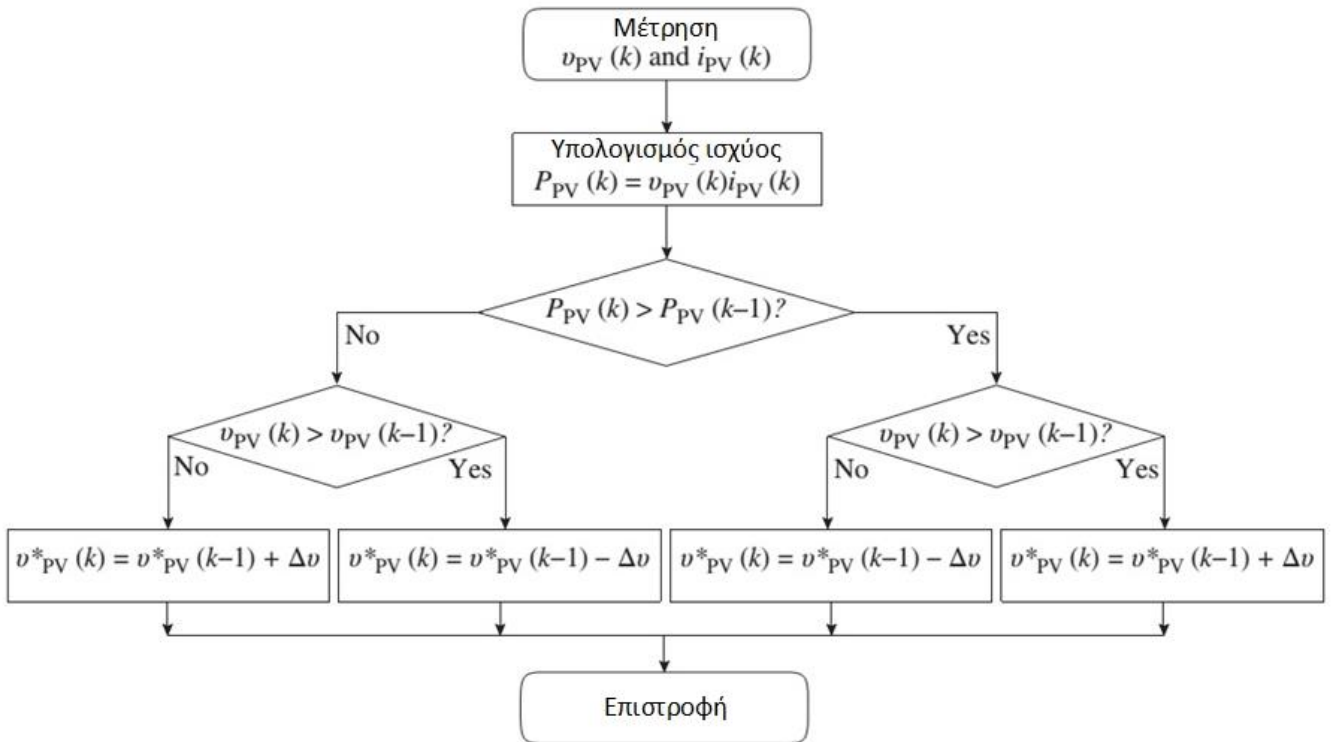


**Σχήμα 3.37** Τεχνικές εύρεσης του σημείου μεγίστης παραγωγής ισχύος

Μεταξύ αυτών οι αλγόριθμοι PAO (Perturb and Observe), ICT (Incremental Conductance Technique) και Τάσης (ή Ρεύματος) Αναφοράς είναι οι πιο γνωστοί.

##### 3.5.1.a. Αλγόριθμος PAO

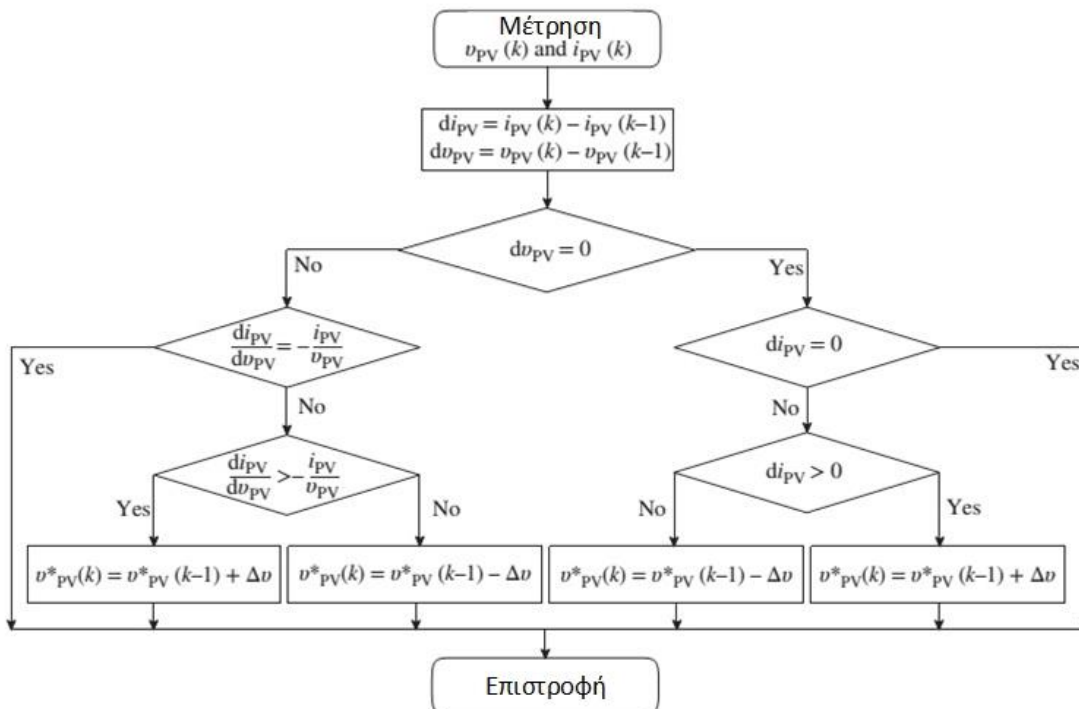
Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας μεταβάλλει το φορτίο της γεννήτριας, σε περιοδικά διαστήματα και συγκρίνει την παραγωγή πριν και μετά. Ανάλογα με την μεταβολή και το αποτέλεσμα που προκαλεί, αύξηση ή μείωση της παραγόμενης ισχύος, κρίνεται η περαιτέρω εξέλιξη, μέχρι να ευρεθεί το σημείο μεγίστης ισχύος. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο γράφημα του σχήματος 3.38.



Σχήμα 3.38 Διάγραμμα ροής για την υλοποίηση του αλγόριθμου ΡΑΟ εντοπισμού του σημείου ΜΡΡΤ

3.5.1.b. ICT (Incremental Conductance Technique)

Στην περίπτωση αυτή το σύστημα υπολογίζει το λόγο του διαφορικού της ισχύος σε σχέση με το διαφορικό της τάσης, ήτοι  $dP/dv$ , ο οποίος γίνεται μηδέν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 3.39.



Σχήμα 3.39 Διάγραμμα ροής για την υλοποίηση του αλγόριθμου ICT εντοπισμού του σημείου ΜΡΡΤ

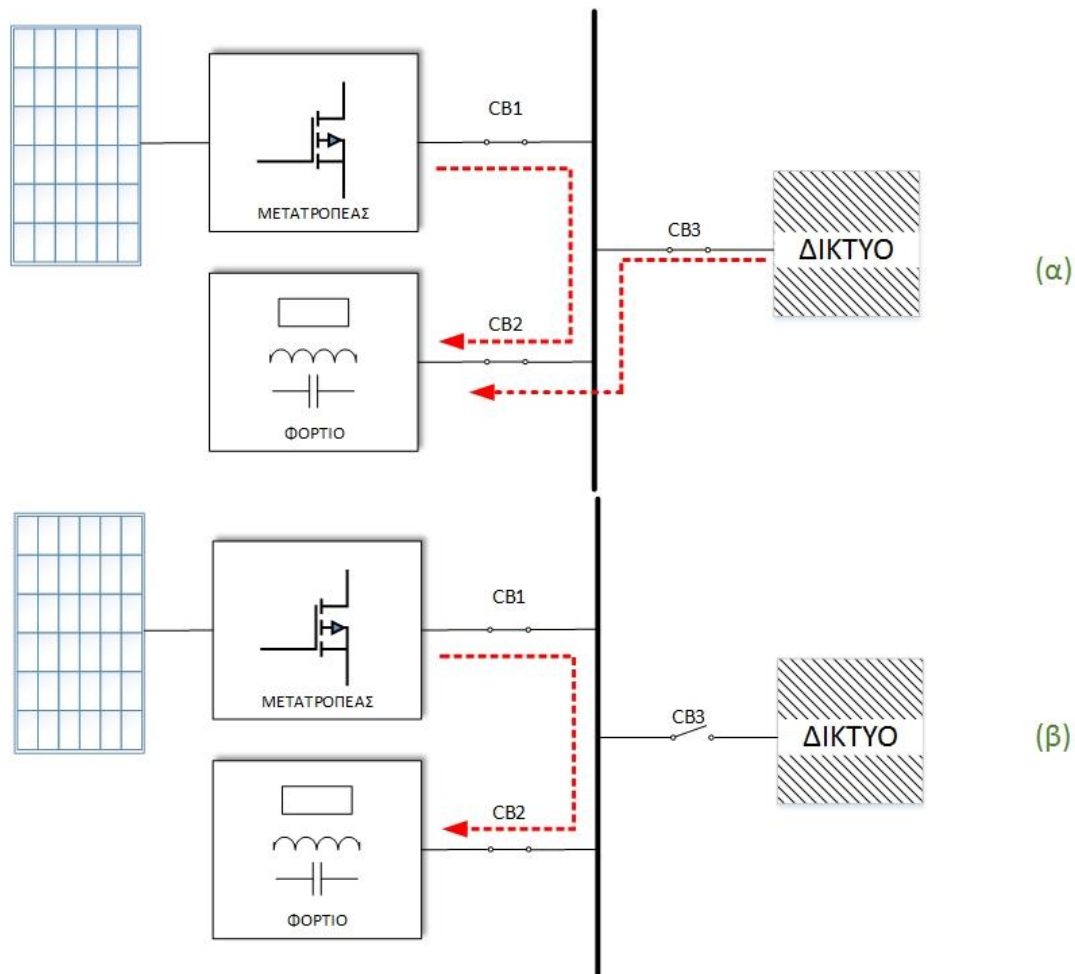
### 3.5.1.c. Τάσης (ή Ρεύματος) Αναφοράς

Στην περίπτωση αυτή, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας εκτιμάται η τάση (ή το ρεύμα) στο σημείο μέγιστης ισχύος και αυτό συγκρίνεται με τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές. Στην συνέχεια το σύστημα κινείται προς την κατεύθυνση απόλειψης της διαφοράς.

### 3.5.2. Λειτουργία νησιδοποίησης

Η κατάσταση της νησιδοποίησης προκύπτει όταν τμήμα του δικτύου, στο οποίο συνδέεται ο ΦΒ σταθμός, αποσυνδέεται από το υπόλοιπο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, αν ο ΦΒ σταθμός παραμένει σε λειτουργία, φορτία γειτονικά συνεχίζουν να τροφοδοτούνται, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.40. Η κατάσταση αυτή είναι επικίνδυνη τόσο για το δίκτυο, π.χ. το προσωπικό του διαχειριστή του δικτύου, τα φορτία που είναι συνδεδεμένα, όσο και για τον ίδιο τον ΦΒ σταθμό, ο οποίος μπορεί να υπερφορτιστεί, αλλά και να βρεθεί εκτός συγχρονισμού κατά την επανασύνδεση του δικτύου. Επιβάλλεται συνεπώς η ανίχνευση της υπόψη κατάστασης και η έγκαιρη αποσύνδεση του ΦΒ σταθμού.

Η διαδικασία αυτή υλοποιείται με κατάλληλους αλγορίθμους εντοπισμού του ενδεχομένου νησιδοποίησης, οι οποίοι παρουσιάζονται στο σχήμα 3.41. Διακρίνουμε τεχνικές όπου ο εντοπισμός είναι εφικτός από την λειτουργία του μετατροπέα, από την το δίκτυο ή από τον διαχειριστή του δικτύου.



**Σχήμα 3.40** Αναπαράσταση της κατάστασης νησιδοποίησης κατά την διασύνδεση ενός ΦΒ συστήματος στο δίκτυο

### 3.5.2.a. Ανίχνευση από τον αντιστροφέα

(α) παθητικές μέθοδοι: βασίζονται στην μέτρηση στοιχείων του δικτύου (τάση, ρεύμα συχνότητα) σε σχέση με στοιχεία αντίστοιχα αναφοράς, Απλές σε υλοποίηση αλλά σχετικά λιγότερο αποτελεσματικές.

(β) Ενεργητικές μέθοδοι: βασίζονται στην εισαγωγή μικρών διαταραχών στο δίκτυο (συνήθως με την μορφή ρεύματος) και παρατήρηση της συμπεριφοράς του δικτύου. Είναι δυσκολότερες σε υλοποίηση σε σχέση με τις παθητικές μεθόδους αλλά περισσότερο αποτελεσματικές.

### 3.5.2.b. Ανίχνευση από το δίκτυο

Βασίζονται στην προσθήκη στο δίκτυο κάποιου στοιχείου που θα προκαλέσει απότομη μεταβολή σε κάποιο από τα χαρακτηριστικά του δικτύου, η οποία μπορεί εύκολα και αξιόπιστα να εντοπισθεί από τον σύστημα επιτήρησης του ΦΒ σταθμού, υποδεικνύοντας την κατάσταση νησιδοποίησης.

### 3.5.2.c. Ανίχνευση από τον διαχειριστή του δικτύου

Στην περίπτωση αυτή ο διαχειριστής του δικτύου αποστέλλει την εντολή διακοπής της σύνδεσης του ΦΒ με σκοπό την αποφυγή νησιδοποίησης.



Σχήμα 3. 41 Τεχνικές εντοπισμού της λειτουργίας νησιδοποίησης

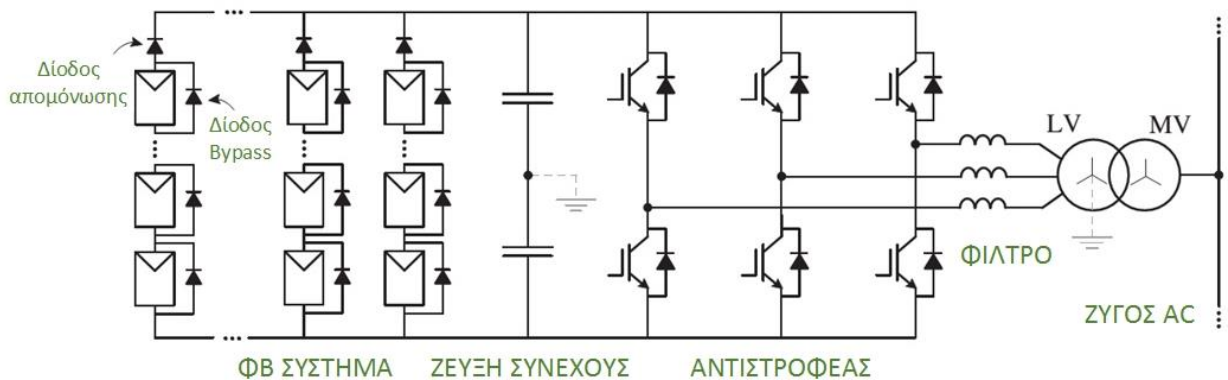
## 3.6 Τοπολογίες διασυνδεδεμένων ΦΒ συστημάτων

### 3.6.1. Λειτουργία με κύριο αντιστροφέα

Στην περίπτωση αυτή (σχήμα 3.13α), στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση λειτουργεί ένας ζυγός DC τάσης, στον οποίο διασυνδέονται οι αλυσίδες των ΦΒ πλαισίων, μέσω μιας διόδου (blocking diode), η οποία είναι απαραίτητη για να αποτρέψει την λειτουργία σκιασμένων αλυσίδων ως φορτίο. Στον υπόψη ζυγό λειτουργεί ένας κεντρικός μετατροπέας, ο οποίος αναλαμβάνει τόσο την λειτουργία MPPT όσο και την διασύνδεση με το δίκτυο, ήτοι μετατροπή DC σε AC, συγχρονισμό, anti islanding κτλ.

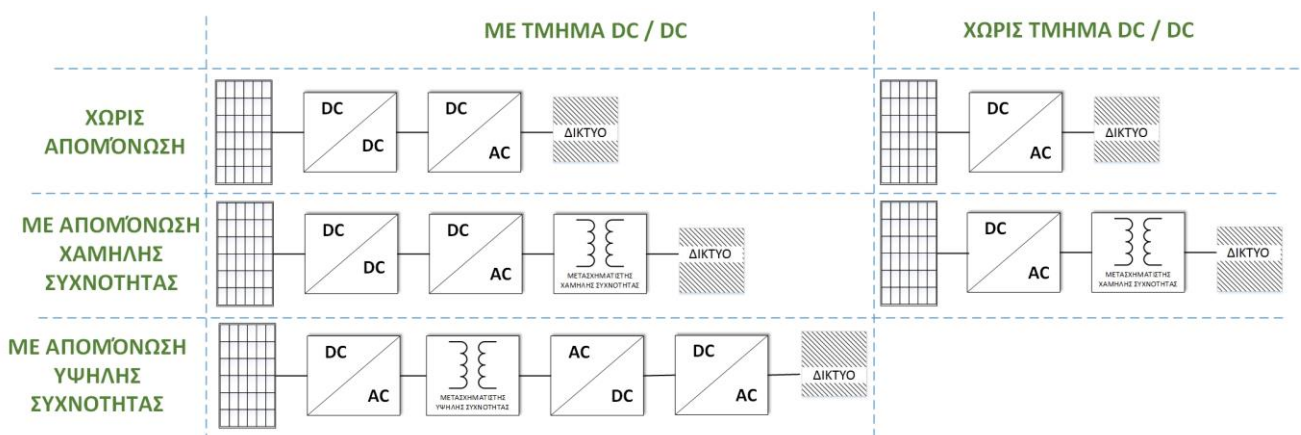
Βασικό πλεονέκτημα της τοπολογίας αυτής είναι η απλή δομή, τόσο όσον αφορά το σύστημα ισχύος όσο και το σύστημα ελέγχου. Παράλληλα όμως η αποτελεσματικότητα της λειτουργίας MPPT είναι περιορισμένη, δεδομένου ότι επιτηρεί μια σχετικά μεγάλη επιφάνεια φωτοβολταϊκών πάνελ, όπου προφανώς η πιθανότητα μερικών σκιάσεων είναι μεγάλη και δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί. Επιπλέον στα αρνητικά καταγράφεται και η ανάγκη διασύνδεσης των αλυσίδων στον ζυγό DC μέσω διόδων, οι οποίες κατά την λειτουργία τους συνεπάγονται απώλειες.

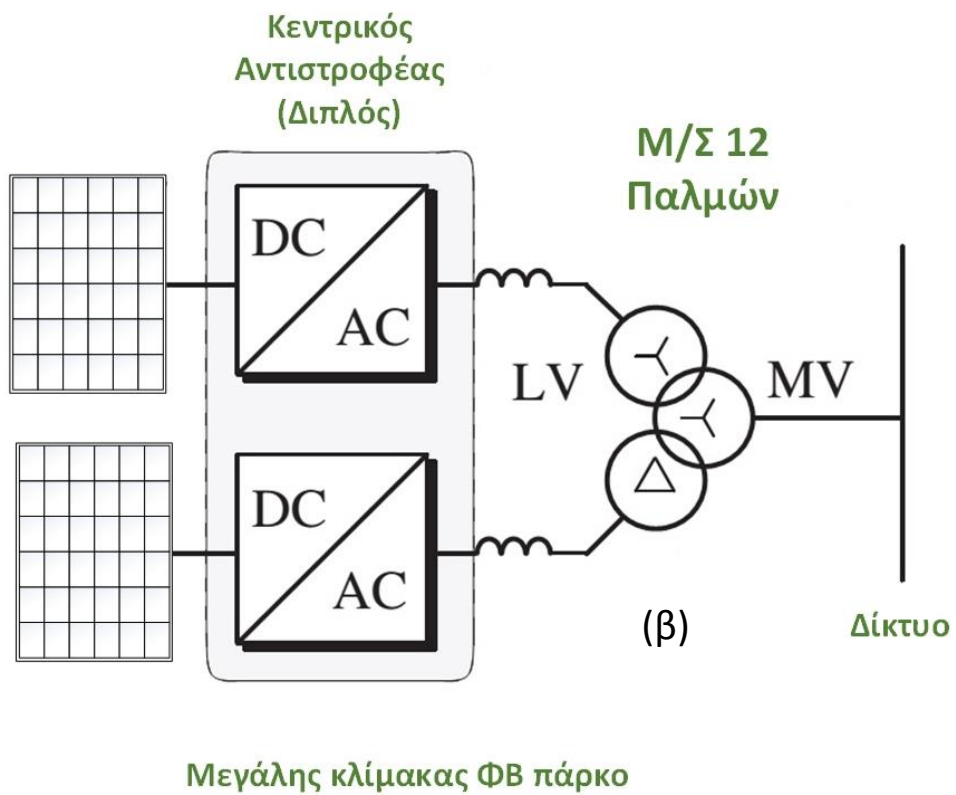
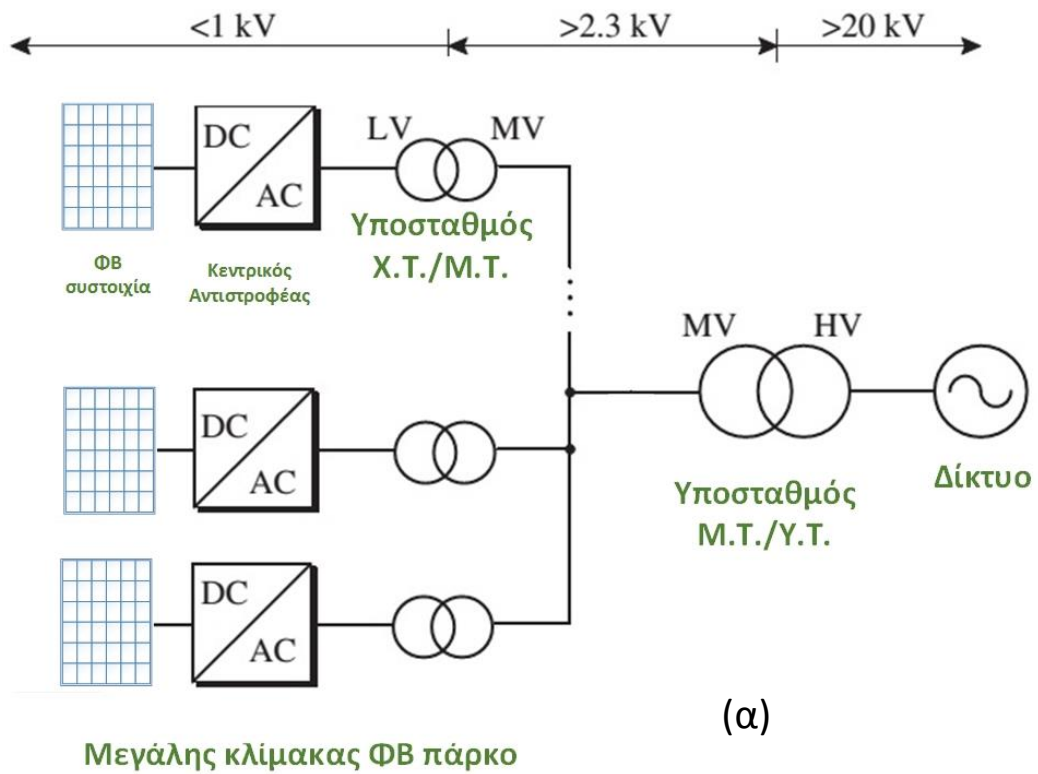
Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, όπου επιπλέον των παραπάνω, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η ανάγκη λειτουργίας μετασχηματιστών ισχύος, για την διασύνδεση με το δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η παραγωγή διοχετεύεται σε έναν μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.42. Περαιτέρω, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μέγιστη τάση μιας αλυσίδας σήμερα δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 1000V και η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς αντιστροφέα είναι 800kW. Έτσι, όσον αφορά την τάση και δεδομένης της έκτασης μιας τέτοιας εγκατάστασης, η υπόψη τοπολογία μπορεί να υλοποιηθεί σε τμήματα της εγκατάστασης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.43(α). Παραδείγματα τέτοιων αντιστροφέων φαίνονται στον **πίνακα 3.2**. Όσον αφορά την ισχύ των αντιστροφέων, προσφέρονται τοπολογίες αντιστροφέων σε παράλληλη λειτουργία με κοινό μετασχηματιστή, περισσότερων των δύο τυλιγμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.43(β). Επιπλέον στην περιοχή αυτή βρίσκεται εφαρμογή και η τεχνολογία των πολυεπίπεδων μετατροπών (σχήμα 3.44).



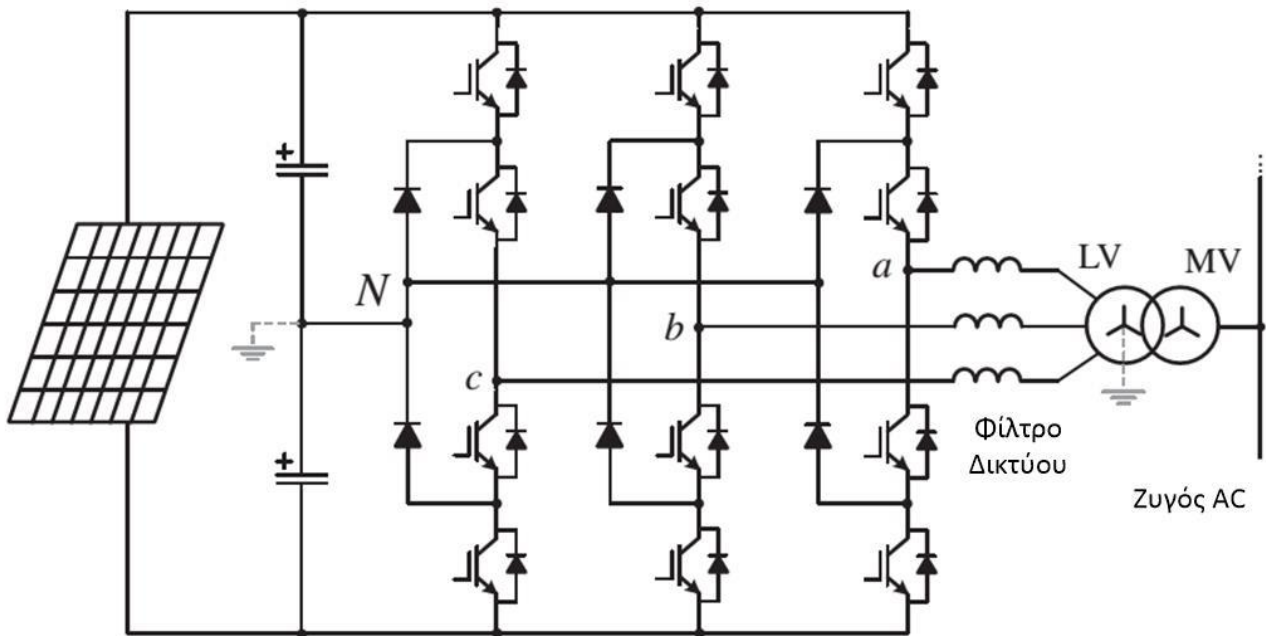
Σχήμα 3. 42 Τοπολογία ΦΒ συστήματος με κεντρικό αντιστροφέα και διασύνδεση στο με μετασχηματιστή

Πίνακας 3.2 Τοπολογίες μετατροπών ΦΒ συστημάτων που χρησιμοποιούνται στην τοπολογία με κύριο αντιστροφέα





**Σχήμα 3.43** (α) μεγάλης κλίμακας ΦΒ εγκατάσταση με κεντρικούς αντιστροφέας ανά τομείς και (β) μεγάλης ισχύος συνδυασμός κεντρικών αντιστροφέων με μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων



**Σχήμα 3.44** Τοπολογία πολυεπίπεδου αντιστροφέα σε ΦΒ σύστημα με τοπολογία με κύριο αντιστροφέα και διασύνδεση στο δίκτυο με μετασχηματιστή

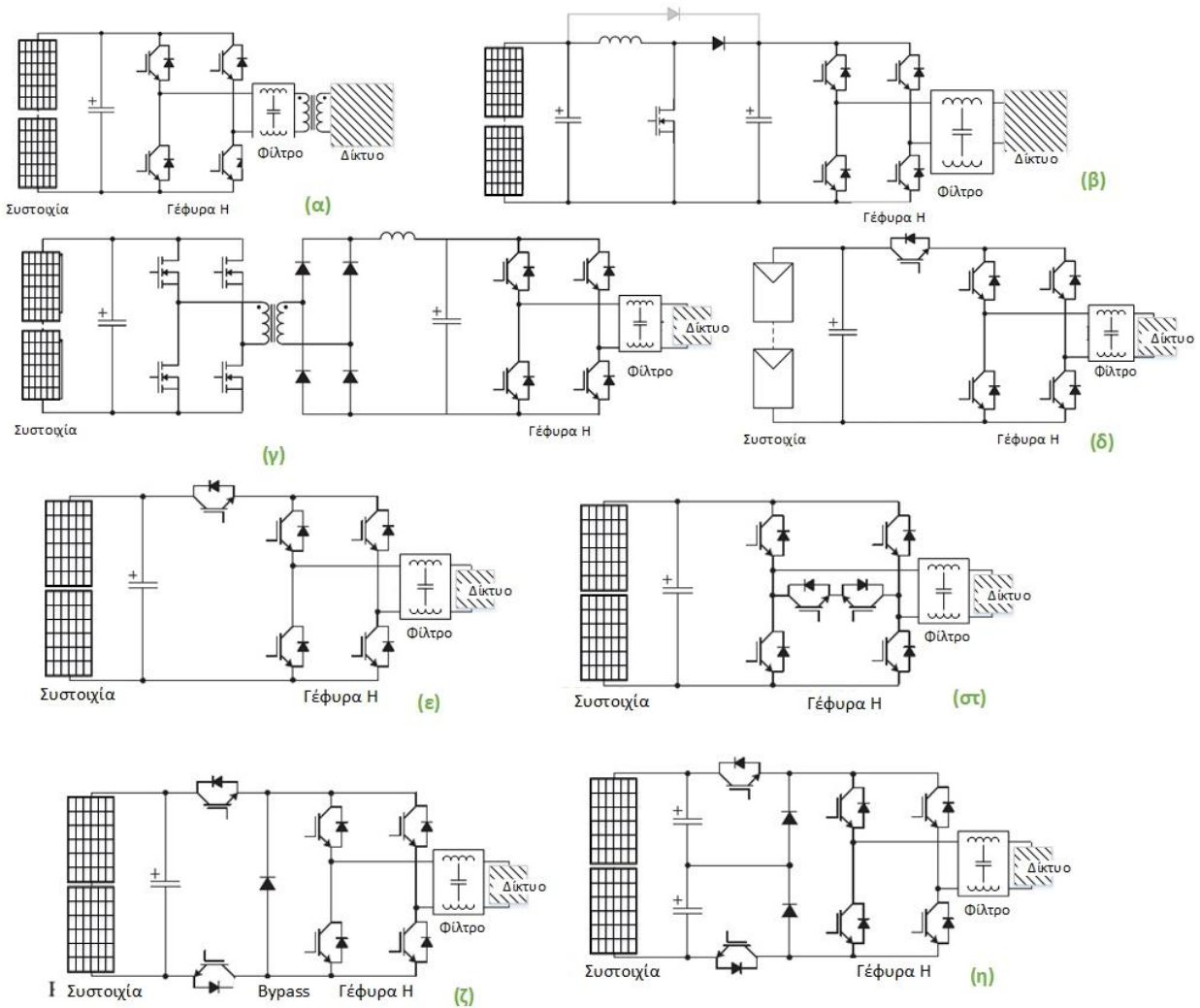
### 3.6.2. Διαμόρφωση αλυσίδας

Στην περίπτωση αυτή, κάθε αλυσίδα διασυνδέεται μέσω ενός μετατροπέα σε έναν κοινό ζυγό AC. Οπότε κάθε μετατροπέας αναλαμβάνει ένα μικρότερο τμήμα της εγκατάστασης και ως εκ τούτου η λειτουργία MPPT είναι αποτελεσματικότερη. Η σύνθεση του μετατροπέα μπορεί να περιλαμβάνει δύο ή και περισσότερους μετατροπείς και σε κάποιες περιπτώσεις μετασχηματιστή, ο οποίος μάλιστα μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλή (βιομηχανική) ή υψηλή συχνότητα. Στο σχήμα 3.45 καταγράφονται οι βασικές τοπολογίες μετατροπέων αυτής της κατηγορίας.

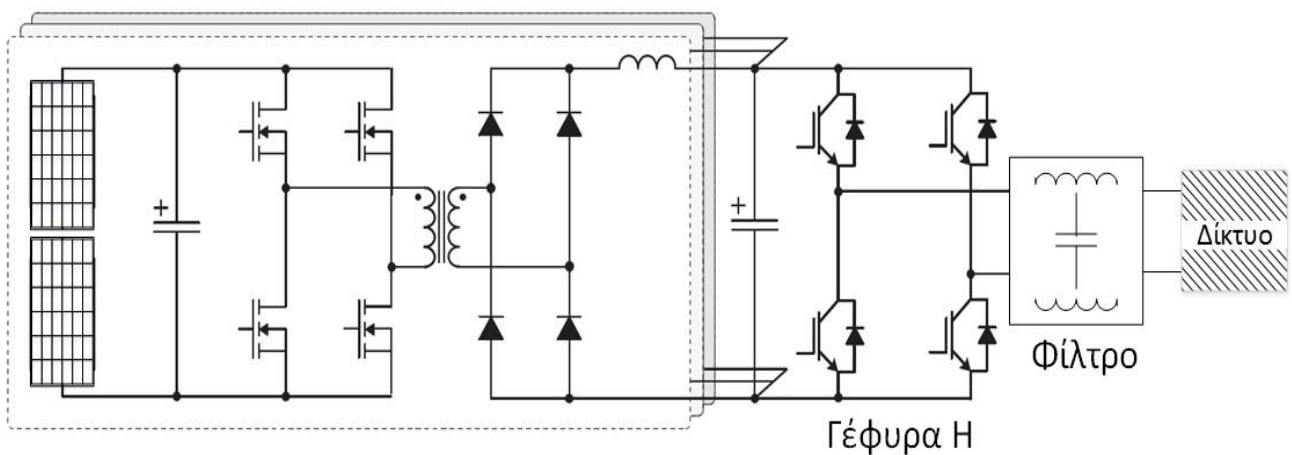
Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελεί βελτίωση της προηγούμενης, τόσο όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας MPPT όσο και την μείωση των απαιτούμενων DC καλωδιώσεων. Από την άλλη μεριά σημαντικό μειονέκτημα είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας, τόσο στο τμήμα της ισχύος όσο και στο τμήμα ελέγχου, δεδομένου του πλήθους των συστημάτων που χρησιμοποιούνται, αλλά και της ανάγκης συγχρονισμού περισσότερων του ενός αντιστροφέων με το δίκτυο. Συνήθως αφορά μεσαίας ή μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, με ισχύ αντιστροφέα ανά αλυσίδα μικρότερη των 10kW.

### 3.6.3. Διαμόρφωση πολλαπλής αλυσίδας

Η τοπολογία αυτή αποτελεί μετεξέλιξη των δύο παραπάνω τοπολογιών. Ουσιαστικά διαχωρίζεται ο μετατροπέας DC σε DC από τον αντιστροφέα DC σε AC. Στην συνέχεια τοποθετείται ένας μετατροπέας DC σε DC για κάθε αλυσίδα, βελτιστοποιώντας την αποτελεσματικότητα της MPPT λειτουργίας και στην συνέχεια, μέσω ενός DC ζυγού, η ενέργεια τροφοδοτείται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα. Η τοπολογία αυτή αφορά σταθμούς μεσαίας κλίμακας, με ισχύ αντιστροφέα μικρότερη από 500kW. Βέβαια και στην περίπτωση αυτή σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η αύξηση της πολυπλοκότητας, τόσο στο τμήμα της ισχύος όσο και στο τμήμα ελέγχου, δεδομένου του πλήθους των συστημάτων που χρησιμοποιούνται. Παραδείγματα τέτοιων αντιστροφέων φαίνονται στο σχήμα 3.46.



**Σχήμα 3.45** Τοπολογίες αντιστροφέν ΦΒ συστημάτων σε συστήματα με διαμόρφωση αλυσίδας (α) Γέφυρα Η με απομόνωση χαμηλής συχνότητας, (β) χωρίς μετασχηματιστή και με DC/DC κλάδο, (γ) με DC/DC κλάδο και απομόνωση υψηλής συχνότητας, (δ) τοπολογία Η5, (ε) τοπολογία HERIC, (ζ) Η6D1 και (η) Η6D2



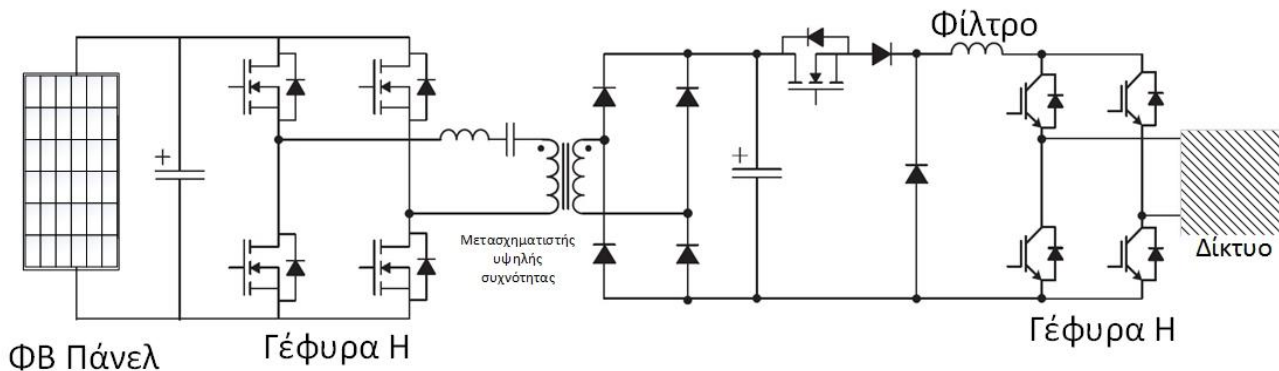
**Σχήμα 3. 46** Τοπολογία συστήματος με διαμόρφωση πολλαπλής αλυσίδας

3.6.4. Αντιστροφή ανά πάνελ

Στην περίπτωση αυτή, οι μετατροπείς διασύνδεσης ενσωματώνονται σε κάθε φωτοβολταϊκό πάνελ δημιουργώντας μια αυτόνομη δομική μονάδα, ικανή να συνδεθεί απευθείας στο



δίκτυο. Πρόκειται για μια τεχνολογία η οποία δεν έχει βρει αποδοχή προς το παρόν, δεδομένου ότι το πλήθος των απαιτούμενων μετατροπών είναι μεγάλο, γεγονός που συνεπάγεται τόσο κόστος όσο και αύξηση της πολυπλοκότητας, ήτοι μειωμένη αξιοπιστία. Βέβαια προφανώς η απόδοση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας βελτιστοποιείται, αφού ο αλγόριθμος MPPT υλοποιείται για κάθε πάνελ χωριστά. Οι τοπολογίες των μετατροπών που χρησιμοποιούνται είναι αντίστοιχες αυτών των άλλων τοπολογιών, αλλά με σημαντικά χαμηλότερη ισχύ, συνήθως μικρότερη των 300W. Ένας τέτοιος αντιστροφέας φαίνεται στο σχήμα 3.47.



Σχήμα 3.47 Τοπολογία συστήματος με διαμόρφωση αντιστροφής ανά πάνελ

### 3.7 Συμπεράσματα

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούν σημαντικές συνιστώσες κάθε τύπου φωτοβολταϊκού συστήματος. Αναλαμβάνουν τόσο την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της ΦΒ γεννήτριας, όσο και την διασύνδεση της με το φορτίο ή το δίκτυο. Επιπλέον έχουν σημαντικό ρόλο και στην περίπτωση που στο σύστημα συμπεριληφθούν διατάξεις αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετατροπείς που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι μετατροπείς DC σε DC καθώς και μετατροπείς DC σε AC και σήμερα διατίθεται πλήθος τοπολογιών, ανάλογα με τις προδιαγραφές που τίθενται, όπως τάση, ισχύς κτλ. Ακόμη, κομβικό ρόλο έχουν οι τεχνικές ελέγχου των μετατροπών, οι οποίες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τόσο την λειτουργία του συστήματος όσο και την ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας. Είναι σημαντικό ότι στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν ώριμες και αξιόπιστες λύσεις, γεγονός που αναδεικνύει στην συνέχεια και την ωριμότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.8 Βιβλιογραφία

1. Power electronics for renewable energy systems transportation and industrial applications, Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, Kamal Al-Haddad, WILEY and IEEE Press, 2014
2. M.H. Rashid, Ηλεκτρονικά ισχύος, Εκδόσεις ΙΩΝ, 2011
3. N. Mohan, T. Undeland, W. Robbins, Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
4. Σ. Μανιάς, Ηλεκτρονικά ισχύος, Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2012
5. Ι. Φραγκιαδάκης, Φωτοβολταϊκά συστήματα, εκδόσεις Ζήτη, 2007
6. A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, WILEY, 2011
7. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems, CRC Press, 2012
8. Deutsche Gesellschaft Für Sonnenenergie (Dgs), Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers (2nd edition), 2008