

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**



**ΘΕΜΑ:** «Τεχνολογίες Μετατροπών Ισχύος για την ενσωμάτωση ΑΠΕ σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος»

Μπεκατώρος Σταμάτιος (Α.Μ.2013019002)

Επιβλέπων: Κανέλλος Φώτιος,  
Επίκουρος Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, Μάρτιος 2017



## Περίληψη

Η υπόψη μεταπτυχιακή διατριβή πραγματεύεται την ανάλυση της τεχνολογίας των μετατροπών ισχύος και την εφαρμογή τους στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα. Αρχικά, γίνεται ανάλυση των ειδών ηλεκτρονικών διακοπών που βρίσκουν χρήση στους διάφορους μετατροπείς. Ύστερα, αναλύεται η λειτουργία των κυριότερων μετατροπών ισχύος ρεύματος από μία μορφή σε μία άλλη(συνεχές/ εναλλασσόμενο) μέσω μαθηματικών σχέσεων και σχετικών σχημάτων και διαγραμμάτων. Στη συνέχεια, καταγράφονται οι εφαρμογές των εν λόγω διατάξεων σε ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο 5<sup>ο</sup> και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της λειτουργίας, των κατηγοριών αλλά και των εφαρμογών των Ευέλικτων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας(FACTS). Συνοψίζοντας, βασικός σκοπός της εργασίας αυτής είναι, εκτός της ανάλυσης των ηλεκτρονικών ισχύος, η παράθεση των εφαρμογών που βρίσκουν αυτά στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.



## Ευχαριστίες

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος του Τμήματος Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή της Σχολής κ. Κανέλλου Φώτιου. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω ιδιαιτέρως για την καθοδήγηση και την άριστη συνεργασία που είχαμε με σκοπό την εκπόνησή της.



## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	15
1.1 Γενικά.....	15
1.2 Διακόπτες.....	17
1.2.1 Δίοδος.....	17
1.2.2 Θυρίστορ .....	18
1.2.3 Τρανζίστορ .....	21
2. Μετατροπείς.....	25
2.1 Ανορθωτές .....	25
2.2 Ανορθωτές Πλήρους Κύματος.....	25
2.2.1 Τροφοδοσία Ωμικού-Επαγωγικού Φορτίου-Συνεχές Ρεύμα.....	25
2.3 Ελεγχόμενοι Τριφασικοί Ανορθωτές.....	29
2.3.1 Δωδεκαπαλμικοί Ανορθωτές.....	30
3. DC-DC Μετατροπείς .....	35
3.1 Μετατροπέας Υποβιβασμού, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη .....	35
3.2 Μετατροπέας Υποβιβασμού, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη .....	36
3.3 Μετατροπέας Ανύψωσης, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη .....	41
3.4 Μετατροπέας Ανύψωσης, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη .....	42
3.5 Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη .....	46
3.6 Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη .....	46
4. Αντιστροφείς.....	53
4.1 Εισαγωγή.....	53
4.1.1 Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας .....	53
4.1.2 Αντιστροφέας Τετραγωνικού Κύματος.....	55
4.1.3 Αντιστροφείς Πολλαπλών Επιπέδων .....	59
4.1.4 Πολυεπίπεδοι Μετατροπείς με Ανεξάρτητες Πηγές DC.....	60
4.1.5 Έξοδος Διαμορφωμένου Πλάτους Παλμού (Pulse-Width-Modulated Output ή PWM).....	61
i. Διπολική Διακοπτική Αλλαγή.....	62
ii. Μονοπολική Διακοπτική Λειτουργία.....	63
4.1.6. Ορισμοί της Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμού.....	65
4.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς.....	68

4.2.1 Αντιστροφάς Έξι Βημάτων .....	68
4.2.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς Προσαρμοσμένου Πλάτους Παλμού .....	72
5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	75
5.1 Εισαγωγή.....	75
5.2 Ανεμογεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας.....	79
5.3 Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Μεταβλητή Αντίσταση Ρότορα.....	80
5.4 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Μερικής Κλίμακας Μετατροπείς Ισχύος (partial scale power converter).....	81
5.5 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Πλήρους Κλίμακας Μετατροπείς Ισχύος (full-rating).....	82
5.6 Τοπολογίες Ηλεκτρονικών Ισχύος σε Ανεμογεννήτριες .....	83
5.6.1 Μετατροπείς Πηγής Τάσης Τεσσάρων Τεταρτημορίων.....	83
5.6.2 Μετατροπέας Ενέργειας Διπλής Κατεύθυνσης .....	84
5.6.3 Πολυεπίπεδος Μετατροπέας Ενέργειας.....	85
5.6.4 Ευέλικτοι Μετατροπείς Ενέργειας .....	87
5.7 Σύνδεση Αιολικών Πάρκων .....	88
5.8 Φ/Β Συστήματα και Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς .....	89
5.8.1 Ανίχνευση του Σημείου Μεγίστης Ισχύος .....	91
5.8.2 Τεχνολογίες Διασύνδεσης Φ/Β Στοιχείων .....	94
5.8.2.1 Τεχνολογία Κεντρικού Αντιστροφέα (Centralized Technology) .....	94
5.8.2.2 Τεχνολογία Αλυσίδας (String Technology) .....	96
5.8.2.3 Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων (Multistring Technology) .....	97
5.8.2.4 Τεχνολογία Ενσωματωμένου Αντιστροφέα ανά Πλαίσιο (ACPV Module Technology) .....	98
5.8.3 Μονοφασικοί Αντιστροφείς στα Φ/Β.....	100
5.8.3.1 Μονοεπίπεδοι Αντιστροφείς.....	101
5.8.3.2 Πολυεπίπεδοι Αντιστροφείς .....	103
Διατάξεις DC - DC – AC.....	103
Διατάξεις DC - AC – AC.....	105
Διατάξεις DC - AC - DC – AC.....	105
5.9 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS-Flexible AC Transmission Systems) .....	106
5.9.1 Γενικά .....	106
5.9.2 Κατηγορίες ΕΣΜ .....	113



5.9.2.1 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Θυρίστορ.....	115
5.9.2.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Μετατροπείς Ισχύος .....	121
5.9.2.3 Υπόλοιπα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς .....	128
5.9.3 Εφαρμογές FACTS.....	130
5.9.3.1 Βελτίωση Ευστάθειας Μόνιμης Κατάστασης ΣΗΕ.....	130
5.9.3.3 Αύξηση της Φόρτισης ΣΗΕ .....	131
5.9.3.4 Αύξηση της Διαθέσιμης Ικανότητας Μεταφοράς.....	132
Επίλογος.....	133
Βιβλιογραφία.....	137



## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Μετατροπέας ac-dc-ac.....	16
Σχήμα 1.2: Μετατροπέας με Διπλή Λειτουργία .....	16
Σχήμα 1.3: Δίοδος.....	18
Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική Ρεύματος Τάσης Πραγματικής Διόδου .....	18
Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική Ρεύματος Τάσης Ιδανικής Διόδου .....	18
Σχήμα 1.6: Τα Τρία Μέρη Ενός SCR.....	19
Σχήμα 1.7: Ιδανική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης SCR .....	19
Σχήμα 1.8: Κυκλωματικό Σύμβολο GTO .....	20
Σχήμα 1.9: Ιδανική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης GTO.....	20
Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστική MOSFET .....	21
Σχήμα 1.11: Κυκλωματικό Σύμβολο MOSFET .....	22
Σχήμα 1.12: Τυπικές Χαρακτηριστικές BJT .....	22
Σχήμα 1.13: Κυκλωματικό Σύμβολο BJT.....	23
Σχήμα 2.1: Ελεγχόμενος Ανορθωτής με Ωμικό Φορτίο .....	25
Σχήμα 2.2: Ασυνεχές Ρεύμα.....	26
Σχήμα 2.3: Αρμονικές της Τάσης Συναρτήσει της Γωνίας Καθυστέρησης .....	29
Σχήμα 2.4: Ελεγχόμενος Τριφασικός Ανορθωτής.....	30
Σχήμα 2.5: Τάση Εξόδου για $\alpha=45^\circ$ .....	30
Σχήμα 2.6: Δωδεκαπαλμικός Τριφασικός Ανορθωτής .....	31
Σχήμα 2.7: Τάση Εξόδου για $\alpha=0$ .....	31
Σχήμα 3.1: Κλειστός Διακόπτης σε Κύκλωμα Μετατροπέα Υποβιβασμού.....	35
Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο Κύκλωμα για Κλειστό Διακόπτη .....	35
Σχήμα 3.3: Μεταβολή του Ρεύματος του Πυκνωτή .....	36
Σχήμα 3.4: Ανοιχτός Διακόπτης σε Κύκλωμα Μετατροπέα Υποβιβασμού.....	37
Σχήμα 3.5: Ρεύμα Επαγωγέα.....	41
Σχήμα 3.6: Τάση Επαγωγέα.....	43
Σχήμα 3.7: Ρεύμα Διόδου.....	44
Σχήμα 3.8: Ρεύμα Πυκνωτή .....	44
Σχήμα 3.9: Ρεύμα Επαγωγέα.....	48
Σχήμα 3.10: Τάση Επαγωγέα.....	49

Σχήμα 3.11: Ρεύμα Διόδου .....	49
Σχήμα 3.12: Ρεύμα Επαγωγέα.....	49
Σχήμα 4.1: Μετατροπείς Πλήρους Γέφυρας.....	53
Σχήμα 4.2: Συνδιασμοί Καταστάσεως Διακοπών και Τάση Εξόδου.....	54
Σχήμα 4.3: Κλειστοί Διακόπτες $S_1$ και $S_2$ .....	54
Σχήμα 4.4: Κλειστοί Διακόπτες $S_3$ και $S_4$ .....	54
Σχήμα 4.5: Κλειστοί Διακόπτες $S_1$ και $S_3$ .....	55
Σχήμα 4.6: Κλειστοί Διακόπτες $S_2$ και $S_4$ .....	55
Σχήμα 4.7: Τάση Εξόδου Τετραγωνικού Κύματος και Κυματομορφή Ρεύματος Σταθερής Κατάστασης για RL Φορτίο.....	57
Σχήμα 4.8: Αντιστροφέας με Δύο Πηγές Συνεχούς Ρεύματος, Κάθε μία με Γέφυρα Τύπου H Συγκροτούμενη από IGBT's. ....	59
Σχήμα 4.9: Τάση Εξόδου για Κάθε H Γέφυρα και Συνολική Τάση για τον Αντιστροφέα Δύο Πηγών του Σχήματος 4.8. ....	61
Σχήμα 4.10: Διπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού.....	63
Σχήμα 4.11: Μετατροπείς Πλήρους Γέφυρας για Μονοπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού .....	64
Σχήμα 4.12: Σήμα Αναφοράς και Σήμα Φορέας .....	65
Σχήμα 4.13: Τάσεις Γέφυρας $v_a$ και $v_b$ .....	65
Σχήμα 4.14: Τάση Εξόδου .....	65
Σχήμα 4.15: Μονοπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού με Διακόπτες Υψηλής και Χαμηλής Συχνότητας: .....	66
Σχήμα 4.16: Τριφασικός Αντιστροφέας .....	69
Σχήμα 4.17: Διακοπτική Αλληλουχία Αντιστροφέα Έξι Βημάτων .....	69
Σχήμα 4.18: Πολικές Τάσεις Εξόδου .....	70
Σχήμα 4.19: Φασικές Τάσεις για Μη Γειωμένο Φορτίου με Σύνδεση Y.....	70
Σχήμα 4.20: Ρεύμα στη Φάση A για Φορτίο RL.....	71
Σχήμα 4.21: Κύμα Αναφοράς και Φορέας για Προσαρμοσμένο Πλάτος Παλμού με $m_f = 9$ και $m_a = 0,7$ για τον Τριφασικό Αντιστροφέα του Σχήματος 4.16. ....	73
Σχήμα 4.22: Κυματομορφές Εξόδου (ρεύμα φορτίου RL) .....	73
Σχήμα 5.1 : Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην ΕΕ σε Ισοδύναμο Χιλίων Τόνων Πετρελαίου .....	75
Σχήμα 5.2: Εξέλιξη των Ανεμογεννητριών και η Τάση Αύξησης της Μετατροπής Ενέργειας μέσω Ηλεκτρονικών Ισχύος (μπλε περιοχή) τα Τελευταία 30 Χρόνια.....	77
Σχήμα 5.3: Δομή Ανεμογεννήτριας .....	77

Σχήμα 5.4: Ετήσια Παραγωγή Αιολικής Ενέργειας Παγκοσμίως από το 1996 έως το 2010 .....	78
Σχήμα 5.5: Φ/Β Πλαίσιο .....	79
Σχήμα 5.6: Ανεμογεννήτρια Σταθερής Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Τύπου Κλωβού Συνδεδεμένη Απευθείας στο Δίκτυο .....	80
Σχήμα 5.7: Μερικώς Μεταβλητής Ταχύτητας Ανεμογεννήτρια με Μεταβλητή Αντίσταση Ρότορα.....	81
Σχήμα 5.8: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Μερικής Κλίμακας Μετατροπέα Ισχύος.....	82
Σχήμα 5.9: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών με Μετατροπέα Πλήρους Κύματος .....	82
Σχήμα 5.10: Δομή Μετατροπέα Πηγής Τάσης .....	84
Σχήμα 5.11: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Σύγχρονη Γεννήτρια.....	85
Σχήμα 5.12: Ανεμογεννήτρια Πλήρους Κλίμακας Μετατροπέα Ενέργειας με Μόνιμου Μαγνήτη Γεννήτρια.....	85
Σχήμα 5.13: Τοπολογίες Πολυεπίπεδων Μετατροπέων .....	86
Σχήμα 5.14: Πολυεπίπεδος Μετατροπέας.....	86
Σχήμα 5.15: Ανεμογεννήτρια με Παράλληλους Μετατροπείς.....	88
Σχήμα 5.16: Αιολικό Πάρκο .....	88
Σχήμα 5.17: Τυπική Απόκλιση Μεταβολής Απόδοσης Φ/Β Στοιχείων Πυριτίου Συναρτήσει της Θερμοκρασίας. Συμβατική Θερμοκρασία είναι 20 Βαθμοί Κελσίου. ....	90
Σχήμα 5.18: Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης Φ/Β Πλαισίου για Καθορισμένη Τιμή Θερμοκρασίας και Ηλιακής Ακτινοβολίας .....	92
Σχήμα 5.19: Καμπύλες I-V Φ/Β Στοιχείου για Διάφορες Ακτινοβολίες-Θερμοκρασίες. ....	94
Σχήμα 5.20: Δομικό Διάγραμμα Τεχνολογίας Κεντρικού Αντιστροφέα .....	95
Σχήμα 5.21: Κυκλωματικό Διάγραμμα Κεντρικού Αντιστροφέα .....	95
Σχήμα 5.22: Τεχνολογία Αλυσίδας.....	96
Σχήμα 5.23: Δομικό Διάγραμμα Τεχνολογίας Πολλαπλών Αλυσίδων.....	98
Σχήμα 5.24: Τεχνολογία Ενσωματωμένου Αντιστροφέα ανά Πλαίσιο .....	99
Σχήμα 5.25: Τυπικό Φ/Β Σύστημα.....	101
Σχήμα 5.26: Αντιστροφέας Ανύψωσης Τεσσάρων Διακοπών.....	101
Σχήμα 5.27: Μικτός Αντιστροφέας Τεσσάρων Διακοπών .....	102
Σχήμα 5.28: Μικτός Αντιστροφέας Έξι Διακοπών με Απομόνωση .....	103
Σχήμα 5.29: Αντιστροφέας Ανύψωσης Δύο Επιπέδων.....	104

Σχήμα 5.30: Flyback Αντιστροφέας.....	104
Σχήμα 5.31: Μετατροπέας DC - AC – AC.....	105
Σχήμα 5.32: Αντιστροφέας Πολλών Επιπέδων με Μετασχηματιστή Υψηλών Συχνοτήτων.....	106
Σχήμα 5.34: Μοντέλο Δύο Μηχανών και Γραμμής Μεταφοράς .....	109
Σχήμα 5.35: Καμπύλη Ενεργού Ισχύος-Γωνίας .....	112
Σχήμα 5.36: Κατηγορίες Ελεγκτών FACTS (όσο περισσότερες οι κουκίδες σε κάθε πεδίο, τόσο μεγαλύτερη η επίδραση) .....	115
Σχήμα 5.37: Εγκάρσιος Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC) Αποτελούμενος από TSCs/TCRs (SVC).....	117
Σχήμα 5.38: (α) Στοιχειώδες κύκλωμα ενός TCSC, (β) Σύστημα TCSC.....	118
Σχήμα 5.39: Κύκλωμα Ρυθμιστή Τάσης Ελεγχόμενου από Θυρίστορ .....	119
Σχήμα 5.40: Σχηματικό Διάγραμμα Ρυθμιστή Φασικής Γωνίας .....	120
Σχήμα 5.41: Κύκλωμα Ελεγχόμενου από Θυρίστορ Ρυθμιστή Φασικής Γωνίας .....	121
Σχήμα 5.42:Κύκλωμα SSSC. ....	124
Σχήμα 5.43 Κύκλωμα STATCOM.....	125
Σχήμα 5.44: Κύκλωμα UPFC .....	128

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Με τον όρο ηλεκτρονικά ισχύος περιγράφεται μια ποικιλία εφαρμογών ημιαγωγικών στοιχείων για τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με παλαιότερες ηλεκτρομηχανικής λογικής, καθώς έχουν μικρότερο όγκο, βάρος, κόστος, υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα ελέγχου και μικρότερες απαιτήσεις συντήρησης. Από την άλλη παρουσιάζουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα, έχοντας ως κύριο την εισαγωγή ανώτερων αρμονικών, γεγονός που έχει μεταξύ άλλων αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών, την αύξηση της άεργης ισχύος και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ιστορικά η αφετηρία τους τοποθετείται στην ανάπτυξη του ανορθωτή ατμών υδραργύρου(1900), με ειδική αναφορά την εφεύρεση του τρανζίστορ (1947). Ουσιαστικά όμως η επανάσταση των ηλεκτρονικών ισχύος ξεκινά με την εφεύρεση του θυρίστορ, το οποίο αποτέλεσε τον αδιαμφισβήτητο κυρίαρχο της αγοράς για σημαντικό χρονικό διάστημα. Πέρασαν περισσότερες από δύο δεκαετίες μέχρι την ανάπτυξη νέων στοιχείων που μπορούσαν να τα ανταγωνιστούν, αρχικά σε ορισμένες εφαρμογές και σταδιακά σε όλο και περισσότερες.

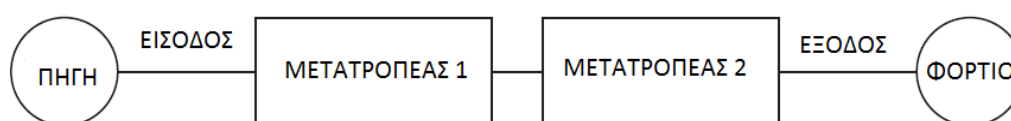
Η λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος έχει ως σκοπό τη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας από μια μορφή σε μία άλλη, μέσω του ελέγχου ή της μετατροπής τάσης ή ρεύματος. Οι εφαρμογές τους ποικίλουν από τη μετατροπή ρεύματος υψηλής τάσης ως τη μετάδοση του συνεχούς ρεύματος στις καθημερινές συσκευές του ανθρώπου, όπως είναι οι ευρέως χρησιμοποιούμενοι φορτιστές των κινητών τηλεφώνων.

Η σχεδίαση του εξοπλισμού μετατροπής ενέργειας προϋποθέτει τη γνώση και εφαρμογή των αρχών της θεωρίας κυκλωμάτων, της θεωρίας αυτομάτου ελέγχου, των αρχών της ηλεκτρονικής, της μετάδοσης θερμότητας και άλλων πεδίων της σύγχρονης επιστήμης. Η αδιάκοπη εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών, συνυφασμένη με την ανάγκη για διαρκή βελτίωση και απόδοση των ηλεκτρονικών συσκευών, έχουν οδηγήσει τον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος στην ανέλιξή του ως έναν από τους πιο αναπτυσσόμενους τομείς της ηλεκτρονικής.

Το αντικείμενο ενός κυκλώματος ηλεκτρονικών ισχύος είναι να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις σε ρεύμα και τάση, μέσω των αντίστοιχων που παρέχει η πηγή, για κάποιο φορτίο. Αυτό γίνεται μέσω της μετατροπής της τάσης ή του ρεύματος και ως εκ τούτου τα κυκλώματα αυτά λέγονται μετατροπείς.

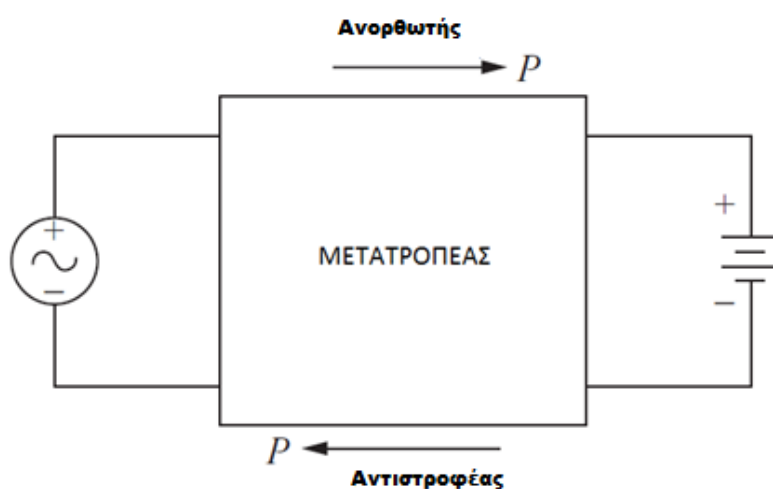
Οι μετατροπείς κατηγοριοποιούνται μέσω της συσχέτισης εισόδου εξόδου. Αρχικά, υπάρχουν οι μετατροπείς εναλλασσόμενου σε συνεχές (ac-dc), οι οποίοι παράγουν μια έξοδο σταθερού ρεύματος από μια είσοδο εναλλασσόμενου ρεύματος (πηγή) και ονομάζονται ανορθωτές. Επιπλέον,

υπάρχουν και εκείνοι που μετατρέπουν το συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα και ονομάζονται αντιστροφείς. Φυσικά, αναφέρεται ότι υπάρχουν και οι μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές ρεύμα καθώς επίσης και εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο, οι οποίοι έχουν τη δικιά τους χρησιμότητα ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Βέβαια, η μετατροπή ενέργειας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει περισσότερους από έναν τύπους μετατροπών στην πορεία της, έχοντας ως στόχο να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως η σωστή συχνότητα και η τάση. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα 1.1, το οποίο δηλώνει πως μια μετατροπή σε εναλλασσόμενο ρεύμα από επίσης εναλλασσόμενο ρεύμα πηγής, μπορεί να γίνει μέσω μιας ενδιάμεσης μετατροπής σε συνεχές ρεύμα και μετά πάλι σε εναλλασσόμενο, έτσι ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές πλάτους και συχνότητας.



Σχήμα 1.1: Μετατροπέας *ac-dc-ac*

Επίσης, κάποια κυκλώματα μετατροπών είναι δυνατό να έχουν πολλαπλές λειτουργίες ανάλογα με τις παραμέτρους του κυκλώματος. Ένα τέτοιο φαίνεται στο σχήμα 1.2, όπου εάν η μπαταρία φορτίζεται από την πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος ο μετατροπέας χαρακτηρίζεται ως ανορθωτής, ενώ εάν οι παράμετροι του συστήματος αλλάξουν και η μπαταρία λειτουργήσει σαν πηγή για το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, ο μετατροπέας χαρακτηρίζεται ως αντιστροφείς.



Σχήμα 1.2: Μετατροπέας με Διπλή Λειτουργία



## 1.2 Διακόπτες

Ένας ηλεκτρονικός διακόπτης χαρακτηρίζεται από τις δύο καταστάσεις του, δηλαδή ανοιχτός (κατάσταση off) και κλειστός (κατάσταση on). Εφαρμογές που χρησιμοποιούν διακόπτες προτιμούνται λόγω της σχετικά μικρής απώλειας ισχύος στη συσκευή. Εάν γίνεται λόγος για ιδανικό διακόπτη, τότε είτε η τάση είτε το ρεύμα του είναι μηδέν, κάνοντας έτσι τις απώλειες μηδενικές. Αντίθετα, οι πραγματικές συσκευές απορροφούν κάποια ενέργεια όταν ο διακόπτης είναι κλειστός και όταν γίνεται η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη, χωρίς όμως να υπάρχει κάποιο αξιοσημείωτο αντίκτυπο στην απόδοση του κυκλώματος.

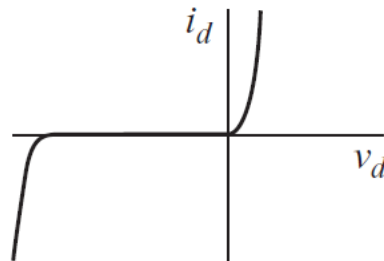
Η χρήση κάποιου συγκεκριμένου διακοπτικού στοιχείου σε ένα κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος βασίζεται στην παρούσα πρόοδο στην τεχνολογία των υλικών. Η συμπεριφορά των ηλεκτρονικών ισχύος δεν επηρεάζεται σημαντικά από το στοιχείο που χρησιμοποιείται ως διακόπτης, ειδικά μάλιστα αν η πτώση τάσης σε αυτό είναι αμελητέα συγκριτικά με τις άλλες υπάρχουσες τάσεις στα υπόλοιπα κυκλώματα. Έτσι, τα ημιαγωγικά στοιχεία μοντελοποιούνται ως ιδανικοί διακόπτες με σκοπό να τονίζεται η συνολική συμπεριφορά του κυκλώματος. Οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων θεωρούνται στιγμιαίες, αλλά φυσικά, όπου θεωρείται αναγκαίο, δεν αμελούνται οι συνέπειες κάποιων μη ιδανικών μεταβάσεων μεταξύ των καταστάσεων on-off.

### 1.2.1 Δίοδος

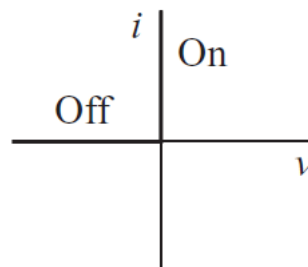
Η δίοδος αποτελεί τον απλούστερο ηλεκτρονικό διακόπτη και θεωρείται μη ελέγξιμη με την έννοια ότι οι καταστάσεις αγωγής ή μη αγωγής καθορίζονται από τάσεις και ρεύματα μέσα στο κύκλωμα. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται πως η δίοδος είναι ορθά πολωμένη όταν το ρεύμα  $i_d$  είναι θετικό, ενώ είναι ανάστροφα πολωμένη όταν η τάση  $v_d$  είναι αρνητική. Στην ιδανική περίπτωση, η δίοδος είναι ένα κύκλωμα που άγει όταν είναι ορθά πολωμένη, ενώ είναι ένα ανοιχτό κύκλωμα όταν είναι ανάστροφα πολωμένη. Στα σχήματα 1.4 και 1.5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης για την πραγματική και την ιδανική δίοδο αντίστοιχα.



Σχήμα 1.3: Δίοδος



Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική Ρεύματος Τάσης Πραγματικής Διόδου



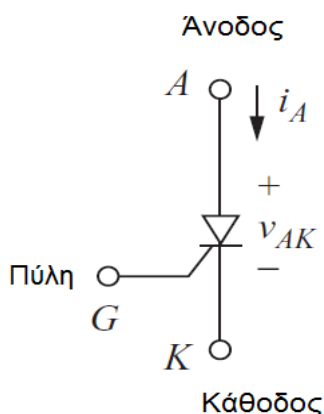
Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική Ρεύματος Τάσης Ιδανικής Διόδου

### 1.2.2 Θυρίστορ

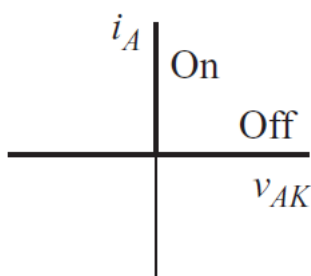
Τα θυρίστορ είναι διακόπτες που χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα όπου απαιτείται ο έλεγχος της ενεργοποίησης του διακόπτη. Είναι ικανά να διαχειριστούν υψηλές τιμές ρεύματος και τάσεων με σκοπό τη χρήση τους σε εφαρμογές μεγάλων ρευμάτων, αλλά οι συχνότητες αλλαγής θέσεως των διακοπών δεν είναι τόσο μεγάλες όσο σε άλλους τύπους διακοπτικών. Ο όρος θυρίστορ συχνά αναφέρεται σε μια οικογένεια συσκευών αποτελούμενων από τρία μέρη και περιλαμβάνει διατάξεις όπως οι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου (silicon controlled rectifier ή SCR) και τα θυρίστορ αποκοπής από την πύλη (gate turn-off thyristor ή GTO). Είναι άξιο

αναφοράς πως η έννοια του θυρίστορ συνήθως ταυτίζεται με την έννοια του ελεγχόμενου ανορθωτή πυριτίου SCR.

Τα τρία μέρη του SCR είναι η άνοδος, η κάθοδος και η πύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6. Για να αρχίσει αυτό να άγει, πρέπει να του εφαρμόζεται ρεύμα στην πύλη όταν η τάση της ανόδου ως προς την κάθοδο είναι θετική. Όταν ξεκινήσει να άγει, το σήμα στην πύλη δεν απαιτείται πλέον για να διατηρηθεί το ρεύμα της ανόδου, ενώ το στοιχείο θα συνεχίσει να άγει όσο το ρεύμα της ανόδου διατηρείται θετικό και πάνω από μία ελάχιστη τιμή, η οποία ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η ιδανική καμπύλη ρεύματος τάσης ενός SCR.

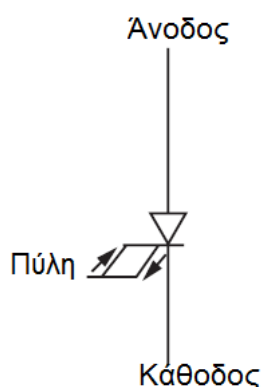


Σχήμα 1.6: Τα Τρία Μέρη Ενός SCR

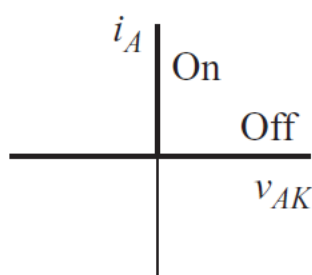


Σχήμα 1.7: Ιδανική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης SCR

Το θυρίστορ αποκοπής από την πύλη ή GTO, όπως το SCR, ενεργοποιείται από ένα μικρής διάρκειας ρεύμα στην πύλη εάν η τάση της ανόδου προς την κάθοδο είναι θετική. Αντίθετα όμως με τα SCR, ένα GTO μπορεί να απενεργοποιηθεί με εφαρμογή ενός αρνητικού ρεύματος στην πύλη, κάνοντας έτσι κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται έλεγχος για το άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη. Το μέγεθος βέβαια του αρνητικού αυτού ρεύματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ρεύμα ενεργοποίησης. Το κυκλωματικό σύμβολο ενός GTO καθώς και η ιδανική καμπύλη ρεύματος τάσης φαίνονται στα σχήματα 1.8 και 1.9 αντίστοιχα.



Σχήμα 1.8: Κυκλωματικό Σύμβολο GTO



Σχήμα 1.9: Ιδανική Καμπύλη Ρεύματος-Τάσης GTO

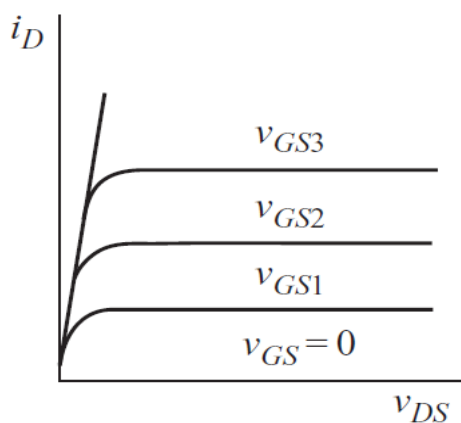
Τα θυρίστορ αποτελούσαν ιστορικά μια πολύ αξιόπιστη επιλογή διακόπτη ηλεκτρονικών ισχύος λόγω της ευκολίας στη διαχείριση μεγάλων

τάσεων και στη διαχείριση των υπαρχόντων τιμών του ρεύματος. Ακόμα η χρήση τους είναι διαδεδομένη, αλλά περισσότερο οι απαιτήσεις έχουν στραφεί προς τα τρανζίστορ λόγω της εξέλιξής τους και της αξίας που έχουν αποκτήσει στη λειτουργία πολυάριθμων εφαρμογών.

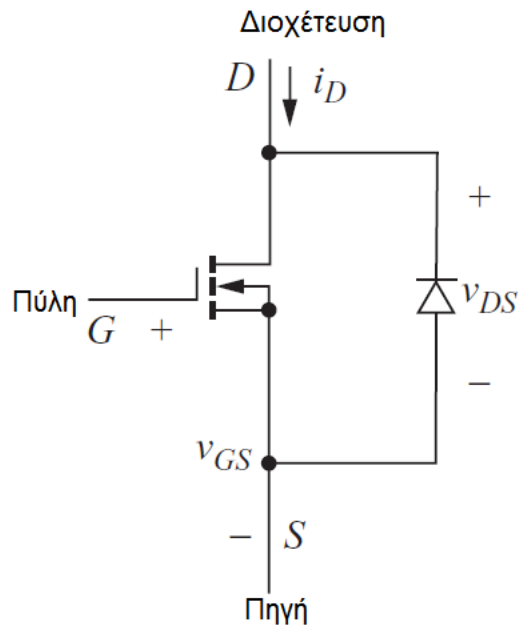
### 1.2.3 Τρανζίστορ

Τα τρανζίστορ λειτουργούν σαν διακόπτες στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος και η κατάσταση λειτουργίας τους στο κύκλωμα προορίζεται να είναι η πλήρως κλειστή ή η πλήρως ανοιχτή. Αυτό διαφέρει από άλλες εφαρμογές των τρανζίστορ όπου αυτά λειτουργούν σε μια περιοχή όπου έχουν μεγάλη τάση και ρεύμα. Αντίθετα όμως με τη δίοδο, είναι επιτεύξιμος ο έλεγχος των κλειστών ή ανοιχτών τρανζίστορ. Τύποι τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος είναι τα MOSFET, τα τρανζίστορ διπολικής επαφής (Bipolar Junction Transistor ή BJT), καθώς και άλλες υβριδικές συσκευές όπως τα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Insulated Gate Bipolar Junction Transistor ή IGBT).

Το MOSFET είναι μια ελεγχόμενη συσκευή μέσω τάσης, της οποίας τα χαρακτηριστικά φαίνονται στο σχήμα 1.10 και το κυκλωματικό σύμβολο στο σχήμα 1.11. Αυτά που αφορούν εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος είναι κατά κύριο λόγο MOSFET πύκνωσης και όχι αραίωσης, οι οποίες είναι οι δύο κύριες κατηγορίες τους. Μια σημαντική τάση πύλης-πηγής ενεργοποιεί τη συσκευή, οδηγώντας σε πτώση τάσης από τη διοχέτευση προς την πηγή.

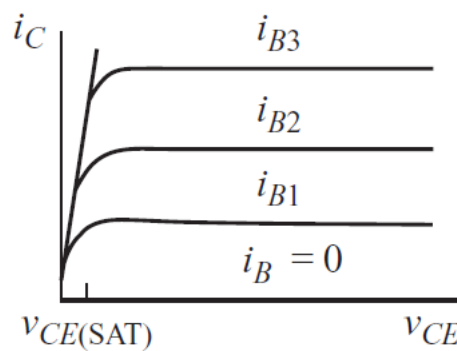


Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστική MOSFET

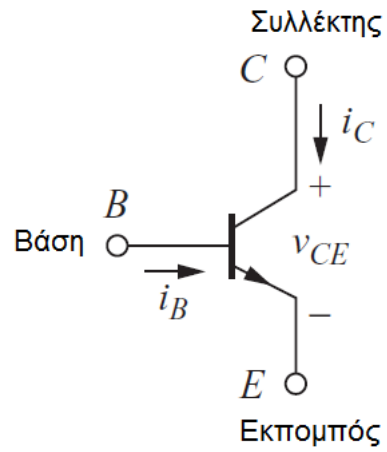


Σχήμα 1.11: Κυκλωματικό Σύμβολο MOSFET

Για τα BJTs, των οποίων οι τυπικές χαρακτηριστικές φαίνονται στο σχήμα 1.12 και το κυκλωματικό σύμβολο στο σχήμα 1.13, η κατάσταση λειτουργίας επιτυγχάνεται παρέχοντας επαρκές ρεύμα βάσης έτσι ώστε να οδηγηθεί το BJT σε κορεσμό. Μηδενικό ρεύμα βάσης οδηγεί σε μη λειτουργία του τρανζίστορ.



Σχήμα 1.12: Τυπικές Χαρακτηριστικές BJT



Σχήμα 1.13: Κυκλωματικό Σύμβολο BJT

Βεβαίως, υπάρχουν και τα τρανζίστορ IGBT, τα οποία είναι μια ολοκληρωμένη ένωση ενός MOSFET και ενός BJT. Το κυκλωματικό σύμβολό του προσεγγίζει αυτό του MOSFET, ενώ τα χαρακτηριστικά του σε κατάσταση λειτουργίας είναι παρόμοια με του BJT.





## 2. Μετατροπείς

### 2.1 Ανορθωτές

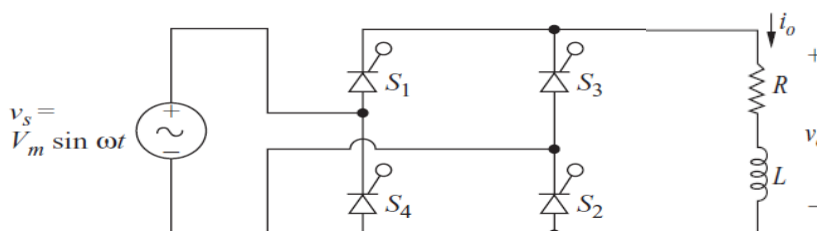
Ένας ανορθωτής μετατρέπει εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, έχοντας ως σκοπό είτε την παραγωγή εξόδου η οποία θα είναι καθαρά συνεχές ρεύμα, είτε την παραγωγή μιας κυματομορφής ρεύματος ή φορτίου η οποία θα έχει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της συνεχούς μορφής του.

Στην πραγματικότητα, ένας ανορθωτής μισού κύματος χρησιμοποιείται κυρίως σε περιορισμένες εφαρμογές και με μικρή απαιτητικότητα σε ρεύμα επειδή το μέσο ρεύμα παροχής δε θα είναι μηδέν και αυτό μπορεί να προκαλέσει δυσχέρεια στην λειτουργία του μετατροπέα.

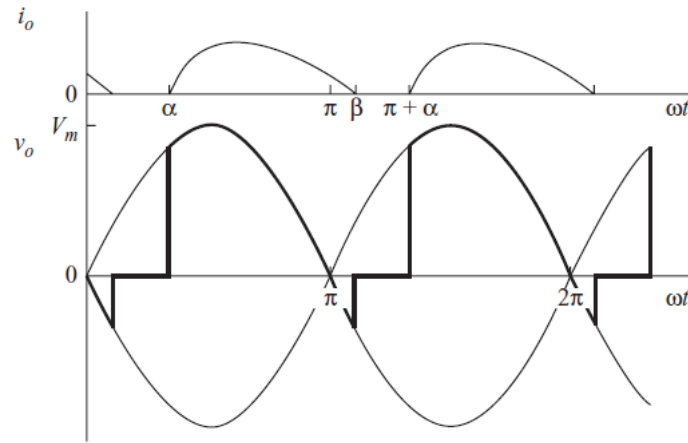
### 2.2 Ανορθωτές Πλήρους Κύματος

Ο σκοπός ενός ανορθωτή πλήρους κύματος είναι να παράξει τάση ή ρεύμα το οποίο θα είναι καθαρά συνεχές ή θα έχει κάποιο χαρακτηριστικό του συνεχούς ρεύματος. Ενώ ο σκοπός είναι ο ίδιος με το σκοπό του ανορθωτή μισού κύματος, ο ανορθωτής αυτός έχει κάποια θεμελιώδη πλεονεκτήματα. Ένα εξ' αυτών αποτελεί η μηδενική τιμή της πηγής εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία οδηγεί στο να αποφεύγονται προβλήματα τα οποία συνδέονται με μη μηδενική τιμή στην πηγή, ειδικά στους μετατροπείς. Επίσης, η έξοδος του ανορθωτή πλήρους κύματος παρουσιάζει λιγότερο κυματισμό συγκριτικά με τον αντίστοιχο μισού κύματος.

#### 2.2.1 Τροφοδοσία Ωμικού-Επαγωγικού Φορτίου-Συνεχές Ρεύμα



Σχήμα 2.1: Ελεγχόμενος Ανορθωτής με Ωμικό Φορτίο



Σχήμα 2.2: Ασυνεχές Ρεύμα

Το ρεύμα του φορτίου για έναν ελεγχόμενο ανορθωτή πλήρους κύματος με RL φορτίο μπορεί να είναι είτε συνεχές είτε ασυνεχές, Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση ρεύματος περιγράφεται από την εξίσωση:

$$i_o(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{\omega t - \alpha}{\omega \tau}} \right] \quad \text{για } \alpha \leq \omega t \leq \beta$$

Όπου,

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad \text{και } \tau = \frac{L}{R}$$

Εάν το ρεύμα του φορτίου εξακολουθεί να είναι θετικό όταν  $\omega t = \pi + \alpha$ , όταν σήματα πύλης έχουν εφαρμοστεί στα θυρίστορ  $S_3$  και  $S_4$  της παραπάνω ανάλυσης, τα θυρίστορ αυτά ενεργοποιούνται και τα  $S_1$  και  $S_2$  αναγκάζονται να διακόψουν τη λειτουργία τους. Εφόσον η αρχική συνθήκη για το ρεύμα στο δεύτερο μισό του κύκλου δεν είναι μηδέν, η συνάρτηση ρεύματος δεν επαναλαμβάνεται. Η εξίσωση του  $i_o(\omega t)$  που γράφηκε πριν δεν ισχύει στη μόνιμη κατάσταση για συνεχές ρεύμα. Για ένα ωμικό φορτίο με συνεχές ρεύμα, οι κυματομορφές του ρεύματος και της τάσης στη μόνιμη κατάσταση φαίνονται στο σχήμα 2.5.

Το όριο μεταξύ ασυνεχούς και συνεχούς ρεύματος εμφανίζεται όταν  $\beta = \pi + \alpha$ . Το ρεύμα όταν  $\omega t = \pi + \alpha$  πρέπει να είναι μεγαλύτερο του μηδενός για τη περίπτωση του συνεχούς ρεύματος.

$$i(\pi + \alpha) \geq 0 \quad (2.1)$$

$$\sin(\pi + \alpha - \theta) - \sin(\pi + \alpha - \theta) e^{-\frac{\pi + \alpha - \theta}{\omega\tau}} \geq 0 \quad (2.2)$$

Χρησιμοποιώντας τις επόμενες εξισώσεις:

$$\sin(\pi + \alpha - \theta) = \sin(\theta - \alpha) \quad (2.3)$$

$$\sin(\theta - \alpha) \left(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}\right) \geq 0 \quad (2.4)$$

Λύνοντας ως προς  $\alpha$ :

$$\alpha \leq \theta \quad (2.5)$$

Χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση 2.6, συμπεραίνουμε:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \quad (2.6)$$

$$\alpha \leq \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \text{ για συνεχές ρεύμα.} \quad (2.7)$$

Μια μέθοδος για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος εξόδου για την περίπτωση του συνεχούς ρεύματος είναι η χρήση των σειρών Fourier. Η σειρά λοιπόν εκφράζεται στη γενική μορφή της ως εξής:

$$v_0(\omega t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (2.8)$$

Η μέση τιμή της τάσης είναι:

$$V_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (2.9)$$

Το πλάτος των όρων του εναλασσόμενου υπολογίζονται από:

$$V_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.10)$$

$$a_n = \frac{2Vm}{\pi} \left[ \frac{\cos(n+1)a}{n+1} - \frac{\cos(n-1)a}{n-1} \right] \quad (2.11)$$

$$b_n = \frac{2Vm}{\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)a}{n+1} - \frac{\sin(n-1)a}{n-1} \right] \quad (2.12)$$

$$n=2, 4, 6, \dots$$

Το σχήμα 2.3 δείχνει την αλληλεπίδραση μεταξύ των ανηγμένων αρμονικών της τάσης εξόδου και της γωνίας καθυστέρησης.

Το πλάτος του ρεύματος σε κάθε συχνότητα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (2.13)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} = \frac{V_n}{|R + jn\omega L|} \quad (2.14)$$

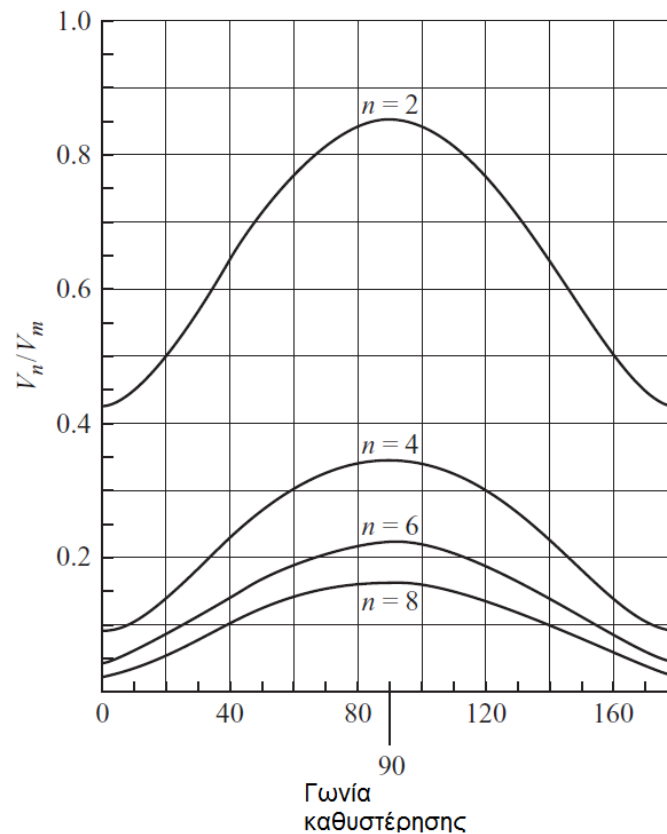
Η ενεργός τιμή του ρεύματος προσδιορίζεται συνδυάζοντας τις αντίστοιχες τιμές σε κάθε συχνότητα.

$$u_n(t) = V_{m,n} \cos(\omega_n t + \theta) \quad (2.15)$$

$$i_n(t) = I_{m,n} \cos(\omega_n t + \varphi) \quad (2.16)$$

Άρα:

$$I_{rms} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{I_n}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.3: Αρμονικές της Τάσης Συναρτήσεως της Γωνίας Καθυστέρησης

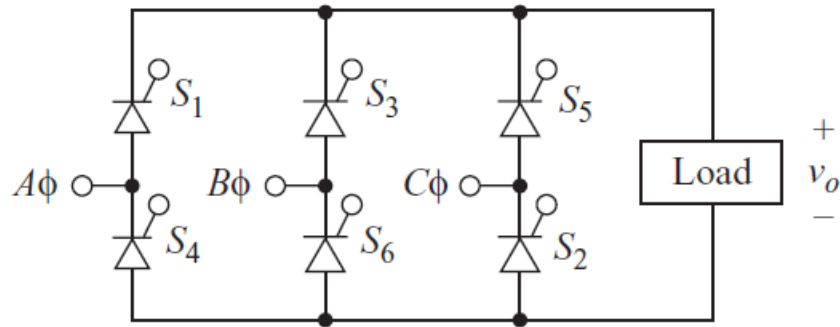
Όσο ο αριθμός των αρμονικών αυξάνει, η αντίσταση στην αυτεπαγωγή γίνεται εντονότερη, επομένως μπορεί να απαιτείται να γίνει επίλυση μόνο για ορισμένους όρους της σειράς έτσι ώστε να υπολογιστεί το ενεργό ρεύμα.

## 2.3 Ελεγχόμενοι Τριφασικοί Ανορθωτές

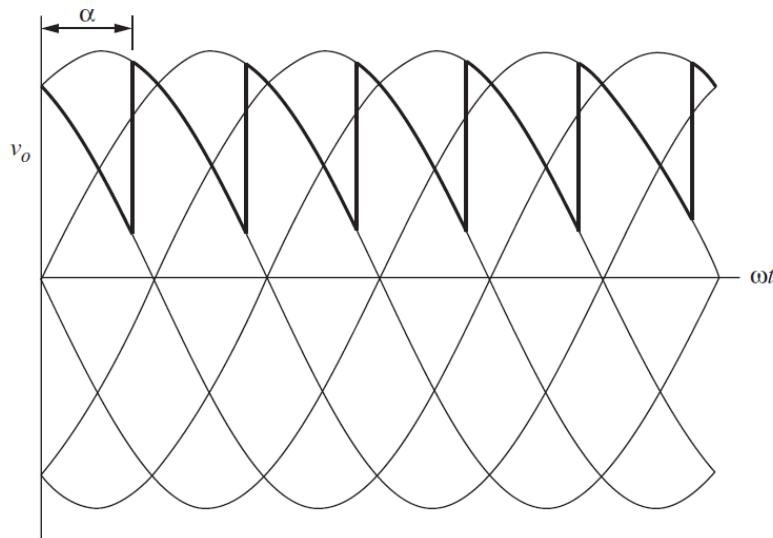
Η έξοδος ενός τριφασικού ανορθωτή δύναται να ελεγχθεί αντικαθιστώντας τα θυρίστορ με διόδους. Το σχήμα 2.2 δείχνει έναν ελεγχόμενο εξαπαλμικό τριφασικό ανορθωτή. Με τα θυρίστορ, η αγωγή δεν ξεκινά μέχρι να εφαρμοστεί ένα σήμα πύλης ενώ το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο. Έτσι, η μετάβαση της τάσης εξόδου στην μέγιστη στιγμιαία τιμή τάσης πηγής είναι δυνατόν να καθυστερήσει. Η γωνία καθυστέρησης  $\alpha$  καθορίζεται από το σημείο από το οποίο το θυρίστορ θα ξεκινούσε να άγει αν ήταν διάδος και αποτελεί το ενδιαμέσο στάδιο που ξεκινά από το σημείο όπου το θυρίστορ αποκτά ορθή πόλωση μέχρις ότου εφαρμοστεί το σήμα πύλης. Το σχήμα 2.3 δείχνει την έξοδο του ελεγχόμενου ανορθωτή για γωνία καθυστέρησης 45 μοιρών.

Η μέση τάση εξόδου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$V_0 = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha \quad (2.18)$$



Σχήμα 2.4: Ελεγχόμενος Τριφασικός Ανορθωτής

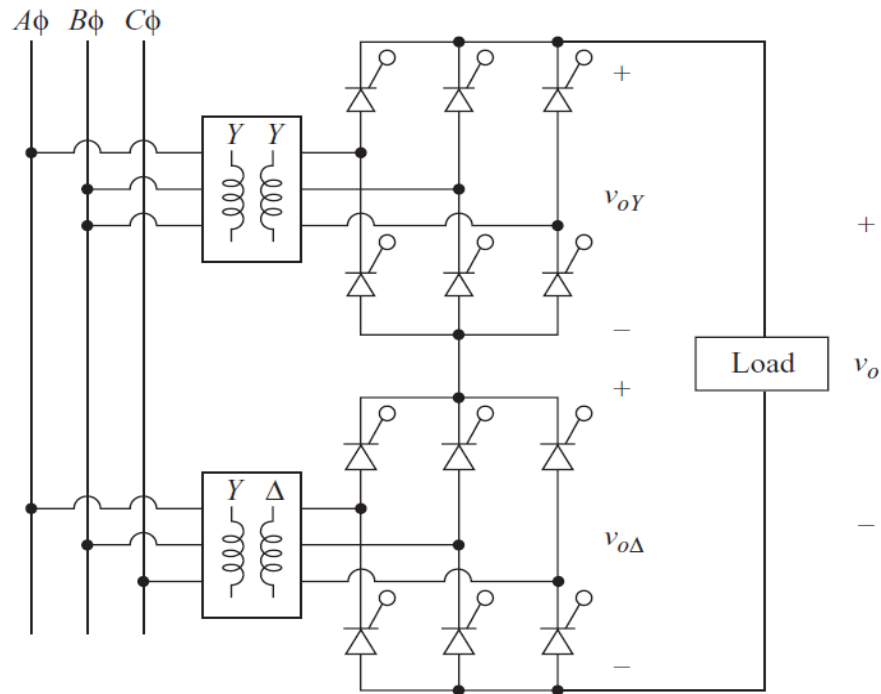


Σχήμα 2.5: Τάση Εξόδου για  $\alpha=45^\circ$

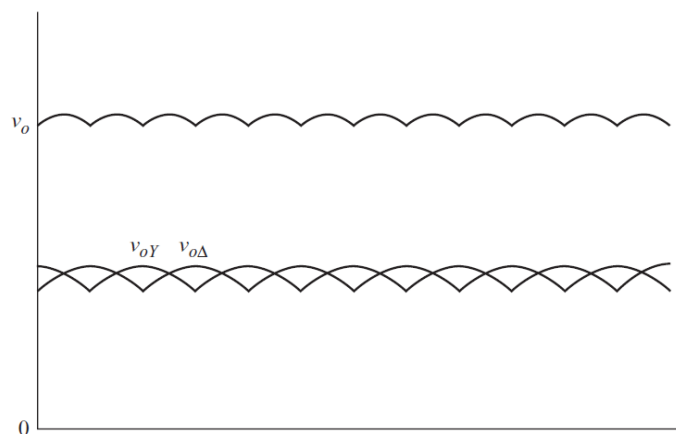
### 2.3.1 Δωδεκαπαλμικοί Ανορθωτές

Ο τριφασικός δωδεκαπαλμικός ανορθωτής παρατηρείται ότι έχει σημαντική βελτίωση ως προς το συνεχές ρεύμα στην έξοδο συγκριτικά με το

μονοφασικό. Οι αρμονικές της τάσης εξόδου είναι μικρές και εμφανίζονται σε συχνότητες που είναι πολλαπλάσιες των έξι φορές της συχνότητας της πηγής. Περαιτέρω μείωση των αρμονικών εξόδου μπορεί να επιτευχθεί με χρήση δύο γεφυρών έξι παλμών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Η διάταξη αυτή αποκαλείται δωδεκαπαλμικός μετατροπέας.



Σχήμα 2.6: Δωδεκαπαλμικός Τριφασικός Ανορθωτής



Σχήμα 2.7: Τάση Εξόδου για  $\alpha=0$

Μία από τις γέφυρες τροφοδοτείται μέσω ενός Υ-Υ \ μετασχηματιστή, ενώ η άλλη τροφοδοτείται μέσω ενός Υ-Δ μετασχηματιστή όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Ο σκοπός της συνδεσμολογίας Υ-Δ του μετασχηματιστή είναι να εισάγει μια διαφορά φάσης  $30^\circ$  μεταξύ πηγής και γέφυρας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εισοδοί στις δύο γέφυρες να έχουν διαφορά φάσης  $30^\circ$ . Η συνολική τάση εξόδου υπολογίζεται από το άθροισμα των εξόδων των δύο γεφυρών, ενώ οι γωνίες καθυστέρησης για τις γέφυρες είναι τυπικά ίδιες.

$$V_0 = V_{0,Y} + V_{0,\Delta} = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha + \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha = \frac{6V_{m,L-L}}{\pi} \cos \alpha \quad (2.19)$$

Η μέγιστη τιμή στην έξοδο του δωδεκαπαλμικού μετατροπέα συναντάται στο μέσο μεταξύ εναλλασόμενων μεγίστων των εξαπαλμικών μετατροπέων. Προσθέτωντας έτσι τις τάσεις στο σημείο αυτό όπου  $\alpha=0$  έχουμε:

$$V_{0,peak} = 2V_{m,L-L} \cos(15^\circ) = 1.932V_{m,L-L} \quad (2.20)$$

Το σχήμα 2.5 δείχνει τις τιμές της τάσης για  $\alpha=0$ .

Εφόσον μια μετάβαση συμβαίνει μεταξύ των θυρίστωρ που άγουν κάθε  $30^\circ$ , συμβαίνουν συνολικά 12 τέτοιες μεταβάσεις σε κάθε περίοδο της πηγής εναλλασόμενου ρεύματος. Η έξοδος έχει συχνότητες αρμονικών που είναι πολλαπλάσιες του γινομένου του 12 με την τιμή της συχνότητας της πηγής ( $12k$ ,  $k=1, 2, 3, \dots$ ). Η μείωση των αρμονικών για να παραχθεί πιο ομαλό συνεχές ρεύμα είναι λιγότερο κοστοβόρος συγκριτικά με τον εξαπαλμικό ανορθωτή.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα χρήσης δωδεκαπαλμικού μετατροπέα και όχι εξαπαλμικού είναι οι μειωμένες αρμονικές που εμφανίζονται στο σύστημα εναλλασόμενου ρεύματος. Το ρεύμα στις γραμμές εναλλασόμενου ρεύματος που παρέχεται στον Υ-Υ μετασχηματιστή αναπαρίσταται από τη σειρά Fourier ως εξής:

$$i_Y(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left( \cos \omega_0 t - \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t + \frac{1}{7} \cos 7\omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_0 t - \dots \right) \quad (2.21)$$



Η εξίσωση 2.21 περιλαμβάνει μια σειρά Fourier που περιγράφει το ρεύμα στις γραμμές εναλλασόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί τον Υ-Δ μετασχηματιστή:

$$i_{\Delta}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left( \cos \omega_0 t + \frac{1}{5} \cos 5\omega_0 t - \frac{1}{7} \cos 7\omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_0 t - \dots \right) \quad (2.22)$$

Η σειρά Fourier για τις δύο τιμές του ρεύματος είναι παρόμοια, αλλά κάποιοι όροι έχουν διαφορετικά αλγεβρικά σύμβολα. Το εναλλασόμενο ρεύμα του συστήματος, το οποίο είναι το άθροισμα των ρευμάτων των μετασχηματιστών αυτών, απεικονίζεται από τις σειρές Fourier με την εξίσωση 2.22:

$$i_{ac}(t) = i_{\gamma}(t) + i_{\Delta}(t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_0 \left( \cos \omega_0 t - \frac{1}{11} \cos 11\omega_0 t + \frac{1}{13} \cos 13\omega_0 t - \dots \right) \quad (2.23)$$

Έτσι, κάποιες από τις αρμονικές στο εναλλασόμενο ρεύμα ακυρώνονται μέσω χρήσης της δωδεκαπαλμικής μορφής και όχι της εξαπαλμικής. Οι αρμονικές που παραμένουν στο σύστημα είναι της μορφής  $12k + 1$ . Η απαλοιφή τους  $6(2n - 1) \pm 1$  έχει προκύψει από ειδική μορφοποίηση του μετατροπέα.

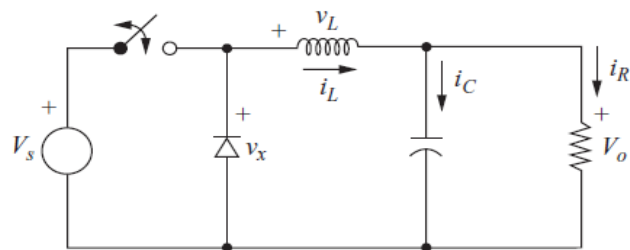
Αυτή η αρχή μπορεί να διευρυνθεί σε εφαρμογές περισσότερων παλμών μέσω ενσωμάτωσης στους εξαπαλμικούς μετατροπείς μετασχηματιστών που έχουν την κατάλληλη διαφορά φάσης. Οι χαρακτηριστικές αρμονικές ενός  $p$ -παλμικού μετατροπέα θα είναι της μορφής  $pk \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots$ . Οι μετατροπείς των ενεργειακών συστημάτων έχουν τον περιορισμό των δώδεκα παλμών εξαιτίας του σημαντικού κόστους παραγωγής μετασχηματιστών υψηλής τάσης με τις επιθυμητές διαφορές φάσης. Παρ' όλα αυτά, τα βιομηχανικά συστήματα παραγωγής χαμηλής τάσης μετασχηματιστών διαθέτουν μετατροπείς μέχρι σαράντα οχτώ παλμών.



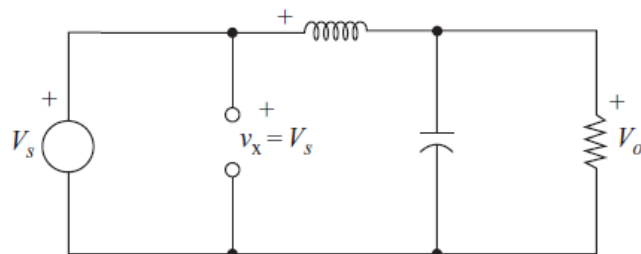
### 3. DC-DC Μετατροπείς

#### 3.1 Μετατροπέας Υποβιβασμού, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη

Αυτού του τύπου οι μετατροπείς αποτελούν κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος που τροποποιούν την τιμή μιας συνεχούς τάσης, παρέχοντας έτσι μία καθορισμένη έξοδο. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός στο κύκλωμα μετατροπέα υποβιβασμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1 παρακάτω, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και αυτό φαίνεται στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.1: Κλειστός Διακόπτης σε Κύκλωμα Μετατροπέα Υποβιβασμού



Σχήμα 3.2: Ισοδύναμο Κύκλωμα για Κλειστό Διακόπτη

Η τάση στον επαγωγέα θα είναι:

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.1)$$

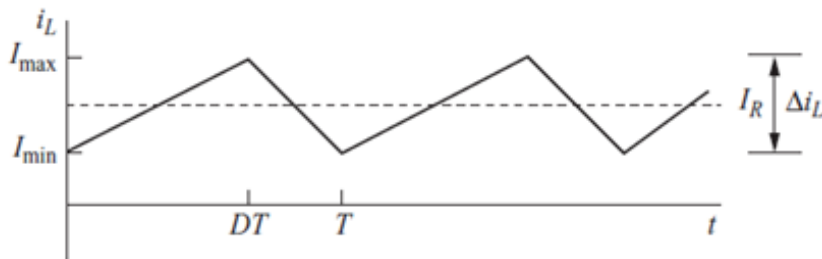
Με κλειστό διακόπτη θα ισχύει:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (3.2)$$

Αφού η παράγωγος του ρεύματος είναι θετική σταθερά, αυτό αυξάνει γραμμικά όπως δείχνει το σχήμα 3.3 παρακάτω. Η μεταβολή του ρεύματος ενώ ο διακόπτης είναι κλειστός υπολογίζεται αλλάζοντας την προηγούμενη εξίσωση ως εξής:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_0}{L} \quad (3.3)$$

$$(\Delta i_L)_{closed} = \left( \frac{V_s - V_0}{L} \right) DT \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.3: Μεταβολή του Ρεύματος του Πυκνωτή

### 3.2 Μετατροπέας Υποβιβασμού, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η δίοδος πολώνεται ορθά για να περάσει το ρεύμα του επαγωγέα, όπως φαίνεται και στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 3.4. Σε αυτό η τάση είναι:

$$v_L = -V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.5)$$

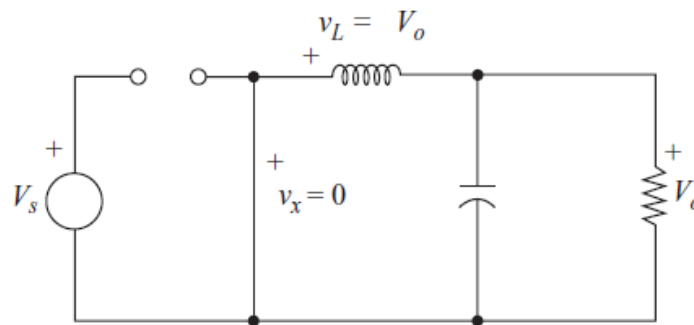
Επομένως:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (3.6)$$

Η παράγωγος του ρεύματος στον επαγωγέα είναι αρνητική σταθερά και το ρεύμα μειώνεται γραμμικά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Η μεταβολή του ρεύματος του επαγωγέα όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός είναι:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{-V_o}{L} \quad (3.7)$$

$$(\Delta i_L)_{open} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.4: Ανοιχτός Διακόπτης σε Κύκλωμα Μετατροπέα Υποβιβασμού

Η σταθερή λειτουργία προϋποθέτει ότι το ρεύμα του επαγωγέα στο τέλος του κύκλου θα πρέπει να ισούται με αυτό στην αρχή του, το οποίο σημαίνει ότι η καθαρή μεταβολή στο ρεύμα του επαγωγέα κατά τη διάρκεια μιας περιόδου πρέπει να είναι μηδέν. Αυτό απαιτεί:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0 \quad (3.9)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις για κλειστό και ανοιχτό διακόπτη η προηγούμενη εξίσωση αποκτά τη μορφή της εξίσωσης 3.10:

$$\left(\frac{V_s - V_0}{L}\right)DT - \left(\frac{V_0}{L}\right)(1 - D)T = 0 \quad (3.10)$$

Άρα

$$V_0 = V_s D \quad (3.11)$$

Επομένως, ο μετατροπέας υποβιβασμού παράγει τάση στην έξοδο που είναι μικρότερη ή ίση με την τάση είσοδο.

Μια εναλλακτική παραγωγή της τάσης εξόδου βασίζεται στην τάση του επαγωγέα, ενώ αφού η μέση τάση του είναι μηδέν για περιοδική λειτουργία θα ισχύει:

$$V_L = (V_s - V_0)DT + (-V_0)(1 - D)T = 0 \quad (3.12)$$

Λύνοντας αυτή την εξίσωση ως προς  $V_0$  προκύπτει ξανά η σχέση  $V_0 = V_s D$ .

Σημειώνεται ότι η τάση εξόδου εξαρτάται μόνο από την είσοδο και από τον κύκλο λειτουργίας  $D$ . Εάν η τάση εισόδου μεταβάλλεται, η τάση εξόδου μπορεί να μεταβληθεί κατάλληλα μέσω προσαρμογής της τιμής του κύκλου αυτού. Απαιτείται ένας βρόγχος ανατροφοδότησης για να γίνεται δειγματοληψία της τάσης εξόδου, να συγκρίνεται με μία τιμή αναφοράς και να προσαρμόζεται κύκλος λειτουργίας ανάλογα.

Το μέσο ρεύμα του επαγωγέα πρέπει να είναι ίσο με το μέσο ρεύμα της αντίστασης που εφαρμόζεται το φορτίο, εφόσον το μέσο ρεύμα του πυκνωτή πρέπει να είναι μηδενικό για σταθερή λειτουργία:

$$I_L = I_R = \frac{V_0}{R} \quad (3.13)$$

Αφού η μεταβολή στο ρεύμα του επαγωγέα είναι γνωστή μέσω προηγούμενων εξισώσεων, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ρεύματος του επαγωγέα υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \\
 &= \frac{V_0}{R} + \frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{L} (1 - D) T \right] = V_0 \left( \frac{1}{R} + \frac{(1-D)}{2Lf} \right)
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

$$\begin{aligned}
 I_{min} &= I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \\
 &= \frac{V_0}{R} - \frac{1}{2} \left[ \frac{V_0}{L} (1 - D) T \right] = V_0 \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right)
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Όπου  $f = 1/T$  είναι η συχνότητα του διακόπτη.

Για να ισχύει η παραπάνω ανάλυση, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το ρεύμα του επαγωγέα είναι συνεχές. Ένας εύκολος έλεγχος για το συνεχές ρεύμα είναι να υπολογιστεί το ελάχιστο ρεύμα του επαγωγέα από την παραπάνω εξίσωση του  $I_{min}$ . Αφού η ελάχιστη τιμή του ρεύματος του επαγωγέα πρέπει να είναι θετική για συνεχές ρεύμα, η ύπαρξη αρνητικής τιμής του ελαχίστου δεν επιτρέπεται και αποδεικνύει ασυνέχεια του ρεύματος. Το κύκλωμα θα λειτουργήσει με ασυνεχές ρεύμα στον επαγωγέα, αλλά η παραπάνω ανάλυση δεν θα ισχύει.

Η εξίσωση του  $I_{min}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του συνδιασμού  $L$  και  $f$  τα οποία θα συντελέσουν στην επίτευξη συνεχούς ρεύματος. Εφόσον η συνθήκη  $I_{min} = 0$  είναι το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς ρεύματος,

$$I_{min} = 0 = V_0 \left( \frac{1}{R} - \frac{(1-D)}{2Lf} \right) \tag{3.16}$$

$$Lf_{min} = \frac{(1-D)R}{2} \tag{3.17}$$

Σε περίπτωση επίτευξης της επιθυμητής συχνότητας του διακόπτη,

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \text{ για συνεχές ρεύμα}$$

(3.18)

Όπου  $L_{min}$  είναι η ελάχιστη απαιτούμενη επαγωγή για συνεχές ρεύμα. Πρακτικά, μια τιμή επαγωγής μεγαλύτερη της  $L_{min}$  απαιτείται για να διασφαλιστεί συνεχές ρεύμα.

Κατά τη σχεδίαση του μετατροπέα υποβιβασμού, η απόσταση κορυφής με κορυφή του ρεύματος του επαγωγέα χρησιμοποιείται ως κριτήριο σχεδίασης. Οι παραπάνω εξισώσεις για  $(\Delta i_L)_{closed}$  και  $V_0$  μπορούν να συνδυαστούν για τον προσδιορισμό της τιμής της επαγωγής για ένα συγκεκριμένο διάστημα δύο κορυφών του ρεύματος του επαγωγέα σε λειτουργία συνεχούς ρεύματος ως εξής:

$$\Delta i_L = \frac{V_s - V_0}{L} DT = \frac{V_s - V_0}{Lf} D = \frac{V_0(1-D)}{Lf} \quad (3.19)$$

$$L = \left( \frac{V_s - V_0}{\Delta i_L f} \right) D = \frac{V_0(1-D)}{\Delta i_L f} \quad (3.20)$$

Αφού τα μέρη του μετατροπέα θεωρούνται ιδανικά, η ισχύς που παρέχεται από την πηγή πρέπει να ισούται με την αντίστοιχη που απορροφάται από την αντίσταση.

$$P_s = P_o \quad (3.21)$$

$$V_s I_s = V_o I_o \quad (3.22)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{I_s}{I_o} \quad (3.23)$$

Είναι αξιοσημείωτο ότι η παραπάνω σχέση είναι παρόμοια με τη σχέση ρεύματος-τάσης για έναν μετατροπέα σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος. Επομένως, το κύκλωμα του μετατροπέα υποβιβασμού είναι αντίστοιχο με ένα μετατροπέα συνεχούς ρεύματος.



### 3.3 Μετατροπéας Ανύψωσης, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα. Ο νόμος τάσης του Κίρκοφ για το κύκλωμα πηγή, επαγωγέας και κλειστός διακόπτης είναι:

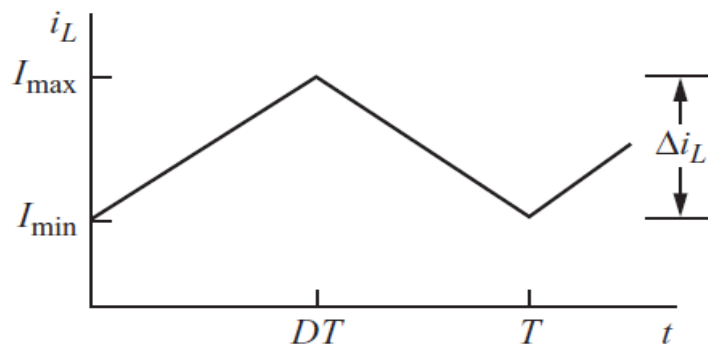
$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad \eta \quad \frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (3.24)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος είναι σταθερά, άρα το ρεύμα αυξάνει γραμμικά ενώ ο διακόπτης είναι κλειστός, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Η μεταβολή του ρεύματος του επαγωγέα υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L} \quad (3.25)$$

Λύνοντας ως προς  $\Delta i_L$  για κλειστό διακόπτη προκύπτει:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_S DT}{L} \quad (3.26)$$



Σχήμα 3.5: Ρεύμα Επαγωγέα

### 3.4 Μετατροπείας Ανύψωσης, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, το ρεύμα του επαγωγέα δε μπορεί να αλλάξει αμέσως και έτσι η δίοδος αποκτά ορθή πόλωση έτσι ώστε να ευνοήσει τη ροή του ρεύματος του επαγωγέα. Υποθέτοντας ότι η τάση εξόδου  $V_0$  είναι σταθερή, η τάση στον επαγωγέα θα είναι:

$$v_L = V_S - V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.27)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S - V_0}{L} \quad (3.28)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του επαγωγέα είναι σταθερός, επομένως το ρεύμα πρέπει να μεταβάλλεται γραμμικά όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Η μεταβολή του ρεύματος του επαγωγέα ενώ ο διακόπτης είναι ανοιχτός θα είναι:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_0}{L} \quad (3.29)$$

Λύνοντας ως προς  $\Delta i_L$ :

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{(V_S - V_0)(1-D)T}{L} \quad (3.30)$$

Για σταθερή λειτουργία, η καθαρή μεταβολή του ρεύματος του επαγωγέα πρέπει να είναι μηδέν. Άρα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.26 και 3.30 θα ισχύει:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0$$

$$\frac{V_S DT}{L} + \frac{(V_S - V_0)(1-D)T}{L} = 0$$

Λύνοντας ως προς  $V_0$  προκύπτει:

$$V_0 = \frac{V_S}{1-D}$$

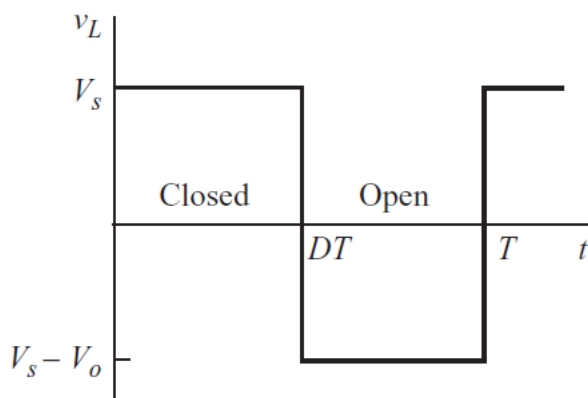
(3.31)

Επίσης, η μέση τάση του επαγωγέα πρέπει να είναι μηδέν για περιοδική λειτουργία. Εκφράζοντας τη μέση τάση του επαγωγέα για μία περίοδο διακόπτη ισχύει:

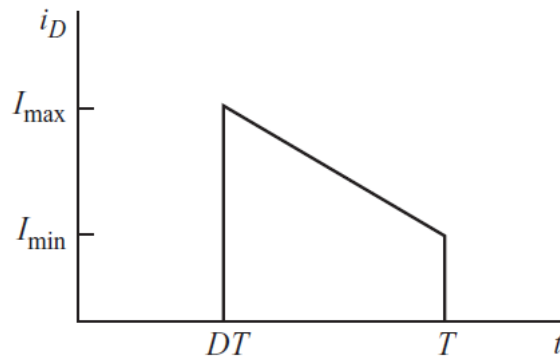
$$V_L = V_S D + (V_S - V_0)(1 - D) = 0 \quad (3.32)$$

Λύνοντας ως προς  $V_0$  προκύπτει η ίδια σχέση με παραπάνω. Η σχέση αυτή δηλώνει πως αν ο διακόπτης είναι διαρκώς ανοιχτός και η  $D$  είναι μηδέν, η τάση εξόδου είναι η ίδια με αυτή της εισόδου. Καθώς ο κύκλος λειτουργίας αυξάνεται, ο παρονομαστής στην σχέση για το  $V_0$  μικραίνει, έχοντας ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη τάση εξόδου. Ο μετατροπέας ανύψωσης παράγει τάση εξόδου η οποία θα είναι ίση ή μεγαλύτερη από την τάση εισόδου, σε αντίθεση με τον μετατροπέα τύπου υποβιβασμού, στον οποίο μπορεί να είναι μικρότερη.

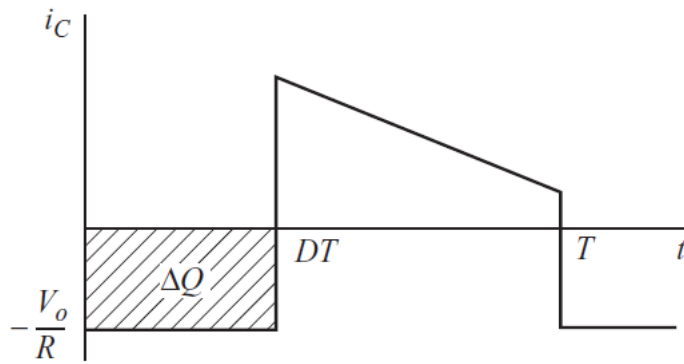
Καθώς ο κύκλος λειτουργίας του διακόπτη πλησιάζει την τιμή 1, η τάση εξόδου τείνει στο άπειρο, σύμφωνα με την εξίσωση που έχουμε καταλήξει για το  $V_0$ . Όμως, η εξίσωση αυτή προϋποθέτει να είναι ιδανικά τα μέρη του μετατροπέα και όχι πραγματικά, τα οποία έχουν απώλειες και θα αποτρέψουν να συμβεί αυτό. Το σχήμα 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8 δείχνουν τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για μετατροπέα ανύψωσης.



Σχήμα 3.6: Τάση Επαγωγέα



Σχήμα 3.7: Ρεύμα Διόδου



Σχήμα 3.8: Ρεύμα Πυκνωτή

Το μέσο ρεύμα στον επαγωγέα προσδιορίζεται υποθέτοντας ότι η μέση ισχύς που παρέχεται από την πηγή είναι ίση με τη ισχύ που καταναλώνεται στον αντιστάτη. Η ισχύς στην έξοδο θα είναι:

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R} = V_0 I_0 \quad (3.33)$$

Η ισχύς που παρέχεται είναι  $V_S I_S = V_S I_L$ . Εξισώνοντας τις σχέσεις της ισχύος εισόδου και εξόδου και χρησιμοποιώντας και την προηγούμενη εξίσωση για  $V_0$ :

$$V_S I_L = \frac{V_0^2}{R} = \frac{[V_S / (1-D)]^2}{R} = \frac{V_S^2}{(1-D)^2} R \quad (3.34)$$

Λύνοντας ως προς το μέσο ρεύμα του επαγωγέα και κάνοντας τις απαραίτητες αντικαταστάσεις, το  $I_L$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I_L = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} = \frac{V_0 I_0}{V_S}$$

(3.35)

Οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του ρεύματος του επαγωγέα προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή και τη μεταβολή του ρεύματος από την εξίσωση 3.26 για το  $(\Delta i_L)_{closed}$ :

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} + \frac{V_S D T}{2L} \quad (3.36)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S D T}{2L} \quad (3.37)$$

Η εξίσωση του  $V_0$  είχε ως αρχική υπόθεση το ρεύμα του επαγωγέα να είναι συνεχές, το οποίο σημαίνει ότι θεωρείται πάντα θετικό. Μία υπόθεση απαραίτητη για τη συνέχεια του ρεύματος στον επαγωγέα είναι να είναι θετική η τιμή του  $I_{min}$ . Επομένως, το όριο μεταξύ συνεχούς και ασυνεχούς ρεύματος του επαγωγέα προσδιορίζεται από:

$$I_{min} = 0 = \frac{V_S}{(1-D)^2 R} - \frac{V_S D T}{2L}$$

ή

$$\frac{V_S}{(1-D)^2 R} = \frac{V_S D T}{2L} = \frac{V_S D}{2Lf} \quad (3.38)$$

Άρα ο ελάχιστος συνδιασμός επαγωγής και συχνότητας διακόπτη για συνεχές ρεύμα στον μετατροπέα ανύψωσης θα είναι:

$$(Lf)_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2}$$

ή

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.39)$$

Ένας μετατροπέας ανύψωσης σχεδιασμένος για λειτουργία με συνεχές ρεύμα θα έχει τιμή αυτεπαγωγής μεγαλύτερη από  $L_{min}$ .

Από άποψη σχεδίσσης, θεωρείται χρήσιμο να εκφραστεί η μεταβλητή  $L$  συναρτήσει του επιθυμητού  $\Delta i_L$ :

$$L = \frac{V_S DT}{\Delta i_L} = \frac{V_S D}{\Delta i_L f} \quad (3.40)$$

### 3.5 Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης, Ανάλυση για Κλειστό Διακόπτη

Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η τάση στον επαγωγέα είναι:

$$v_L = V_S = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (3.41)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του επαγωγέα είναι σταθερός, δείχνοντας έτσι ότι το ρεύμα αυτό αυξάνει γραμμικά. Άρα, η εξίσωση 3.41 μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_S}{L}$$

Λύνοντας ως προς  $\Delta i_L$ :

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_S DT}{L} \quad (3.42)$$

### 3.6 Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης, Ανάλυση για Ανοιχτό Διακόπτη

Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, του ρεύμα στον επαγωγέα δε μπορεί να μεταβληθεί στιγμιαία, έχοντας ως αποτέλεσμα η δίοδος να είναι ορθά πολωμένη και να διέρχεται ρεύμα από την αντίσταση και τον πυκνωτή. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση κατά μήκος του επαγωγέα είναι:

$$v_L = V_0 = L \frac{di_L}{dt}$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_0}{L} \quad (3.43)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος του επαγωγέα είναι σταθερός και σε αυτή την περίπτωση και η μεταβολή του ρεύματος θα είναι:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_0}{L}$$

Λύνοντας ως προς  $\Delta i_L$ :

$$(\Delta i_L)_{open} = \frac{V_0(1-D)T}{L} \quad (3.44)$$

Για σταθερή λειτουργία, η καθαρή μεταβολή του ρεύματος του επαγωγέα πρέπει να είναι μηδέν. Άρα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 3.26 και 3.28 για  $(\Delta i_L)_{closed}$  και  $(\Delta i_L)_{open}$  αντίστοιχα, θα ισχύει:

$$(\Delta i_L)_{closed} + (\Delta i_L)_{open} = 0$$

$$\frac{V_s DT}{L} + \frac{V_0(1-D)T}{L} = 0$$

Λύνοντας ως προς  $V_0$  προκύπτει:

$$\boxed{V_0 = -V_s \left( \frac{D}{1-D} \right)} \quad (3.45)$$

Ο απαιτούμενος κύκλος λειτουργίας για συγκεκριμένες τάσεις εισόδου-εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

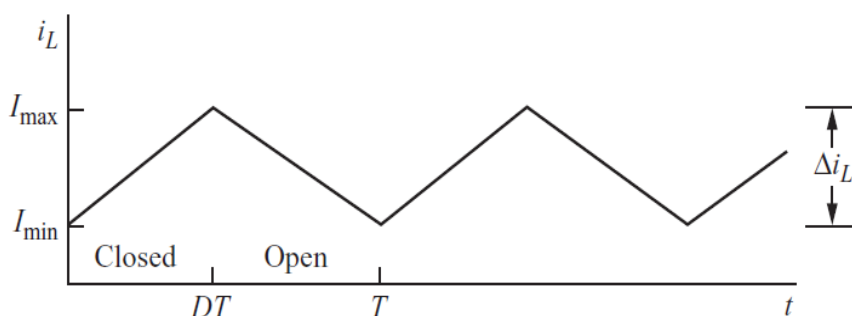
$$D = \frac{|V_0|}{V_s + |V_0|} \quad (3.46)$$

Η μέση τάση του επαγωγέα είναι μηδέν για περιοδική λειτουργία επομένως:

$$V_L = V_S D + V_0(1 - D) = 0$$

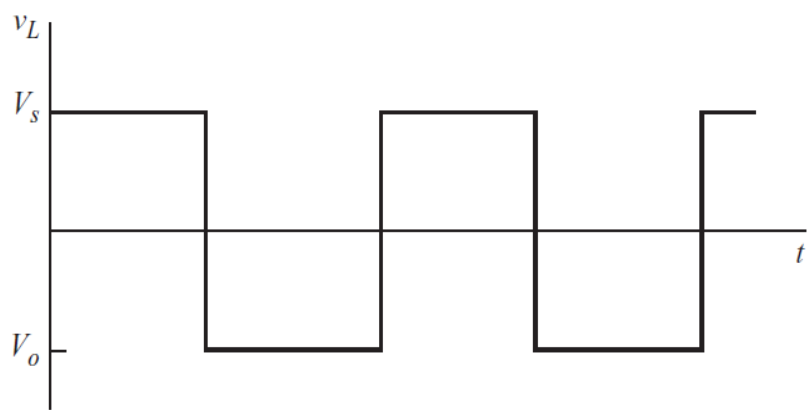
Λύνοντας ως προς  $V_0$  προκύπτει η ίδια εξίσωση με την 3.31.

Η εξίσωση αυτή δηλώνει πως η τάση εξόδου έχει αντίθετη πολικότητα από την τάση της πηγής. Το μέγεθος της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης μπορεί να είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από αυτό της τάσης της πηγής, ανάλογα από τον κύκλο λειτουργίας του διακόπτη. Εάν ισχύει  $D > 0.5$ , η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη από την εισόδο, ενώ εάν  $D < 0.5$ , η έξοδος είναι μικρότερη από την είσοδο. Επομένως, το κύκλωμα συνδυάζει τις ικανότητες των μετατροπέων υποβιβασμού και ανύψωσης. Παρόλα αυτά, η αλλαγή πολικότητας στην έξοδο μπορεί σε κάποιες εφαρμογές να αποτελεί μειονέκτημα. Στα σχήματα 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος για έναν τέτοιο μετατροπέα.

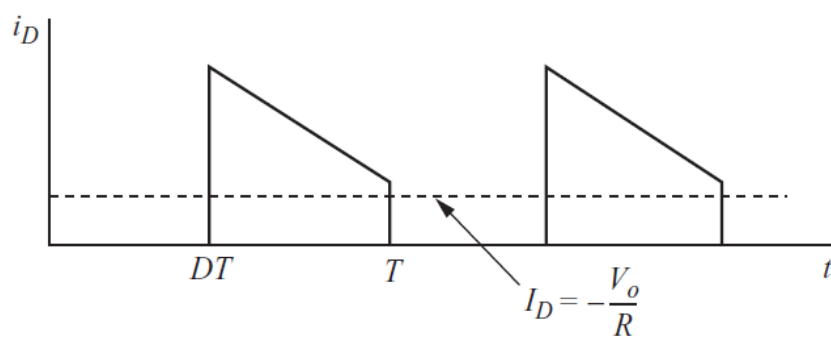


Σχήμα 3.9: Ρεύμα Επαγωγέα

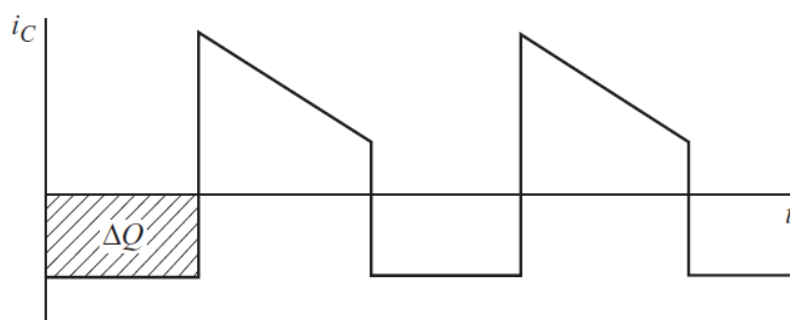




Σχήμα 3.10: Τάση Επαγωγέα



Σχήμα 3.11: Ρεύμα Διόδου



Σχήμα 3.12: Ρεύμα Επαγωγέα

Είναι αξιοσημείωτο ότι η πηγή δεν συνδέεται ποτέ άμεσα με το φορτίο σε έναν μετατροπέα υποβιβασμού-ανύψωσης. Γίνεται αποθήκευση ενέργειας στον επαγωγέα όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, ενώ μεταφέρεται ενέργεια στο φορτίο όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός. Έτσι, ο μετατροπέας αυτός ονομάζεται και έμμεσος μετατροπέας.

Η ενέργεια που καταναλώνεται από το φορτίο πρέπει να είναι ίση με αυτή που παρέχεται από την πηγή, όπου:

$$P_0 = \frac{V_0^2}{R}$$

$$P_S = V_S I_S$$

$$\frac{V_0^2}{R} = V_S I_S$$

Το μέσο ρεύμα της πηγής σχετίζεται με το μέσο ρεύμα του επαγωγέα με τη σχέση:

$$I_S = I_L D$$

Άρα

$$\frac{V_0^2}{R} = V_S I_L D \quad (3.47)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.56 και λύνοντας ως προς  $I_L$ :

$$I_L = \frac{V_0^2}{V_S R D} = \frac{P_0}{V_S D} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} \quad (3.48)$$

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του ρεύματος του επαγωγέα προσδιορίζονται επομένως ως εξής:

$$I_{max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} + \frac{V_S D T}{2L} \quad (3.49)$$

$$I_{min} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} - \frac{V_S D T}{2L} \quad (3.50)$$

Για συνεχές ρεύμα, το ρεύμα του επαγωγέα πρέπει να παραμένει θετικό. Έτσι ώστε να καθοριστεί το όριο μεταξύ συνεχούς και μη συνεχούς ρεύματος, η τιμή του  $I_{min}$  ορίζεται μηδέν οπότε:

$$(Lf)_{min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2}$$

$$L_{min} = \frac{(1 - D)^2 R}{2f}$$

(3.51)

όπου  $f$  είναι η συχνότητα του διακόπτη.

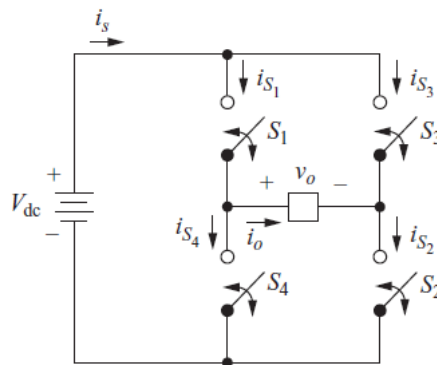


## 4. Αντιστροφείς

### 4.1 Εισαγωγή

Οι αντιστροφείς είναι κυκλώματα που μετατρέπουν το συνεχές σε εναλλασσόμενο ρεύμα και πιο συγκεκριμένα, μεταφέρουν ισχύ από μία πηγή συνεχούς ρεύματος σε ένα φορτίο εναλλασσόμενου. Οι ελεγχόμενοι, πλήρους κύματος μετατροπείς τύπου γέφυρας μπορούν να συμπεριφερθούν σαν αντιστροφείς σε ορισμένες περιπτώσεις, αλλά σε αυτές πρέπει να υπάρχει εκ των προτέρων μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Σε άλλες εφαρμογές, το ζητούμενο είναι να δημιουργηθεί μία εναλλασσόμενη τάση όταν μόνο συνεχής τάση είναι διαθέσιμη. Οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως τα κοινά UPS και η τροφοδοσία συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω μίας κινητής και ανεξάρτητης μπαταρίας.

#### 4.1.1 Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας

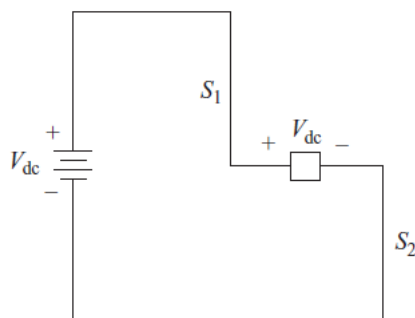


Σχήμα 4.1: Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας

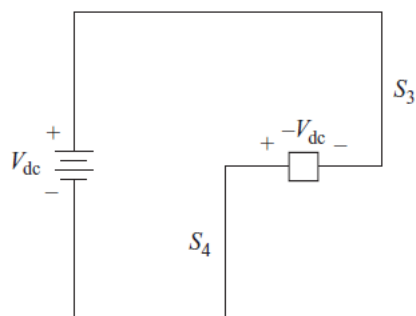
Ο μετατροπέας πλήρους γέφυρας του σχήματος 4.1 είναι το βασικό κύκλωμα που χρησιμοποιείται για να μετατραπεί το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Σύμφωνα με αυτό, μία εναλλασσόμενη έξοδος δημιουργείται από μία συνεχή είσοδο, ανοίγοντας και κλείνοντας τους διακόπτες με την κατάλληλη σειρά. Η τάση εξόδου  $V_o$  μπορεί να είναι  $+V_{dc}$ ,  $-V_{dc}$ , ή μηδέν, ανάλογα με το ποιοι διακόπτες είναι κλειστοί. Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν το ισοδύναμο κύκλωμα για διάφορους συνδυασμούς καταστάσεως των διακοπών.

Κλειστοί Διακόπτες	Τάση Εξόδου $V_0$
$S_1$ και $S_2$	$+V_{dc}$
$S_3$ και $S_4$	$-V_{dc}$
$S_1$ και $S_3$	0
$S_2$ και $S_4$	0

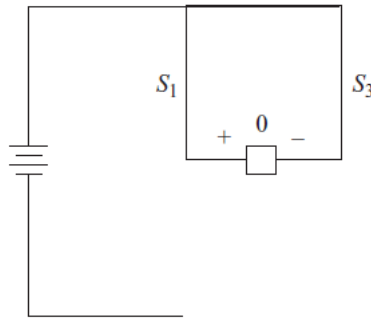
Σχήμα 4.2: Συνδιασμοί Καταστάσεως Διακοπών και Τάση Εξόδου



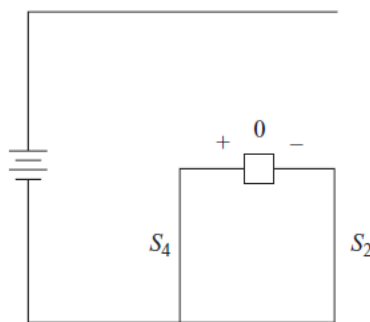
Σχήμα 4.3: Κλειστοί Διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$



Σχήμα 4.4: Κλειστοί Διακόπτες  $S_3$  και  $S_4$



Σχήμα 4.5: Κλειστοί Διακόπτες  $S_1$  και  $S_3$



Σχήμα 4.6: Κλειστοί Διακόπτες  $S_2$  και  $S_4$

Σημειώνεται ότι  $S_1$  και  $S_4$  δεν πρέπει να είναι κλειστοί ταυτόχρονα, όπως και οι  $S_2$  και  $S_3$ , αλλιώς θα υπήρχε βραχυκύκλωμα κατά μήκος της πηγής συνεχούς ρεύματος. Οι πραγματικοί διακόπτες δεν ανοίγουν ή κλείνουν στιγμιαία, επομένως οι χρόνοι που μεσολαβούν για την αλλαγή κατάστασης ενός διακόπτη πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για να επιτευχθεί ο έλεγχός τους. Παραμέληση των χρόνων που ένας διακόπτης είναι σε θέση on θα έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ένα μικρό σφάλμα κατά μήκος της πηγής συνεχούς ρεύματος. Ο χρόνος που απαιτείται για τις αλλαγές κατάστασης ενός διακόπτη ονομάζεται κενός χρόνος.

#### 4.1.2 Αντιστροφείας Τετραγωνικού Κύματος

Η απλούστερη διακοπτική λειτουργία για τον μετατροπέα πλήρους γέφυρας παράγει μία τάση εξόδου τετραγωνικού κύματος. Οι διακόπτες συνδέουν το φορτίο με  $+V_{dc}$  όταν  $S_1$  και  $S_2$  είναι κλειστοί ή με  $-V_{dc}$  όταν  $S_3$  και

$S_4$  είναι κλειστοί. Η περιοδική αλλαγή της τάσης του φορτίου μεταξύ  $+V_{dc}$  και  $-V_{dc}$  παράγει μια τάση τετραγωνικού κύματος κατά μήκος του φορτίου. Αν και η μεταβαλλόμενη έξοδος δεν είναι ημιτονοειδής, μπορεί να αποτελεί μια επαρκή κυματομορφή εναλλασσόμενου για κάποιες εφαρμογές.

Η κυματομορφή του ρεύματος στο φορτίο εξαρτάται από τα συστατικά του φορτίου. Για το φορτίο αντίστασης, η κυματομορφή του ρεύματος ταυτίζεται με το σχήμα της τάσης εξόδου. Ένα επαγωγικό φορτίο θα έχει ρεύμα το οποίο θα έχει μια πιο ημιτονοειδή μορφή σε σχέση με την τάση, εξαιτίας της ικανότητας της επαγωγής να φιλτράρει. Ένα τέτοιο φορτίο βέβαια δημιουργεί ορισμένες δυσκολίες στη σχεδίαση των διακοπών σε κύκλωμα πλήρους γέφυρας, επειδή τα ρεύματα στους διακόπτες πρέπει να είναι αμφίδρομα.

Για ένα φορτίο RL σε σειρά και μια τάση εξόδου τετραγωνικού κύματος, γίνεται η υπόθεση ότι οι διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  του σχήματος 4.1 είναι κλειστοί τη χρονική στιγμή  $t=0$ . Η τάση κατά μήκος του φορτίου είναι  $+V_{dc}$  και το ρεύμα ξεκινά να αυξάνεται στο φορτίο και στους διακόπτες αυτούς. Το ρεύμα εκφράζεται ως το άθροισμα των εξαναγκασμένων και φυσικών αποκρίσεων:

$$\begin{aligned} i_0(t) &= i_f(t) + i_n(t) \\ &= \frac{V_{dc}}{R} + Ae^{-t/\tau} \end{aligned} \quad (4.1)$$

για  $0 \leq t \leq T/2$ ,  $\tau = L/R$ , ενώ  $A$  είναι μια σταθερά που υπολογίζεται από τις αρχικές συνθήκες.

Όταν  $t = T/2$ , οι διακόπτες  $S_1$  και  $S_2$  είναι ανοιχτοί και οι διακόπτες  $S_3$  και  $S_4$  είναι κλειστοί. Η τάση κατά μήκος του RL φορτίου γίνεται  $-V_{dc}$  και το ρεύμα έχει τη μορφή:

$$i_0(t) = \frac{-V_{dc}}{R} + Be^{-(t-T/2)/\tau} \quad (4.2)$$

Για

$$T/2 \leq t \leq T$$

Όπου  $B$  μια σταθερά που καθορίζεται από τις αρχικές συνθήκες.

Όταν το κύκλωμα ενεργοποιείται για πρώτη φορά και το αρχικό ρεύμα του επαγωγέα είναι μηδέν, ένα μεταβατικό γεγονός συμβαίνει πριν το ρεύμα του φορτίου φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση. Σε αυτή, το  $i_0$  είναι περιοδικό και συμμετρικό γύρω από το μηδέν, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Για  $0 \leq t \leq T/2$  η αρχική συνθήκη της εξίσωσης του  $i_0(t)$  θα είναι  $I_{min}$ , ενώ για



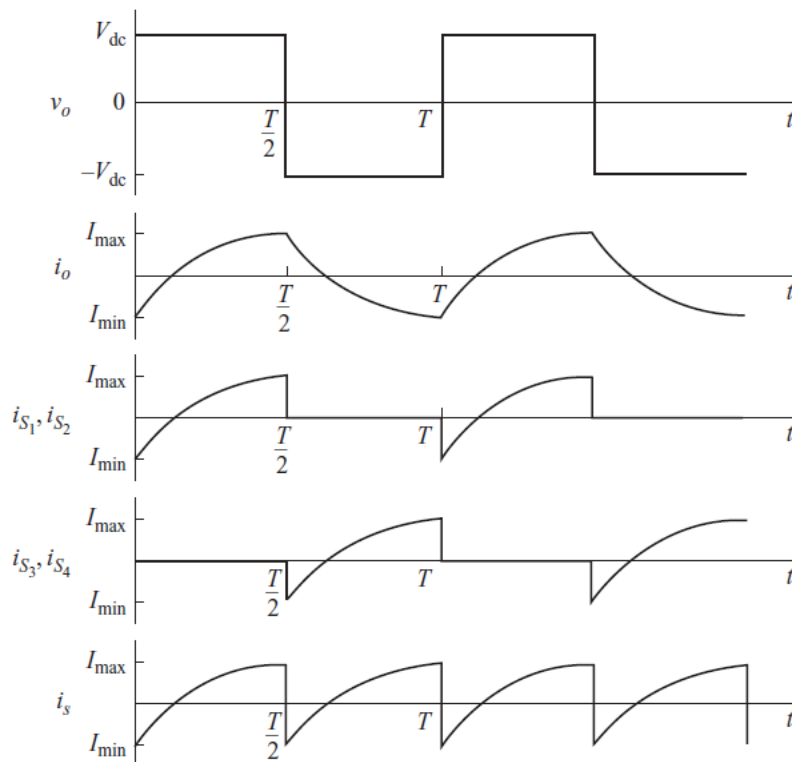
$T/2 \leq t \leq T$  η αρχική συνθήκη του θα είναι  $I_{max}$ . Για τον πρώτο περιορισμό, τοποθετώντας  $i_0(t)t = 0$  στην εξίσωση 4.2 προκύπτει:

$$i_0(0) = \frac{V_{dc}}{R} + Ae^0 = I_{min}$$

ή

(4.3)

$$A = I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}$$



Σχήμα 4.7: Τάση Εξόδου Τετραγωνικού Κύματος και Κυματομορφή Ρεύματος Σταθερής Κατάστασης για RL Φορτίο

Με το ίδιο τρόπο υπολογίζεται και το Β για  $t = T/2$ .

$$i_0(T/2) = \frac{-V_{dc}}{R} + B e^0 = I_{max}$$

ή (4.4)

$$B = I_{max} + \frac{V_{dc}}{R}$$

Στη μόνιμη κατάσταση, οι κυματομορφές του ρεύματος γίνονται:

$$i_0(t) = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-t/\tau} & \text{για } 0 \leq t \leq T/2 \\ \frac{-V_{dc}}{R} + \left(I_{max} + \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-(t-T/2)/\tau} & \text{για } T/2 \leq t \leq T \end{cases}$$

(4.5)

Στο πρώτο μέλος αυτής της εξίσωσης αν  $t = T/2$ :

$$i(T/2) = I_{max} = \frac{V_{dc}}{R} + \left(I_{min} - \frac{V_{dc}}{R}\right) e^{-T/2\tau}$$

Λόγω συμμετρίας,

$$I_{min} = -I_{max}$$

Άρα με αντικατάσταση του  $I_{min}$  με το  $-I_{max}$ :

$$I_{max} = -I_{min} = \frac{V_{dc}}{R} \left( \frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right)$$

(4.6)

Συμπερασματικά, η εξίσωση του  $i_0(t)$  και η εξίσωση του  $I_{max}$  περιγράφουν το ρεύμα σε ένα φορτίο RL στη μόνιμη κατάσταση, όταν εφαρμόζεται μία τάση τετραγωνικού κύματος. Το σχήμα 4.7 δείχνει το ρεύμα που προκύπτει στο φορτίο, στην πηγή και στους διακόπτες.

Η ισχύς που απορροφάται από το φορτίο μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση  $I_{rms}^2 R$ , στην οποία ο υπολογισμός του ρεύματος του φορτίου  $rms$  θεωρείται μέγεθος δεδομένο. Οι υπολογισμοί είναι δυνατόν να γίνουν απλούστεροι εάν εκμεταλλευτεί κανείς τη συμμετρία της κυματομορφής. Αφού το διάγραμμα του ρεύματος επαναλαμβάνεται κάθε μισή περίοδο, μόνο το πρώτο μισό της κάθε περιόδου είναι αναγκαίο να υπολογιστεί:

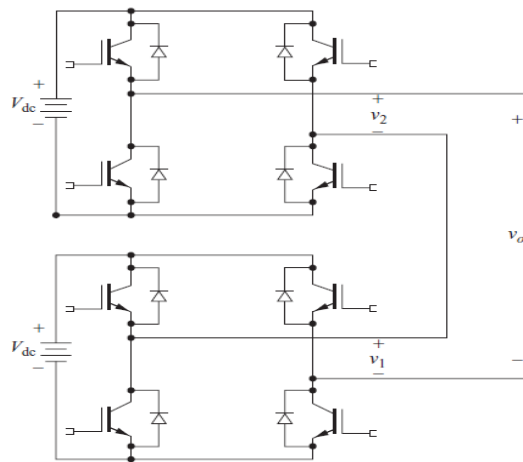
$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) d(t)} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left[ \frac{V_{dc}}{R} + \left( I_{min} - \frac{V_{dc}}{R} \right) e^{-t/\tau} \right]^2 d(t)} \quad (4.7)$$

Εάν οι διακόπτες είναι ιδανικοί, η ισχύς που παρέχεται από την πηγή πρέπει να είναι ίση με αυτή που καταναλώνεται από το φορτίο. Η ισχύς από μια πηγή συνεχούς τάσης προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$P_{dc} = V_{dc} I_s \quad (4.8)$$

#### 4.1.3 Αντιστροφείς Πολλαπλών Επιπέδων

Ο αντιστροφέας γέφυρας τύπου H παράγει τάσεις εξόδου  $V_{dc}$ , 0 και  $-V_{dc}$ . Η βασική διακοπτική μεθοδολογία της γέφυρας H μπορεί να επεκταθεί σε άλλα κυκλώματα τα οποία μπορούν να παράξουν επιπρόσθετα επίπεδα τάσεων εξόδου.



Σχήμα 4.8: Αντιστροφέας με Δύο Πηγές Συνεχούς Ρεύματος, Κάθε μία με Γέφυρα Τύπου H Συγκροτούμενη από IGBT's.

Αυτές οι πολυεπίπεδες τάσεις εξόδου προσεγγίζουν αρκετά μια ημιτονοειδή μορφή και έτσι μειώνουν τις αρμονικές. Ο πολυεπίπεδος

αντιστροφείας είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπως μεταβλητής ταχύτητας μεταδότες κίνησης και διασυνδεδεμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

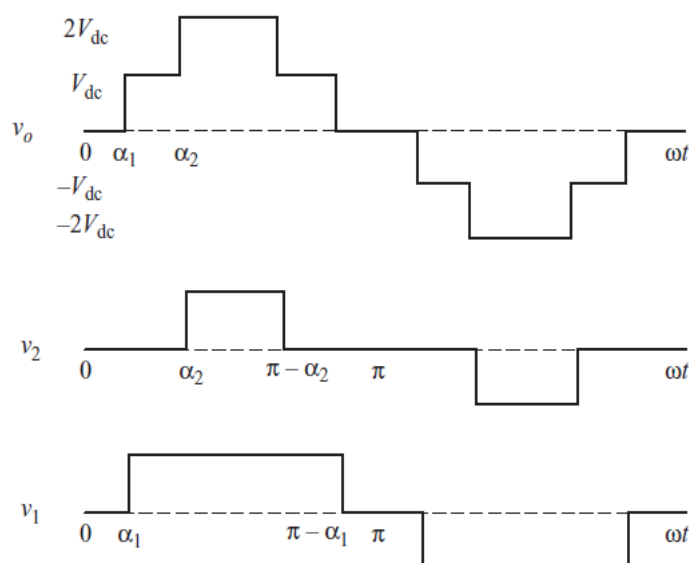
#### 4.1.4 Πολυεπίπεδοι Μετατροπείς με Ανεξάρτητες Πηγές DC

Μια μέθοδος πολυεπίπεδου αντιστροφείας χρησιμοποιεί πηγές συνεχούς ρεύματος, η κάθε μία με μία γέφυρα τύπου H. Ένα κύκλωμα με δύο πηγές συνεχούς ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 4.8. Η έξοδος καθεμιάς από τις γέφυρες τύπου H είναι  $+V_{dc}$ , 0 ή  $-V_{dc}$ . Η συνολική στιγμιαία τάση  $v_o$  στην έξοδο του πολυεπίπεδου μετατροπέα είναι ο καθένας συνδιασμός από τις ανεξάρτητες τάσεις στις γέφυρες. Έτσι, για ένα αντιστροφή δύο πηγών,  $v_o$  μπορεί να είναι οποιοδήποτε από τα πέντε επίπεδα  $+2V_{dc}$ ,  $V_{dc}$ , 0,  $-V_{dc}$ , ή  $-2V_{dc}$ .

Οι σειρές Fourier για τη συνολική τάση εξόδου  $v_o$  για κύκλωμα δύο πηγών, περιλαμβάνουν μόνο τις μονές αρμονικές και είναι:

$$v_o(t) = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1,3,5,7,\dots}^{\infty} [\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2)] \frac{\sin(n\omega_0 t)}{n} \quad (4.9)$$

Όπου  $\alpha$  η γωνία καθυστέρησης.



Σχήμα 4.9: Τάση Εξόδου για Κάθε Η Γέφυρα και Συνολική Τάση για τον Αντιστροφέα Δύο Πηγών του Σχήματος 4.8.

Οι συντελεστές Fourier για αυτές τις σειρές είναι:

$$V_{\pi} = \frac{4V_{dc}}{n\pi} [\cos(na_1) + \cos(na_2)] \quad (4.10)$$

Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους  $M$  είναι ο λόγος του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου προς το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας τετραγωνικού παλμού εύρους  $2V_{dc}$ , το οποίο είναι

$$2 \left( \frac{4V_{dc}}{\pi} \right).$$

$$M_1 = \frac{V_1}{2 \left( \frac{4V_{dc}}{\pi} \right)} = \frac{\cos(a_1) + \cos(a_2)}{2} \quad (4.11)$$

Μερικές αρμονικές μπορούν να εξαλειφθούν από την κυματομορφή της τάσης εξόδου μέσω κατάλληλης επιλογής των  $a_1$  και  $a_2$  στην εξίσωση του  $V_{\pi}$ . Για τον μετατροπέα δύο πηγών, το αρμονικό μέγεθος μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας γωνίες καθυστέρησης ώστε:

$$\cos(ma_1) + \cos(ma_2) = 0$$

#### 4.1.5 Έξοδος Διαμορφωμένου Πλάτους Παλμού (Pulse-Width-Modulated Output ή PWM)

Η διαμόρφωση του πλάτους του παλμού παρέχει ένα τρόπο μείωσης της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος του φορτίου. Η αφιλτράριστη έξοδος διαμορφωμένου πλάτους παλμού θα έχει μια σχετικά υψηλή συνολική αρμονική παραμόρφωση, αλλά οι αρμονικές θα είναι σε πολύ υψηλότερες συχνότητες, κάνοντας έτσι το φιλτράρισμα ευκολότερο.

Σε διαμορφωμένο πλάτος παλμού, το εύρος της τάσης εξόδου μπορεί να ελεγχθεί με ρύθμιση των κυματομορφών. Η μείωση των αρμονικών και ο έλεγχος του εύρους της τάσης εξόδου είναι δύο αξιόλογα πλεονεκτήματα της

εξόδου διαμορφωμένου πλάτους παλμού. Μειονεκτήματα αποτελούν τα πιο περίπλοκα κυκλώματα ελέγχου για τους διακόπτες και οι αυξημένες απώλειες λόγω της πιο συχνής κίνησης των διακοπών.

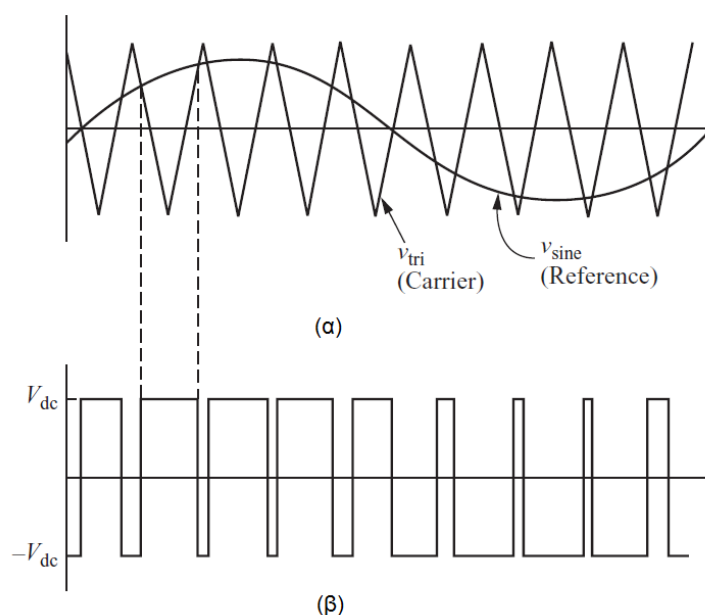
Ο έλεγχος των διακοπών για ημιτονοειδή έξοδο διαμορφωμένου πλάτους παλμού απαιτεί ένα σήμα αναφοράς (reference signal), που κάποιες φορές ονομάζεται και σήμα διαμόρφωσης ή ελέγχου, το οποίο είναι ένα ημίτονο σε αυτή την περίπτωση. Επιπλέον, απαιτεί και ένα σήμα φορέα (carrier signal), το οποίο είναι ένα τριγωνικό σήμα που ελέγχει τη συχνότητα αλλαγής καταστάσεων του διακόπτη.

#### ι. Διπολική Διακοπτική Αλλαγή

Το σχήμα 4.10 απεικονίζει την αρχή της ημιτονοειδούς διπολικής διαμόρφωσης του πλάτους παλμού. Το (α) διάγραμμα απεικονίζει ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς και ένα τριγωνικό σήμα φορέα. Όταν η στιγμιαία τιμή του ημιτόνου αναφοράς είναι μεγαλύτερη από τον τριγωνικό φορέα, η έξοδος είναι στο  $+V_{dc}$ , ενώ όταν αυτή η τιμή αναφοράς είναι μικρότερη από τον φορέα, η έξοδος είναι στο  $-V_{dc}$ .

$$v_o = +V_{dc} \quad \text{για } v_{sine} > v_{tri} \quad (4.12)$$

$$v_o = -V_{dc} \quad \text{για } v_{sine} < v_{tri} \quad (4.13)$$



#### Σχήμα 4.10: Διπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού

α) Ημιτονοειδές Σήμα Αναφοράς και Τριγωνικός Φορέας,

β) Έξοδος  $+V_{dc}$  όταν  $v_{sine} > v_{tri}$  και  $-V_{dc}$  όταν  $v_{sine} < v_{tri}$

Αυτή η μορφή της διαμόρφωσης πλάτους παλμού είναι διπολική επειδή η έξοδος εναλλάσσει μεταξύ αρνητικών και θετικών τιμών την συνεχή τάση της πηγής.

Η διάταξη των διακοπών, η οποία θα επιτύχει διπολική λειτουργία τους χρησιμοποιώντας μετατροπέα πλήρους γέφυρας, καθορίζεται συγκρίνοντας το στιγμιαίο σήμα αναφοράς και το σήμα φορέα:

$S_1$  και  $S_2$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} > v_{tri}$  ( $v_0 = +V_{dc}$ )

$S_3$  και  $S_4$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} < v_{tri}$  ( $v_0 = -V_{dc}$ )

#### ii. Μονοπολική Διακοπτική Λειτουργία

Σε μια μονοπολική διάταξη διακοπών για διαμόρφωση του πλάτους παλμού, η έξοδος αλλάζει είτε από υψηλή τιμή στο μηδέν είτε από χαμηλή τιμή στο μηδέν, σε αντίθεση με τη διπολική όπου άλλαζε από ψηλή σε χαμηλή τιμή. Μία μονοπολική διάταξη διακοπών ελέγχεται όπως δείχνει το σχήμα 4.1 παρακάτω:

$S_1$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} > v_{tri}$

$S_2$  είναι σε λειτουργία όταν  $-v_{sine} < v_{tri}$

$S_3$  είναι σε λειτουργία όταν  $-v_{sine} > v_{tri}$

$S_4$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} < v_{tri}$

Σημειώνεται ότι τα ζεύγη διακοπών  $(S_1, S_4)$  και  $(S_2, S_3)$  είναι συμπληρωματικά, δηλαδή όταν ο ένας διακόπτης του ενός ζεύγους είναι κλειστός, ο άλλος είναι ανοιχτός. Οι τάσεις  $v_a$  και  $v_b$  του σχήματος 4.11 εναλλάσσονται μεταξύ  $+V_{dc}$  και μηδέν. Η τάση εξόδου  $v_o = V_{ab} = v_a - v_b$  φαίνεται στο σχήμα 4.12.

Μια άλλη μονοπολική διάταξη έχει μόνο ένα ζεύγος από διακόπτες που λειτουργούν στη συχνότητα του σήματος φορέα, ενώ το άλλο ζεύγος λειτουργεί στη συχνότητα του σήματος αναφοράς. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ύπαρξη δυο διακοπών υψηλής συχνότητας και δύο χαμηλής συχνότητας. Σε αυτή θα ισχύουν:

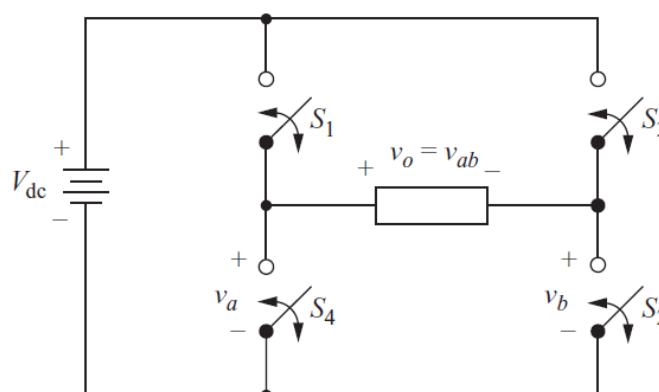
$S_1$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} > v_{tri}$  (υψηλή συχνότητα)

$S_4$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} < v_{tri}$  (υψηλή συχνότητα)

$S_2$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} > 0$  (χαμηλή συχνότητα)

$S_3$  είναι σε λειτουργία όταν  $v_{sine} < 0$  (χαμηλή συχνότητα)

Εναλλακτικά, οι  $S_2$  και  $S_3$  θα μπορούσαν να είναι οι διακόπτες υψηλής συχνότητας και οι  $S_1$  και  $S_4$  οι διακόπτες χαμηλής συχνότητας.

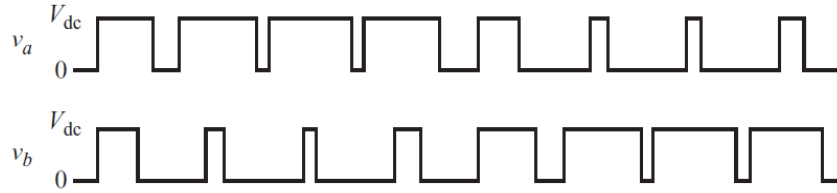


Σχήμα 4.11: Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας για Μονοπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού





Σχήμα 4.12: Σήμα Αναφοράς και Σήμα Φορέας

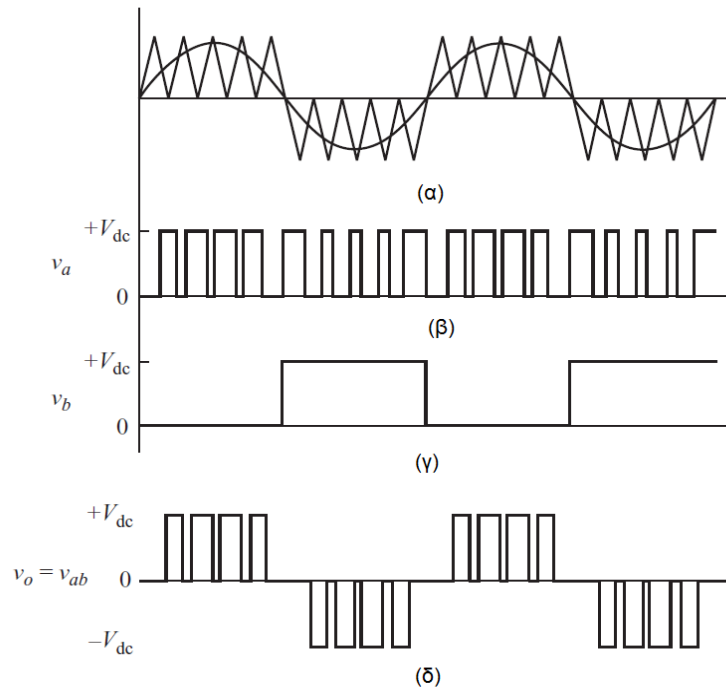


Σχήμα 4.13: Τάσεις Γέφυρας  $v_a$  και  $v_b$



Σχήμα 4.14: Τάση Εξόδου

#### 4.1.6. Ορισμοί της Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμού



Σχήμα 4.15: Μονοπολική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού με Διακόπτες Υψηλής και Χαμηλής Συχνότητας:

α) Σήματα αναφοράς και φορέας

β)  $v_a$  (σχήμα 4.11)

γ)  $v_b$

δ) Έξοδος  $v_a - v_b$

α. Δείκτης Διαμόρφωσης Συχνότητας  $m_f$ . Η σειρά Fourier της τάσης εξόδου, κατά τη διαμόρφωση πλάτους παλμού, έχει μια θεμελιώδη συχνότητα η οποία είναι η ίδια με του σήματος αναφοράς. Τα μεγέθη κάποιων αρμονικών είναι αρκετά μεγάλα, τόσο που κάποιες φορές υπερβαίνουν τη θεμελιώδη συχνότητα. Από την άλλη πλευρά, επειδή αυτές οι αρμονικές βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες, ένα απλό βαθυπερατό φίλτρο μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματικό για την αφαίρεσή τους. Ο δείκτης διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  ορίζεται ως ο λόγος των συχνοτήτων των σημάτων που είναι φορείς και αυτών που είναι σήματα αναφοράς,

$$m_f = \frac{f_{carrier}}{f_{reference}} = \frac{f_{tri}}{f_{sine}} \quad (4.14)$$

Αυξάνοντας τη συχνότητα του φορέα (αυξάνοντας δηλαδή τον λόγο  $m_f$ ) αυξάνονται οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές. Ένα μειονέκτημα των υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων είναι αυξημένες απώλειες στους διακόπτες που χρησιμοποιούνται για να λειτουργήσει ο αντιστροφέας.

**β. Δείκτης Διαμόρφωσης Πλάτους  $m_a$ .** Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως ο λόγος των πλατών των σημάτων αναφοράς και των σημάτων που είναι φορείς:

$$m_a = \frac{V_{m,reference}}{V_{m,carrier}} = \frac{V_{m,sine}}{V_{m,tri}} \quad (4.15)$$

Εάν  $m_a \leq 1$ , το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας της τάσης εξόδου  $V_1$  είναι γραμμικά ανάλογο του  $m_a$ . Έτσι ισχύει:

$$V_1 = m_a V_{dc} \quad (4.16)$$

Συμπερασματικά, το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας της εξόδου στη διαμόρφωση πλάτους παλμού ελέγχεται από τον  $m_a$ . Αυτό είναι ζωτικής σημασίας στην περίπτωση μιας ακανόνιστης συνεχούς τάσης της πηγής επειδή η τιμή του δείκτη αυτού μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να αναπληρώνει τις διακυμάνσεις της πηγής αυτής, παράγοντας έτσι μία έξοδο σταθερού πλάτους. Εναλλακτικά, ο  $m_a$  μπορεί να ποικίλει έτσι ώστε να μεταβάλλεται το πλάτος της εξόδου. Εάν είναι μεγαλύτερος του 1, το πλάτος της εξόδου αυξάνει όταν αυξάνεται και αυτός, αλλά όχι γραμμικά.

**γ. Διακόπτες.** Οι διακόπτες, σε κύκλωμα πλήρους γέφυρας, πρέπει να παρέχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν ρεύμα προς οποιαδήποτε κατεύθυνση κατά τη διαμόρφωση πλάτους παλμού, ακριβώς όπως γίνονταν και στη λειτουργία τετραγωνικού κύματος, ενώ παράλληλα δίοδοι ανατροφοδότησης είναι απαραίτητο να υπάρχουν στις συσκευές που λειτουργούν με διακόπτες. Μια άλλη συνέπεια της χρήσης πραγματικών διακοπών είναι ότι δεν ανοίγουν ή κλείνουν στιγμιαία. Επομένως, είναι αναγκαίο κατά τον έλεγχο να περιλαμβάνονται και χρόνοι για αλλαγές καταστάσεων των διακοπών, όπως ακριβώς συμβαίνει και στον αντιστροφέα τετραγωνικού κύματος.

**δ. Τάση Αναφοράς.** Η ημιτονοειδής τάση αναφοράς πρέπει να δημιουργείται μέσα στο κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα ή να παίρνεται από μια εξωτερική αναφορά. Είναι πιθανό να φαίνεται ότι η λειτουργία του αντιστροφέα τύπου γέφυρα είναι αχρείαστη, επειδή πρέπει να υπάρχει μια ημιτονοειδής τάση πριν η γέφυρα λειτουργήσει για να παράξει μια ημιτονοειδή έξοδο. Ωστόσο είναι πολύ μικρή η απαιτούμενη ενέργεια από το σήμα

αναφοράς. Η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο παρέχεται από τη συνεχούς τάσης πηγή και αυτός είναι ο σκοπός του αντιστροφέα. Το σήμα αναφοράς δεν περιορίζεται μόνο σε ημιτονοειδή μορφή αλλά και σε άλλες κυματομορφές, οι οποίες μπορούν να επιτελέσουν το ρόλο του σήματος αυτού.

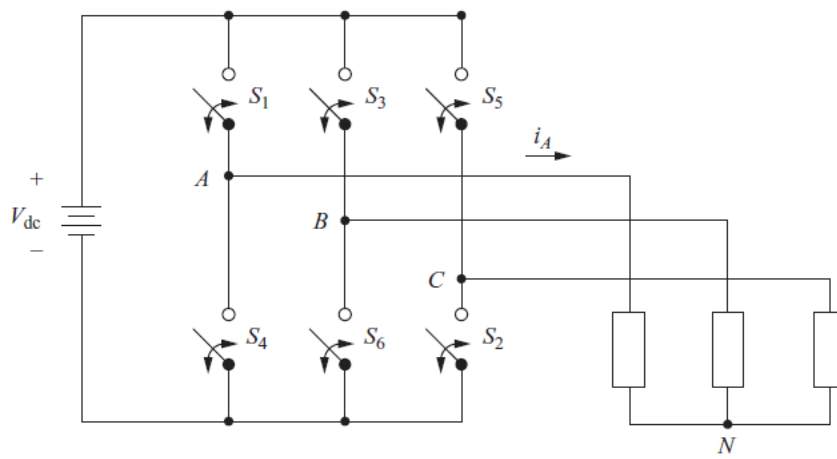
## 4.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς

### 4.2.1 Αντιστροφέας Έξι Βημάτων

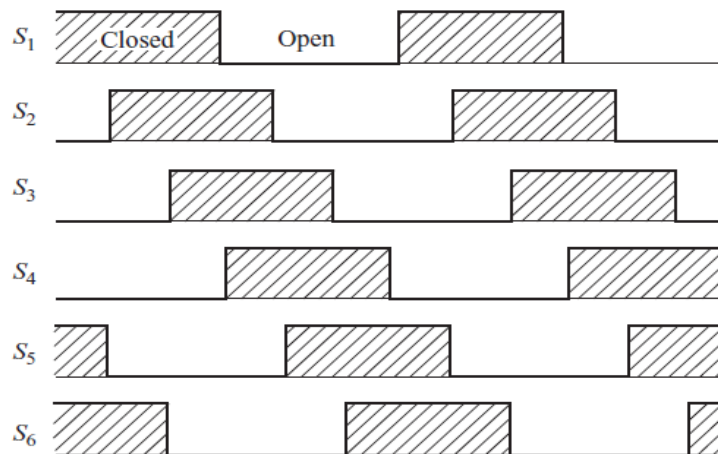
Το σχήμα 4.16 δείχνει ένα κύκλωμα το οποίο παράγει μια τριφασική εναλλασσόμενη έξοδο από μια συνεχή είσοδο. Μια σημαντική εφαρμογή αυτού του κυκλώματος αποτελεί ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών γεννητριών, όπου η συχνότητα στην έξοδο ποικίλλει. Οι διακόπτες ανοιγοκλείνουν με τη σειρά που δείχνει το σχήμα 4.17.

Κάθε διακόπτης έχει κύκλο λειτουργίας 50% (δεν επιτρέπει κενούς χρόνους) και μια διακοπτική ενέργεια συμβαίνει κάθε  $T/6$  σε μονάδες χρόνου ή κάθε 60 μοίρες σε μονάδες γωνίας. Σημειώνεται ότι οι διακόπτες  $S_1$  και  $S_4$  ανοίγουν και κλείνουν αντίθετα ο ένας με τον άλλον, όπως ακριβώς κάνουν και τα διακοπτικά ζεύγη  $(S_2, S_5)$  και  $(S_3, S_6)$ . Όπως με τον επαγωγέα μονής φάσης, αυτά τα ζεύγη διακοπών πρέπει να συντονιστούν έτσι ώστε να μην είναι κλειστά ταυτόχρονα, γεγονός το οποίο θα οδηγούσε σε ένα μικρό κύκλωμα κατά μήκος της πηγής. Με αυτή τη διάταξη, οι στιγμιαίες τάσεις  $v_{A0}$ ,  $v_{B0}$  είναι  $+V_{dc}$  ή μηδέν, ενώ οι πολικές τάσεις  $v_{AB}$ ,  $v_{BC}$  και  $v_{CA}$  είναι  $+V_{dc}$ , μηδέν ή  $-V_{dc}$ . Η αλληλουχία διακοπών του σχήματος 4.17 παράγει τις τάσεις εξόδου που φαίνονται στο σχήμα 4.18.

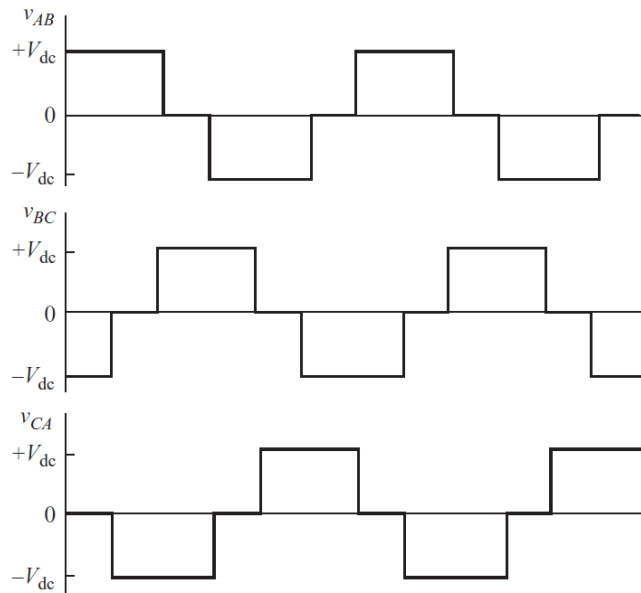
Το τριφασικό φορτίο που είναι συνδεδεμένο στην τάση εξόδου μπορεί να είναι συνδεδεμένο σε διάταξη τριγώνου ή αστέρα με μη γειωμένο ουδέτερο. Για ένα φορτίο συνδεδεμένο με αυτόν τον τρόπο, το οποίο είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος σύνδεσής του, η τάση κατά μήκος κάθε φάσης του φορτίου είναι μια φασική τάση, η οποία φαίνεται στο σχήμα 4.19. Εξαιτίας των έξι βημάτων στις κυματομορφές εξόδου για την τάση αυτή, τα οποία προέρχονται από τις έξι αλλαγές των διακοπών ανά περίοδο, το κύκλωμα αυτό ονομάζεται αντιστροφέας έξι βημάτων.



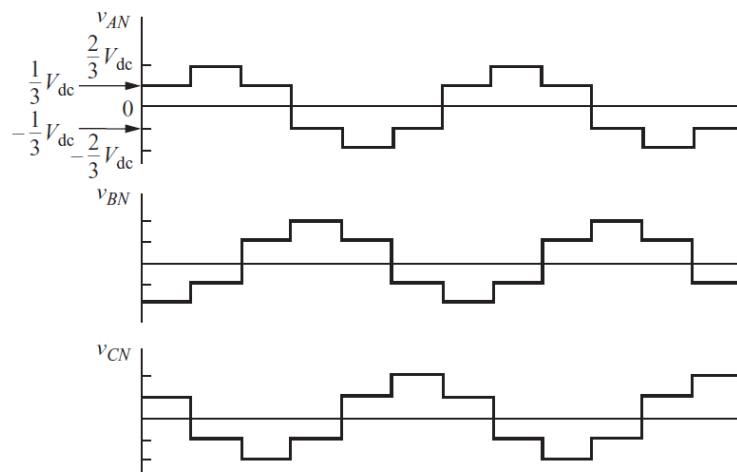
Σχήμα 4.16: Τριφασικός Αντιστροφέας



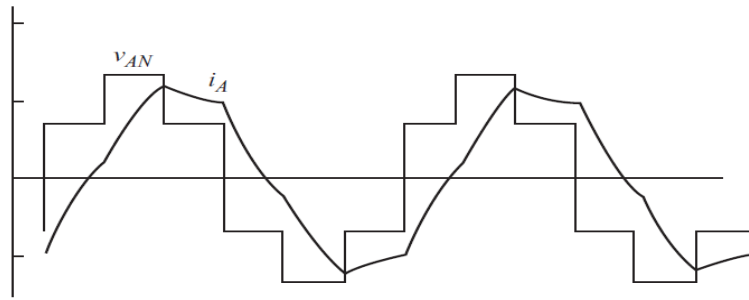
Σχήμα 4.17: Διακοπτική Αλληλουχία Αντιστροφέα Έξι Βημάτων



Σχήμα 4.18: Πολικές Τάσεις Εξόδου



Σχήμα 4.19: Φασικές Τάσεις για Μη Γειωμένο Φορτίου με Σύνδεση Υ



Σχήμα 4.20: Ρεύμα στη Φάση Α για Φορτίο RL

Η σειρά Fourier για την τάση εξόδου έχει μια θεμελιώδη συχνότητα ίση με αυτή του διακόπτη. Οι αρμονικές συχνότητες είναι της τάξης  $6k + 1$  για  $k = 1, 2, \dots$  ( $n = 5, 7, 11, 13 \dots$ ). Η τρίτη αρμονική και τα παράγωγα αυτής δεν υπάρχουν και ίδιες αρμονικές επίσης δεν υπάρχουν. Για μια τάση εισόδου  $V_{dc}$ , η έξοδος για ένα μη γειωμένο συνδεδεμένο με μορφή αστέρα φορτίο έχει τους ακόλουθους συντελεστές Fourier:

$$V_{n,L-L} = \left| \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos\left(n\frac{\pi}{6}\right) \right|$$

$$V_{n,L-L} = \left| \frac{2V_{dc}}{3n\pi} \left[ 2 + \cos\left(n\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right|$$

$$\text{Για } n=1, 5, 7, 11, 13 \dots \dots \quad (4.17)$$

Ένα παράδειγμα φασικής τάσης και ρεύματος για ένα φορτίο RL συνδεδεμένου σε αστέρα φαίνεται στο σχήμα 4.20. Η συχνότητα εξόδου μπορεί να ελεγχθεί αλλάζοντας τη συχνότητα του διακόπτη. Το μέγεθος της τάσης εξόδου εξαρτάται από την τιμή της συνεχούς τάσης της πηγής και για να ελεγχθεί αυτή η τάση εξόδου του αντιστροφέα έξι βημάτων, η συνεχής τάση της πηγής θα πρέπει να προσαρμοστεί ανάλογα.

#### 4.2.2 Τριφασικοί Αντιστροφείς Προσαρμοσμένου Πλάτους Παλμού

Η διαμόρφωση του πλάτους του παλμού μπορεί να γίνει εξίσου εύκολα στους τριφασικούς ανορθωτές όπως με τους μονοφασικούς. Τα πλεονεκτήματα είναι τα ίδια, όπως οι μειωμένες απαιτήσεις φιλτραρίσματος για τη μείωση των αρμονικών και η ικανότητα ελέγχου του πλάτους της θεμελιώδους συχνότητας.

Ο τρόπος λειτουργίας των διακοπών σε αυτή την περίπτωση είναι όμοιος με αυτόν των μονοφασικών ανορθωτών. Η βασική αρχή είναι κάθε διακόπτης ελέγχεται συγκρίνοντας ένα ημιτονοειδές κύμα αναφοράς με ένα τριγωνικό κύμα φορέα. Η θεμελιώδης συχνότητα της εξόδου είναι ίδια με αυτή του κύματος αναφοράς, ενώ το πλάτος της εξόδου καθορίζεται από τα σχετικά πλάτη του κύματος αναφοράς και του κύματος φορέα.

Όπως και στην περίπτωση του τριφασικού αντιστροφέα έξι βημάτων, οι διακόπτες του σχήματος 4.16 ελέγχονται σε ζεύγη ( $S_1, S_4$ ), ( $S_2, S_5$ ) και ( $S_3, S_6$ ). Όταν σε ένα ζεύγος ένας διακόπτης είναι κλειστός, ο άλλος είναι ανοιχτός. Κάθε ζεύγος διακοπών απαιτεί ένα ξεχωριστό ημιτονοειδές κύμα αναφοράς. Τα τρία ημίτονα έχουν διαφορά 120 μοίρες έτσι ώστε να παράγεται μια ισορροπημένη τριφασική έξοδος. Το σχήμα 4.21 περιλαμβάνει ένα τριγωνικό φορέα και τα τρία κύματα αναφοράς. Οι έλεγχοι των διακοπών είναι τέτοιοι ώστε:

$S_1$  λειτουργεί όταν  $v_a > v_{tri}$

$S_2$  λειτουργεί όταν  $v_c > v_{tri}$

$S_3$  λειτουργεί όταν  $v_b > v_{tri}$

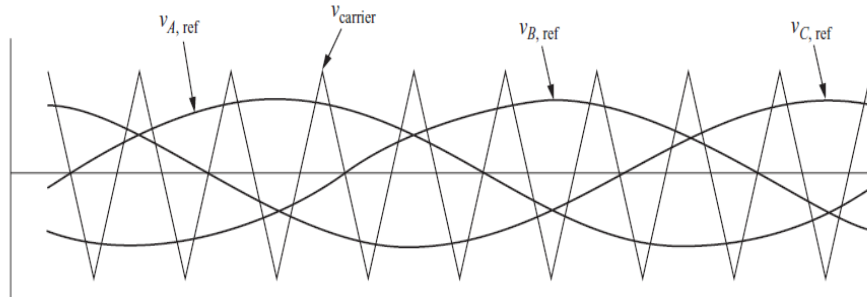
$S_4$  λειτουργεί όταν  $v_a < v_{tri}$

$S_5$  λειτουργεί όταν  $v_c < v_{tri}$

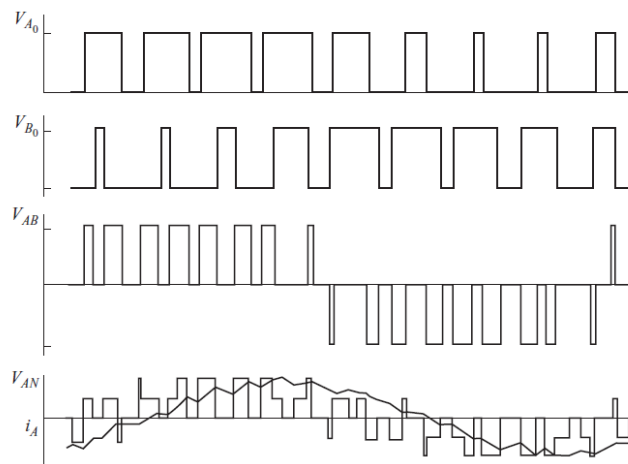
$S_6$  λειτουργεί όταν  $v_b < v_{tri}$

Οι αρμονικές ελαχιστοποιούνται εάν η συχνότητα του φορέα επιλέγεται να είναι μονό τριπλό πολλαπλάσιο της συχνότητας αναφοράς, το οποίο σημαίνει ότι θα είναι 3, 9, 15.... φορές η τιμή της αναφοράς. Στο σχήμα 4.22 παραθέτονται οι πολικές τάσεις εξόδου για ένα τριφασικό αντιστροφέα προσαρμοσμένου πλάτους παλμού.





Σχήμα 4.21: Κύμα Αναφοράς και Φορέας για Προσαρμοσμένο Πλάτος Παλμού με  $m_f = 9$  και  $m_a = 0,7$  για τον Τριφασικό Αντιστροφέα του Σχήματος 4.16.



Σχήμα 4.22: Κυματομορφές Εξόδου (ρεύμα φορτίου RL)

Οι συντελεστές Fourier για τις πολικές τάσεις της διάταξης τριφασικού αντιστροφέα με προσαρμοσμένο πλάτος παλμού σχετίζονται με αυτούς της μονοφασικής διπολικής διάταξης με προσαρμοσμένο πλάτος παλμού, άρα:

$$V_{n3} = \sqrt{A_{n3}^2 + B_{n3}^2} \quad (4.18)$$

όπου

$$A_{n3} = V_n \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)$$

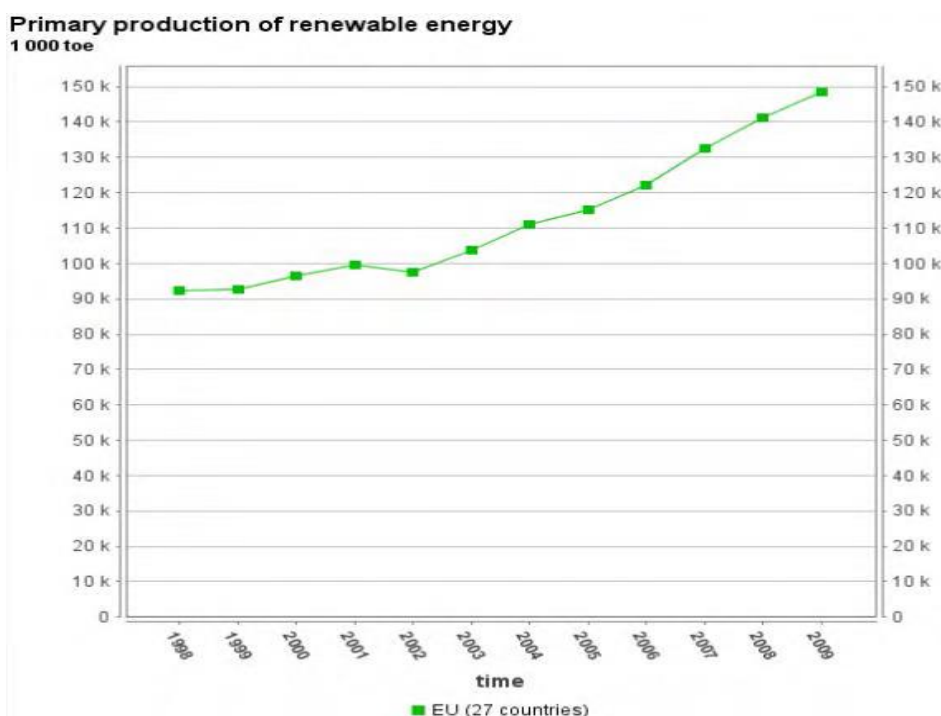
$$B_{n3} = V_n \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)$$



## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Στα τυπικά συστήματα ενέργειας, το σημαντικότερο ποσοστό ενέργειας το παράγουν μεγάλες θερμικές μονάδες παραγωγής, η οποία έπεται μεταφέρεται μέσω ενός εκτεταμένου δικτύου μεταφοράς στα κεντρικά σημεία κατανάλωσης. Τα κέντρα ελέγχου του συστήματος παρακολουθούν και ρυθμίζουν το σύστημα ενέργειας διαρκώς, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα παροχής της ενέργειας, η ονομαστική συχνότητα και η ονομαστική τάση. Από την άλλη πλευρά, στη σύγχρονη εποχή το δίκτυο παραγωγής και διανομής ενέργειας αλλάζει ραγδαία, με την ανάπτυξη και εγκατάσταση ενός μεγάλου αριθμού διεσπαρμένων μονάδων, συμπεριλαμβανομένου των ανανεώσιμων πηγών, όπως οι ανεμογεννήτριες, η εκμετάλλευση των θαλασσιών κυμάτων για παραγωγή ενέργειας, τα Φ/Β, οι υδρογεννήτριες, οι κυψέλες καυσίμου και οι σταθμοί παραγωγής μέσω ατμού ή αερίου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η ανάπτυξη της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρωπαϊκή Ένωση, σε ισοδύναμο χιλίων τόνων πετρελαίου.

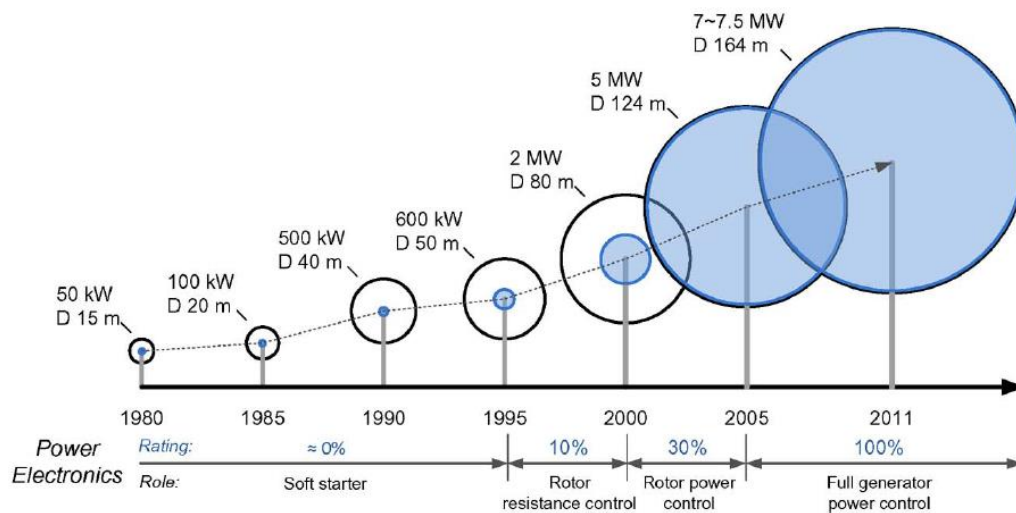


*Σχήμα 5.1 : Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ στην ΕΕ σε Ισοδύναμο Χιλίων Τόνων Πετρελαίου*

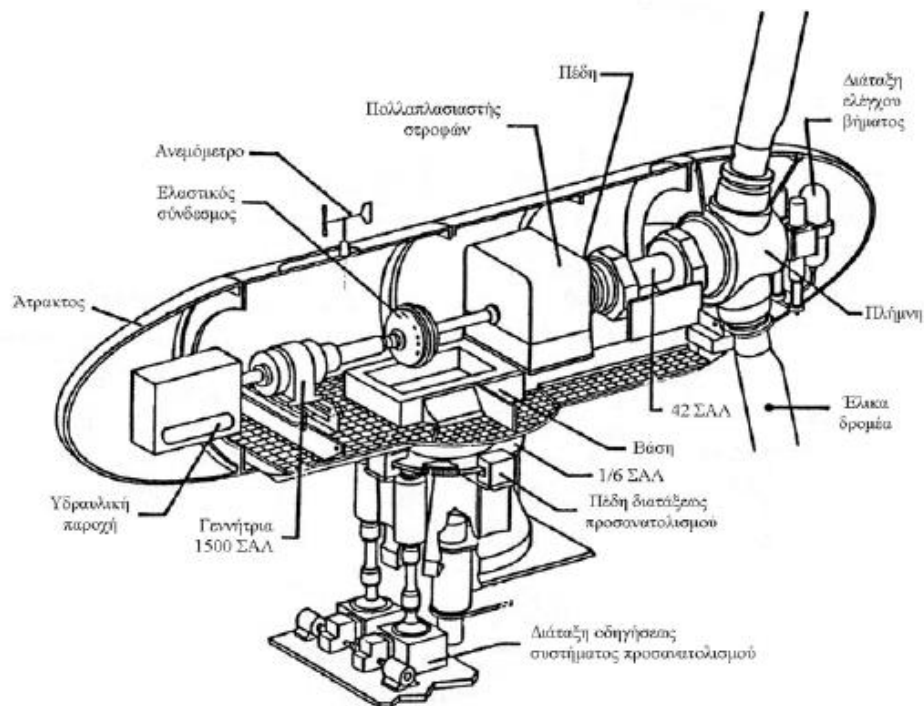
Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η απαρχή της χρονολογείται τη

δεκαετία του 1980 έχοντας ως δυνατότητα παραγωγής μερικές δεκάδες kW και έχει εξελιχθεί σήμερα στο βαθμό να εγκαθίστανται ανεμογεννήτριες πολλών MW, όπως δείχνει και το σχήμα 5.2. Αυτό επίσης υποδηλώνει ότι στην αρχή η παραγωγή τους δεν επηρέαζε σε σημαντικό βαθμό τον έλεγχο της συνολικής παραγωγής ενέργειας, ενώ πλέον ο ρόλος τους στο σύστημα είναι κρίσιμος λόγω του μεγέθους της παραγωγής. Ενδεικτικό παράδειγμα της εισαγωγής των ανεμογεννητριών στο δίκτυο αποτελεί η Δανία, στην οποία το 30% της ενέργειας που παράγεται για μεγάλα αστικά κέντρα και το 25% της συνολικής ενεργειακής απαίτησης καλύπτεται από μονάδες παραγωγής αιολικής ενέργειας. Στόχος της χώρας αυτής αποτελεί, μέχρι το έτος 2050, το σύνολο της παραγόμενης ενέργειας να παράγεται από εναλλακτικές πηγές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η παραγωγή από αιολική ενέργεια έχει ξεπεράσει το όριο των 200 GW, γεγονός που προβάλλει τον πρωτεύοντα ρόλο των ηλεκτρονικών ισχύος στην παραγωγή ενέργειας.

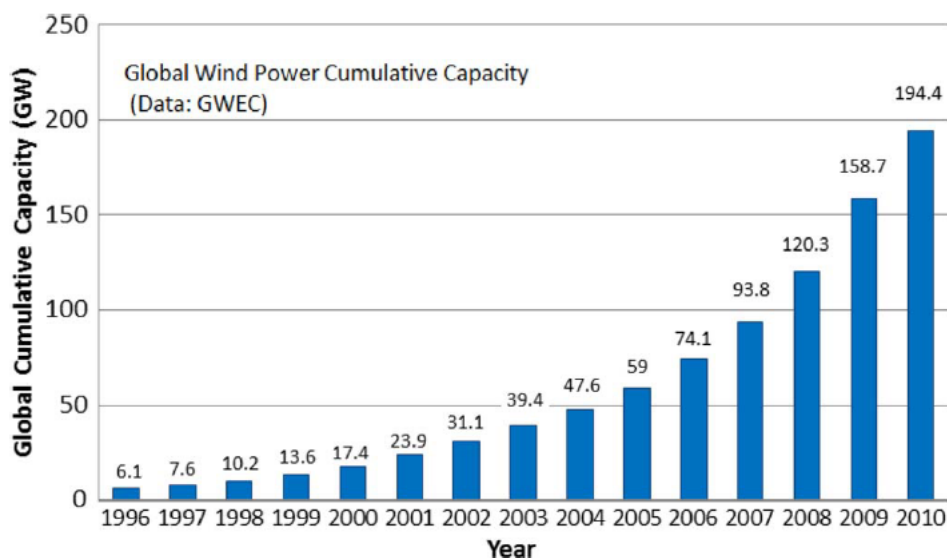
Τα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι ο ρότορας, το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια, η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος και ένας μετατροπέας για σύνδεση στο δίκτυο, σκοπός των οποίων αποτελεί η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των πτερυγίων του ρότορα σε ηλεκτρική. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία των ανεμογεννητριών βασίστηκε αρχικά στις γεννήτριες επαγωγής τύπου κλωβού συνδεδεμένες απευθείας στο σύστημα, η οποία ήταν τεχνολογία η οποία μετέφερε τους παλμούς του ανέμου στο σύστημα. Επιπρόσθετα, δεν υπήρχε έλεγχος στην ενεργό και την άεργο ισχύ, οι οποίοι είναι σημαντικοί παράμετροι ελέγχου έτσι ώστε να ρυθμιστούν η συχνότητα και η τάση. Καθώς το εύρος ισχύος των γεννητριών αυξάνει, αυτοί οι παράμετροι αποκτούν περισσότερη σημασία και κρίνεται ζωτικής σημασίας ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος σαν συνδετικοί κρίκοι μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του συστήματος. Αυτές οι διατάξεις μεταβάλλουν τα βασικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και από πηγή ενέργειας τη μετατρέπουν σε ενεργή πηγή ισχύος. Η ηλεκτρική τεχνολογία τους δεν αποτελεί κάτι καινούργιο αλλά πλέον έχοντας μικρύνει αισθητά το κόστος παραγωγής μιας kWh, αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση, της οποίας η διαρκής ενσωμάτωση στο σύστημα φαίνεται στο σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.2: Εξέλιξη των Ανεμογεννητριών και η Τάση Αύξησης της Μετατροπής Ενέργειας μέσω Ηλεκτρονικών Ισχύος (μπλε περιοχή) τα Τελευταία 30 Χρόνια.



Σχήμα 5.3: Δομή Ανεμογεννήτριας



Σχήμα 5.4: Ετήσια Παραγωγή Αιολικής Ενέργειας Παγκοσμίως από το 1996 έως το 2010

Οι πιο κοινές κατηγορίες ανεμογεννητριών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικούς τύπους. Οι βασικές διαφορές μεταξύ αυτών αφορούν το σύστημα παραγωγής ενέργειας και τον τρόπο με τον οποίο η αεροδυναμική απόδοση του ρότορα μειώνεται εάν ξεπεράσει το ανώτατο όριο, με σκοπό να αποφευχθεί η υπερφόρτωση.

Μια επίσης ανανεώσιμη πηγή ενέργειας αποτελεί η ηλιακή ενέργεια. Αν και η τάση αναζήτησης νέων μορφών παραγωγής ενέργειας είναι υπαρκτή εδώ και αρκετά χρόνια, είναι οι τελευταίες δεκαετίες που η ηλιακή ενέργεια γνωρίζει σημαντική άνθιση. Είναι βέβαιο πως έχουν παρέλθει έτη ερευνών και δοκιμών με σκοπό τη επίτευξη ενός συστήματος με την επιζητούμενη σχέση απόδοσης-κόστους και λόγω αυτού του επιτεύγματος ο αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων αυξάνεται με το χρόνο.

Σκοπός των Φ/Β συστημάτων είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή μέσω της συνεργασίας μικρότερων υποσυστημάτων, τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους. Δομικοί λίθοι αυτών των συστημάτων αποτελούν οι Φ/Β κυψέλες που επωμίζονται το έργο της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και ο ηλεκτρονικός μετατροπέας (inverter) που προσαρμόζει την ηλεκτρική ενέργεια σε αξιοποιήσιμη μορφή. Αυτά τα συστήματα εμφανίζονται είτε αυτόνομα, όπου είναι απαραίτητη η ύπαρξη

συσσωρευτών (μπαταρίες) για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας, είτε διασυνδεδεμένα στο δίκτυο τροφοδοτώντας το με ισχύ.

Το δομικό στοιχείο των Φ/Β είναι η κυψέλη ή αλλιώς κύτταρο. Αυτά, συνήθως δομημένα σε ομάδες των 60 ή 72, συγκροτούν ένα πλαίσιο, ενώ με τη σειρά τους τα πλαίσια σε συστοιχίες συγκροτούν ένα Φ/Β σύστημα.

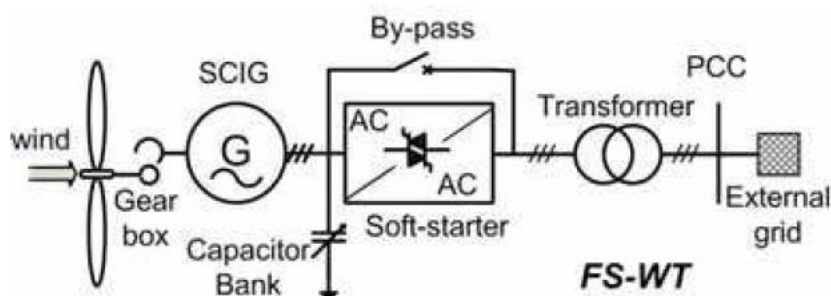


Σχήμα 5.5: Φ/Β Πλαίσιο

## 5.2 Ανεμογεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας

Αυτός ο τύπος αναπτύχθηκε κατά κύριο λόγο στη Δανία τη δεκαετία του 1980 και αποτελεί ένα μηχανισμό σταθερής και ελεγχόμενης ταχύτητας, κατά τον οποίο μια γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Αυτή η διάταξη προϋποθέτει την ύπαρξη ενός αντισταθμιστή ισχύος με σκοπό τη μείωση (σχεδόν απαλοιφή) της απαίτησης αέργου ισχύος από τις γεννήτριες προς το δίκτυο. Συνήθως επιτυγχάνεται μέσω της συνεχούς μεταβολής των πυκνωτών, ακολουθώντας τη διακύμανση της παραγωγής. Η πιο ομαλή σύνδεση με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενσωμάτωσης ενός ομαλού εκκινητή. Ανεξάρτητα από τη μεθοδολογία ελέγχου της ενέργειας σε μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, οι αυξομειώσεις του ανέμου μετατρέπονται σε μηχανικές τάσεις και κατά επέκταση σε ηλεκτρικές. Αυτές

μπορεί να προκαλέσουν αυξομειώσεις της τάσης στο σημείο σύνδεσης στη περίπτωση ενός ασθενούς δικτύου. Λόγω αυτών, η ανεμογεννήτρια απορροφά ποικίλα ποσά αέργου ισχύος από το δίκτυο(στην περίπτωση που δεν υφίσταται πυκνωτής), γεγονός που εντείνει τις αυξομειώσεις τάσης και τις απώλειες στη γραμμή μεταφοράς. Επομένως, αυτού του τύπου η διάταξη δεν υποστηρίζει έλεγχο της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, απαιτεί στοιβαρό δίκτυο και η κατασκευή της είναι απαραίτητο να αντέχει υψηλές μηχανικές καταπονήσεις που μπορεί να προκληθούν από τις ριπές του ανέμου.

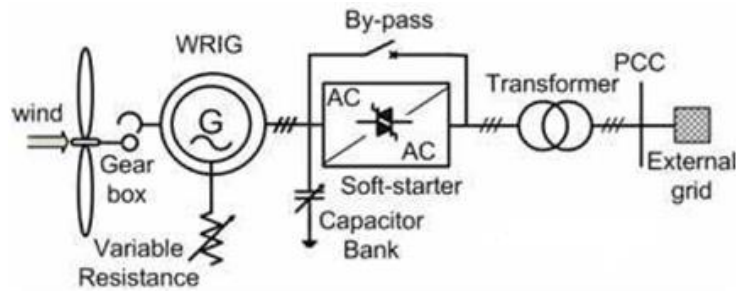


Σχήμα 5.6: Ανεμογεννήτρια Σταθερής Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Τύπου Κλωβού Συνδεδεμένη Απευθείας στο Δίκτυο

### 5.3 Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Μεταβλητή Αντίσταση Ρότορα

Σε αυτή τη διάταξη, η οποία απεικονίζεται πλήρως στο σχήμα 5.7, η γεννήτρια είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο. Ο περιστρεφόμενος ρότορας της γεννήτριας συνδέεται σειριακά με μια ελεγχόμενη αντίσταση, της οποίας το μέγεθος καθορίζει το εύρος της μεταβλητής ταχύτητας (τυπικό μέγεθος 0-10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα). Ένας πυκνωτής επιτυγχάνει την αναπλήρωση της αέργου ισχύος και η ομαλή σύνδεση στο δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω ενός ομαλού εκκινήτη. Μια επιπρόσθετη αντίσταση προστίθεται στο κύκλωμα του ρότορα, η οποία μπορεί να ελεγχθεί από ηλεκτρονικά ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγξιμη είναι όχι μόνο η συνολική αντίσταση του ρότορα, αλλά και η ολίσθηση και επομένως η ενέργεια εξόδου του συστήματος. Το δυναμικό εύρος της υπό έλεγχο ταχύτητας εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του ρότορα. Το πιο σύνηθες είναι το εύρος της ταχύτητας να είναι 0-10% περισσότερο από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ενέργεια που προέρχεται από την εξωτερική μετατροπή ενέργειας απορρίπτεται με τη μορφή απώλειας θερμότητας.



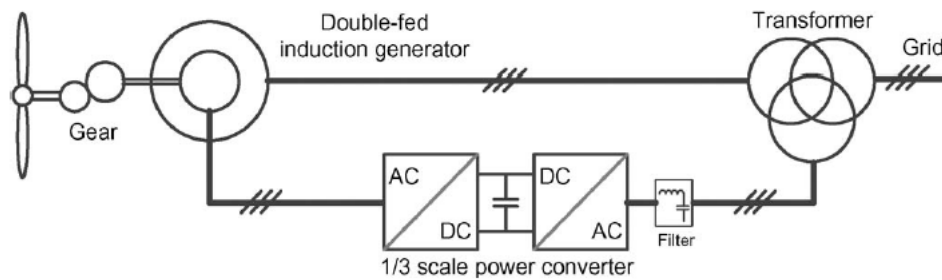


Σχήμα 5.7: Μερικώς Μεταβλητής Ταχύτητας Ανεμογεννήτρια με Μεταβλητή Αντίσταση Ρότορα

#### 5.4 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Μερικής Κλίμακας Μετατροπείς Ισχύος (partial scale power converter)

Αυτή η διάταξη, γνωστή και μοντέλο επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδότησης (doubly fed induction generator), αντιστοιχεί σε ανεμογεννήτρια ελεγχόμενα μεταβλητής ταχύτητας, με τοποθετημένα στο κύκλωμα του ρότορα μιας γεννήτριας επαγωγής τυλιγμένου δρομέα ενός μερικής κλίμακας μετατροπέα ισχύος (ορισμένο προσεγγιστικά στο 30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας), όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Ο στάτορας είναι απευθείας συνδεδεμένος με το δίκτυο, ενώ ένας μετατροπέας μερικής κλίμακας ελέγχει τη συχνότητα του ρότορα και συνεπώς τη ταχύτητά του.

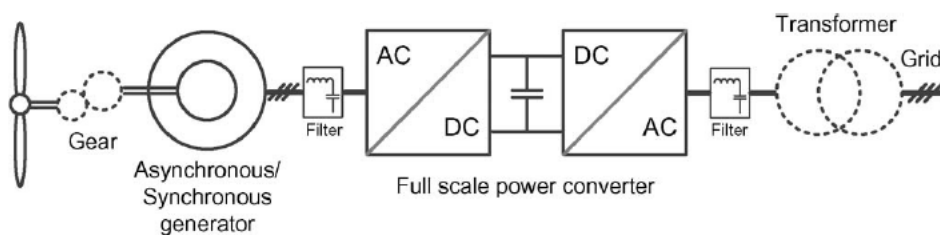
Η ονομαστική τιμή της ισχύος αυτού του μερικής κλίμακας μετατροπέα συχνότητας καθορίζει το εύρος της ταχύτητας (τυπικό εύρος  $\pm 30\%$  της σύγχρονης ταχύτητας). Επιπρόσθετα, αυτός ο μετατροπέας αναπληρώνει την άεργο ισχύ και επιτυγχάνει ομαλή σύνδεση στο δίκτυο, ενώ παράλληλα παγιδεύει την ενέργεια που στη διάταξη της προηγούμενης παραγράφου καταναλωνόταν στην αντίσταση. Ένας μικρός μετατροπέας συχνότητας κάνει τη διάταξη αυτή ελκυστική από οικονομικής πλευράς και ταυτόχρονα τα ηλεκτρονικά ισχύος δίνουν τη δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να αναλάβει ένα πιο δυναμικό ρόλο στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά βέβαια, τα κύρια μειονεκτήματά της είναι η χρήση ψυκτρών και η πολυπλοκότητα των μέσων προστασίας σε περίπτωση σφαλμάτων του δικτύου.



Σχήμα 5.8: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Μερικής Κλίμακας Μετατροπέα Ισχύος

### 5.5 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Πλήρους Κλίμακας Μετατροπείς Ισχύος (full-rating)

Στην εν λόγω διάταξη, οποία φαίνεται στο σχήμα 5.9, ο μετατροπέας ενέργειας αντισταθμίζει την άεργο ισχύ και πραγματοποιεί ομαλή σύνδεση στο δίκτυο για ολόκληρο το εύρος ταχυτήτων, ενώ η γεννήτρια μπορεί να είναι επαγωγής τυλιγμένου δρομέα ή μόνιμου μαγνήτη. Το τύλιγμα διέγερσης του στάτορα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα πλήρους κύματος. Ορισμένες ανεμογεννήτριες παρομοίου τύπου μπορεί επιπλέον να μην έχουν κιβώτιο ταχυτήτων, όπως φαίνεται στο σχήμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται μια γεννήτρια πολλαπλών πόλων, στην οποία δίνεται κίνηση απευθείας.



Σχήμα 5.9: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητών Στροφών με Μετατροπέα Πλήρους Κύματος

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αεροδυναμική απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα

ταχυτήτων του ανέμου. Μέσω της μεθοδολογίας των μεταβλητών στροφών, γίνεται εφικτή η διαρκής προσαρμογή(επιτάχυνση ή επιβράδυνση) της ταχύτητας περιστροφής της ανεμογεννήτριας ως προς την ταχύτητα του ανέμου, με τέτοιο τρόπο ώστε λόγος ταχύτητας των ακροπτερυγίων να διατηρείται σταθερός σε μια προκαθορισμένη τιμή αντίστοιχη με τον αεροδυναμικό συντελεστή. Αντίθετα με την περίπτωση των σταθερών στροφών, σε αυτό το σύστημα η στροφορμή της γεννήτριας διατηρείται σχεδόν σταθερή. Έτσι, οι αυξομειώσεις του ανέμου απορροφώνται από τις μεταβολές στη ταχύτητα της γεννήτριας.

Παρατηρώντας το σύστημα λοιπόν, σημειώνεται ότι τα βασικά προτερήματα της τεχνολογίας μεταβλητών στροφών σε σύγκριση με αυτή των σταθερών αποτελούν η μειωμένη μηχανική καταπόνηση σε εξαρτήματα του συστήματος όπως ο άξονας και το κιβώτιο ταχυτήτων, η αυξημένη παραγωγή ενέργειας και ο περιορισμένος περιβαλλοντικός θόρυβος.

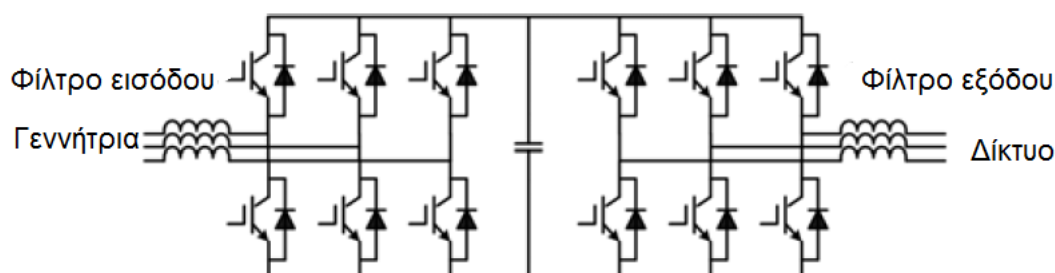
## 5.6 Τοπολογίες Ηλεκτρονικών Ισχύος σε Ανεμογεννήτριες

### 5.6.1 Μετατροπείς Πηγής Τάσης Τεσσάρων Τεταρτημορίων

Η τοπολογία αυτή είναι η πιο συχνή για τριφασικό μετατροπέα και η μορφή της φαίνεται στο σχήμα 5.10. Λόγω αυτού, οι διαθέσιμες γνώσεις στο συγκεκριμένο πεδίο είναι εκτεταμένες και τεκμηριωμένες σε σημαντικό βαθμό. Επιπρόσθετα, πολυάριθμοι κατασκευαστές παράγουν εξαρτήματα ειδικά σχεδιασμένα για χρήση σε αυτό τον τύπο μετατροπέα, με αποτέλεσμα το κόστος των εξαρτημάτων αυτών να είναι αρκετά πιο περιορισμένο συγκριτικά με εξαρτήματα άλλων μετατροπέων, τα οποία απαιτούν εκ νέου εξειδικευμένη παραγωγική διαδικασία. Ένα τεχνικό πλεονέκτημα αυτού του είδους μετατροπέα αποτελεί η αποσύζευξη της γεννήτριας και του δικτύου μέσω του πυκνωτή μεταξύ του αντιστροφέα του δικτύου και του ανορθωτή της γεννήτριας. Εκτός του ότι έτσι προσφέρεται προστασία, με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτός ο ξεχωριστός έλεγχος των δύο ανορθωτών. Η ύπαρξη της επαγωγής ανύψωσης μειώνει τις απαιτήσεις στην επίδοση του φίλτρου που υπάρχει από τη μεριά του δικτύου και προσδίδει ένα ποσοστό προστασίας του μετατροπέα απέναντι σε μη φυσιολογικές συνθήκες στο δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και συγκεκριμένα μειονεκτήματα των μετατροπέων αυτών. Ένα από αυτά αποτελεί το γεγονός ότι ο πυκνωτής στη dc πλευρά είναι ογκώδης και βαρύς, αυξάνει το κόστος και ίσως το πιο σημαντικό, μειώνει το συνολικό χρόνο ζωής του συστήματος. Επιπλέον,

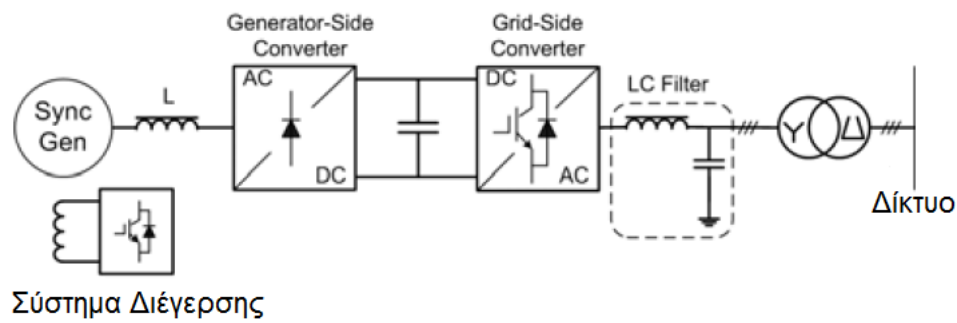
μειονέκτημα αποτελούν και οι απώλειες στους διακόπτες. Εφόσον ο μετατροπέας αποτελείται από δύο ανορθωτές, οι απώλειες στους διακόπτες μπορεί να γίνουν ακόμα μεγαλύτερες. Η αυξημένη ταχύτητα των αλλαγών των διακοπών μπορεί να δημιουργήσει την απαίτηση για επιπλέον φίλτρα, ενώ παράλληλα για υπάρξει προστασία από υψηλές τάσεις στη μόνωση της γεννήτριας και για να αποφευχθούν προβλήματα λόγω αυτών, ίσως να απαιτηθεί η εφαρμογή ενός φίλτρου στην έξοδο.



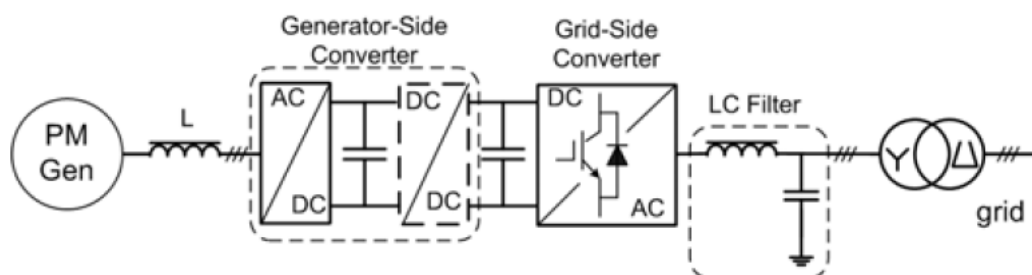
Σχήμα 5.10: Δομή Μετατροπέα Πηγής Τάσης

### 5.6.2 Μετατροπέας Ενέργειας Διπλής Κατεύθυνσης

Μία γεννήτρια επαγωγής τυλιγμένου δρομέα απαιτεί μόνο έναν απλής γέφυρας ανορθωτή για την πλευρά της, όπως φαίνεται στο σήμα 5.11. Ο ανορθωτής διόδων, ο οποίος για τριφασικό σύστημα αποτελείται από έξι διόδους, είναι η πιο κοινώς γνωστή τοπολογία σε εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάποιες εφαρμογές με dcσύνδεσμο και μόνο σε ένα τεταρτημόριο, ενώ παράλληλα είναι απλός και δεν είναι εφικτός ο έλεγχός του. Η μεταβλητότητα της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός επιπλέον μετατροπέα ενέργειας, ο οποίος τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης. Ο μετατροπέας στη μεριά του δικτύου προσφέρει ένα αποσυνδεδεμένο έλεγχο της ενεργούς και της άεργου ισχύος η οποίες μεταφέρονται στο δίκτυο και φυσικά σε όλα τα επιμέρους συστήματα υποστήριξής του. Με σκοπό της επίτευξη της μεταβλητότητας της ταχύτητας, η ανεμογεννήτρια με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη θα απαιτεί την εισαγωγή στο dcμέρος ενός μετατροπέα ανύψωσης DC-DC.



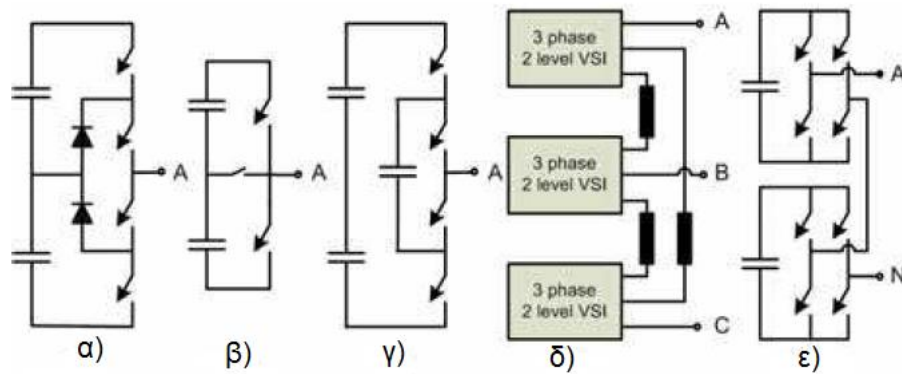
Σχήμα 5. 11: Ανεμογεννήτρια Μεταβλητής Ταχύτητας με Σύγχρονη Γεννήτρια



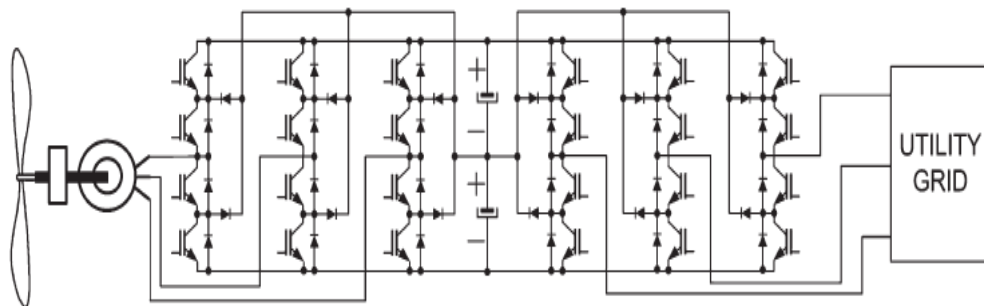
Σχήμα 5. 12: Ανεμογεννήτρια Πλήρους Κλίμακας Μετατροπέα Ενέργειας με Μόνιμου Μαγνήτη Γεννήτρια

### 5.6.3 Πολυεπίπεδος Μετατροπέας Ενέργειας

Τη σημερινή εποχή, εμφανίζεται αυξημένο το ενδιαφέρον για τους πολυεπίπεδους μετατροπείς ενέργειας και ειδικά για τις υψηλής τάσης εφαρμογές τους σε ανεμογεννήτριες (μεσαίας σε υψηλή ισχύ). Από την ανακάλυψη του τριών επιπέδων μετατροπέα ουδέτερου σημείου έχουν προκύψει αρκετές εναλλακτικές μορφολογίες πολυεπίπεδων μετατροπέων. Η γενική ιδέα τους είναι να δημιουργηθεί μια ημιτονοειδής τάση μέσω διαφόρων επιπέδων τάσεων, οι οποίες κατά κύριο λόγο παρέχονται από πυκνωτές. Οι διαφορετικές τοπολογίες αυτές συνοψίζονται στις κατηγορίες του σχήματος 5.13.



Σχήμα 5.13: Τοπολογίες Πολυεπίπεδων Μετατροπών



Σχήμα 5.14: Πολυεπίπεδος Μετατροπέας

Αρχικά, ο κύριος σκοπός του πολυεπίπεδου μετατροπέα ήταν να επιτύχει μεγαλύτερες τάσεις στους μετατροπείς. Καθώς τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των υποεξαρτημάτων βελτιώνονται, τα μακροπρόθεσμα πλεονεκτήματα των πολυεπίπεδων μετατροπών έγιναν όλο και πιο φανερά. Οι μειωμένες αρμονικές στην τάση εισόδου και εξόδου, αλλά και οι μειωμένες απώλειες λόγω διακοπών, οι οποίες μπορούν να φτάσουν ακόμα και σε 25% μείωση, αποτελούν κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Αν και οι απώλειες λόγω αγωγής είναι υψηλότερες για ένα πολυεπίπεδο μετατροπέα, η συνολική του αποδοτικότητα είναι πιο βελτιωμένη συγκριτικά με τον μετατροπέα δύο επιπέδων.

Φυσικά, είναι αναπόφευκτο να υπάρχουν και μειονεκτήματα για τους μετατροπείς αυτούς. Το πιο συνηθισμένο για μετατροπείς τριών επιπέδων με dc πλευρά χωρισμένη σε πολλά τμήματα είναι η μη ισορροπία στην τάση μεταξύ άνω και κάτω πυκνωτών. Το πρόβλημα της μη ισορροπίας στο φορτίο μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε μέσω της κατάλληλης διαμόρφωσης του τρόπου

ελέγχου των διακοπών, γεγονός που υποδεικνύει την αναγκαιότητα μέτρησης της τάσης κατά μήκος των πυκνωτών.

Ο πολυεπίπεδος μετατροπέας τριών επιπέδων του σχήματος 5.13(α) και ο πολυεπίπεδος μετατροπέας του σχήματος 5.13(γ) δείχνουν μια άνιση τάση ρεύματος στους ημιαγωγούς. Είναι φανερό πως οι άνω και κάτω διακόπτες σε ένα κλάδο του ανορθωτή μπορεί να είναι υποβαθμισμένοι σε σύγκριση με τους διακόπτες στο κέντρο. Η άνιση καταπόνηση λόγω ρεύματος και η αντίστοιχη καταπόνηση λόγω τάσης συνιστούν ένα σχεδιαστικό πρόβλημα για έναν πολυεπίπεδο μετατροπέα με αμφίδρομη διασύνδεση των διακοπών, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13(β).

Έτσι λοιπόν, για όλες τις τοπολογίες του σχήματος 5.13, ο αριθμός των ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται είναι μεγαλύτερος από έναν μετατροπέα δύο επιπέδων. Με αυτόν τον τρόπο, οι απώλειες αγωγής του μετατροπέα ίσως αυξηθούν. Αντιθέτως, κάθε ημιαγωγός χρειάζεται να εμποδίσει μόνο τη μισή τάση στη dc πλευρά και για μικρότερες τιμές της τάσης, οι απώλειες σε κλειστή κατάσταση διακόπτη μειώνονται, γεγονός που εν μέρει δικαιολογεί τον υψηλότερο αριθμό των ημιαγωγών.

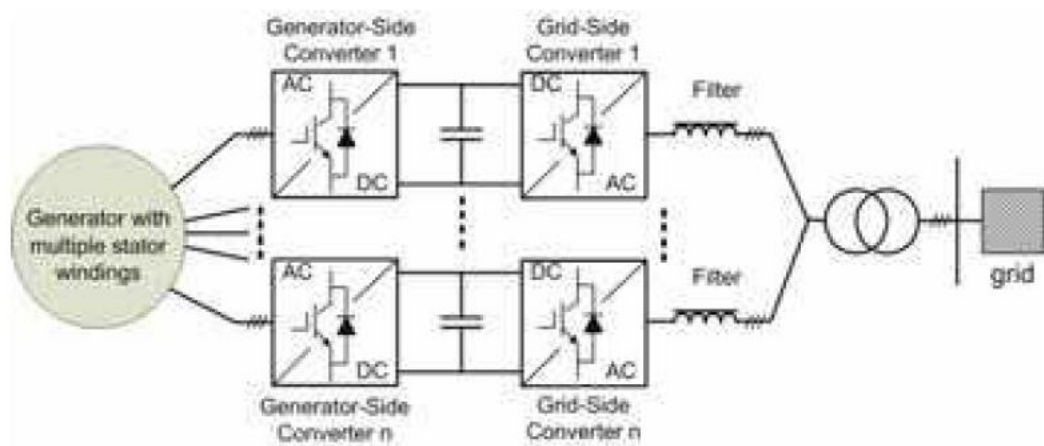
#### 5.6.4 Ευέλικτοι Μετατροπείς Ενέργειας

Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου και συνεπακόλουθο χαμηλό επίπεδο παραγόμενης ενέργειας, ο πλήρους κλίμακας μετατροπέας ενέργειας προβλέπει περιορισμένη χρήση των διακοπών και αυξημένες λόγω αυτού απώλειες ενέργειας. Επομένως, το σχήμα 5.11 δείχνει ένα τρόπο πολλοί μετατροπείς ενέργειας να λειτουργούν παράλληλα, η οποία αποτελεί διάταξη η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις κοινές γεννήτριες.

Εισάγοντας τα ηλεκτρονικά ισχύος, πολυάριθμα από τα συστήματα ανεμογεννητριών έχουν παρόμοια απόδοση με τα γνωστά συστήματα παραγωγής ενέργειας. Οι σημερινές ανεμογεννήτριες μπορούν και αποκρίνονται άμεσα στις απαιτήσεις του διαχειριστή του δικτύου, αν και η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου.

Αυτές οι ανεμογεννήτριες μπορούν να είναι ενεργές ακόμα και όταν εμφανιστεί σφάλμα στο σύστημα και, όπου είναι απαραίτητο, να ανεβάσουν την τάση του στήματος. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν την παραγωγή ενέργειας ακόμα και όταν υπάρχει περισσότερη ενέργεια διαθέσιμη λόγω αυξημένου ανέμου και να λειτουργήσουν σαν αποθήκες ενέργειας για το σύστημα.





Σχήμα 5.15: Ανεμογεννήτρια με Παράλληλους Μετατροπείς

## 5.7 Σύνδεση Αιολικών Πάρκων



Σχήμα 5.16: Αιολικό Πάρκο

Σε πολυάριθμες χώρες, η αιολική ενέργεια συμμετέχει δραστικά στην συνολική παραγωγή και επιτυγχάνεται μέσω τεράστιων αιολικών πάρκων, τα οποία στο μέλλον είναι εφικτό να συντελούν σημαντικά στην παραγωγή ενέργειας σε εθνικό επίπεδο και να διαμορφώνουν τη ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας. Κατά συνέπεια, αναμένεται αυτές οι μονάδες παραγωγής να πρέπει να ικανοποιήσουν αυξημένες απαιτήσεις, όπως ο



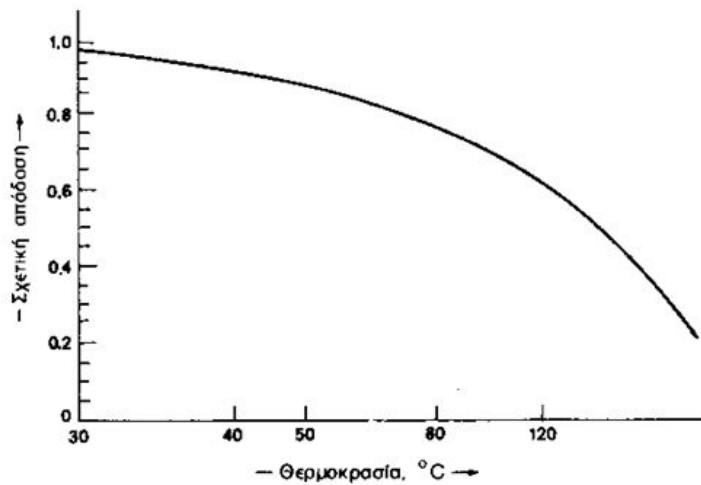
έλεγχος της συχνότητας και της τάσης, η ρύθμιση της ενεργού και της άεργου ισχύος και οι ταχείες αποκρίσεις στις δυναμικές απαιτήσεις του συστήματος(πχ απότομη μείωση της παραγωγής σε λίγα δευτερόλεπτα). Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί σημαντικό κομμάτι των ρυθμίσεων του συστήματος και του ελέγχου των άκρων αυτών με σκοπό να ικανοποιηθούν οι μελλοντικές απαιτήσεις.

## 5.8 Φ/B Συστήματα και Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς

Λόγω της σχετικά μικρότερης απόδοσης των συστημάτων αυτών συγκριτικά με άλλες μορφές παραγωγής ενέργειας, είναι ζωτικής σημασίας η πλήρης εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μέρος που πρόκειται να τοποθετηθούν, με σκοπό τη βέλτιστη λειτουργία του Φ/B. Σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, είναι προφανές πως η περιστροφή της Γης και η διαρκής αλλαγή της θέσης του Ήλιου προσδιορίζουν την τοποθέτηση του συστήματος με τέτοιο τρόπο ώστε η γωνία πρόσπτωσης να είναι κάθετη στο συλλέκτη, γεγονός που επιφέρει τη βέλτιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Επιπλέον, ένας παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την απόδοση ενός συλλέκτη είναι η θερμοκρασία με τρόπο που αν ο συντελεστής απόδοσης ενός Φ/B στοιχείου σε μια συμβατική θερμοκρασία είναι  $n$ , η τιμή σε διαφορετική θερμοκρασία θα είναι:

$$n_{\theta} = n\sigma_{\theta} \quad (5.1)$$

Όπου  $\sigma_{\theta}$  είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Στη συμβατική θερμοκρασία, ο  $\sigma_{\theta}$  είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα Φ/B στοιχεία πυριτίου του εμπορίου. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζεται η σχέση απόδοσης-θερμοκρασίας.



*Σχήμα 5.17: Τυπική Απόκλιση Μεταβολής Απόδοσης  $\Phi/B$  Στοιχείων Πυριτίου Συναρτήσει της Θερμοκρασίας. Συμβατική Θερμοκρασία είναι 20 Βαθμοί Κελσίου.*

Όταν δεν συνδέεται φορτίο σε ένα  $\Phi/B$  συναντάται η μέγιστη τάση εξόδου, η τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{oc}$ . Αντίθετα όταν βραχυκυκλωθούν τα άκρα της  $\Phi/B$  γεννήτριας, η τάση μηδενίζεται, αλλά έχουμε μέγιστη ροή ρεύματος που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ . Η ισχύς που παράγεται για κάθε ζεύγος τιμών τάσης-έντασης που μπορεί να εμφανιστεί στα άκρα της  $\Phi/B$  γεννήτριας δεν είναι πάντα σταθερή αλλά μηδενίζεται όπως φαίνεται εύκολα στις ακραίες συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης και παρουσιάζει ένα μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή τάσης-έντασης. Είναι λοιπόν επιθυμητό, σε κάθε εγκατάσταση  $\Phi/B$  πλαισίων, οι συστοιχίες να λειτουργούν παράγοντας τις τιμές αυτές τάσης-έντασης που δίνουν κάθε στιγμή.

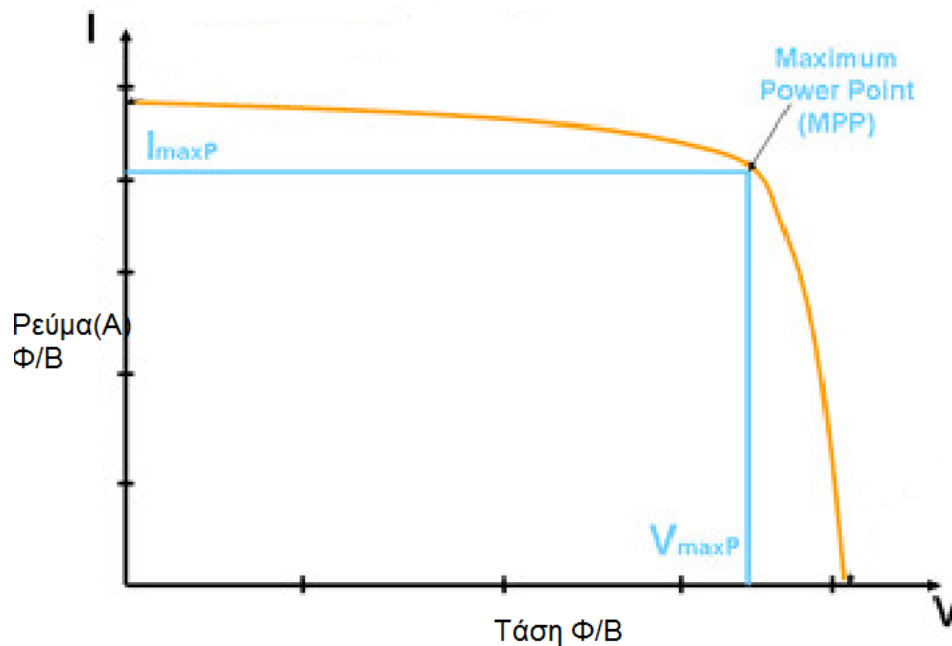
Σε ένα  $\Phi/B$  σύστημα, πρώτα τα πλαίσια και ύστερα οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς είναι τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία τους. Είναι το μέρος του συστήματος που είναι υπεύθυνο για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας από τα  $\Phi/B$  πλαίσια, σε τέτοια μορφή, ώστε να μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμη. Η μετατροπή της ενέργειας είναι απαραίτητο να συμβεί, αφού αφενός είναι σε συνεχή μορφή (DC), ενώ αφετέρου πρέπει να τηρηθούν οι απαιτήσεις των φορτίων ή του δικτύου, στο οποίο διοχετεύεται η ενέργεια. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν ενδεικτικά στην μορφή των ηλεκτρικών μεγεθών, στο πλάτος, στη συχνότητα, στην ποιότητα ισχύος και στο αρμονικό περιεχόμενο. Το είδος του μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί επηρεάζεται από τον τρόπο που συνδέονται τα πλαίσια, το εύρος ισχύος και την εκάστοτε εφαρμογή του συστήματος. Οι τοπολογίες διασύνδεσης των  $\Phi/B$  πλαισίων θα αναλυθούν σε παρακάτω κεφάλαιο.

### 5.8.1 Ανίχνευση του Σημείου Μέγιστης Ισχύος

Η ηλιακή ενέργεια είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμη, όπως είναι ήδη γνωστό, μέσω των Φ/Β στοιχείων. Ωστόσο, η εξαγωγή της ενέργειας από αυτά δεν είναι απλή διαδικασία και παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες. Μια από τις πιο σημαντικές δυσκολίες είναι η ανίχνευση του Μέγιστου Σημείου Ισχύος (Maximum Power Point). Για να γίνει κατανοητό το τι ακριβώς είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος, πρέπει να αναφερθεί ότι μια συστοιχία Φ/Β κάτω από σταθερή και ομοιόμορφη ακτινοβολία λειτουργεί σύμφωνα με μια χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης. Σε αυτήν την καμπύλη υπάρχει ένα σημείο στο οποίο η συστοιχία λειτουργεί με τη μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ με αποτέλεσμα αυτό να είναι το Μέγιστο Σημείο Ισχύος της Φ/Β συστοιχίας. Να σημειωθεί ότι το σημείο αυτό δεν μπορεί να είναι γνωστό γιατί δεν είναι σταθερό, αφού η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της Φ/Β συστοιχίας αλλάζει με την αλλαγή της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι το Σημείο Μέγιστης Ισχύος είναι διαφορετικό κατά τις πρωινές σε σχέση με τις απογευματινές ώρες, όπου και η ηλιακή ακτινοβολία είναι ασθενέστερη. Επίσης, σημειώνεται ότι το MPP επηρεάζεται τόσο από την ακτινοβολία, όσο και από τη θερμοκρασία.

Όταν η γεννήτρια μέσω ηλιακής ενέργειας τροφοδοτεί απευθείας ένα συγκεκριμένο φορτίο κάτι τέτοιο δεν είναι πραγματοποιήσιμο καθώς η τιμή του φορτίου έχει συγκεκριμένη αντίσταση. Όταν όμως μεταξύ γεννητριών και κατανάλωσης παρεμβάλλονται ηλεκτρονικά για τον έλεγχο της ισχύος, για την ρύθμιση φόρτισης συσσωρευτών, για την ανύψωση ή και την αλλαγή μορφής της παραγόμενης τάσης, τότε υπάρχει δυνατότητα να λειτουργούν αυτές σε ένα μέγιστο σημείο. Αυτό το αναλαμβάνουν ειδικοί ανιχνευτές της μέγιστης ισχύος, ή maximum power point trackers (MPPT).

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των Φ/Β και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Η λογική που συνήθως ακολουθείται για τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος είναι παρακολουθώντας συνεχώς τις τιμές τάσης και έντασης εξόδου των Φ/Β γεννητριών, οι ανιχνευτές να προκαλούν ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής και αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια, τότε να αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.



Σχήμα 5.18: Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης Φ/Β Πλαισίου για Καθορισμένη Τιμή Θερμοκρασίας και Ηλιακής Ακτινοβολίας

Όπως προαναφέρθηκε στην εξέταση των Φ/Β στοιχείων, η ένταση που παράγεται από ένα Φ/Β στοιχείο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα από την τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το στοιχείο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο στοιχείο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το Φ/Β στοιχείο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του.

Η παραγόμενη ισχύς από ένα Φ/Β στοιχείο είναι  $P=VI$ . Όταν η λειτουργία του στοιχείου μετατοπιστεί σε διαφορετικό σημείο της καμπύλης  $V-I$  λόγω μεταβολής στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ή μεταβολή του φορτίου, τότε η τάση μεταβάλλεται κατά  $dV$  και η ένταση κατά  $dI$ .

Τότε η ισχύς είναι:

$$P = VI = (V + dV)(I + dI) \quad (5.2)$$

Αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης έχουμε:

$$dP = dV \cdot I + dI \cdot V \quad (5.3)$$

Η κλίση της καμπύλης ισχύος είναι μηδέν στο MPP. Στο σημείο αυτό η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$0 = dV \cdot I + dI \cdot V$$

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (5.4)$$

Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος εκφράζει την δυναμική αντίσταση της πηγής  $Z_d$ , ενώ ο δεύτερος την στατική αντίσταση  $Z_s$ . Με βάση αυτή την εξίσωση υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος:

α. Μία διαταραχή ρεύματος εισάγεται περιοδικά στην Φ/Β πηγή ενώ μετρούνται η δυναμική αντίσταση αυτής  $Z_d$  και η στατική αντίσταση  $Z_s$ . Η τάση λειτουργίας αυξάνεται ή μειώνεται μέχρι να ικανοποιηθεί η εξίσωση του σημείου μέγιστης ισχύος, δηλαδή  $Z_d = -Z_s$

β. Μια δεύτερη μέθοδος ελέγχου είναι να αυξάνεται η τάση όσο ισχύει η συνθήκη:

$$\frac{dP}{dV} > 0$$

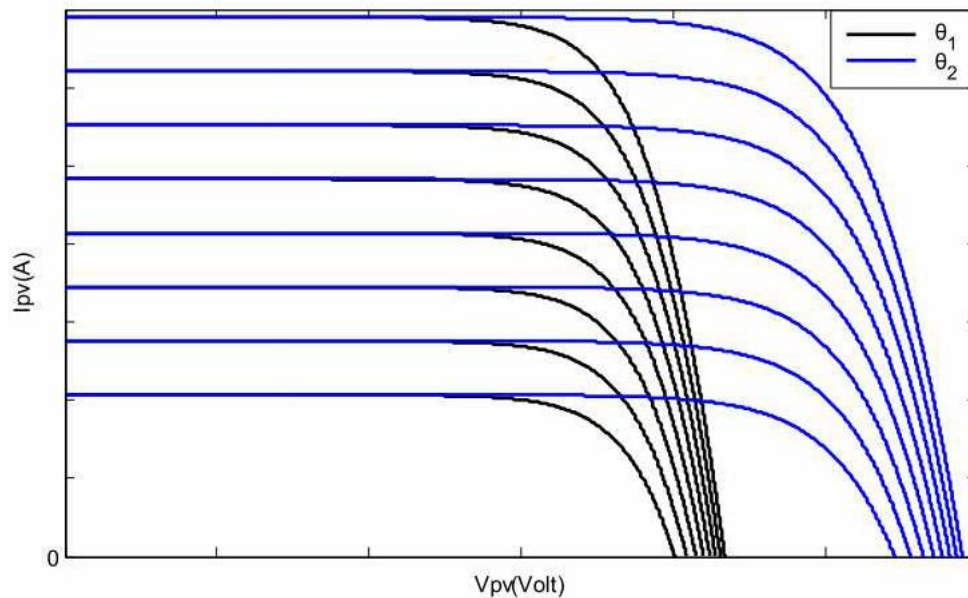
δηλαδή η ισχύς αυξάνεται με αύξηση της τάσης. Σε αντίθετη περίπτωση η τάση μειώνεται. Η τάση σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται σχεδόν αυτός ο ρυθμός μεταβολής.

γ. Μια τρίτη μέθοδος κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα Φ/Β στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή,

$$\frac{V_{mp}}{V_{oc}} = K \quad (5.5)$$

Αυτός έχει τιμή περίπου 0,72 για τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ένα Φ/Β στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις αντίστοιχες συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών αυτών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο  $(K \cdot V_{oc})$  που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

Το λογικό κύκλωμα ελέγχου μετρά την τάση και την ένταση εξόδου των Φ/Β γεννητριών, η οποία βέβαια εξαρτάται κάθε στιγμή από την ακτινοβολία που προσπίπτει, τη θερμοκρασία της γεννήτριας και φυσικά από την αντίσταση που συναντά αυτή στα άκρα της. Εφαρμόζοντας μία από τις παραπάνω μεθόδους, στέλνει σήμα στον DC/DC μετατροπέα να ανυψώσει ή να μειώσει την τάσημέχρι να εντοπιστεί το MPP.

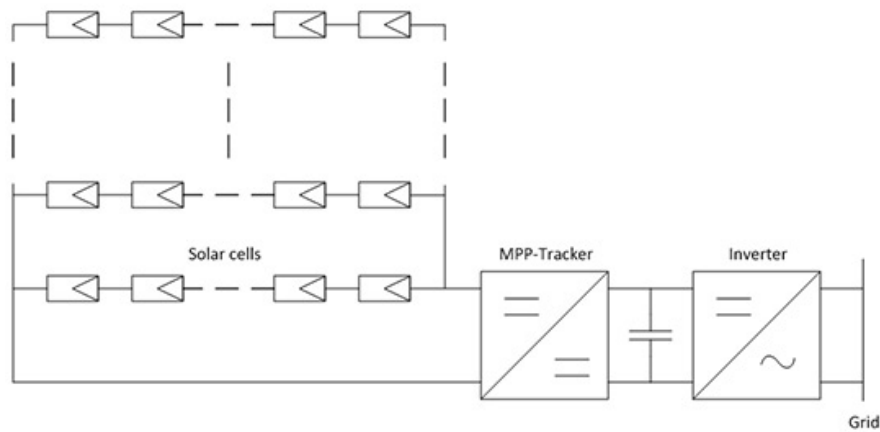


Σχήμα 5.19: Καμπύλες I-V Φ/Β Στοιχείου για Διάφορες Ακτινοβολίες-Θερμοκρασίες.

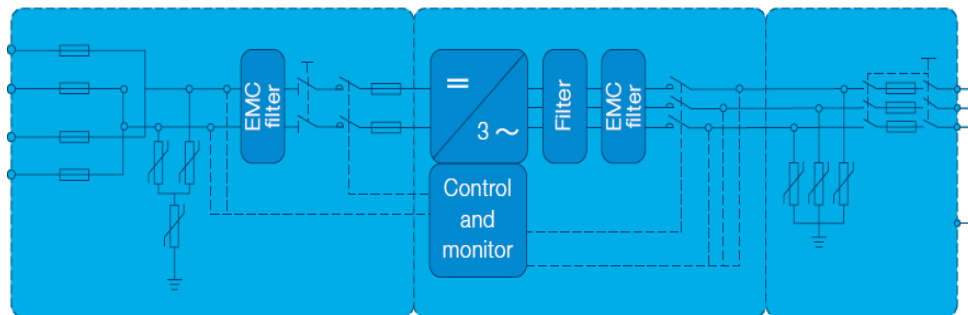
## 5.8.2 Τεχνολογίες Διασύνδεσης Φ/Β Στοιχείων

### 5.8.2.1 Τεχνολογία Κεντρικού Αντιστροφέα (Centralized Technology)

Αυτή η τεχνολογία διασύνδεσης είναι η παλαιότερη που χρησιμοποιήθηκε σε συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας. Σκοπός της είναι η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ισχύος, η οποία διοχετεύεται προς το δίκτυο μέσω ενός και μόνου κεντρικού αντιστροφέα. Το δομικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.20.



Σχήμα 5.20: Δομικό Διάγραμμα Τεχνολογίας Κεντρικού Αντιστροφέα



Σχήμα 5.21: Κυκλωματικό Διάγραμμα Κεντρικού Αντιστροφέα

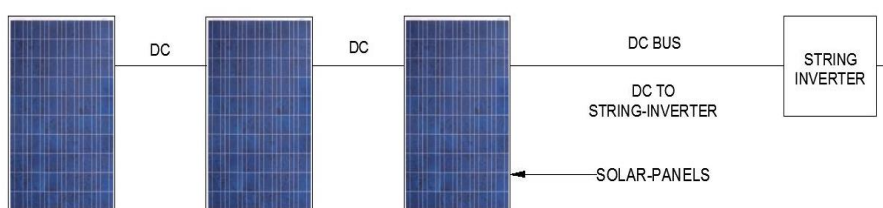
Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνολογίας αποτελεί η χρησιμοποίηση μεγάλου αριθμού Φ/Β πλαισίων τα οποία είναι χωρισμένα σε εν σειρά ομάδες, τις αλυσίδες. Σκοπός είναι η παραγωγή αρκετά υψηλής συνεχούς τάσης στα άκρα τους, ώστε να μην είναι απαραίτητη η παρουσία επιπλέον μετατροπών ανύψωσης για την μετατροπή της σε εναλλασσόμενη μορφή. Η επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου ισχύος επιτυγχάνεται μέσω της παράλληλης σύνδεσης των αλυσίδων, η οποία δίνει το απαραίτητο ρεύμα. Για να αποφευχθεί η λειτουργία ορισμένων αλυσίδων ως φορτία λόγω σκιάσεων, γίνεται χρήση ενός μόνο ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPP Tracker), όπως και διόδων ισχύος.

Πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας αποτελεί η απλότητα στη σύνδεση και η δυνατότητα παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων ισχύος από ένα και μόνο σύστημα, προσφέροντας έτσι χαμηλό κόστος ανά εγκατεστημένο kW. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχει η ανάγκη για μετατροπείς ανύψωσης.

Αντίθετα, μια τέτοια τεχνολογία παρουσιάζει και μειονεκτήματα. Η πολύ υψηλή τάση που εμφανίζεται στα άκρα των αλυσίδων παρουσιάζει αυξημένο κίνδυνο ηλεκτροπληξίας και απαιτεί τη χρησιμοποίηση διατάξεων προστασίας τόσο της εγκατάστασης όσο και των ανθρώπων, καθώς και καλώδια υψηλής συνεχούς τάσης των οποίων το κόστος δεν είναι αμελητέο. Επίσης είναι απαραίτητη η εφαρμογή ειδικών τεχνικών γείωσης του συστήματος. Η ύπαρξη ενός μόνο ανιχνευτή μέγιστης ισχύος, περιορίζει την απόδοση του συστήματος και συνεπώς την παραγωγή σε καταστάσεις μερικής σκίασης ή ανομοιόμορφης θερμικής καταπόνησης ορισμένων πλαισίων. Όταν μια αλυσίδα σκιαστεί περισσότερο από τις υπόλοιπες και λόγω αυτού λειτουργεί ως φορτίο, τότε η τιμή της τάσης στα άκρα της υπολείπεται των άλλων και έτσι ελλοχεύει ο κίνδυνος καταστροφής του. Η χρήση διόδων ισχύος αποτελεί μία λύση, κάτι που προκαλεί αύξηση του κόστους και μείωση της αποδοτικότητας του όλου συστήματος εξαιτίας των απωλειών. Ακόμα ένα μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι όλο το σύστημα παραλύει σε περίπτωση συντήρησης ή βλάβης του αντιστροφέα. Τέλος, δεδομένου ότι τέτοιοι μετατροπείς σχεδιάζονται για συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος, ο σχεδιασμός ενός συστήματος με αυτήν την τεχνολογία δεν επιτρέπει την μελλοντική επέκταση του συστήματος.

#### 5.8.2.2 Τεχνολογία Αλυσίδας (String Technology)

Η τεχνολογία αλυσίδας αντικατέστησε την τεχνολογία κεντρικού αντιστροφέα και τυγχάνει μεγάλης αποδοχής σε χώρες πρωτοπόρες στον τομέα των Φ/Β. Ομοίως με την Τεχνολογία Κεντρικού Αντιστροφέα, τα πάνελ είναι συνδεδεμένα σε σειρά, με αποτέλεσμα να είναι δομημένα σε αλυσίδες. Η διαφορά είναι ότι κάθε αλυσίδα πλέον καταλήγει σε έναν αντιστροφέα ο οποίος μεταχειρίζεται μικρότερα ποσά ισχύος, οδηγώντας βέβαια στην παραγωγή μικρότερων ποσών ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή απευθύνεται κυρίως σε συστήματα μικρής σχετικά ισχύος και απεικονίζεται στο σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22: Τεχνολογία Αλυσίδας



Πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το χαμηλό κόστος και η απλότητα στη σύνδεση των πλασίων. Δεν απαιτείται η χρήση μετατροπών ανύψωσης, αν και υπάρχει η δυνατότητα όταν η συνεχής τάση δεν είναι στο επιθυμητό επίπεδο. Επίσης, συγκριτικά με την κεντριοποιημένη τεχνολογία, αυτή υπερτερεί διότι χρησιμοποιούνται περισσότεροι ανιχνευτές μέγιστης ισχύος επιτρέποντας την εκμετάλλευση των Φ/Β πλασίων στον βέλτιστο βαθμό, κάνοντας έτσι το σύστημα πιο αποδοτικό σε περιπτώσεις σκίασης. Η δυνατότητα για μαζική παραγωγή τέτοιων αντιστροφών οδηγεί στο αισθητά μειωμένο κόστος συγκριτικά με την τεχνολογία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επίσης είναι πιο αξιόπιστα συστήματα, ενώ και σε περίπτωση βλάβης ή συντήρησης, δεν είναι απαραίτητο να τεθεί όλο το σύστημα εκτός λειτουργίας. Τέλος, εξαιτίας του ιδιαίτερου σχεδιασμού του συστήματος, είναι εφικτή η μελλοντική επέκταση της ισχύος του με απλό και εύκολο τρόπο.

Όμως, μειονέκτημα παραμένει η ανάγκη ύπαρξης διατάξεων προστασίας εξαιτίας της υψηλής τάσης που παρουσιάζεται στα άκρα των αλυσίδων. Μπορεί να υπάρχει καλύτερη αντιμετώπιση του φαινομένου σκίασης όμως το πρόβλημα παραμένει αν κάποια από τα πλαίσια μιας αλυσίδας σκιάζονται, ελαττώνοντας έτσι την παραγωγή της συγκεκριμένης αλυσίδας.

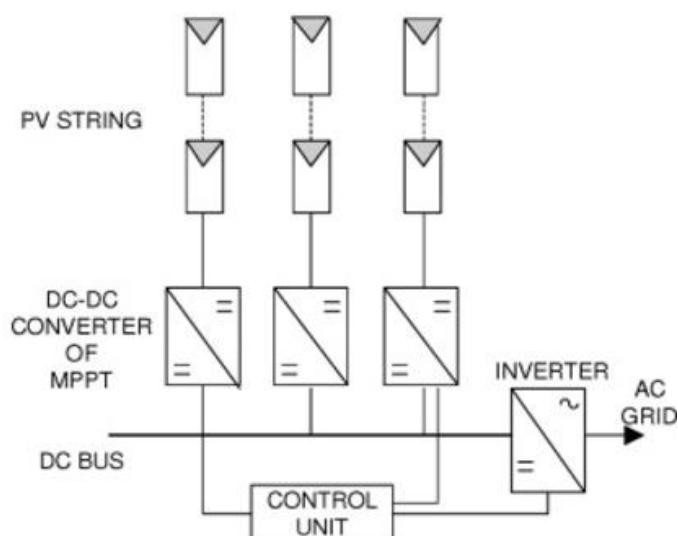
#### 5.8.2.3 Τεχνολογία Πολλαπλών Αλυσίδων (Multistring Technology)

Η τεχνολογία αυτή αποτελεί εξέλιξη της τεχνολογίας αλυσίδας επιτρέποντας τη χρησιμοποίησή της σε συστήματα μεγάλης ισχύος, αποφεύγοντας έτσι τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας κεντρικού αντιστροφέα, που είναι η εναλλακτική λύση για συστήματα μεγάλης ισχύος. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται πολλές αλυσίδες εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β πάνελ, οι οποίες οδηγούνται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα μέσω ανεξάρτητων μετατροπών ανύψωσης συνεχής τάσεως σε συνεχή.

Σημειώνεται πως τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων τεχνολογιών συνδυάζονται στην παρούσα τεχνολογία, δηλαδή ενώ αυτή ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και για συστήματα υψηλής ισχύος, επιτρέπει την μεγιστοποίηση της παραγωγής χάρη στους πολλούς ανεξάρτητους μετατροπείς συνεχούς σε συνεχή, καθένας από τους οποίους διαθέτει τον δικό του ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPPT). Ο μετατροπέας ανύψωσης είναι συνδεδεμένος με κάθε μία από τις αλυσίδες, οι οποίες μπορεί να αποτελούνται από διαφορετικό αριθμό πλασίων, κάτι που δίνει τη δυνατότητα άριστης συνεργασίας αυτών. Ταυτόχρονα, δύναται η λειτουργία κάθε αλυσίδας στο MPP, γεγονός που αποκτά ζωτική σημασία σε περιπτώσεις σκιάσεων και

οδηγεί το σύστημα στη μέγιστη δυνατή απόδοση. Συνοψίζοντας, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί και η ευχέρεια στην επέκταση ενός τέτοιου συστήματος.

Βέβαια, ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων τεχνολογιών έχει και συγκεκριμένα μειονεκτήματα. Η ύπαρξη ενός μόνο αντιστροφέα επηρεάζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση βλάβης και παράλληλα η ανάγκη για χρησιμοποίηση των μετατροπών ανύψωσης αυξάνει το κόστος.



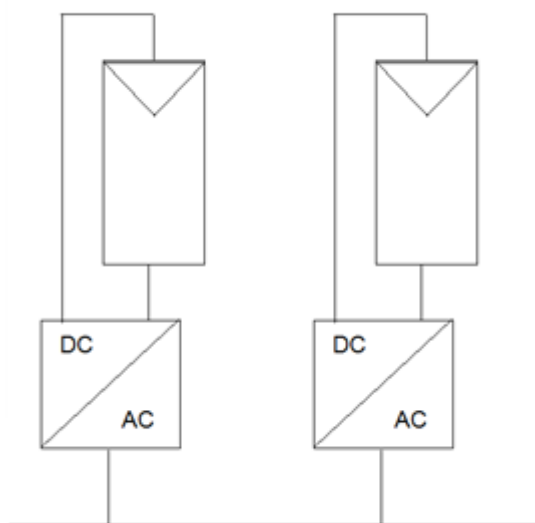
Σχήμα 5.23: Δομικό Διάγραμμα Τεχνολογίας Πολλαπλών Αλυσίδων

#### 5.8.2.4 Τεχνολογία Ενσωματωμένου Αντιστροφέα ανά Πλαίσιο (ACPV Module Technology)

Για συστήματα περιορισμένης ισχύος, αυτή αποτελεί την πιο πρόσφατη τεχνολογία στην διασύνδεση των Φ/Β πλαισίων. Σε κάθε ένα από αυτά συνδέεται ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης σε μονοφασική εναλλασσόμενη και έπειτα συνδέονται στο δίκτυο. Το πίσω μέρος των πλαισίων ή η βάση στήριξής τους είναι τα σημεία ενσωμάτωσης του εν λόγω αντιστροφέα.

Η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος για κάθε πλαίσιο αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της νέας, αυξάνοντας έτσι την παραγωγή κάτωτις εκάστοτε συνθήκες και μεγιστοποιώντας έτσι την αποδοτικότητα του

συστήματος. Επίσης, στα άκρα κάθε πλαισίου εμφανίζεται μικρή τάση και εξαιτίας αυτού δεν υπάρχει η ανάγκη για εξειδικευμένες διατάξεις προστασίας. Επίσης, υπάρχει αξιοπιστία στη λειτουργία του συστήματος, ενώ σε περιπτώσεις βλάβης ή συντήρησης δεν απαιτείται η συνολική διακοπή λειτουργίας του. Το κόστος αυτών των συστημάτων είναι περιορισμένο και διαρκώς τείνει προς μείωση, κάτι που οφείλεται στη δυνατότητα μαζικής παραγωγής τέτοιων πλαισίων.



*Σχήμα 5.24: Τεχνολογία Ενσωματωμένου Αντιστροφέα ανά Πλαίσιο*

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι οι μετατροπείς αυτοί είναι εκτεθειμένοι σε όλες τις καιρικές συνθήκες, φαινόμενο που προκαλεί εμφανή προβλήματα τους μήνες που οι θερμοκρασία του περιβάλλοντος αυξάνεται. Συγκεκριμένα, η ανεπαρκής απαγωγή θερμότητας από τα ημιαγωγικά στοιχεία των μετατροπέων και η χρήση πυκνωτών που επηρεάζονται από τη συνεπαγόμενη θέρμανσή τους, οδηγεί στη μείωση του αναμενόμενης διάρκειας ζωής τους. Επιπλέον, το ότι οι μετατροπείς είναι πιθανό να βρίσκονται σε επαφή με το πλαίσιο, μπορεί να οδηγήσει σε τοπική υπερθέρμανσή του, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του. Τέλος είναι απαραίτητη η ανύψωση της συνεχούς τάσης πριν την μετατροπή σε εναλλασσόμενη, είτε μέσω ενός μετατροπέα ανύψωσης είτε μέσω ενός μετασχηματιστή.

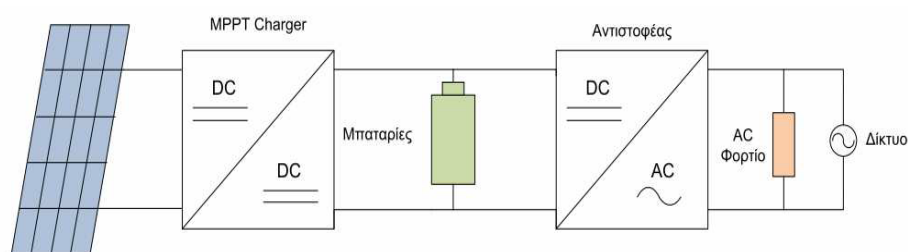
### 5.8.3 Μονοφασικοί Αντιστροφείς στα Φ/Β

Στα κατανεμημένα συστήματα παραγωγής ισχύος, οι λειτουργίες των αντιστροφέων περιλαμβάνουν μετατροπή συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, εξασφάλιση ποιότητας ισχύος εξόδου και έλεγχο συστημάτων. Τέτοια μικρά συστήματα πρέπει να έχουν μικρό κόστος, καθώς και υψηλή απόδοση για ένα ευρύ φάσμα τάσεων εισόδου. Αυτές οι απαιτήσεις έχουν οδηγήσει την ανάπτυξη της τεχνολογίας των αντιστροφέων προς απλούστερες κατασκευές. Εκτός από αντιστροφείς ενός επιπέδου, έχουν αναπτυχθεί και αντιστροφείς πολλών επιπέδων για τη μετατροπή ισχύος στα κατανεμημένα συστήματα παραγωγής ισχύος. Οι αντιστροφείς ενός επιπέδου παράγονται εύκολα και οικονομικά αλλά η απόδοσή τους εξαρτάται από το εύρος των τάσεων εισόδου. Αντιθέτως, οι αντιστροφείς πολλών επιπέδων λειτουργούν για ευρύ φάσμα των τάσεων εισόδου αλλά είναι αρκετά δαπανηροί, η δομή τους είναι περίπλοκη και η απόδοσή τους όχι τόσο ικανοποιητική..

Τα κατανεμημένα συστήματα παραγωγής ισχύος είναι συνήθως μικρές μονάδες οι οποίες μπορεί να είναι ανεμογεννήτριες, Φ/Β συστήματα, μικρές υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις καθώς και τα σχετικά συστήματα ελέγχου, διαχείρισης και αποθήκευσης ενέργειας. Τέτοια συστήματα συνήθως απαιτούν αντιστροφείς σαν ενδιάμεσα κυκλώματα μεταξύ των μονοφασικών φορτίων και των πηγών. Αυτοί αντιμετωπίζουν ένα μεγάλο εύρος αποκλίσεων της τάσης εισόδου λόγω των διακυμάνσεων των ΑΠΕ, γεγονός το οποίο επιβάλλει αυστηρές προϋποθέσεις για τη δομή και τον έλεγχο των αντιστροφέων. Μία λύση αποτελεί η δυνατότητα μετατροπής ισχύος από μεταβαλλόμενη συνεχή τάση σε ορισμένη εναλλασσόμενη για μεμονωμένες εφαρμογές ή έξοδος εναλλασσόμενου ρεύματος για εφαρμογές συνδεδεμένες στο δίκτυο, ανάλογη της τάσης και της συχνότητας του δικτύου. Επίσης, απαιτείται ικανοποιητική ποιότητα παρεχόμενης ισχύος με μειωμένη ολική αρμονική παραμόρφωση, ενώ ταυτόχρονα, μέσω λειτουργιών όπως η ηλεκτρική απομόνωση, απαιτείται προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας και του δικτύου από αφύσικες συνθήκες τάσης, ρεύματος, συχνότητας και θερμοκρασίας. Τέλος, χρειάζεται η ανίχνευση μεγίστου σημείου ισχύος Φ/Β στοιχείων και φυσικά βέλτιστος έλεγχος ροής ενέργειας. Στο σχήμα 5.25 φαίνεται ένα τυπικό μικρό Φ/Β σύστημα με μονοφασικό αντιστροφέα.

Ένας αντιστροφέας ενός επιπέδου διαθέτει μόνο ένα στάδιο μετατροπής ισχύος και διαμόρφωσης του ημιτονοειδούς ρεύματος ή της ημιτονοειδούς τάσης του φορτίου. Με γνώμονα τον αριθμό των εν χρήση διακοπών, οι αντιστροφείς ενός επιπέδου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τεσσάρων διακοπών (four – switch) και σε έξι διακοπών (six – switch). Από την άλλη πλευρά, ένας αντιστροφέας πολλών επιπέδων επιτελεί το έργο του σε περισσότερα από ένα στάδια μετατροπής ισχύος, όπου συνήθως σε ένα ή περισσότερα στάδια πραγματοποιείται ανύψωση ή υποβιβασμός τάσης είτε

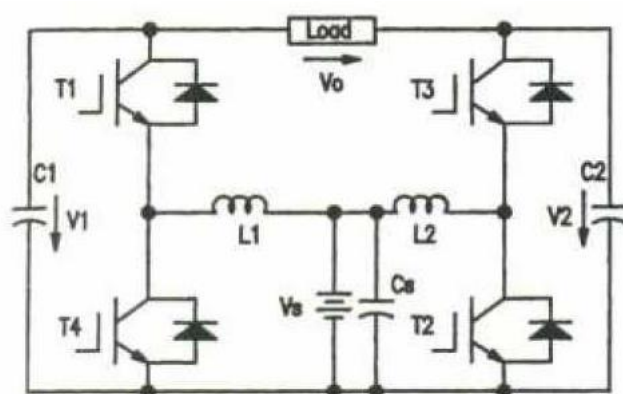
ηλεκτρική απομόνωση, ενώ στο τελευταίο στάδιο γίνεται η μετατροπή συνεχούς σε εναλλασσόμενο. Οι αντιστροφείς πολλών επιπέδων χωρίζονται στους DC-DC-AC, στους DC-AC-DC-AC και στους DC - AC – AC.



Σχήμα 5.25: Τυπικό Φ/Β Σύστημα

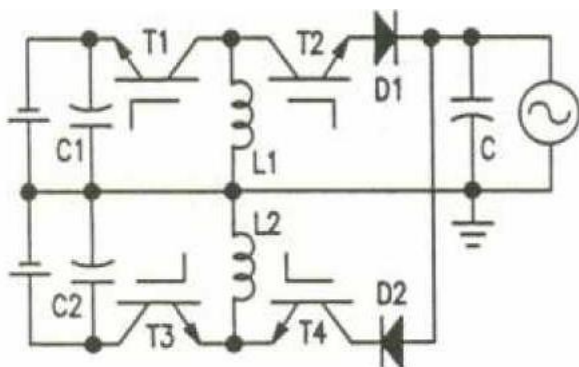
#### 5.8.3.1 Μονοεπίπεδοι Αντιστροφείς

Στο σχήμα 5.26 φαίνεται ένας μη απομονωμένος αντιστροφέας τύπου boost (ανύψωσης) όπου διακρίνονται δύο όμοιοι DC - DC μετατροπείς ανύψωσης τάσης, οι DC εισόδους των οποίων συνδέονται παράλληλα με μια DC πηγή και το φορτίο συνδέεται στις εξόδους τους. Κάθε μετατροπέας ρυθμίζεται ώστε να παράγει μια DC τετραγωνική, μονοπολική έξοδο με ημιτονοειδή συνιστώσα, με διαφορά φάσης  $180^\circ$  από την έξοδο του άλλου μετατροπέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ημιτονοειδή μορφή της εξόδου πάνω στο φορτίο.



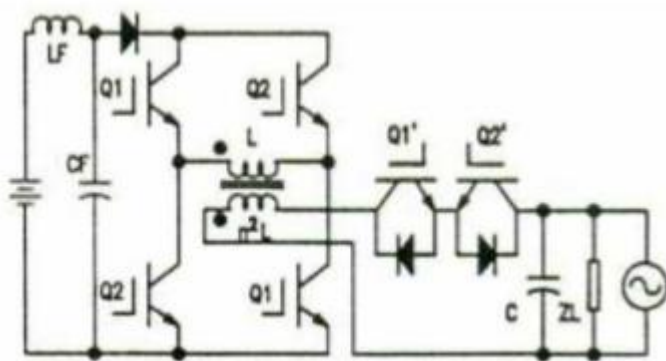
Σχήμα 5.26: Αντιστροφέας Ανύψωσης Τεσσάρων Διακοπών

Μια εναλλακτική διάταξη μικτού αντιστροφέα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.27, η οποία έχει δυνατότητα λειτουργίας σε ένα μεγάλο εύρος τάσεων εισόδου, αλλά απαιτεί διαφορετική πηγή συνεχούς τάσης για κάθε DC - DC μετατροπέα. Σε αυτή την τοπολογία διακρίνονται δύο μικτοί DC - DC μετατροπείς που μοιράζονται την ίδια έξοδο και λειτουργούν σε κάθε ημιπερίοδο με ξεχωριστή πηγή τροφοδοσίας και όχι κοινή, όπως στη διάταξη του Σχήματος 5.26. Αυτός ο αντιστροφέας βρίσκει εφαρμογή σε οικιακές εγκαταστάσεις Φ/Β στοιχείων με έλεγχο σημείου μέγιστης ισχύος.



Σχήμα 5.27: Μικτός Αντιστροφέας Τεσσάρων Διακοπών

Αναφορικά με τους αντιστροφείς έξι διακοπών (six-switch), μέσω του σχήματος 5.28 γίνεται αναφορά σε έναν απομονωμένο, τύπου flyback, μικτό αντιστροφέα ο οποίος περιλαμβάνει δύο μικτούς ψαλιδιστές (choppers) συνδεδεμένους σε γέφυρα τεσσάρων διακοπών με δύο επιπλέον διακόπτες. Η παραγωγή της επιθυμητής ισχύος εξόδου χωρίς να εξαρτάται από τη συνεχή τάση και την ηλεκτρική απομόνωση της Φ/Β γεννήτριας και της συσκευής αποτελεί σημαντικό προτέρημα αυτής της διάταξης.

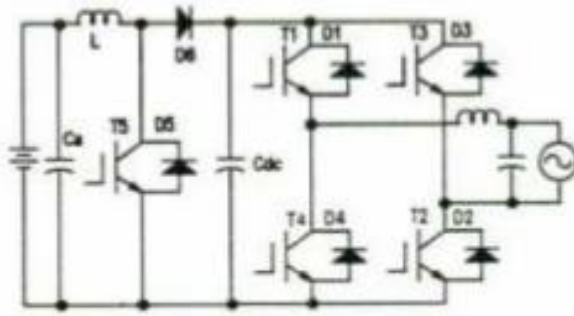


### 5.8.3.2 Πολυεπίπεδοι Αντιστροφείς

Για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ισχύς, υψηλή απόδοση και το εύρος τάσεων εισόδου είναι αρκετά μεγάλο, χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς πολλών επιπέδων. Αυτό συμβαίνει διότι αν και οι αντιστροφείς ενός επιπέδου παρουσιάζουν γενικά υψηλή απόδοση και χαμηλό κόστος, συνήθως χαρακτηρίζονται από περιορισμένη χωρητικότητα ισχύος και από χαμηλή ποιότητα ισχύος εξόδου. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η ενίσχυση και η απομόνωση (αν αυτή απαιτείται) στους αντιστροφείς αυτούς γίνεται στο πρώτο επίπεδο, ενώ η αντιστροφή γίνεται στο δεύτερο επίπεδο.

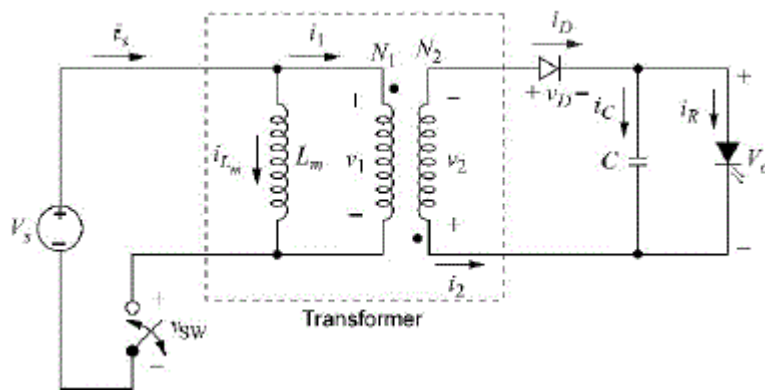
#### Διατάξεις DC - DC – AC

Στο σχήμα 5.29 φαίνεται ένας αντιστροφέας ανύψωσης δύο επιπέδων που χρησιμοποιείται σε μικρά αιολικά συστήματα και αποτελείται από έναν αντιστροφή υποβιβασμού που βρίσκεται πίσω από έναν DC - DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης. Με αυτή τη διάταξη, στο πρώτο στάδιο δημιουργείται μια ανυψωμένη DC τάση με ανεκτή κυμάτωση ενώ στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας υποβιβασμού. Η ισχύς εξόδου ελέγχεται συνήθως στο δεύτερο στάδιο και δεν απαιτείται τα δύο στάδια να είναι συγχρονισμένα. Επιπλέον, είναι δυνατό να ελεγχθεί το πρώτο επίπεδο ώστε η DC διασύνδεση να είναι μια ελεγχόμενη ανορθωμένη κυματομορφή και στη συνέχεια το δεύτερο επίπεδο θα αναλαμβάνει τη μετατροπή μόνο της κυματομορφής σε εναλλασσόμενη έξοδο με συχνότητα γραμμής. Έτσι, μειώνονται οι συνολικές διακόπτηκες απώλειες και κατ'επέκταση βελτιώνεται η απόδοση, ενώ παράλληλα καταπονείται λιγότερο ο ενδιάμεσος πυκνωτής της DC διασύνδεσης (DC-link capacitor). Σε συνδυασμό με αντιστροφείς συχνότητας γραμμής, η συγκεκριμένη διάταξη βρίσκει εφαρμογή σε Φ/Β εγκαταστάσεις που είναι συνδεδεμένες και με το δίκτυο.



Σχήμα 5.29: Αντιστροφέας Ανύψωσης Δύο Επιπέδων

Ένας απομονωμένος flyback αντιστροφέας υποβιβασμού φαίνεται στο σχήμα 5.30. Στο πρώτο μέρος του κύκλου παλμοδότησης, η ισχύς εισόδου, που είναι σταθερή λόγω του ελέγχου εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος ελέγχεται και προσαρμόζεται από τον μικτό DC - DC μετατροπέα, ενώ ένας πυκνωτής στο ενδιάμεσο αποθηκεύει την ενέργεια. Στο δεύτερο μέρος του κύκλου, ο μετατροπέας flyback ελέγχει ένα μέρος της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στον ενδιάμεσο πυκνωτή. Στο τρίτο επίπεδο, η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο μαγνητισμένο πηνίο, μεταφέρεται στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και από εκεί, μέσω των διακοπών SAC1 και SAC2, διοχετεύεται σε μονοφασικό δίκτυο, αφού περάσει από ένα φίλτρο LC. Εξαιτίας αυτού, ο ενδιάμεσος πυκνωτής εφαρμόζεται για προσωρινή αποθήκευση ενέργειας. Ζωτικής σημασίας πλεονέκτημα για αυτή τη διάταξη αποτελεί η αύξηση του ορίου ζωής του αντιστροφέα μέσω της χρήσης μικρών πυκνωτών αντί των μεγάλων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών.

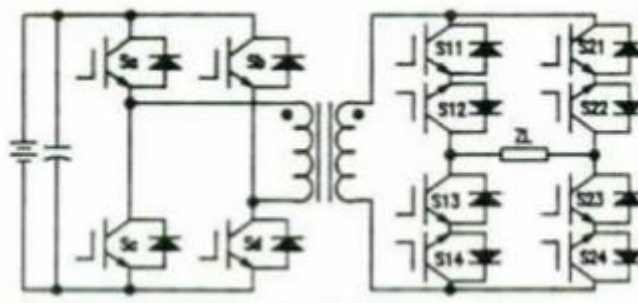


Σχήμα 5.30: Flyback Αντιστροφέας



### Διατάξεις DC - AC – AC

Σε συστήματα που διατηρούν την αυτονομία τους, είναι αναγκαία η αμφίδρομη ροή ισχύος για τον έλεγχο των αντιστροφών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ροή ισχύος πρέπει να επιτρέπεται τόσο από την είσοδο προς την έξοδο όσο και αντίστροφα. Στο σχήμα 5.30 παρουσιάζεται η εφαρμογή του προηγούμενου, όπου το δεύτερο επίπεδο αποτελεί έναν αμφίδρομο AC - AC μετατροπέα, χωρίς ενδιάμεση DC διασύνδεση, με αποτέλεσμα την εξάλειψη των ογκωδών στοιχείων των φίλτρων της ενδιάμεσης DC διασύνδεσης που υπάρχουν στους περισσότερους αντιστροφείς ανύψωσης πολλαπλών επιπέδων. Η απομόνωση και η αλλαγή της τάσης σε αυτόν τον μετατροπέα επιτυγχάνονται μέσω ενός μετασχηματιστή υψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 5.31: Μετατροπέας DC - AC – AC

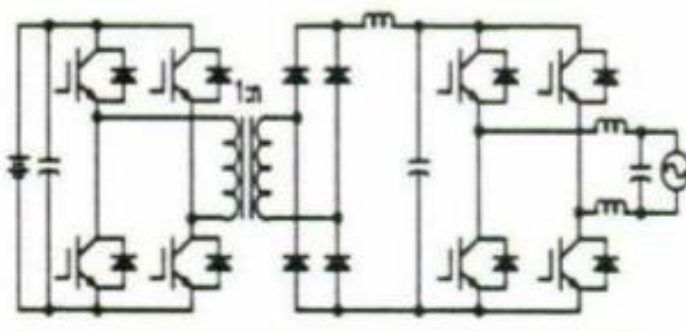
Άξια αναφοράς είναι η ανάγκη για μετασχηματιστές υψηλών συχνοτήτων στα πρώτα επίπεδα, με σκοπό να παρέχεται η απαραίτητη ηλεκτρική απομόνωση και να αυξάνεται ο λόγος ανύψωσης. Ταυτόχρονα, η χρήση αντιστροφών συχνότητας γραμμής ενδείκνυται να γίνεται στα τελευταία στάδια, με σκοπό τις ελάχιστες απώλειες λόγω της αλλαγής θέσεων των διακοπών. Παρόλα αυτά, οι μεγαλύτερες απώλειες των αντιστροφών πολλαπλών επιπέδων δε δύναται να αποφευχθούν, αφού αυτοί περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερα επίπεδα μετατροπής ισχύος για τη λειτουργία σε μεγαλύτερο εύρος τάσεων εισόδου και μεγαλύτερη χωρητικότητα ισχύος.

### Διατάξεις DC - AC - DC – AC

Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με μεγάλο λόγο ανύψωσης τάσης αποτελούνται συνήθως από DC - AC - DC μετατροπείς υψηλών

συχνοτήτων, με σκοπό την παραγωγή ελεγχόμενης συνεχούς τάσης από μεταβαλλόμενη, καθώς και από αντιστροφείς υψηλών συχνοτήτων ή συχνότητας γραμμής, με στόχο την επιθυμητή έξοδο. Οι διατάξεις πολλών επιπέδων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την ενδιάμεση DC διασύνδεση μεταξύ δύο επιπέδων σε συνεχούς διασύνδεσης μεταξύ των δύο επιπέδων και σε συνεχούς ψευδοδιασύνδεσης μεταξύ των δύο επιπέδων.

Μια διάταξη με ενδιάμεση DC διασύνδεση είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.32, όπου η ανύψωση και ο έλεγχος της σταθερής τάσης της DC διασύνδεσης πραγματοποιούνται μέσω του πρώτου αντιστροφέα, ενός μετασχηματιστή υψηλών συχνοτήτων, ενός ανορθωτή και ενός φίλτρου. Η διάταξη να χαρακτηρίζεται από υψηλές απώλειες και υψηλό κόστος.



Σχήμα 5.32: Αντιστροφέας Πολλών Επιπέδων με Μετασχηματιστή Υψηλών Συχνοτήτων

## 5.9 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS- Flexible AC Transmission Systems)

### 5.9.1 Γενικά

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ) περιλαμβάνουν ως μέρος της δομής τους ελεγκτές βασισμένους σε ηλεκτρονικά ισχύος με σκοπό τη μείωση της διαφοράς μεταξύ θερμικού ορίου και ορίου ευστάθειας, τη βελτίωση της ικανότητας ασφαλούς μεταφοράς ισχύος και τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου του συστήματος μεταφοράς. Τα ΕΣΜ ωφελούν σε σημαντικό βαθμό τη λειτουργία όλου του συστήματος, έχοντας ως κύριο αντικείμενο αφενός να αυξήσουν τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του

συστήματος μεταφοράς και αφετέρου να κατευθύνουν την ισχύ σε επιθυμητές διαδρομές στο σύστημα μεταφοράς.

Η σύγχρονη ανταγωνιστική εποχή απαιτεί, μέσω των διαρκώς εξελισσόμενων ΣΗΕ, την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η δημιουργία ενός δικτύου ελεύθερης πρόσβασης για προμηθευτές, παραγωγούς, καταναλωτές και τους εκάστοτε φορείς της αγοράς αναδεικνύεται σε βασική επιδίωξη της σύγχρονης πραγματικότητας. Ο ανταγωνισμός έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη διαφοροποίηση των συνθηκών τόσο στην παραγωγή όσο και στην μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα συστήματα μεταφοράς εμφανίζονται προβλήματα, όπως υπερφόρτιση των γραμμών μεταφοράς, θέματα ευστάθειας τάσης και μεταβατικής ευστάθειας. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, η λύση της εγκατάστασης και όδευσης νέων γραμμών μεταφοράς δεν είναι μία εύκολη επιλογή, εξαιτίας του μεγάλου κόστους και χρόνου κατασκευής και λόγω της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και των περιορισμών που τίθενται από τις ρυθμιστικές αρχές ενέργειας και άλλους οργανισμούς. Έτσι λοιπόν, λόγω αυτών των προκλήσεων καθώς και των απαιτήσεων των νέων ΣΗΕ, η τεχνολογία των ΕΣΜ αποτελεί μία εναλλακτική λύση τόσο για τα σημερινά όσο και για τα μελλοντικά ΣΗΕ.

Το εκάστοτε σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επωφελείται από τα ΕΣΜ σε θέματα όπως η αξιοπιστία, η ικανότητα φόρτισης και η ευελιξία στη μεταφορά του εναλλασσόμενου ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα:

- ❖ Βελτιώνεται η ευστάθεια του συστήματος μέσω της ικανότητάς τους να επηρεάζουν θετικά την δυναμική ευστάθεια των συστημάτων και την ευστάθεια μόνιμης κατάστασης, συνεπικουρούμενα από το γεγονός ότι τα ΕΣΜ διευρύνουν το όριο μεταβατικής ευστάθειας, αλλά και της ευστάθειας τάσης.

- ❖ Αυξάνουν τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς και ταυτόχρονα παρέχουν καλύτερο έλεγχο της ροής πραγματικής και αέργου ισχύος.

- ❖ Βελτιώνουν τον έλεγχο της τάσης αλλά και την ευστάθεια της τάσης (μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας) του δικτύου με τη βελτίωση του δείκτη ευστάθειας τάσης και του περιθωρίου φόρτισης.

- ❖ Βελτιώνουν το προφίλ της τάσης του συστήματος με την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων της τάσης από τις προδιαγραφές, των διακυμάνσεων της τάσης (flicker) και των αρμονικών και παράλληλα επιτυγχάνουν την αύξηση της φόρτισης του συστήματος, μειώνοντας τις υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς.

- ❖ Ενισχύουν τις αποσβέσεις των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του συστήματος, βελτιώνουν την ποιότητα της ενέργειας και πραγματοποιούν

μείωση του φαινομένου της συμφόρησης κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

❖ Τέλος, ελαχιστοποιούν τις απώλειες του συστήματος και αυξάνουν στο μέγιστο βαθμό τη χρησιμότητα του καταναλωτή.

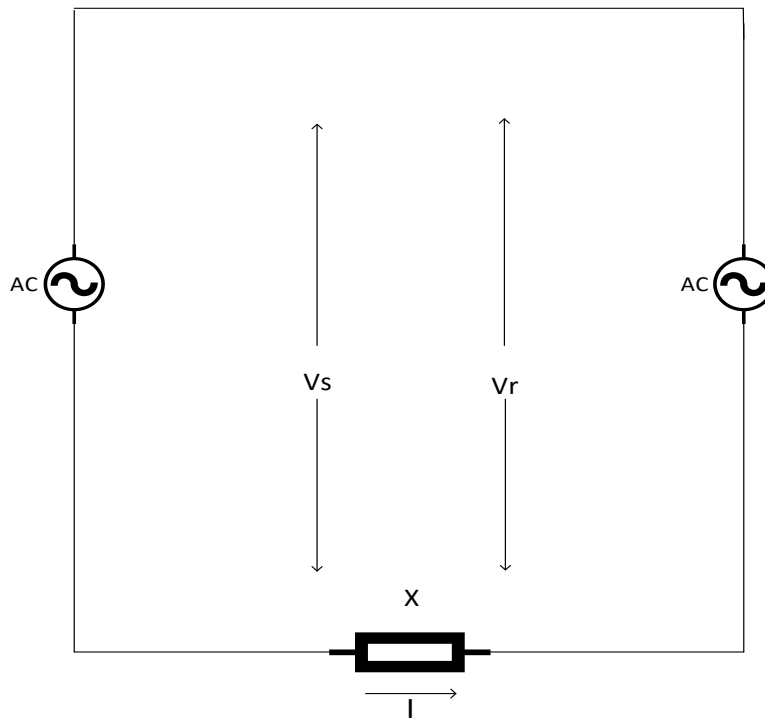
Η μεταφερόμενη ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς επηρεάζεται άμεσα από την επαγωγική αντίδραση της γραμμής, το μέτρο της τάσης αναχώρησης και άφιξης και της μεταξύ τους γωνίας. Ελέγχοντας έτσι κάποια ή και όλες από τις παραπάνω παραμέτρους είναι δυνατόν να ελεγχθεί η ενεργός ισχύς καθώς και η άεργος ισχύς σε μία γραμμή μεταφοράς. Σύμφωνα με το μοντέλο δύο μηχανών και της γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες και εγκάρσιες αγωγιμότητες (Σχήμα 5.34) και θεωρώντας ότι το διάνυσμα ρεύματος είναι το διάνυσμα μεταφοράς  $\vec{I} = I < 0^\circ$ , τότε η ενεργός ισχύς έχει την ίδια τιμή σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος και δίνεται από τη σχέση (5.6). Η άεργος ισχύς στην αρχή και στο πέρας της γραμμής είναι διαφορετικές και υπολογίζονται από τις σχέσεις (5.7) και (5.8) αντίστοιχα.

$$P_s = P_r = P = \frac{V_s V_r}{X} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (5.6)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X} - \frac{V_s V_r \cos(\delta_s - \delta_r)}{X} \quad (5.7)$$

$$Q_r = \frac{V_r^2}{X} - \frac{V_s V_r \cos(\delta_r - \delta_s)}{X} \quad (5.8)$$

Όπου  $P_s, P_r$ : η ενεργός ισχύς στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα  $Q_s, Q_r$ : η άεργος ισχύς στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα  $V_s, V_r, \delta_s, \delta_r$ : τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων στην αναχώρηση και στην άφιξη της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.34: Μοντέλο Δύο Μηχανών και Γραμμής Μεταφοράς

Τονίζεται ότι η ικανότητα ελέγχου των παραπάνω παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί το βασικό σκοπό των ΕΣΜ, ενώ παράλληλα η μεταβατική και δυναμική ευστάθεια, καθώς επίσης και η ικανότητα απόσβεσης διαφόρων ταλαντώσεων στο ΣΗΕ είναι δυνατό να αυξηθούν μέσω της ικανότητας γρήγορου ελέγχου της ισχύος, μέσα στα κατάλληλα καθορισμένα όρια. Ως μεταβατική ευστάθεια ορίζεται η ικανότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε συγχρονισμό όταν υπόκειται σε μεγάλες διαταραχές, όπως σφάλματα (βραχυκυκλώματα, απώλεια γραμμών μεταφοράς), ή μεγάλες απώλειες στην παραγωγή, ενώ ως δυναμική ευστάθεια ορίζεται η ικανότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε συγχρονισμό όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές.

Οι πρώτες μορφές αντιστάθμισης σε μία γραμμή μεταφοράς που εφαρμόστηκαν κυρίως τα προηγούμενα χρόνια διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν για να επιτύχουν την επιθυμητή αντιστάθμιση. Η σειριακή αντιστάθμιση, η εγκάρσια αντιστάθμιση και η αντιστάθμιση μέσω μετασχηματιστών ρύθμισης φασικής γωνίας και τάσης αποτελούν αυτές τις τρεις κατηγορίες. Είναι συνήθης τακτική στα συστήματα ισχύος να τοποθετούνται εν σειρά πυκνωτές (σειριακή αντιστάθμιση) για τη μείωση της συνολικής επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς, τακτική η οποία ακολούθως οδηγεί στην αύξηση του ορίου μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής και επίσης στην αύξηση της ικανότητας φόρτισης μίας γραμμής μεγάλου μήκους υπερυψηλής τάσης. Με

αυτόν τον τρόπο καταβάλλεται μόνο ένα μέρος του κόστους που θα χρειαζόταν για την εγκατάσταση μιας νέας γραμμής μεταφοράς. Οι εγκάρσιοι πυκνωτές (εγκάρσια αντιστάθμιση) χρησιμοποιούνται για την παροχή μέρος της αέργου ισχύος που ζητείται από το φορτίο και έτσι μειώνεται η άεργος ισχύς που μεταφέρεται μέσω της γραμμής, διατηρώντας την τάση του συστήματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Η ρύθμιση φασικής γωνίας και μέτρου της τάσης επιτυγχανόταν αρχικά με τη μεσολάβηση μετασχηματιστών. Η μετατόπιση γωνίας εφαρμόζεται για τον έλεγχο της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, εισάγοντας μια επιπρόσθετη γωνία μεταξύ της τάσης αναχώρησης και άφιξης.

Μέχρι πρόσφατα οι μετασχηματιστές αυτοί υπολείπονταν σε ταχύτητα και αυτό οφειλόταν στο γεγονός ότι ελέγχονταν μηχανικά. Ταυτόχρονα, είναι πολύ χρήσιμοι στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου, η χρονική απόκριση είναι πολύ αργή για να ελαχιστοποιήσει τις μεταβατικές ταλαντώσεις. Στην πραγματικότητα, οι κλασσικές μέθοδοι αντιστάθμισης αέργου ισχύος καλύπτουν μόνο κάποια από τα προβλήματα που συναντώνται στα ενεργειακά δίκτυα εναλασσόμενου ρεύματος. Έτσι, με τους τρόπους που προαναφέρθηκαν, βελτιώνεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συστήματος και σε κάποιο βαθμό η ικανότητά του να επανέρχεται γρήγορα σε ομαλή λειτουργία μετά από διάφορες μεταβατικές καταστάσεις. Άρα ο έλεγχος του συστήματος, η μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων γίνεται ταχύτατα και σύμφωνα με τη σύγχρονη τεχνολογία, ενώ η διαδικασία αντιστάθμισης καθυστερεί εμφανώς λόγω της αδράνειας και της μηχανικής καταπόνησης των κινούμενων ηλεκτρομηχανικών τμημάτων. Κατά συνέπεια, εμφανίζεται αδυναμία εφαρμογής ουσιαστικού ελέγχου σε περιπτώσεις μεταβατικών/δυναμικών καταστάσεων, όπου είναι αναγκαίος ο ταχύτατος έλεγχος. Βασικό μειονέκτημα των κλασσικών μεθόδων αντιστάθμισης αποτελεί το γεγονός ότι η άεργος ισχύς ελέγχεται συνεχώς (κατά βήματα) και μόνο ως προς τη θετική κατεύθυνση, επειδή εισάγοντας ή εξάγοντας πυκνωτές στο δίκτυο, εισάγονται ή εξάγονται στην ουσία σταθερές χωρητικές ποσότητες, με αποτέλεσμα την εμφάνιση «σκαλοπατιών» στην αντιστάθμιση. Επομένως, έγινε απαραίτητη η ανάπτυξη της τεχνολογίας των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς (ΕΣΜ) (Flexible AC Transmission Systems, FACTS), τα οποία συμβάλλουν στην αποδοτικότερη αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων πόρων και δυνατοτήτων των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

### **Βασικές αρχές ελέγχου ενεργού και άεργου ροής ισχύος**

Η ενεργός και άεργος ισχύς σε μια γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από τα μέτρα των τάσεων αναχώρησης και άφιξης και από τις αντίστοιχες φασικές γωνίες τους καθώς και από την επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Για να γίνει ευκολότερη η κατανόηση των βασικών εννοιών περί της ροής ισχύος,

χρησιμοποιούμε το απλό μοντέλο των δύο μηχανών το οποίο φαίνεται στο σχήμα 5.35.

Η γραμμή μεταφοράς μεταξύ δύο μηχανών θεωρείται χωρίς απώλειες με επαγωγική αντίδραση  $X$ . Η τάση  $\tilde{V}_R$  στο άκρο άφιξης θεωρείται ως τάση αναφοράς, δηλαδή έχει γωνία μηδέν. Φαινόμενη, ενεργός και άεργος ισχύς συνδέονται από τη σχέση  $S = P + jQ = \tilde{V}I$ .

Για την αρχή της γραμμής προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις :

$$S_R = P_R + jQ_R = \tilde{V}_R \tilde{I} \quad (5.9)$$

$$P_R = P_{max} \sin \delta \quad (5.10)$$

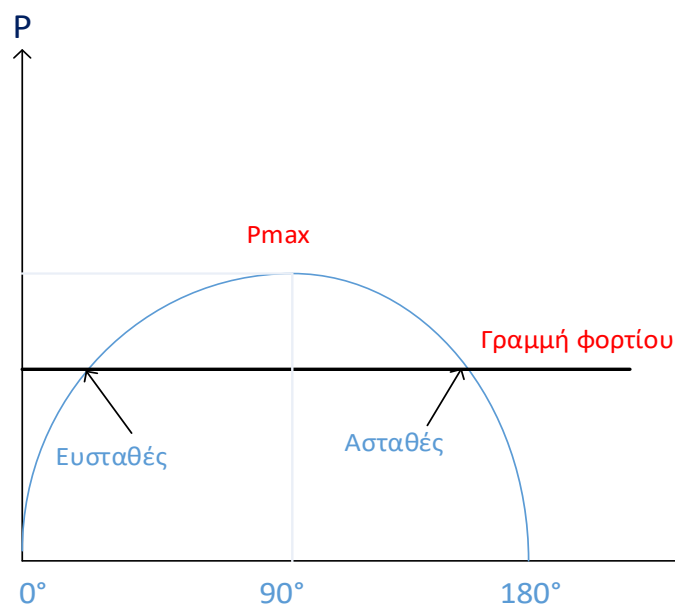
$$Q_R = P_{max} \cos \delta - \frac{V_R^2}{X} \quad (5.11)$$

Για το πέρας της γραμμής έχουμε :

$$P_S = P_{max} \sin \delta \quad (5.12)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X} - P_{max} \cos \delta \quad (5.13)$$

όπου  $V_S, V_R$  τα μέτρα των τάσεων άφιξης και αναχώρησης,  $\delta$  η μεταξύ τους διαφορά γωνίας και  $P_{max} = \frac{V_S V_R}{X}$ . Οι εξισώσεις τόσο για την εξερχόμενη ενεργό ισχύ  $P_R$  όσο και για την εισερχόμενη ενεργό ισχύ  $P_S$  είναι ισοδύναμες, εξαιτίας της υπόθεσης του χωρίς απώλειες συστήματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.35 (β) η μέγιστη μεταφερόμενη ενεργός ισχύς  $P_{max}$ , προκύπτει για γωνία  $\delta=90^\circ$  χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ωμικές απώλειες, ενώ ανσυνυπολογιστούν και αυτές, τότε η τιμή της γωνίας  $\delta$  για την οποία έχουμε μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ είναι διαφορετική. Το αν το σύστημα είναι ευσταθές ή όχι εξαρτάται από το αν η παράγωγος  $\frac{dP}{d\delta}$  είναι αντίστοιχα θετική ή αρνητική. Η μέγιστη ισχύς  $P_{max}$  που μπορεί να μεταφερθεί χωρίς να αποσυγχρονισθούν οι μηχανές των άκρων αναχώρησης και άφιξης προκύπτει για μηδενική τιμή της παραγώγου  $\frac{dP}{d\delta}$  και αποτελεί το όριο στατικής ευστάθειας.



Σχήμα 5.35: Καμπύλη Ενεργού Ισχύος-Γωνίας

Είναι βέβαιο πως σε ένα σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να προβλέπεται ένα συγκεκριμένο περιθώριο στη μεταφορά ισχύος ούτως ώστε αυτό να είναι ικανό να χειριστεί διαταραχές, όπως μεταβολές στο φορτίο, σφάλματα στο δίκτυο (βραχυκυκλώματα) και χειρισμούς μεταγωγής (άνοιγμα-κλείσιμο διακοπών). Αυτό συμβαίνει για να μη λειτουργεί το σύστημα κοντά στο όριο στατικής ευστάθειας. Επιπλέον, όπως μπορεί να φανεί από το σχήμα 5.35, η τομή μεταξύ της γραμμής φορτίου, η οποία αντιπροσωπεύεται από τη μηχανική ισχύ στην αναχώρηση και της καμπύλης μεταφερόμενης ισχύος, καθορίζει την τιμή της γωνίας  $\delta$  μόνιμης κατάστασης. Ως εκ τούτου, μια μικρή αύξηση στη μηχανική ισχύ στο άκρο αναχώρησης αυξάνει τη γωνία  $\delta$ .

Για γωνίες με τιμές άνω των  $90^\circ$  η παραμικρή αύξηση ισχύος επιταχύνει την γεννήτρια και καθιστά το σύστημα ασταθές. Ωστόσο στο αριστερό σημείο τομής, αύξηση της γωνίας  $\delta$  προκαλεί αύξηση της ηλεκτρικής ισχύος για να ισοσταθμίσει την αύξηση της μηχανικής ισχύος. Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου περιθωρίου ως προς τη γωνία φορτίου  $\delta$ , χρησιμοποιείται η βασική ιδέα της δυναμικής ευστάθειας ή της μεταβατικής ευστάθειας.

Δυναμική ευστάθεια είναι η ικανότητα που έχει το Σ.Η.Ε να παραμένει συγχρονισμένο κάτω από μικρές διαταραχές, ενώ μεταβατική ευστάθεια είναι η ικανότητα που διαθέτει το Σ.Η.Ε να παραμένει συγχρονισμένο όταν υπόκειται σε διάφορες μεταβατικές διαταραχές, όπως σφάλματα (βραχυκυκλώματα, απώλεια γραμμών μεταφοράς) ή απώλειες στην παραγωγή. Μια τυπική ισχύς μεταφοράς αντιστοιχεί σε γωνίες ισχύος κάτω των  $30^\circ$ , αλλά οι τιμές των γωνιών στα διάφορα σημεία του συστήματος



μεταφοράς, συνήθως είναι κάτω των  $45^\circ$ , με σκοπό να είμαστε σίγουροι για την μόνιμη ευσταθή κατάσταση του δρομέα

Οι εξισώσεις (5.10) και (5.12) δείχνουν ότι η μεταφερόμενη ενεργός ή πραγματική ισχύς εξαρτάται κυρίως από τη γωνία ισχύος  $\delta$ , ενώ αναλύοντας τις εξισώσεις (5.11) και (5.13) παρατηρούμε ότι για μεγάλες γωνίες οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ στην αναχώρηση και άφιξη της γραμμής είναι υπερβολικές. Μπορούμε επίσης να συμπεράνουμε ότι τα μέτρα των τάσεων, με φορά ροής από την υψηλότερη τάση προς τη χαμηλότερη τάση, επηρεάζουν τη μεταφορά αέργου ισχύος, ενώ το πρόσημο της γωνίας ισχύος επηρεάζει την κατεύθυνση της ροής ενεργού ισχύος. Οι εξισώσεις (5.10) μέχρι και (5.13) δείχνουν ότι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, τα μέτρα των τάσεων άφιξης και αναχώρησης και η φασική γωνία μεταξύ των δύο αυτών τάσεων επηρεάζουν σημαντικά τη ροή ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς.

Για παράδειγμα, μια αύξηση ή μείωση της επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής μεταφοράς, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (5.10) και (5.12) μειώνει ή αυξάνει αντίστοιχα τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ  $P_{max}$ . Επίσης η γωνία μεταξύ των δύο άκρων μεταβάλλεται μέσω αλλαγής της επαγωγικής αντίδρασης  $X$ , για δεδομένη τιμή ροής ισχύος. Η μεταφερόμενη ισχύς της γραμμής μεταφοράς με τη σειρά της επηρεάζεται μέσω ρύθμισης στα μέτρα των τάσεων, αναχώρησης  $V_S$  και άφιξης  $V_R$ . Παρόλα αυτά, οι τιμές αυτές υποβάλλονται σε ένα στενό έλεγχο λόγω των απαιτήσεων φορτίου, μεταξύ 0,95α.μ και 1,05α.μ.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ροής ισχύος, αλλά επίσης έχουν μια θετική επίδραση στη μεταβατική και δυναμική ευστάθεια του συστήματος. Επιπλέον, δύναται να επιτευχθεί αύξηση της δυνατότητας απόσβεσης των ταλαντώσεων που προκαλούνται από κάποιο είδος σφάλματος, αφού η έλλειψη υποστήριξης αέργου ισχύος στο σύστημα αποτελεί βασική αιτία που προκαλεί αστάθεια τάσης σε ένα Σ.Η.Ε.

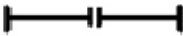






## 5.9.2 Κατηγορίες ΕΣΜ

Με κριτήριο τη δομή τους, τα ΕΣΜ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στα ΕΣΜ που βασίζονται σε θυρίστορ (thyristor based FACTS) και στα ΕΣΜ που βασίζονται σε μετατροπείς πηγών τάσεως [Voltage-Source Converter (VSC) based FACTS].

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν μετατροπείς που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση συνιστωσών, όπως μετασχηματιστών, πυκνωτών ή πηνίων με ρύθμιση φάσεως. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ελεγχόμενοι αντισταθμιστές σειράς (Thyristor Controlled Series Capacitors, TCSC), τα συστήματα ελέγχου άεργου ισχύος (Static Var Compensators, SVC), οι ρυθμιστές γωνίας φάσεως (Phase Shifters, PS) και πιο συγκεκριμένα οι (Thyristor Controlled Phase-Shifting Transformer, TCPST) ή αλλιώς (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR) ή αλλιώς (Static Phase Shifting Transformers, SPST), και τέλος ο ρυθμιστής τάσης ελεγχόμενος από θυρίστορ (Thyristor-Controlled Voltage Regulator, TCVR). Κάθε μία από τις υποκατηγορίες αυτές των ΕΣΜ, επιδρά σε μία διαφορετική παράμετρο της γραμμής μεταφοράς (τάση, σύνθετη αντίσταση, γωνία) και φυσικά χρησιμοποιεί θυρίστορς (ημιαγωγικά στοιχεία χωρίς δυνατότητα εξαναγκασμένης σβέσης). Έτσι λοιπόν, το TCSC επιδρά στη σύνθετη αντίσταση, το SVC επιδρά στην τάση και το TCPST στη φασική γωνία. Τα συστήματα αυτά είναι παρόμοια με συστοιχίες πυκνωτών ή πηνίων με διακοπτική ζεύξη και μετασχηματιστές με μηχανική αλλαγή λήψεως γωνίας, αλλά έχουν πολύ ταχύτερη απόκριση και καλύτερο έλεγχο.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μετατροπείς που υλοποιούν ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές τάσεως ή ρεύματος (SVS/SCS-Synchronous Voltage/Current Sources) και χρησιμοποιούν συνήθως GTO (Gate Turn Off thyristors). Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές σειράς (Static Synchronous Series Compensators, SSSC), οι ελεγχόμενοι σύγχρονοι αντισταθμιστές (Static Synchronous Compensators, STATCOM), οι ρυθμιστές ροής ισχύος μεταξύ γραμμών μεταφοράς (Interline Power Flow Controllers, IPFC), καθώς και οι ενοποιημένοι ρυθμιστές ροής ισχύος (Unified Power Flow Controllers, UPFC). Αυτά τα συστήματα είναι σημαντικά βελτιωμένα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας, ενώ επίσης δίνουν τη δυνατότητα της έγχυσης ή της απορρόφησης ενεργού ισχύος. Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς που εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία είναι το SSSC που παρέχει αντιστάθμιση σειράς, με άμεσο έλεγχο της τάσης κατά μήκος της γραμμής, το STATCOM το οποίο ρυθμίζει την τάση της γραμμής μέσω εγκάρσιας άεργης αντιστάθμισης και το UPFC, το οποίο μπορεί να ελέγξει είτε ανεξάρτητο είτε συνδυαστικά με άλλα συστήματα FACTS συνολικά και τις τρεις παραμέτρους της γραμμής (τάση, σύνθετη αντίσταση, και γωνία).

Με κριτήριο τη σύνδεση στο δίκτυο, τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς κατηγοριοποιούνται σε σειριακά, εγκάρσια και σε συνδυασμό αυτών. Αρχικά, σειριακά λογίζονται αυτά που παρέχουν ολικό έλεγχο της ενεργούς ισχύος και μερικό της άεργου ισχύος, όπως το TCSC και το SSSC, ενώ εγκάρσια, όπως το SVC και το STATCOM, θεωρούνται εκείνα που παρέχουν ολικό έλεγχο της άεργου ισχύος και της τάσης του συστήματος, ενώ συνδυασμό των παραπάνω αποτελούν το UPFC, το TCPST και το TCVR.

Αρχή	Συσκευές	Διάταξη	Επίδραση στην απόδοση		
			Ροή Φορτίου	Ευστάθεια	Ποιότητα Τάσης
Variation of the Line Impedance: Series Compensation	<b>FSC</b> (Fixed Series Compensation)		●	● ● ● ●	●
	<b>TPSC</b> (Thyristor Protected Series Compensation)		●	● ● ● ●	●
	<b>TCSC</b> (Thyristor Controlled Series Compensation)		● ●	● ● ● ●	●
Voltage Control: Shunt Compensation	<b>SVC</b> (Static Var Compensator)		○	● ●	● ● ● ●
	<b>STATCOM</b> (Static Synchronous Compensator)		○	● ●	● ● ● ●
Load-Flow Control	<b>HVDC (B2B, LDT)</b>		● ● ● ●	● ● ● ●	● ●
	<b>UPFC</b> (Unified Power Flow Controller)		● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●

Σχήμα 5.36: Κατηγορίες Ελεγκτών FACTS (όσο περισσότερες οι κουκίδες σε κάθε πεδίο, τόσο μεγαλύτερη η επίδραση)

#### 5.9.2.1 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Θυρίστορ

##### Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)

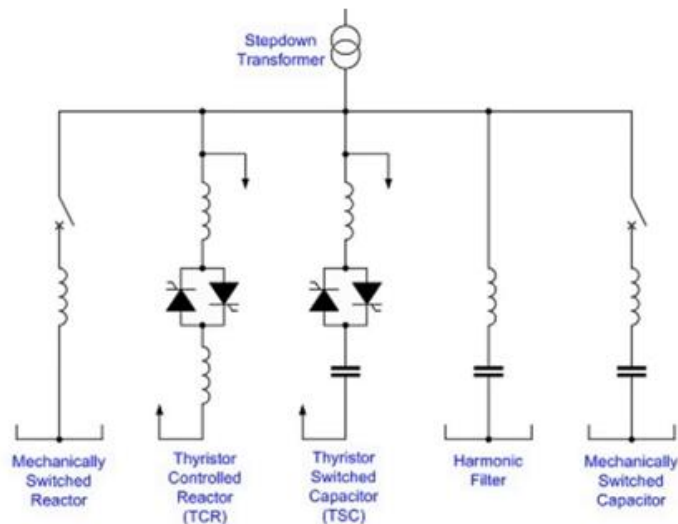
Η χρήση των στατικών διακοπών με θυρίστορ έλυσε τα σημαντικά προβλήματα που παρουσίαζαν τα μηχανικά διακοπτικά στοιχεία και οδήγησε στην ανάπτυξη των SVC στις αρχές τις δεκαετίας του 1960, ενώ σημειώνεται ότι η αντιστάθμιση σε αυτούς είναι εγκάρσια. Το SVC χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1979 σε επίπεδο μεταφοράς και από τότε πολλά SVCs έχουν εγκατασταθεί στα ΣΗΕ. Αυτό λοιπόν αντιμετωπίζεται ως μία εγκάρσια σύνθετη αντίσταση (ιδανικός πυκνωτής ή πηνίο) με ρυθμιζόμενο ρεύμα αντιστάθμισης το οποίο μπορεί να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ στο σημείο που συνδέεται. Η εγκάρσια παρεχόμενη αντιστάθμιση είναι συνάρτηση του μέτρου της τάσης του ζυγού που συνδέεται το SVC.

Στο σχήμα 5.37 φαίνεται πως ένας τυπικός εγκάρσιος στατικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελείται από βαθμίδες πηνίων ελεγχόμενων από θυρίστορ (TCRs-Thyristor Control Reactors) και από βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενων από θυρίστορ (TSCs-Thyristor Switched Capacitors). Αυτές συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα, βοηθώντας έτσι στη λειτουργική ευελιξία της αντιστάθμισης κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών και μειώνουν με

αυτόν τον τρόπο τις απώλειες στην μόνιμη κατάσταση. Ένα TSC αποτελείται από ένα πυκνωτή που συνδέεται σε σειρά με ένα αμφίδρομο διακόπτη από θυρίστορ και μπορεί να παρέχει γρήγορο, συνεχόμενο έλεγχο της αέργου ισχύος στην επιλεγμένη περιοχή, με την ταυτόχρονη όμως παραγωγή αρμονικών ρευμάτων. Επιπλέον, παράγει χωρητική άεργο ισχύ, μέρος της οποίας παράγεται από τα μόνιμα συνδεδεμένα φίλτρα αρμονικών, τα οποία εγκαθίστανται για την απορρόφηση των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται από τα TCR. Τέλος, ένα TCR αποτελείται από μία αντί-παράλληλη σύνδεση βαλβίδων θυρίστορ οι οποίες συνδέονται σε σειρά με μία γραμμική επαγωγική αντίδραση και λειτουργούν σαν ένας αμφίδρομος διακόπτης.

Ξεκινώντας από τα πλεονεκτήματα του SVC, εντοπίζεται ότι είναι γρήγορο και παρέχει ικανοποιητικό έλεγχο και ταχύτατη σύνδεση ή αποσύνδεση των πυκνωτών. Επιπλέον, μπορεί να διατηρεί την τάση εντός των προδιαγραφών στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος και να συμβάλει στη βελτίωση της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, στα μειονεκτήματα του SVC συγκαταλέγεται το ότι δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος και το ότι η ποσότητα της αέργου ισχύος που παρέχει είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης με αποτέλεσμα να είναι σχετικά μικρή σε περιπτώσεις βυθίσεων τάσης, τότε δηλαδή που το σύστημα την έχει περισσότερο ανάγκη. Το δεύτερο μειονέκτημα που αναφέρθηκε οδήγησε στη σχεδίαση του στατικού σύγχρονου αντισταθμιστή (STATCOM), ο οποίος παρέχει άεργο ισχύ ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα.

Συμπερασματικά, το SVC τοποθετείται σαν εγκάρσιο κύκλωμα και χρησιμοποιείται κυρίως για τη ρύθμιση ή την ενίσχυση της τάσης και τον έλεγχο της αέργου ισχύος του δικτύου. Έχει κάποια ικανότητα να βελτιώνει τη μεταβατική και τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος δεδομένου ότι μπορεί να αυξήσει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, αλλά δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος. Η αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των συνδέσεων του δικτύου, η σταθεροποίηση της λειτουργίας του συστήματος λόγω της βελτίωσης των μεταβατικών χαρακτηριστικών μεταφοράς, η απόσβεση των υπό-σύγχρονων συντονισμών, καθώς και η απόσβεση των διακυμάνσεων της ενεργού ισχύος με κατάλληλη ρύθμιση της αέργου ισχύος αποτελούν ορισμένα από τα προσφερόμενα ωφέλη του SVC σε λειτουργία ελεγχόμενου εγκάρσιου στοιχείου.



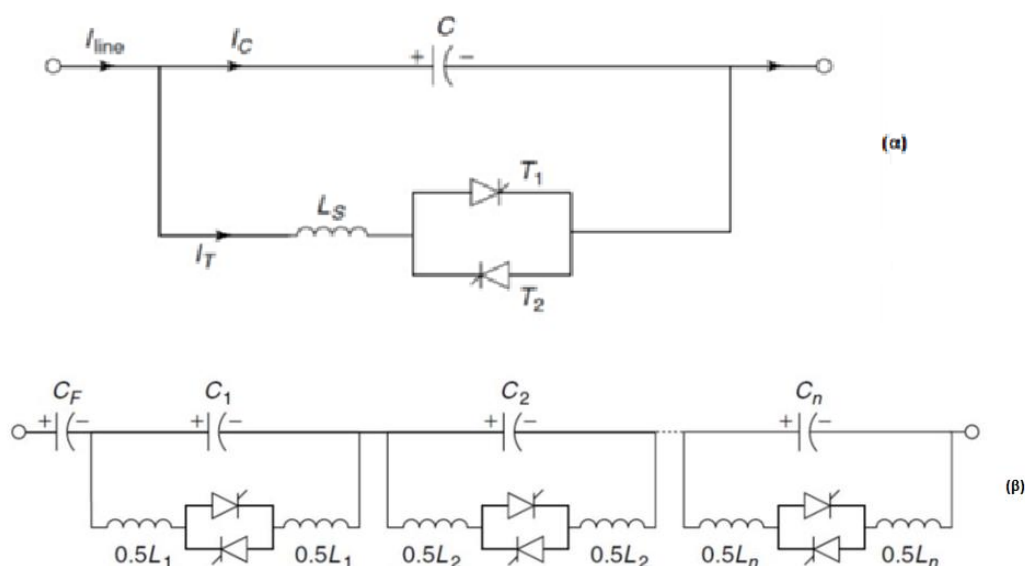
Σχήμα 5.37: Εγκάρσιος Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)  
Αποτελούμενος από TSCs/TCRs (SVC)

#### Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος από Θυρίστορ

Το πρώτο TCSC χρησιμοποιήθηκε το 1996 σε επίπεδο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αφορά σειριακή αντιστάθμιση. Ένα τυπικό TCSC μπορεί να παρέχει συνεχόμενο έλεγχο της ισχύος στη γραμμή μεταφοράς με μία μεταβλητή χωρητική αντιστάθμιση. Το TCSC επιτυγχάνει μια συνεχή μεταβολή της εν σειρά επαγωγικής αντίδρασης της γραμμής, με αποτέλεσμα τη μείωση ή αύξηση της φόρτισης κυματικής αντίστασης και με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να τροφοδοτεί (κατά την υπερφόρτιση) ή να απορροφά (κατά την υποφόρτιση) άεργο ισχύ. Ένα σύστημα TCSC μπορεί να αποτελείται από πολλές μονάδες TCSC αποτελούμενες από ένα σειριακό πυκνωτή αντιστάθμισης ( $C_1, \dots, C_n$ ), συνδεδεμένο παράλληλα με ένα TCR και παράλληλα επίσης με μία αντίσταση από μεταλλικό οξειδίο (MOV, Metal Oxide Varistor). Σκοπός της αντίστασης από μεταλλικό οξειδίο είναι να εμποδίζει φαινόμενα υπερτάσεων κατά μήκος της γραμμής. Αυτές οι μονάδες συνδέονται με ένα σταθερό σειριακό πυκνωτή (CF), που χρησιμοποιείται κυρίως για την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Το TCSC παρουσιάζει ομοιότητες με το SVC, με τη μόνη διαφορά τους να εντοπίζεται στο ότι αντίθετα με το SVC που συνδέεται παράλληλα σε ένα τοπικό ζυγό, το TCSC συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς. Σε αντίθεση με το SVC, τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από το TCR δεν τείνουν να διαφύγουν από το δίκτυο, ενώ στο TCSC, τα αρμονικά ρεύματα

παγιδεύονται στο εσωτερικό, λόγω χαμηλής αντίδρασης του πυκνωτή σε σχέση με την ισοδύναμη αντίδραση του δικτύου. Ως πλεονεκτήματα, το TCSC αυξάνει τη μεταφερόμενη ισχύ της γραμμής, παρέχει γρήγορο συνεχόμενο έλεγχο του σειριακού επιπέδου αντιστάθμισης της γραμμής μεταφοράς, βελτιώνει το προφίλ της τάσης, ενώ με κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις μπορεί να συμβάλει στη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Παράλληλα συμβάλλει σε αξιόλογο βαθμό στη βελτίωση της ευστάθειας του δικτύου και έχει αποδειχτεί πολύ αποτελεσματικός στην απόσβεση του φαινομένου του υπό-σύγχρονου συντονισμού (Sub-Synchronous Resonance, SSR), ένα ανεπιθύμητο φαινόμενο που είναι αποτέλεσμα της χρήσης πυκνωτών σειράς. Ιστορικά, η αντιστάθμιση σειράς εφαρμοζόταν κυρίως για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ με την πρόσφατη ανάπτυξη των ελεγχόμενων πυκνωτών σειράς, έχουν βελτιωθεί τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και απόδοσης του σειριακού αντισταθμιστή και έχουν δημιουργηθεί νέες δυνατότητες εφαρμογών στον έλεγχο της ροής ισχύος σε διασυνδεδεμένα δίκτυα και στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος σε διασυνδετικές γραμμές.

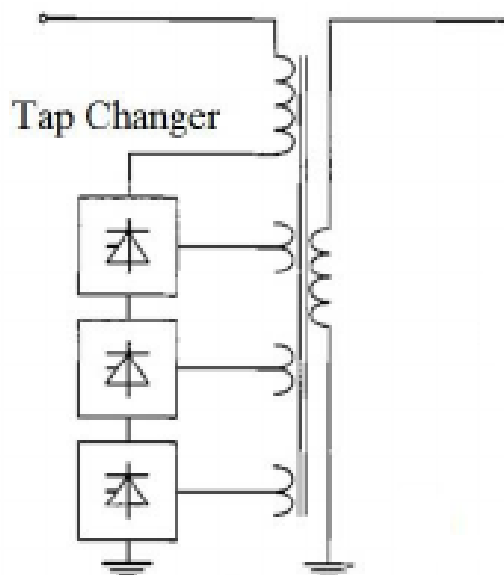


Σχήμα 5.38: (α) Στοιχειώδες κύκλωμα ενός TCSC, (β) Σύστημα TCSC.

#### Ρυθμιστής Τάσης Ελεγχόμενος από Θυρίστορ

Το TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator, TCVR) έχει πολλά κοινά με το TCPST, αφού χρησιμοποιεί την ίδια διάταξη από αμφίδρομους διακόπτες από θυρίστορ οι οποίοι φαίνονται στην επόμενη παράγραφο,

παρέχει μία μεταβλητού μεγέθους τάση εν σειρά με τη γραμμή με συνεχόμενο έλεγχο. Ένας τέτοιος ελεγκτής με χαμηλό σχετικά κόστος μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικός στον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος μεταξύ δύο συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος.



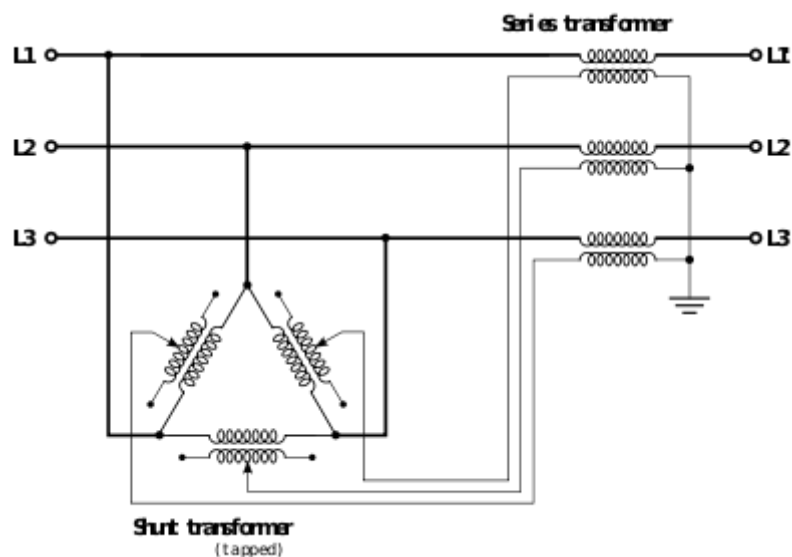
Σχήμα 5.39: Κύκλωμα Ρυθμιστή Τάσης Ελεγχόμενου από Θυρίστορ

#### Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενος από Θυρίστορ

Η ικανότητα μεταφοράς ενός ΣΗΕ βελτιώνεται, εκτρέποντας τη ροή ισχύος από γραμμές που βρίσκονται στα όρια στατικής ευστάθειας προς παράλληλες γραμμές με μεγαλύτερα περιθώρια ή μειώνοντας την κυκλοφορία ισχύος σε βρόχους. Για αυτό το λόγο ρυθμιστές φασικής γωνίας (Phase Shifting Transformer, PST ή Phase Angle Regulator, PAR) χρησιμοποιούνται από το 1930 για τον έλεγχο της ροής ισχύος σε γραμμές μεταφοράς στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, χρησιμοποιώντας μετασχηματιστές με κατάλληλη συνδεσμολογία τυλιγμάτων. Το κύκλωμα ισχύος του ρυθμιστή αποτελείται από ένα μετασχηματιστή ανύψωσης (Boost Transformer, BT), από ένα μετασχηματιστή διέγερσης (Excitation Transformer, ET) και ένα μετατροπέα (σχήμα 5.40). Οι δευτερεύουσες περιελίξεις (secondary windings) του μετασχηματιστή διέγερσης, συνδέονται παράλληλα, υποστηρίζοντας το μετασχηματιστή ανύψωσης που συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή μεταφοράς. Ο μετασχηματιστής διέγερσης παρέχει την τάση εισόδου για το ρυθμιστή φασικής γωνίας, ενώ ο μετασχηματιστής ανύψωσης εγχέει μία ελεγχόμενη



τάση, σε σειρά με τη γραμμή. Το μέτρο και/ή η γωνία της εγχεόμενης φάσης εξαρτάται από το μετατροπέα.



Σχήμα 5.40: Σχηματικό Διάγραμμα Ρυθμιστή Φασικής Γωνίας

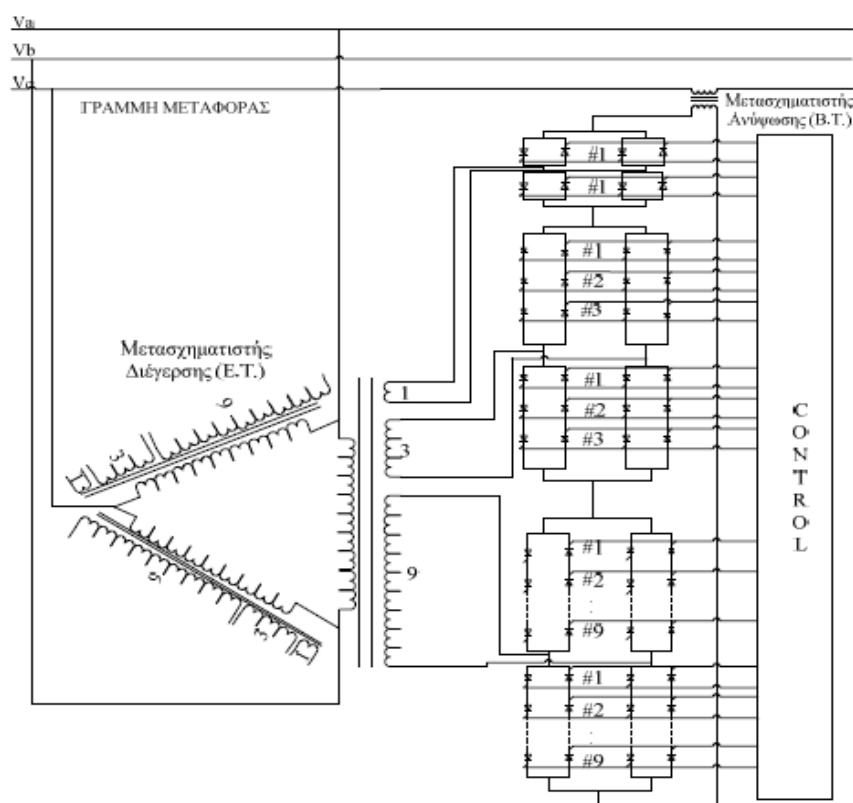
Σε ένα συνηθισμένο ρυθμιστή φασικής γωνίας, το τμήμα του μετατροπέα αποτελείται από μηχανικούς διακόπτες. Οι τυπικοί ρυθμιστές φασικής γωνίας δεν προορίζονται για αύξηση της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία γραμμή μεταφοράς και ως εκ τούτου δεν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε γραμμές μεγάλου μήκους. Τα μειωμένα όρια ζωής, η αργή απόκριση λόγω της υπάρχουσας αδράνειας των μηχανικών διακοπών και η απαίτηση για διατήρηση της συχνότητας σχετικά με τη μηχανική καταπόνηση και τη γήρανση του λαδιού αποτελούν τα βασικά τεχνικής φύσεως μειονεκτήματα ενός ρυθμιστή φασικής γωνίας. Το πρώτο μειονέκτημα αντισταθμίζεται μερικώς από το σύνολο των βοηθητικών ημιαγωγικών στοιχείων, ενώ το δεύτερο μειονέκτημα αφορά τις εφαρμογές του ρυθμιστή φασικής γωνίας μόνο για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και παράλληλα για τη ρύθμιση της τάσης.

Μέσω των ελεγκτών ηλεκτρονικών ισχύος, η λειτουργία των αναβαθμισμένων ρυθμιστών φασικής γωνίας έχει αναβαθμίσει την ταχύτητά της και προσφέρει δυναμική ρύθμιση της ροής ισχύος, βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος, απόσβεση των ταλαντώσεων, αλλά και ενίσχυση της ευστάθειας της τάσης. Αυτοί ονομάζονται ρυθμιστές φασικής γωνίας ελεγχόμενοι από θυρίστορ (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer, TCPST ή Thyristor Controlled Phase Angle Regulator, TCPAR). Το κύκλωμα των TCPSTs παρουσιάζεται στο σχήμα 5.41 και φαίνεται ότι σε



αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται αμφίδρομοι διακόπτες από θυρίστορ (bidirectional thyristor switches).

Τέλος, στην κατηγορία μεθόδων αντιστάθμισης που προσβλέπει στη φασική γωνία, εντάσσεται και ο TCPST, ο τρόπος δράσης του οποίου στηρίζεται στη γρήγορη εισαγωγή μιας τάσης εν σειρά με την τάση στο ένα άκρο της γραμμής, ώστε να ελέγχεται η ροή ισχύος στη γραμμή. Παρόλο που έχουν προταθεί κυκλώματα με ρύθμιση και του μέτρου και της φασικής γωνίας της εισαγόμενης τάσης, λόγω της απλότητας τους, έχουν επικρατήσει τα κυκλώματα με ρύθμιση μόνο του μέτρου. Επειδή το TCPAR δεν παράγει άεργο ισχύ, όλη η άεργος ισχύς που εισάγεται στη γραμμή ως αποτέλεσμα της φασικής στροφής της τάσης, απορροφάται από το ζυγό. Έτσι λοιπόν, για να αποφεύγονται οι διακυμάνσεις της τάσης, το TCPST πρέπει να συνδέεται σε ισχυρούς ζυγούς.



Σχήμα 5.41: Κύκλωμα Ελεγχόμενου από Θυρίστορ Ρυθμιστή Φασικής Γωνίας

#### 5.9.2.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Μετατροπείς Ισχύος

Αυτά τα συστήματα συνιστούν ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές εναλλασσόμενης τάσης ή ρεύματος (SVS/SCS Synchronous Voltage/Current

Sources) που λειτουργικά είναι σαφώς ανώτερα για κάθε είδος αντιστάθμισης. Εκτός της άεργης αντιστάθμισης, έχουν τη δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής ενεργού ισχύος με το δίκτυο, εξασφαλίζοντας έτσι πιο ευέλικτη διαχείριση ροής ισχύος και αντιμετώπιση δυναμικών διαταραχών. Ανάλογη με μία ιδανική στρεφόμενη σύγχρονη μηχανή, μια τέτοια πηγή παράγει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων στη θεμελιώδη συχνότητα, με ελεγχόμενο πλάτος και φάση. Αυτή η ιδανική μηχανή δεν έχει καθόλου αδράνεια, δεν αλλάζει σημαντικά τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου, η απόκρισή της είναι πρακτικά στιγμιαία και μπορεί να παράγει άεργο ισχύ (χωρητική και επαγωγική). Επίσης, εάν διασυνδεθεί με μία κατάλληλη πηγή ενέργειας, μπορεί να ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το δίκτυο.

Το SVS, παρέχοντας μία προκαθορισμένη τάση (ή μία επιθυμητή τάση παρέχοντας ένα προκαθορισμένο ρεύμα), έχει τη δυνατότητα να επιτύχει ένα επιθυμητό ρεύμα, ενώ σε αντίθεση με την αντιστάθμιση ελεγχόμενης σύνθετης αντίστασης, η αντιστάθμιση SVS είναι πρακτικά ανεξάρτητη από τις μεταβλητές του δικτύου (ρεύμα, τάση, γωνία) και μπορεί να διατηρηθεί σταθερή κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, το SVS με σταθερές εισόδους θα λειτουργεί μόνο στη θεμελιώδη συχνότητα, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο συντονισμός με το δίκτυο, ενώ σε άλλες συχνότητες η σύνθετη αντίσταση εξόδου θα είναι πρακτικά μηδενική. Τέλος, συνυπολογίζοντας και τη δυνατότητα αμφίπλευρης μεταφοράς ενεργού ισχύος μεταξύ των κόμβων AC και DC του SVS, είναι δυνατή η ζεύξη των DC κόμβων δύο ή περισσότερων SVS's και επομένως ο καθορισμός διαδρομών μεταφοράς ισχύος μεταξύ ζυγών ή γραμμών.

#### Στατικός Σύγχρονος Σειριακός Αντισταθμιστής (SSSC)

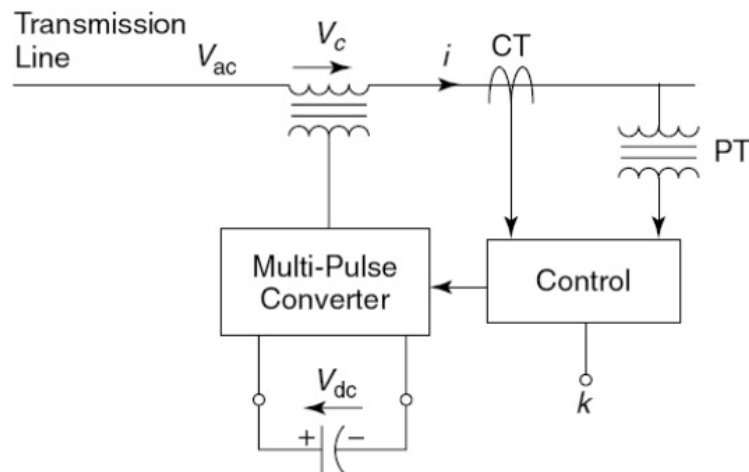
Η αντιστάθμιση σειράς με σύγχρονες πηγές τάσης ή ρεύματος (SSSC), η οποία αποτελεί σειριακή αντιστάθμιση, έχοντας δομηθεί από ημιαγωγικά στοιχεία, έχει τη δυνατότητα να διατηρεί μία σταθερή εγχεόμενη τάση αντιστάθμισης ή ακόμα και να ελέγχει το μέτρο της, ανεξάρτητα από το μέτρο του ρεύματος της γραμμής. Το SSSC είναι ένας ελεγκτής ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς συνδεδεμένος σε σειρά (σχήμα 5.42), ο οποίος αποτελείται από μία βαθμίδα αποθήκευσης ενέργειας (πχ μπαταρία μεγάλης ισχύος), ένα μετατροπέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter – VSC) με ημιαγωγικά στοιχεία (συνήθως GTO thyristors), έναν ελεγκτή και ένα μετασχηματιστή σύζευξης. Είναι αντιληπτό πως μπορεί να ληφθεί ως ένα προηγμένο είδος ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς, δηλαδή μία προηγμένη μορφή του TCSC.

Το SSSC είναι ανάλογο με μία ιδανική σύγχρονη πηγή τάσης, που παράγει τριφασική τάση μεταβλητού πλάτους και γωνίας, στην επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα, ενώ επιπλέον παρουσιάζει ομοιότητα με ένα σύγχρονο αντισταθμιστή, που παρέχει ή απορροφά άεργο ισχύ προς ή από το σύστημα και μπορεί ακόμη να παράγει ενεργό ισχύ, αν στη θέση του πυκνωτή χρησιμοποιηθεί μία βαθμίδα αποθήκευσης ενέργειας. Το SSSC περιορίζεται στην ανταλλαγή αέργου ισχύος με το εναλλασσόμενο σύστημα μεταφοράς, μη υπολογίζοντας το μικρό μέγεθος απαιτούμενο ποσό ενέργειας για απώλειες διακοπών και κυκλώματος.

Το SSSC, εξαιτίας του ότι χρησιμοποιείται για να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ προς ή από τη γραμμή, μπορεί να αξιοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής ισχύος της γραμμής. Θεωρώντας λοιπόν ότι οι απώλειες του SSSC είναι αμελητέες, παράγει στην έξοδό του μία ημιτονοειδή τάση μεταβλητού πλάτους, το διάνυσμα της οποίας προηγείται ή έπεται κατά 90ο του διανύσματος του ρεύματος της γραμμής. Λόγω αυτού θεωρείται ότι η εγγεόμενη τάση ισοδυναμεί με μία επαγωγική ή χωρητική αντίδραση σε σειρά με τη γραμμή, η οποία αυξάνει ή μειώνει τη συνολική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς, επιφέροντας έτσι ενίσχυση της μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος και αύξηση ή μείωση της μεταφερόμενης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς.

Το TCSC υστερεί σε αρκετά σημεία έναντι του SSSC, όπως για παράδειγμα η εξάλειψη των μεγάλων παθητικών στοιχείων (πυκνωτές, αντιδράσεις), η συμμετρική ικανότητα τόσο σε επαγωγικούς όσο και σε χωρητικούς τρόπους λειτουργίας, η βελτίωση τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος, αλλά και η δυνατότητα μίας πηγής ενέργειας στη DC πλευρά για την ανταλλαγή ισχύος με το δίκτυο AC. Ωστόσο, η εμπειρία, η αξιοπιστία και η τεchnο-οικονομική αξιολόγηση θα καθορίσουν την εφαρμογή ή όχι ενός SSSC. Στο μέλλον, η πρόοδος στα χαρακτηριστικά των συσκευών τροφοδοσίας αλλά και το μικρότερο κόστος, θα ωθήσουν σε εφαρμογές των SSSC's στη θέση των TCSC's.

Τέλος, διαπιστώνεται ότι το SSSC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος, για την αύξηση της αξιοπιστίας του καθώς και για τον έλεγχο της ενεργούς και της αέργου ισχύος της γραμμής. Συμπερασματικά, είναι ένας από τους πιο αποτελεσματικούς ελεγκτές ΕΣΜ που προσφέρει αντιστάθμιση σειράς και παρέχει ευελιξία στον έλεγχο του συστήματος μεταφοράς.



Σχήμα 5.42:Κύκλωμα SSSC.

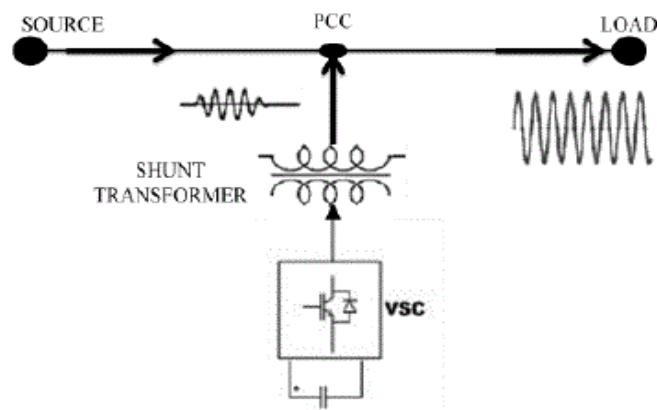
### Στατικός Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM)

Το πρώτο STATCOM τέθηκε σε λειτουργία το 1999 και αποτελεί το πιο εξελιγμένο μοντέλο εγκάρσιας αντιστάθμισης, δηλαδή είναι μία προέκταση του SVC βασισμένη σε dc-ac μετατροπείς, οι οποίοι εν συνεχεία παράγουν μία εναλλασσόμενη τάση (ή ρεύμα) από μία συνεχή τάση (ή ρεύμα) με τη μέθοδο συγχρονισμένης διαμόρφωσης πλάτους παλμών (Synchronized Pulse-Width Modulation, SPWM). Το μοντέλο λειτουργίας του STATCOM αποτελείται από ένα μετασχηματιστή σύζευξης και ένα μετατροπέα πηγής τάσεως (Voltage Source Converter – VSC) με ημιαγωγικά στοιχεία (τα οποία είναι συνήθως GTO thyristors), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.43(β). Ο πρωταρχικός στόχος του STATCOM σε δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η γρήγορη ρύθμιση της τάσης σε ένα φορτίο ή σε ένα ενδιάμεσο ζυγό, γεγονός το οποίο συντελεί στην αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος του δικτύου και κατ'επέκταση στην αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς του δικτύου.

Το STATCOM είναι ανάλογο με μία ιδανική σύγχρονη μηχανή, η οποία παράγει τριφασική φάση στη θεμελιώδη συχνότητα με ελεγχόμενο μεταβλητό πλάτος και φασική γωνία. Αυτή η ιδανική μηχανή δεν μεταβάλλει ορατά την υπάρχουσα αντίσταση του συστήματος, η αδράνειά της είναι μηδέν και μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ. Πιο συγκεκριμένα, η βασική συμπεριφορά του STATCOM βασίζεται στη λειτουργία του σύγχρονου αντισταθμιστή και πιο συγκεκριμένα εάν η παραγόμενη τάση από τον STATCOM είναι μικρότερη από την τάση του ζυγού του συστήματος στον οποίο είναι συνδεδεμένο, τότε το STATCOM συμπεριφέρεται ως επαγωγικό φορτίο απορροφώντας άεργο ισχύ από το σύστημα. Αντίθετα, όταν η παραγόμενη τάση από το STATCOM είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος, το STATCOM παρέχει άεργο ισχύ

στο σύστημα, επομένως η συμπεριφορά του παρομοιάζεται με αυτή του εγκάρσιου πυκνωτή. Οι απώλειες παρέχονται από το σύστημα και όχι από κάποια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος και ο μετατροπέας διατηρεί τον πυκνωτή φορτισμένο στην επιθυμητή τάση, η οποία επιτυγχάνεται όταν οι τάσεις εξόδου του μετατροπέα έπονται των τάσεων του δικτύου με μία μικρή γωνία. Έτσι, ο μετατροπέας απορροφά μικρό ποσό ενεργού ισχύος από το AC σύστημα, με σκοπό να επιτυγχάνει την επιθυμητή τάση πυκνωτή και να καλύπτει τις εσωτερικές απώλειες. Ο ίδιος μηχανισμός ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση ή μείωση της τάσης του πυκνωτή και επομένως και του πλάτους της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ώστε να ελέγχεται η παροχή ή η απορρόφηση αέργου ισχύος. Ο πυκνωτής DC εξασφαλίζει επίσης την ενεργειακή ισορροπία μεταξύ εισόδου-εξόδου κατά τη διάρκεια δυναμικών αλλαγών της αέργου ισχύος. Αυτός ο τύπος SVS έχει παρόμοια λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως ένας ιδανικός σύγχρονος αντισταθμιστής και για αυτό ονομάζεται Static Synchronous Compensator.

Το STATCOM προσφέρει έλεγχο του ρεύματος εξόδου στην περιοχή λειτουργίας του, χωρητική και επαγωγική εγκάρσια αντιστάθμιση και η παροχή πλήρους χωρητικού ρεύματος υπό οποιαδήποτε τάση δικτύου (πρακτικά και για μηδενική) βοηθάει αποτελεσματικά στη βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας. Επίσης, μέσω παροχής ή απορρόφησης αέργου ισχύος μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, ενώ επιπλέον συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος. Δηλαδή το STATCOM στηρίζει την τάση του συστήματος όταν αυτή παίρνει πολύ χαμηλές τιμές, δεδομένου του ότι ο πυκνωτής θα μπορεί να παρέχει αρκετή ενέργεια ώστε να αντισταθμιστούν οι απώλειες. Ο συγκεκριμένος αντισταθμιστής συμβάλλει στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος, αντιμετωπίζει τις γρήγορες διακυμάνσεις της τάσης, επιτυγχάνει έλεγχο της τάσης σε μόνιμες, μεταβατικές και δυναμικές συνθήκες λειτουργίας και μπορεί να αποτρέψει τον υπερσύγχρονο συντονισμό. Ο STATCOM βέβαια υστερεί σε κατασκευή, λόγω απαίτησης για χρήση ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων με δυνατότητες ελέγχου του χρόνου σβέσης.



Σχήμα 5.43 Κύκλωμα STATCOM.

Θεωρώντας, χωρίς βλάβης της γενικότητας, ότι στο σύστημα των δύο ζυγών, συνδεδεμένων με γραμμή μικρού μήκους χωρίς απώλειες, το STATCOM να βρίσκεται στη μέση της γραμμής μεταφοράς, σύμφωνα με το σχήμα 5.43, και υποθέτοντας ότι  $|V_S| = |V_R| = V$ , καθώς επίσης και ότι  $V_m = V_m < 0^\circ$  0 (τάση στο μέσο της γραμμής) και  $\tilde{I}_0 = I_0 < 90^\circ$  (μοντελοποίηση του STATCOM με πηγή ρεύματος), προκύπτει ότι η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς είναι:

$$P_{sm} = P_{mr} = \frac{V^2}{X} \sin(\delta_s - \delta_r) + \frac{VI_0}{2} \sin \frac{(\delta_s - \delta_r)}{2} \quad (5.14)$$

Έναντι του SVC το STATCOM υπερτερεί σημαντικά σε αρκετούς τομείς, έναν εκ των οποίων συνιστά το γεγονός ότι ενώ στο SVC η ποσότητα της αέργου ισχύος που παρέχει είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, το STATCOM παρέχει στο μεγαλύτερο μέρος των χαρακτηριστικών του, άεργο ισχύ που είναι ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο λοιπόν, εκμεταλλευόμενος τη δυνατότητα υπερρεύματος που έχει όταν βυθίζεται η τάση του, μπορεί να τροφοδοτεί σημαντικό ποσό αέργου ισχύος. Επιπλέον, ανεξάρτητα από τις συνθήκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, η απόκρισή του είναι σαφώς πιο γρήγορη από το SVC. Έναν ακόμα τέτοιο τομέα αποτελεί το γεγονός ότι όταν διαθέτει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με πραγματική ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα, όπως κάνει ο σύγχρονος αντισταθμιστής (Synchronous Condenser) λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας που υπάρχει στα στρεφόμενα μέρη του. Συνοψίζοντας, το STATCOM μπορεί να παρέχει υποστήριξη τάσης με την παραγωγή ή την απορρόφηση αέργου ισχύος στο σημείο σύνδεσης χωρίς την ανάγκη μεγάλων εξωτερικών αντιδράσεων ή πυκνωτών.

#### Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC)

Η ευελιξία και η κατάλληλη σχεδίαση για την ρύθμιση της τάσης και της ροής ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς προσφέρονται από τον UPFC. Αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσεως (VSCs), ο ένας συνδεδεμένος παράλληλα και ο άλλος συνδεδεμένος σε σειρά, ενώ ταυτόχρονα ο UPFC έχει τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας, σε αντίθεση με άλλα ΕΣΜ που έχουν μόνο ένα βαθμό ελευθερίας (μεταβλητή ελέγχου) και οι ελεγκτές για αυτό έχουν μεγάλο εύρος δυνατοτήτων ελέγχου του συστήματος μεταφοράς. Συγκεκριμένα, αυτοί οι ελεγκτές κάνουν χρήση των μετατροπών ισχύος ως σύγχρονων πηγών τάσεως και μπορούν να ανταλλάσσουν

ενεργό ισχύ με το σύστημα μεταφοράς ή να παρέχουν άεργο ισχύ. Επιπλέον, το UPFC έχει την ικανότητα να ελέγχει, μεμονωμένα ή και με άλλα ΕΣΜ, ταυτοχρόνως ή επιλεκτικά όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη ροή ισχύος σε μία γραμμή μεταφοράς (π.χ. τάση, επαγωγική αντίδραση, γωνία). Εναλλακτικά, μπορεί να ελέγχει ανεξάρτητα και την ενεργό και την άεργο ισχύ σε μία γραμμή μεταφοράς, κάνοντας έτσι την εφαρμογή του στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας να φτάνει σε υψηλά επίπεδα τα όρια της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος τους.

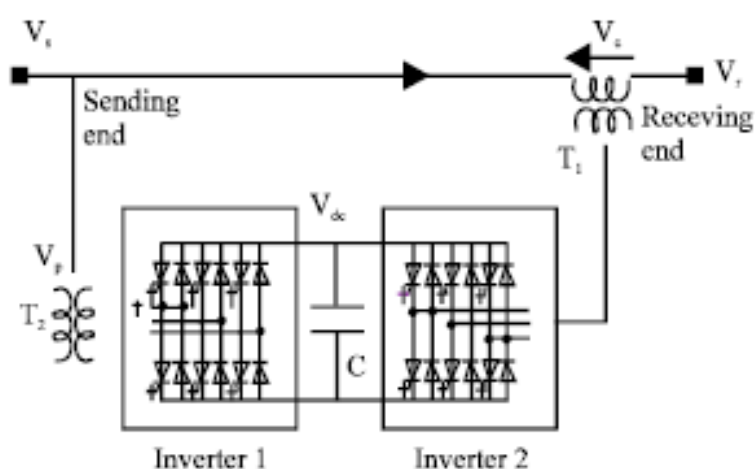
Σκοπός κατασκευής του UPFC ήταν ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο και η δυναμική αντιστάθμιση ενός συστήματος μεταφοράς εναλλασσόμενης τάσης, παρέχοντας έτσι μοναδική ευελιξία, ενώ γενική ιδέα είναι να ανταλλάσσει και ενεργό και άεργο ισχύ με το σύστημα μεταφοράς. Έχοντας ως δεδομένο εξ'ορισμού ότι το UPFC είναι ικανό να παρέχει μόνο την άεργο ισχύ προς το σύστημα, η ενεργός ισχύς πρέπει να παρέχεται σε αυτό ή να απορροφάται από αυτό, από μία κατάλληλη διάταξη παροχής ισχύος στην οποία η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσεται, παρέχεται από τους τερματικούς ζυγούς άφιξης ή αναχώρησης. Το UPFC αποτελείται από δύο συνδεδεμένους μετατροπείς AC/DC (VSC1 και VSC2), οι οποίοι λειτουργούν από μία κοινή DC ζεύξη που παρέχεται από ένα συσσωρευτή (μπαταρία), διάταξη που απεικονίζεται στο σχήμα 5.44. Οι μετατροπείς αυτοί συνδέονται με το υπόλοιπο AC σύστημα με τη βοήθεια δύο μετασχηματιστών, ενός εν σειρά και ενός εγκάρσιου. Η συνολική διάταξη λειτουργεί ως ένας ιδανικός AC/AC μετατροπέας, στον οποίο η ενεργός ισχύς μπορεί να ρέει και προς τις δύο κατευθύνσεις των δύο τερματικών ζυγών του μετατροπέα, ενώ παράλληλα κάθε μετατροπέας μπορεί ανεξάρτητα να παράγει ή να απορροφά την άεργο ισχύ στο δικό του τερματικό ζυγό εξόδου.

Ο εν σειρά μετατροπέας (VSC2) παρέχει την κύρια λειτουργία του UPFC, η οποία συνοψίζεται στην έγχυση μιας τάσης εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς μέσω του εν σειρά μετασχηματιστή (μετασχηματιστής ενίσχυσης). Η εγχεόμενη τάση δρα ουσιαστικά ως μια σύγχρονη πηγή εναλλασσόμενης τάσης, όπου το ρεύμα γραμμής ρέει μέσω αυτής όπως και η ανταλλασσόμενη άεργος και ενεργός ισχύς μεταξύ της πηγής και του συστήματος. Η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται στα άκρα του μετασχηματιστή παράγεται εσωτερικά από το μετατροπέα, ενώ η ενεργός ισχύς που ανταλλάσσεται στα άκρα μετατρέπεται σε DC ισχύ και εμφανίζεται στη DC ζεύξη ως θετική ή αρνητική απαίτηση ενεργού ισχύος. Κύριος ρόλος του εγκάρσιου μετατροπέα (VSC1) είναι η παροχή ή η απορρόφηση της απαιτούμενης από τον εν σειρά μετατροπέα ενεργού ισχύος στην κοινή DC ζεύξη. Αυτή η DC ισχύς μετατρέπεται και πάλι σε εναλλασσόμενη και συνδέεται με αυτή της γραμμής μεταφοράς μέσω ενός εγκάρσια συνδεδεμένου πυκνωτή. Με σκοπό την παροχή ανεξάρτητα εγκάρσιας άεργου αντιστάθμισης στη γραμμή μεταφοράς,



ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί επίσης ελεγχόμενα να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ, εάν είναι επιθυμητό.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αν και υπάρχει κλειστό ευθύ μονοπάτι για την παροχή ενεργού ισχύος, με την έγχυση της εν σειρά τάσης, διαμέσου του εν σειρά μετατροπέα και του εγκάρσιου μετατροπέα και της γραμμής, η αντίστοιχη ανταλλασσόμενη άεργος ισχύς παρέχεται ή απορροφάται τοπικά από τον εν σειρά μετατροπέα και για αυτό το λόγο δε χρειάζεται να μεταφερθεί διαμέσου της γραμμής. Συνεπώς ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί, είτε να ανταλλάσσει άεργο ισχύ με τη γραμμή μεταφοράς ανεξάρτητα από τον εν σειρά μετατροπέα, είτε να λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει ροή αέργου ισχύος μέσω του UPFC.



Σχήμα 5.44: Κύκλωμα UPFC

### 5.9.2.3 Υπόλοιπα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς

#### Αντισταθμιστής Σειράς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWMSC)

Ο αντισταθμιστής σειράς με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse-width Modulation Based Series Compensator, PWMSC) είναι ένας νέος σειριακός ελεγκτής ΕΣΜ, ο οποίος παρέχει αντιστάθμιση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Αυτοί οι αντισταθμιστές έχουν το πλεονέκτημα να είναι πιο απλοί τόσο στη δομή του κυκλώματος τροφοδοσίας όσο και στον έλεγχο τους, καθώς επίσης παρουσιάζουν αξιόλογη αποτελεσματικότητα στον έλεγχο της ροής του δικτύου λόγω της δυνατότητας του PWMSC να λειτουργεί τόσο



σε επαγωγική όσο και σε χωρητική. Είναι γνωστό ότι η δυναμική ευστάθεια του συστήματος δύναται να επηρεάζει τη φόρτωση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που αντιμετωπίζεται από το PWMSC σε μεγάλο βαθμό. Σημειώνεται ότι τροποποίηση της αντίδρασης της γραμμής και παροχή αρκετής απόσβεσης στις ταλαντώσεις του συστήματος επιτυγχάνονται μέσω κατάλληλης σχεδίασης του ελεγκτή του PWMSC.

### Δυναμικός Αποκαταστάτης Τάσης (DVR – Dynamic Voltage Restorer)

Ο Δυναμικός αποκαταστάτης τάσης (DVR – Dynamic Voltage Restorer) είναι μία συσκευή, που αξιοποιεί ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος στερεάς κατάστασης και συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο διανομής. Η κύρια χρήση του είναι για την προστασία ενός ευαίσθητου φορτίου από την παραμόρφωση της τάσης στην πλευρά της παροχής, κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος ή υπερφόρτισης στα συστήματα ενέργειας. Η βασική αρχή ενός τέτοιου σειριακού αντισταθμιστή εντοπίζεται στην εισαγωγή μίας τάσης με το απαιτούμενο πλάτος και συχνότητα, με σκοπό ο σειριακός αντισταθμιστής να μπορεί να επαναφέρει την τάση στην πλευρά του φορτίου στο επιθυμητό πλάτος και κυματομορφή, ακόμη κι όταν η τάση από την πηγή είναι ασύμμετρη ή παραμορφωμένη. Η συσκευή του DVR χρησιμοποιεί GTO θυρίστορ σε μία δομή αντιστροφέα που λειτουργεί με τη βοήθεια της τεχνικής PWM (διαμόρφωση εύρους παλμών).

Το DVR εκτός του ότι μπορεί να παράγει ή να απορροφά ανεξάρτητα ελεγχόμενη πραγματική και άεργο ισχύ στην πλευρά του φορτίου, αποτελείται από έναν διακοπτικό DC σε AC μετατροπέα (δηλ. έναν αντιστροφέα) που εγγεί μία τριφασική εναλλασσόμενη τάση σε σειρά και συγχρονισμένη με τις τάσεις που τροφοδοτούνται από τη διανομή. Το εύρος και η φασική γωνία των εγγεόμενων τάσεων μεταβάλλονται και έτσι υπάρχει έλεγχος της πραγματικής και της αέργου ισχύος που ανταλλάσσεται μεταξύ του DVR και του συστήματος διανομής. Η DC πλευρά (πλευρά που συνδέεται με την παροχή) συνδέεται σε μία πηγή ενέργειας ή μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας κατάλληλης χωρητικότητας. Η άεργος ισχύς που ανταλλάσσεται μεταξύ του DVR και του συστήματος διανομής «δημιουργείται» από το πρώτο χωρίς τη συμμετοχή παθητικών άεργων συνιστωσών. Η πραγματική ισχύς που ανταλλάσσεται στην AC πλευρά (πλευρά φορτίου) παρέχεται από την DC πλευρά και συγκεκριμένα από μία εξωτερική πηγή ενέργειας ή ένα σύστημα ενεργειακής αποθήκευσης. Η δομή του DVR αποτελείται από φίλτρο, αντιστροφέα, ανορθωτή και συζευγμένο μετασχηματιστή, ενώ παράλληλα το φίλτρο χρησιμοποιείται για απαλοιφή των αρμονικών που δημιουργούνται από την υψηλή διακοπτική συχνότητα στην PWM τεχνική η οποία χρησιμοποιείται.

### 5.9.3 Εφαρμογές FACTS

#### 5.9.3.1 Βελτίωση Ευστάθειας Μόνιμης Κατάστασης ΣΗΕ

Ως ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις ορίζονται οι ταλαντώσεις της γωνίας των δρομέων των σύγχρονων γεννητριών, που βρίσκονται διασυνδεδεμένες σε ένα σύστημα, ενώ το αίτιο αυτών των ταλαντώσεων μπορεί να είναι οποιαδήποτε διαταραχή που επιφέρει απόκλιση στην ταχύτητα του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα, μίας ή και περισσοτέρων μηχανών. Κατά την περίπτωση της ευστάθειας μόνιμης κατάστασης, οι διαταραχές παρομοιάζονται με τις φυσιολογικές διακυμάνσεις φορτίου, δηλαδή είναι αργές και μικρές, συμπεριλαμβανομένης της δράσης των αυτόματων ρυθμιστών τάσης και των ρυθμιστών των στροβίλων. Οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις διαχωρίζονται σε διαφορετικές κατηγορίες, κυρίως με κριτήριο τη τοπογραφική θέση στο δίκτυο των γεννητριών που συμμετέχουν σε αυτές, η κυριότερη ένδειξη για την εύρεση του τύπου της ταλάντωσης είναι η συχνότητα και επιπλέον η γωνία φόρτισης μεταβάλλεται συνήθως από  $1^{\circ}$  –  $5^{\circ}$ . Οι κυριότερες από αυτές τις κατηγορίες είναι οι ενδοσυστημικές ταλαντώσεις (intra-area oscillations), οι τοπικές ταλαντώσεις (local oscillations) και οι ταλαντώσεις μεταξύ των περιοχών του ΣΗΕ ή ταλαντώσεις διασύνδεσης (inter-area oscillations). Τοπικές ταλαντώσεις ονομάζονται οι ταλαντώσεις ανάμεσα στους άξονες γεννητριών του ίδιου σταθμού ή γεννητριών κοντινών σταθμών και το εύρος της συχνότητας των ταλαντώσεων κυμαίνεται συνήθως από τα 1 έως τα 2 Hz. Ταλαντώσεις διασύνδεσης λέγονται οι ταλαντώσεις που εμφανίζονται ανάμεσα σε μια ομάδα μηχανών ενός συστήματος και σε μηχανές ενός άλλου συστήματος, όταν τα δύο συστήματα συνδέονται με ασθενή διασυνδετική γραμμή (tie-line), ενώ ταυτόχρονα το εύρος της συχνότητας των ταλαντώσεων αυτών κυμαίνεται από τα 0.1 έως τα 1 Hz, (χαμηλότερες από τις συχνότητες των τοπικών ταλαντώσεων). Οι ταλαντώσεις διασύνδεσης, μπορούν να περιορίσουν κατά πολύ τις λειτουργίες του ΣΗΕ, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός αξιοσημείωτο μιας και οι ταλαντώσεις αυτές αποτελούν συχνό φαινόμενο στα μεγάλα ΣΗΕ. Επίσης, μπορούν να οδηγήσουν σε διαδοχικές αποκοπές γραμμών μεταφοράς του συστήματος, μετατρέποντας έτσι σε επιτακτική την ανάγκη απόσβεσής τους. Αυτή λοιπόν η απόσβεση μπορεί να βελτιωθεί με τον έλεγχο των γεννητριών με τη βοήθεια σταθεροποιητών ΣΗΕ (PSS) ή με τον έλεγχο της ροής ισχύος του συστήματος. Τα ΕΣΜ μπορούν να μεταβάλλουν τη ροή ισχύος τους συστήματος άμεσα ή έμμεσα μέσα σε ms, δίνοντας τη δυνατότητα να βελτιωθεί η δυναμική και η μεταβατική ευστάθεια του ΣΗΕ και έτσι να γίνει καλύτερη χρήση της εγκατεστημένης ισχύος.

### 5.9.3.2 Μείωση του Λειτουργικού Κόστους ΣΗΕ

Η ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς ελέγχεται έχοντας ως στόχο τη δυνατότητα μεταβολής της ροής ισχύος υπό δυναμικές συνθήκες και την ενίσχυση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος, ώστε μετέπειτα να εξασφαλίζεται η ευστάθεια και η ασφάλεια του δικτύου. Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου (OPF) πραγματεύεται την ελαχιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης (συνήθως το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλων των γεννητριών του δικτύου), μεταβάλλοντας διάφορους ελέγχους του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι περιορισμοί ισοζυγίου ισχύος και φυσικά όλοι οι υπόλοιποι περιορισμοί λειτουργίας του συστήματος. Με άλλα λόγια, βασικός στόχος της OPF είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για την ικανοποίηση της ζήτησης σε ένα ΣΗΕ, διατηρώντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του συστήματος. Η διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος απαιτεί κάθε στοιχείο του συστήματος να λειτουργεί στα επιθυμητά όρια ασφαλείας μόνιμης καταστάσεως και αυτό με τη σειρά του περιέχει τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος στα καθορισμένα όρια, τη μέγιστη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τους μετασχηματιστές, καθώς και το ελάχιστο και μέγιστο όριο εξόδου κάθε γεννήτριας. Η εγκατάσταση των ΕΣΜ αναγνωρίζεται ως μία από τις πιο οικονομικά αποδοτικές λύσεις, παρόλα αυτά, το κόστος εγκατάστασής τους είναι αρκετά υψηλό, όταν αυτά πρέπει να τοποθετούνται βέλτιστα για να ικανοποιούν μία επιθυμητή αντικειμενική συνάρτηση. Με τον όρο κόστος εγκατάστασης ΕΣΜ, θεωρείται το συνολικό κόστος της επένδυσης κάθε συσκευής, που περιλαμβάνει το κόστος αγοράς της συσκευής, το κόστος για την τοποθέτηση της συσκευής στον υποσταθμό και το κόστος συντήρησης της συσκευής. Αναμφίβολα, τα ΕΣΜ επιδρούν ευεργετικά σε όλες τις συνιστώσες ασφαλείας του δικτύου και παρέχουν υψηλό έλεγχο της ροής φορτίου, κάνοντας το δίκτυο πιο αποδοτικό, λειτουργικό, ευέλικτο, αξιόπιστο, και διευρύνουν τα όρια ασφαλείας του υπάρχοντος εξοπλισμού.

### 5.9.3.3 Αύξηση της Φόρτισης ΣΗΕ

Η ανάγκη ενίσχυσης της φόρτισης των ήδη υπάρχοντων δικτύων έχει γίνει κάτι περισσότερο από επιτακτική λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας γνώμονα την απαίτηση να μπορεί να μεταφερθεί περισσότερη ισχύς με το μικρότερο δυνατό κόστος επέκτασης του δικτύου. Η βελτίωση της φόρτισης του συστήματος είναι πολύπλοκη και πρέπει να αναλύεται σε διάφορα διαδοχικά στάδια συνυπολογίζοντας παράγοντες όπως τα όρια τάσης του δικτύου, οι θερμικοί περιορισμοί και τα όρια ευστάθειας. Ένα άλλο μειονέκτημα της επέκτασης των δικτύων μεταφοράς είναι οι διάφορες πολιτικές και περιβαλλοντικές θεωρήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, ενισχύοντας έτσι την ανάγκη της βελτίωσης των υπάρχοντων πόρων των δικτύων, η οποία με τη σειρά της θα αυξήσει τη

μεταφερόμενη ισχύ από το δίκτυο προς τους καταναλωτές. Η χρησιμοποίηση των ΕΣΜ ως ελεγκτές ροής ισχύος κρίνεται άκρως ικανοποιητική, αφού επιτυγχάνουν διάφορους τύπους αντιστάθμισης (ή συνδυασμό αυτών) με μία συσκευή, υψηλά επίπεδα σειριακής αντιστάθμισης, ταχύτερο και ομαλότερο έλεγχο και φυσικά υψηλή αξιοπιστία.

#### 5.9.3.4 Αύξηση της Διαθέσιμης Ικανότητας Μεταφοράς

Τα δίκτυα είναι αναγκαίο να διαθέτουν μεγάλες ικανότητες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την ικανοποίηση της ζήτησης των αυξημένων συναλλαγών ισχύος, προκειμένου να διευκολυνθεί το εμπόριο και η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι περιορισμοί μεταφοράς στην αναδιαρθρωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχουν παρακινήσει την ανάπτυξη διάφορων τεχνολογιών με σκοπό την αύξηση της διαθέσιμης ικανότητας μεταφοράς των υπαρχόντων δικτύων. Η εισαγωγή των ΕΣΜ στα ΣΗΕ ενισχύει σημαντικά τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς τους και σε μία ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η βέλτιστη εγκατάσταση ΕΣΜ μπορεί να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος και να βοηθήσει τους συμμετέχοντες στην αγορά να υλοποιήσουν το σχεδιασμό τους και ταυτόχρονα να διατηρήσουν την ανταγωνιστική τους συμπεριφορά, κάνοντας τα διάφορα δίκτυα μεταφοράς ευέλικτα και ανταγωνιστικά. Συμπερασματικά, μέσω της ικανότητάς τους να ρυθμίζουν τις τάσεις των ζυγών του ΣΗΕ και να ανακατανέμουν τις ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, τα ΕΣΜ ενισχύουν την ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος και την ευστάθεια του δικτύου.

Στην αρχή της εργασίας έγινε μια σύντομη εισαγωγή στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, την απήχησή τους στις σύγχρονες εφαρμογές και στη χρησιμότητά τους. Ξεκινώντας από τα δομικά συστατικά τους, παρατέθηκαν τα βασικά είδη διακοπών όπως η δίοδος, το τρανζίστορ και το θυρίστορ. Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση των διατάξεων που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές, δηλαδή των ανορθωτών. Οι διατάξεις αυτές κατηγοριοποιήθηκαν και έγινε μια σύντομη ανάλυση της κάθε διάταξης μέσω των εξισώσεων που διέπουν τη λειτουργία τους και αντίστοιχων διαγραμμάτων. Επίσης, μια παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τους μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή. Αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου αποτέλεσε η μετατροπή συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη μέσω διατάξεων αντιστροφών, οι οποίοι αναλύθηκαν σε μονοφασικούς και τριφασικούς. Το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφει τις εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την ενσωμάτωσή τους στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το σημείο συνοψίζεται η διαδεδομένη χρήση των ΑΠΕ και γίνεται αναφορά στα κύρια μέρη μιας ανεμογεννήτριας και ενός συγκροτήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη δυνατότητα μεταβολής των στροφών τους και γίνεται λεπτομερής αναφορά των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται σε αυτές. Επιπλέον, αναλύονται οι τρόποι διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πάνελ τόσο μεταξύ τους όσο και με το δίκτυο, ενώ επίσης αναφέρονται και οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που είναι αναγκαίες για τη λειτουργία αυτών των συστημάτων. Ακολούθως, δίνεται έμφαση στα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS) και αυτά χωρίζονται σε κατηγορίες. Στα τελευταία υποκεφάλαια αυτού του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στα ωφέλη από τη χρήση των FACTS. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας βελτιώνουν την ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνουν το λειτουργικό κόστος του, τις απώλειές του και αυξάνουν τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς που είναι ζωτικής σημασίας στο τομέα της μεταφοράς ενέργειας.

Τέλος, είναι βέβαιο πως η τεχνολογία ενσωμάτωσης διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για την ενσωμάτωσή τους στο δίκτυο εξελίσσεται με αλματώδεις ρυθμούς και υπάρχει σημαντικός χώρος για εμβάθυνση και επέκταση του αντικείμενου της εργασίας αυτής. Εξαιτίας του αυξανόμενου ανταγωνισμού στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας, διαρκώς αναζητούνται νέες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος με σκοπό την ενσωμάτωσή τους στα σύγχρονα συστήματα μεταφοράς ενέργειας, έχοντας ως σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών τους και συνεπώς αυτός αποτελεί έναν τομέα με σημαντικά περιθώρια προόδου.









## Βιβλιογραφία

1. Chakraborty S., Simoes, Marcelo G., Kramer, William E., 2013. *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems, Green Energy and Technology*. In: Edison R. C. da Silva, Malik E. E., 2013. *Fundamentals of Power Electronics*, pp 7-59. London: Springer- Verlag.
2. Kassakian J., Schlecht M., Verghese G., 1991. *Principles of power electronics*. Reading: Addison- Wesley.
3. Mohan N., Undeland T., Robbins W., 2003. *Power electronics: converters, applications, and design*. New York: Wiley.
4. Hart D., 2011. *Power electronics*, 2<sup>η</sup> Εκδ. New York: McGraw Hill.
5. Batarseh I., 2004. *Power electronic circuits*. New York: Wiley.
6. Zmood D., Holmes D.G., 2001. Improved voltage regulation for current-source inverters. IEEE.
7. Espinoza J., Joós G., Guzmán J., 2001. Selective harmonic elimination and current/voltage control in current/voltage source topologies: a unified approach. IEEE.
8. Acha E., Agelidis V., Anaya-Lara O., 2002. *Power electronic control in electrical systems*. Oxford: Newnes.
9. Strzelecki R., Zinoviev G.S., 2008. *Overview of power electronics converters and controls*. London: Springer.
10. Shigekane H., Fujihira T., Sasagawa K., 2009. Macro-trend and a future expectation of innovations in power electronics and power devices. Proceedings of the IPEMC, pp 35–39.
11. Bose B., 2006. *Power electronics and AC drives*. Amsterdam: Elsevier.
12. Kazimierczuk M., 2008. *Pulse-width modulated DC–DC power converters*. New York: Wiley.
13. Krein P., 1998. *Elements of power electronics*. Oxford: New York.
14. Shepherd W., Zhang L., 2004. *Power converter circuits*. New York: CRC.
15. Erickson R., Maksimovic D., 2001. *Fundamentals of power electronics*. New York: Springer.
16. Ang S., Oliva A., 2005. *Power-Switching Converters*, 2<sup>η</sup> Εκδ., Florida: Taylor & Francis.
17. Ορφανός Γ. *Ηλεκτρονικά Συστήματα Ισχύος Για Τη Σύνδεση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας Στο Δίκτυο*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα ΗΜΜΥ, Ιούλιος 2012.
18. Murthy Y. *A Review On Power Electronics Application On Wind Turbines*. IJRET, Vol. 2, Issue 11, pp 360-376., Nov- 2013.
19. Chen Z., Hu Y., Blaabjerg F. *Stability improvement of induction generator-based wind turbine systems*. IET Proc. Renewable Power Generation, vol. 1, no. 1, pp. 81–93, Mar.2007.
20. *Power Quality Requirements for Wind Whines*. IEC Standard 61400-21, 2001.

21. Blaabjerg F., Liserre M., KeMa. *Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, No. 2, March/April 2012.
22. Chen Z., Guerrero J. M., Blaabjerg F. *A review of the state of the art of power electronics for wind turbines*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, Aug. 2009.
23. Blaabjerg F., Chen Z., Kjaer S. B. *Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004.
24. Kazmierkowski M. P., Krishnan R., Blaabjerg F., 2002. *Control in Power Electronics-Selected Problems*. New York: Academic.
25. Design Limits and Solutions for Very Large Wind Turbines, Mar. 2011. UpWind project. Διαθέσιμο στο: [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/upwind/21895\\_UpWind\\_Report\\_low\\_web.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/upwind/21895_UpWind_Report_low_web.pdf).
26. Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P., 2011. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Hoboken, NJ: IEEE/Wiley.
27. Liserre M., Blaabjerg F., Hansen S. *Design and control of an LCLfilter-based three-phase active rectifier*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, Sep./Oct. 2005.
28. Grabic S., Celanovic N., Katic V. A. *Permanent magnet synchronous generator cascade for wind turbine application*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 3, pp. 1136–1142, May 2008.
29. Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S., 2011. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Hoboken, NJ: Wiley.
30. Oliveira D.S., Reis M. M., Silva C., Colado L.B., Antunes F., Soares B.L. *A three-phase high-frequency semicontrolled rectifier for PM WECS*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 25, no. 3, pp. 677–685, Mar. 2010.
31. Rodriguez J., Bernet S., Bin W., Pontt J. O., Kouro S. *Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007.
32. Kouro S, Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Wu B., Rodriguez J., Perez M. A., Leon J. I. *Recent advances and industrial applications of multilevel converters*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
33. Pena R., Clare J. C., Asher G. M. *Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation*. Proc. Inst. Elect. Eng.—Elect. Power Appl., vol. 143, no. 3, pp. 231–241, May 1996.
34. Teichmann R., Bernet S. *A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 3, pp. 855–865, May/Jun. 2005.
35. Carrasco J. M., Franquelo L. G., Bialasiewicz J. T., Galvan E., Portillo R., Prats M. M., Leon J. I., Moreno-Alfonso N. *Power electronic systems for the grid*

- integration of renewable energy sources: A survey.* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, Jun. 2006.
36. Hosoda H., Peak S. *Multi-level converters for large capacity motor drive.* IPEC, pp. 516–522, 2010.
  37. Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Peérez M. A. *A survey on cascaded multilevel inverters.* IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, pp. 2197–2206, Jul. 2010.
  38. Inoue S., Akagi H. *A bidirectional isolated DC-DC converter as a core circuit of the next-generation medium-voltage power conversion system.* IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 535–542, Mar. 2007.
  39. Schreiber D. *Power converter circuit arrangement for generators with dynamically variable power output.* U.S. Patent 6 680 856, Jan. 20, 2004.
  40. Jones R., Waite P. *Optimised power converter for multi-MW direct drive permanent magnet wind turbines.* In Proc. EPE, pp. 1–10, 2011.
  41. Kang J., Takada N., Yamamoto E., Watanabe E. *High power matrix converter for wind power generation applications.* In Proc. ICPE ECCEAsia, pp. 1331–1336, 2011.
  42. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R.W., 2011. *Semiconductor Power Devices Physics, Characteristics, Reliability.* Berlin, Germany: Springer-Verlag.
  43. Wolfgang E., Amigues L., Seliger N., Lugert G. *Building-in reliability into power electronics systems.* In Proc. World Electron. Packag. Syst. Integr., pp. 246–252, 2005.
  44. Due J., Munk-Nielsen S., Nielsen R. *Lifetime investigation of high power IGBT modules.* In Proc. EPE, Birmingham, U.K., pp. 1–8.
  45. Νικολάου Ε. *Ανάπτυξη αλγορίθμου για την διαστασιολόγηση αυτόνομων υβριδικών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.* Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα ΜΠΔ, Οκτώβριος 2015.
  46. Καγιάφας Ε. *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΘΥΡΙΣΤΟΡ (SCR, TRIAC, DIAC, UJT, PUT).* ΕΜΠ, Τμήμα ΗΜΜΥ. Διαθέσιμο στο: [http://www.lib.ntua.gr/gr/el\\_sources/ebooks/kagiafas/powerelectronics.pdf](http://www.lib.ntua.gr/gr/el_sources/ebooks/kagiafas/powerelectronics.pdf)
  47. Μανιάς Σ., 2013. *Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά.* Αθήνα: Συμεών.
  48. Γ. Κορρές, Ευέλκτα Συστήματα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΕΜΠ, Σεπτέμβριος, 2007.
  49. Santoso S., McGranham M.F., Wayne Beaty H., 2003. *Electrical Power Systems Quality.* McGraw Hill Professional.
  50. Sankaran C., 2001. *Power Quality.* Taylor & Francis.
  51. Chattopadhyay S. *Electric Power Quality.* Springer.
  52. Arrilaga J., Watson N.R., Chen S., 2000. *Power System Quality Assessment.* Wiley.
  53. Heydt G.T., 1994. *Electric Power Quality.* 2<sup>η</sup> Έκδ. Stars in a Circle Publications.
  54. Bollen M.H.J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions.* New York, IEEE Press, 1999.

55. Rashid M., 2002. Power Electronics Handbook. In: Rajashekara K., Anwar S., Barkhordarian V., Huang A.Q. (eds). *Chapter I: Part 1: Power Electronic Devices*. CRC Press LCC.
56. Motto K., Li Y., Huang A. Q. *Comparison of the state-of-the-art in high power IGBTs, IGCTs, and ETOs*. IEEE-APEC, 2000.
57. Bernet S., Teichmann R., Zuckerberger A., Steimer P. *Comparison of high power IGBTs and hard driven GTOs for high power inverters*. IEEE-APEC, 1998.
58. Πυλαρινός Δ. Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος. Πανεπιστήμιο Κρήτης-ΤΕΙ Κρήτης. Διαθέσιμο στο: [http://talos-ts.com/files/PEGA\\_PYLARINOS.pdf](http://talos-ts.com/files/PEGA_PYLARINOS.pdf).
59. M. Rashid, 2010. *Ηλεκτρονικά Ισχύος. Κυκλώματα, εξαρτήματα & εφαρμογές*. Εκδόσεις ΙΩΝ.
60. Σ. Μανιάς, 2014. *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ.
61. K. H. Sueker, 2005. *Power Electronics Design: A practitioner's Guide*. Elsevier.
62. N. Mohan, 2003. *First Courses on Power Electronics and Drives*. MNPERE.
63. V. Subrahmanyam, 1988. *Thyristor Control of Electric Drives*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
64. W. Mack Grady, Robert J. Gilleskie. *Harmonics And How They Relate To Power Factor*. EPRI PowerQuality Issues & Opportunities Conference (PQA'93). San Diego, CA, November 1993. Διαθέσιμο στο: <http://users.ece.utexas.edu/~grady/POWERFAC.pdf>.
65. B. W. Williams, 1992. *Power Electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components*. McGraw-Hill.
66. ΤΕΕ Αθηνών, 5-6 Απριλίου, 2006. *Ηλεκτρονικά ισχύος, συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και βιομηχανικές εφαρμογές*. Διαθέσιμο στο: [http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107\\_contents.htm](http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107_contents.htm)
67. M. Barnes, 2003. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. Newnes (an imprint of Elsevier).
68. G. Benysek, 2007. *Improvement in the quality of delivery of electrical energy using power electronics systems*. Springer.
69. L. M. Tolbert, T. J. King, B. Ozpineci, J. B. Campbell, G. Muralidharan, D. T. Rizy, A. S. Sabau, H. Zhang, W. Zhang, Y. Xu, H. F. Huq, H. Liu, *Power electronics for distributed energy systems and transmission and distribution applications*. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2005.
70. V. K. Sood, 2004. *HVDC and FACTS controllers: Applications of Static Converters in Power Systems*. Kluwer Academic Publishers.
71. X. Wang, Y. Song, M. Irving, 2008. *Modern Power Systems Analysis*. Springer.
72. R. Strzelecki, G. Benysek, 2008. *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*. Springer.

73. M. S. Ali, S. K. Kamarudin, M. S. Masdar, A. Mohamed. *An Overview of Power Electronics Applications in Fuel Cell Systems: DC and AC Converter.*, The Scientific World Journal, Vol. 2014, Article ID 103709, 2014. Διαθέσιμο: <http://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/103709/>
74. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, Z. Chen, M. Liserre, *Power converters and control of renewable energy systems.* Proceedings of ICPE 2004. pp.2-20,2004. Διαθέσιμο: <http://www.cerien.upc.edu/jornades/jie2005/ponencies/power%20converters%20and%20control%20of%20renewable%20energy%20systems%20paper.pdf>
75. J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, 2006. *Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, pp. 1002–1016.
76. Electrical Engineering Handbook, John Wiley & Sons, 1985
77. Σ. Μανιάς, 1997. *Ανώτερα Κεφάλαια Ηλεκτρονικών Ισχύος.* Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
78. R. Shaffer, 2006. *Fundamentals of Power Electronics with MATLAB.* Charles River Media, USA.
79. Μ.Π. Μπράιτισης, Ε. Τσιμπλοστεφανάκης. *ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ.* Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας.
80. Νικόλαος Α. Κουμιώτης, *ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,* Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2015.
81. Νικολάκης Ιωάννης, *Μελέτη Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς σε Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας,* Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Σεπτέμβριος 2005.
82. Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, και Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος,* Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2011.
83. Σ. Καφούρος, *Διερεύνηση της λειτουργίας και σχεδιασμός συστήματος ελέγχου του δυναμικού αποκαταστάτη τάσης (DVR) που χρησιμοποιείται στα δίκτυα διανομής,* Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Οκτώβριος 2010.
84. Α. Η. Λαμπρίδης, *Ανάλυση προσομοίωσης εγκάρσιου στατικού αντισταθμιστή στο πρόγραμμα Matlab,* Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούνιος 2009.