



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση και προσομοίωση ενός 10kW φωτοβολταϊκού συστήματος



Δήμητρα Δημογλίδου

ΑΕΜ 6085

Επιβλέπων Δρ. Δημήτριος Καλπακτσόγλου

Ιούλιος 2016

Περίληψη

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ονομάζονται οι πηγές ενέργειας που υπάρχουν στη φύση και είναι μη ορυκτές. Μία μορφή ανανεώσιμων πηγών είναι και η ηλιακή ενέργεια. Με τον όρο ηλιακή ενέργεια, αναφερόμαστε στην ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο με την μορφή ακτινοβολίας.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας γίνεται με τη χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούνται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Σύμφωνα με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού, έτσι η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και παράγεται ηλεκτρική τάση. Το παραγόμενο αυτό ρεύμα μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες χρήσεις. Με αυτό τον τρόπο γίνεται στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μειώνεται η χρήση των ορυκτών καυσίμων για να καλύψουμε τις ανάγκες μας.

Στη πτυχιακή αυτή θα πραγματοποιηθεί προσομοίωση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου μεγάλης ισχύος. Λογικά διαγράμματα, σχέδια και γράφηκες παραστάσεις θα συμπεριληφθούν και θα αξιολογηθούν. Τα τελικά συμπεράσματα όπως και προτάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις θα δοθούν κατά την ολοκλήρωση της πτυχιακής.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	7
1.1 Πρόλογος	7
1.2 Μόλυνση του περιβάλλοντος	7
1.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου	8
1.4 Ανάγκη για την στροφή μας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	9
1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	10
1.5.1 Αιολική ενέργεια	10
1.5.2 Γεωθερμική ενέργεια	11
1.5.3 Ενέργεια των κυμάτων	11
1.5.4 Υδραυλική ενέργεια	11
1.5.5 Βιομάζα	12
1.5.6 Ηλιακή ενέργεια	12
1.6 Πλεονεκτήματα ηλιακής ενέργειας	13
1.7 Μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας	13
2 Ηλιακή Ενέργεια	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2 Ιστορία της ηλιακής ενέργειας	16
2.3 «Ηλιακό δυναμικό» στην Ελλάδα	17
2.4 Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας	19
2.4.1 Ηλιακή σταθερά	19
2.4.2 Ηλιακή ώρα	19
2.4.3 Ηλιακή απόκλιση	19
2.4.4 Θέση ηλίου στον ορίζοντα	20
2.5 Υπολογισμός της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα	20

2.5.1	Θέση ανατολής και δύσης.....	20
2.5.2	Ωρες ηλιοφάνειας.....	20
2.5.3	Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την γήινη ατμόσφαιρα.....	20
2.5.4	Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης	21
2.6	Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης.....	22
2.7	Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια.....	22
2.8	Φωτοβολταϊκά.....	24
2.9	Φωτοβολταϊκά πάρκα.....	24
2.9.1	Εγκατάσταση	25
2.10	Φωτοβολταϊκά σε στέγη	26
2.10.1	Εγκατάσταση	28
3	Φωτοβολταϊκές κυψέλες.....	29
3.1	Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	29
3.2	Οι ηλιακές κυψέλες	29
3.3	Λειτουργία ηλιακής κυψέλης	29
3.4	Δομή ηλιακών κυψελών	30
3.5	Φωτοβολταϊκή τεχνολογία	30
3.5.1	Το πυρίτιο	30
3.5.2	Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.....	31
3.5.3	Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	32
3.5.4	Τεχνολογία λεπτού υμενίου	33
3.6	Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών κυψελών.....	36
3.7	Φωτοβολταϊκά πλαίσια	37
3.8	Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	38
3.8.1	Σταθερές συστοιχίες.....	39
3.8.2	Στρεφόμενες συστοιχίες.....	40
3.8.3	Συστοιχίες με ανακλαστήρες / κάτοπτρα.....	41
3.8.4	Στρεφόμενες συστοιχίες με κάτοπτρα	41

3.9	Επίδραση σκίασης	42
4	Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος.....	43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Δίοδοι	44
4.3	Thyristors	46
4.4	Χαρακτηριστικά των ελεγχόμενων διακοπών	49
4.5	Διπολικά Transistor επαφής (BJT) και μονολιθικά Darlington (MD)	49
4.6	Transistor μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (MOSFET) 51	
4.7	Διπολικά Transistor με μονωμένη πύλη (IGBT).....	52
4.8	Thyristor με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (GTO).....	53
4.9	Ελεγχόμενα MOS Thyristor (MCT).....	53
4.10	Σύγκριση ελεγχόμενων διακοπών	54
5	Αντιστροφείς DC-AC Διακοπτικού Τύπου	56
5.1	Εισαγωγή.....	56
5.2	Βασικές αρχές των αντιστροφέων διακοπτικού τύπου	58
5.2.1	Στρατηγική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)	60
5.2.2	Μικρός mf ($mf \leq 21$).....	66
5.2.3	Μεγάλος mf ($mf > 21$)	67
5.2.4	Υπερδιαμόρφωση ($ma > 1$)	67
5.3	Μονοφασικοί αντιστροφείς.....	69
5.3.1	Αντιστροφείς με πλήρη γέφυρα (μονοφασικοί).....	69
5.3.2	Διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου.....	70
5.3.3	Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου.....	71
5.4	Τριφασικοί αντιστροφείς.....	74
5.4.1	Διαμόρφωση PWM σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης	75
6	Προσομοίωση-Αποτελέσματα	78
6.1	Εισαγωγή.....	78

6.2	Παράλληλη σύνδεση	79
6.3	Σύνδεση σε σειρά/παράλληλα.....	81
6.4	Μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.....	84
7	Επίλογος.....	90
8	Βιβλιογραφία	91

1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1 Πρόλογος

Σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις για το περιβάλλον, έχουν δημιουργηθεί σοβαρές επιπτώσεις σε αυτό λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που έχουν προκύψει, είναι η μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω αυτής της δραστηριότητας και επίσης η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας. Οι συμβατικές ενεργειακές τεχνολογίες είναι το κύριο αίτιο της καταστροφής του περιβάλλοντος, τόσο λόγω της εξάντλησης των φυσικών πόρων όσο και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Έχουμε ενδείξεις που αναφέρουν ότι η κλιματική αλλαγή οφείλεται κυρίως στις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Αέρια θερμοκηπίου παράγονται τόσο από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και από το κλάδο των μεταφορών. Για το λόγο αυτό είναι ανάγκη η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και ειδικότερα στις ανανεώσιμες, οι οποίες είναι και φιλικές προς το περιβάλλον αλλά και ανεξάντλητες συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας.

1.2 Μόλυνση του περιβάλλοντος

Στην ανθρώπινη δραστηριότητα αποδίδονται οι διαταραχές στη γήινη βιόσφαιρα και στο φυσικό περιβάλλον οι οποίες αποτελούν τα περιβαλλοντικά προβλήματα. Ορισμένα από τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι η κλιματική αλλαγή, η τρύπα του όζοντος, η όξινη βροχή καθώς επίσης και η ρύπανση του περιβάλλοντος.

Η ρύπανση – μόλυνση του περιβάλλοντος είναι η αλλοίωση της μορφής του περιβάλλοντος και της ισορροπίας του ανθρώπου με τη φύση. Ο άνθρωπος είναι υπεύθυνος γι' αυτή την καταστροφή ως αποτέλεσμα της έλλειψης λογικής εκμετάλλευσης της γης. Η μόλυνση του περιβάλλοντος διακρίνεται στη ρύπανση του αέρα, των υδάτων και του εδάφους.

Οι αιτίες που οδηγούν στη ρύπανση του περιβάλλοντος είναι πολλές. Η χρήση χημικών ουσιών στις γεωργικές καλλιέργειες καθώς και η δημιουργία πολλών εργοστασίων χωρίς τα κατάλληλα μέτρα προστασίας είναι οι κύριες αιτίες που στέρησαν από τον άνθρωπο ένα υγιές περιβάλλον.

Τα εργοστάσια μολύνουν τον αέρα λόγω του μονοξειδίου του άνθρακα που παράγονται από αυτά καθώς και η καύση ορυκτών καυσίμων, ενώ τα βιομηχανικά απόβλητα που χύνονται στις θάλασσες και τα ποτάμια, προκαλούν ρύπανση των υδάτων.



Εικόνα 1.1 - Εργοστάσιο ΔΕΗ - Πτολεμαΐδα, ρύπανση του αέρα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Όλα αυτά έχουν σοβαρές συνέπειες. Οι επιπτώσεις της μόλυνσης εντοπίζονται στην ανθρώπινη υγεία και σε άλλες μορφές ζωής στον πλανήτη. Το πρόβλημα αυτό οδηγεί επίσης και στην καταστροφή της φύσης, της χλωρίδας και της πανίδας.

Τώρα που πλέον η φύση έχει αρχίσει να εκδικείται τον άνθρωπο για όλες αυτές τις καταστροφές που της έχει προκαλέσει, αρχίζουμε να παίρνουμε μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Αποτελεσματικότερο είναι βέβαια να παρθούν μέτρα πρόληψης, έτσι θα μπορούσαμε να προστατέψουμε καλύτερα το περιβάλλον.

1.3 Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η διαδικασία κατά την οποία η ατμόσφαιρα ενός πλανήτη συγκρατεί θερμότητα και συμβάλλει στην αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειάς του.

Το φαινόμενο αυτό, που επιτρέπει τη διέλευση της ακτινοβολίας αλλά ταυτόχρονα την εγκλωβίζει, μοιάζει με τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου, έτσι ο Γάλλος μαθηματικός Fourier το ονόμασε «Φαινόμενο Θερμοκηπίου». Είναι η φυσική διεργασία που εξασφαλίζει στη γη θερμοκρασία επιφάνειας γύρω στους 15°C, ενώ χωρίς αυτό η θερμοκρασία θα ήταν -18°C. Τα τελευταία χρόνια όμως, με τον όρο

Φαινόμενο του Θερμοκηπίου δεν αναφερόμαστε στη φυσική διεργασία, αλλά στην έξαρση αυτής, λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας από τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες.

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου ως αποτέλεσμα της αύξησης της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ο βασικότερος τομέας παραγωγής αερίων είναι η παραγωγή ενέργειας και στη συνέχεια ακολουθούν η βιομηχανική δραστηριότητα, οι μεταφορές και οι αγροτικές δραστηριότητες.

Τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν την μεγάλο μήκους κύματος γήινη ακτινοβολία και επανεκπέμπουν θερμική ακτινοβολία θερμαίνοντας την επιφάνεια. Εάν συνεχιστεί αυτό, η θερμοκρασία της γης θα αυξηθεί και μπορεί η αύξηση να είναι μικρή, μπορεί να οδηγήσει όμως σε σημαντικές κλιματικές αλλαγές.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, θα πρέπει να πετύχουμε μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Η μείωση αυτή μπορεί να γίνει με την χρήση ήπιων μορφών ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών μας.

1.4 Ανάγκη για την στροφή μας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ανάγκη για στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξάνεται σημαντικά. Οι περισσότερες χώρες προσπαθούν να τις εκμεταλλευτούν και να μειώσουν την χρήση των ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των αναγκών τους. Έτσι θα μπορέσει να περιοριστεί και η μόλυνση του περιβάλλοντος, όπως και το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Είναι αναγκαία η χρήση των ΑΠΕ διότι:

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον με μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα
- Είναι ανεξάντλητες
- Έχουν χαμηλά έξοδα λειτουργίας
- Επιχορηγούνται απο την κυβέρνηση με διάφορα σχέδια για επενδύσεις σε ΑΠΕ

- Είναι ευέλικτες εφαρμογές όπου γίνεται ορθολογική η χρήση τους ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας.

1.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ονομάζονται οι πηγές ενέργειας που υπάρχουν στη φύση και είναι μη ορυκτές. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντλωση ή καύση. Είναι καθαρές μορφές ενέργειας, πολύ φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδесμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως άλλες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό.

Οι ΑΠΕ διακρίνονται στις παρακάτω ενέργειες:

- Αιολική
- Ηλιακή
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια των κυμάτων
- Υδραυλική ενέργεια
- Βιομάζα

1.5.1 Αιολική ενέργεια.

Αιολική είναι η ενέργεια που παίρνουμε από τον άνεμο. Είναι μια ανεξάντλητη, ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον. Η εκμετάλλευση της γίνεται με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται οι άνεμοι.



Εικόνα 1.2 - Αιολικό πάρκο.

1.5.2 Γεωθερμική ενέργεια.

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια της γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας γίνεται είτε με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια, είτε με ρεύματα μεταφοράς.

1.5.3 Ενέργεια των κυμάτων.

Είναι η ενέργεια που μας προσφέρει η θάλασσα. Η εκμετάλλευσή της γίνεται με τα κύματα, τις παλίρροιες και τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού. Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας έχει μικρό κόστος, μεγάλη απόδοση καθώς επίσης και δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από το άφθονο θαλασσινό νερό. Όμως έχει μεγάλο κόστος κατά τη μεταφορά της ενέργειας στη στεριά.

1.5.4 Υδραυλική ενέργεια.

Είναι μια καθαρή, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Στη φύση, το νερό που βρίσκεται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, έχει δυναμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε κινητική όταν αυτό ρέει σε περιοχές με μικρότερο υψόμετρο. Η ενέργεια του νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η εκμετάλλευσή της γίνεται με διάφορα υδροηλεκτρικά έργα, όπως με υδροταμιευτήρα, με φράγμα, με κλειστό αγωγό πτώσεως, με υδροστρόβιλο, με ηλεκτρογεννήτρια ή με διώρυγα φυγής.



Εικόνα 1.3 - Υδροηλεκτρική ενέργεια.

1.5.5 Βιομάζα.

Ο όρος βιομάζα, περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς και χρησιμοποιείται ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Τέτοια υλικά είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα που προέρχονται από τα δάση, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κλπ. Η βιομάζα είναι ανανεώσιμη καθώς αναπληρώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα, χαρακτηρίζεται επίσης και ως δευτερογενής ηλιακή ενέργεια. Η ενέργεια της βιομάζας χρησιμοποιείται για την ηλεκτροπαραγωγή αλλά και ως υγρά καύσιμα μεταφορών που αντικαθιστούν τα πετρελαϊκά προϊόντα.

1.5.6 Ηλιακή ενέργεια.

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο. Τέτοιες ενέργειες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών.

1. Παθητικά ηλιακά συστήματα. Τα παθητικά ηλιακά συστήματα αποτελούνται από δομικά στοιχεία, κατάλληλα σχεδιασμένα και συνδυασμένα μεταξύ τους, ώστε να υποβοηθούν την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για τον φυσικό φωτισμό των κτηρίων ή για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας μέσα σε αυτά.
2. Ενεργειακά ή θερμικά ηλιακά συστήματα. Η πιο απλή και διαδεδομένη μορφή των θερμικών ηλιακών συστημάτων είναι οι ηλιακοί θερμοσίφωνες, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ενέργεια και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε κάποιο ρευστό. Στα συστήματα αυτά η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών.
3. Φωτοβολταϊκά συστήματα. Πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση μη διασυνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων.

Τα παθητικά και τα ενεργητικά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

1.6 Πλεονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

1. Είναι μια ανεξάντλητη, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Όσο ο ήλιος εξακολουθεί να υφίσταται, θα υπάρχει διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια.
2. Σε αντίθεση με άλλες μορφές ενέργειας, η ηλιακή ενέργεια δεν βρίσκεται σε συγκεκριμένο σημείο. Είναι διαθέσιμη παντού.
3. Έχει μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας και ελάχιστο κόστος συντήρησης.
4. Μηδενική ρύπανση
5. Αθόρυβη λειτουργία

1.7 Μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

1. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος κατασκευής.
2. Έλλειψη επιδοτήσεων
3. Προβλήματα στην αποθήκευση



Εικόνα 1.4 - Θερμικά ηλιακά συστήματα.

2 Ηλιακή Ενέργεια

2.1 Εισαγωγή

Η Ελλάδα απολαμβάνει τον ήλιο σχεδόν όλο το χρόνο. Εφόσον έχουμε αυτό το προνόμιο, οφείλουμε να το εκμεταλλευτούμε μέσω τεχνολογιών που χρησιμοποιούν τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου. Αυτή η εναλλακτική πηγή ενέργειας είναι ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

Τα ηλιακά θερμικά συστήματα μέσω ηλιακών συλλεκτών μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε θερμική και έτσι καλύπτεται η ενεργειακή ανάγκη για θέρμανση νερού χρήσης.

Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καλύψουν τις ανάγκες μιας κατοικίας ή ακόμη και για κεντρική ηλεκτροπαραγωγή. Παράγουν συνεχές ρεύμα και λειτουργούν σε αρκετά δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες. Έχουν μικρό βάρος και τοποθετούνται στο έδαφος, σκεπές, ταράτσες και σε κτήρια.

Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται στον ήλιο. Φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη μας, διαμέσου του διαστήματος, και στη συνέχεια κατά τη διέλευσή της από την ατμόσφαιρα υπόκειται σε σημαντικές αλλαγές, που οφείλονται στην σύσταση της ατμόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα σημείο στην επιφάνεια της γης μια δεδομένη χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από την ένταση και την διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο ένα μέρος της ακτινοβολίας που προέρχεται άμεσα από τον ήλιο (άμεση ηλιακή ακτινοβολία), ενώ το υπόλοιπο είτε απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας είτε ανακλάται πάλι προς το διάστημα ή προς την επιφάνεια της γης. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές ανακλάσεις δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και καλείται διάχυτη ακτινοβολία.

Η γη δέχεται ετήσια ηλιακή ενέργεια με ακτινοβολία της τάξης του $173 \times 10^{15} \text{W}$. Σε ένα 24ωρο κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας της γης δέχεται κατά μέσο όρο 4-6 KWh ηλιακής ενέργειας με ακτινοβολία 800-2500 KWh/m³ ετησίως. Η ποσότητα

αυτή είναι περίπου η διπλάσια από αυτή που θα μπορέσει ποτέ να ληφθεί από το σύνολο των μη ανανεώσιμων πηγών της Γης (πχ. Φυσικό αέριο, άνθρακα κτλ) και περισσότερη από αυτή που καταναλώνει σήμερα ο άνθρωπος σε ένα χρόνο.

Γι αυτό κρίνεται σκόπιμη η πρακτική εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας.

Η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:

1. την άμεση παραγωγή θερμότητας, με ενεργητικά και παθητικά ηλιακά συστήματα. Αν η παραγόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια μηχανικής ενέργειας (με αμοστρόβιλους). Η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή τη περίπτωση αναφερόμαστε σε θερμική παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια.
2. την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δύο τρόπους: θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η θερμική αξιοποίηση περιλαμβάνει συλλογή της ηλιακής ενέργειας για να παραχθεί θερμότητα κυρίως για θέρμανση νερού και μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση αμοστροβίλων. Οι φωτοβολταϊκές εφαρμογές πρόκειται για συστήματα που μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και που εδώ και πολλά χρόνια, χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροδότηση στο ηλεκτρικό δίκτυο καταναλώσεων.

Πλεονεκτήματα χρήσης της ηλιακής ενέργειας:

- Αποτρέπεται η κατανάλωση ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και κατά συνέπεια οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούν τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές.
- Το φως του ήλιου είναι δωρεάν και διαθέσιμο σε όλο τον πλανήτη. Είναι ανανεώσιμη πηγή και δεν πρόκειται να εξαντληθεί.
- Η ηλιακή θερμική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να απελευθερώνεται αργά και σταδιακά.
- Η τοποθέτηση ενός ηλιακού συστήματος είναι απλή. Η συντήρηση που απαιτεί είναι ελάχιστη ενώ η ανθεκτικότητά τους φτάνει τα 25 και άνω έτη λειτουργίας.

- Πρόκειται για απλή και συμφέρουσα λύση καθώς με τη πάροδο του χρόνου τα ηλιακά συστήματα τείνουν να “πληρώνονται μόνα τους” . (μέσος χρόνος αποπληρωμής 4 ετών)
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε μηχανήματα μικρής κλίμακας όσο και μεγάλης.
- Είναι η εναλλακτική ενέργεια που φαίνεται ότι μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα στις ανάγκες του μέλλοντος.
- Τα συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι γενικώς αθόρυβα.
- Τα black-out είναι σπάνια.
- Πλεονάζουσα ενέργεια μπορεί να επανατροφοδοτήσει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
- Το κόστος δε μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου όπως συμβαίνει πχ με τα ορυκτά καύσιμα.
- Η ηλιακή τεχνολογία είναι μια καθ’όλα ώριμη, δοκιμασμένη και αξιόπιστη τεχνολογία.
- Είναι ιδανική για απομονωμένες περιοχές, μακριά από γεννήτριες.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρισμού ακόμα κι όταν έχει συννεφιά.
- Η ενέργεια δε χάνεται κατά τη μεταφορά από τα κεντρικά σημεία, όταν τα καταναμημένα συστήματα βρίσκονται σε λειτουργία.

2.2 Ιστορία της ηλιακής ενέργειας

Η κύρια και πρωταρχική πηγή ενέργειας για τη γη είναι ο Ήλιος. Από πολύ νωρίς οι άνθρωποι είχαν καταλάβει την εξαιρετική σημασία που είχε για τη ζωή του κόσμου.

Από τα αρχαία χρόνια ο άνθρωπος είχε διαπιστώσει την τεράστια σημασία που είχε ο ήλιος για την επιβίωσή του αλλά και για την επιβίωση κάθε ζωντανού οργανισμού στον πλανήτη. Για κάθε άνθρωπο, ο ήλιος ήταν γιγαντιαία πηγή φωτός, θερμότητας και κατ’ επέκταση πηγή ζωής. Αυτός ήταν και ο λόγος που τον περιέβαλαν με

σεβασμό, φόβο και δέος. Μην μπορώντας να εξηγήσουν τα φαινόμενα που προκαλούσε τον θεοποιούσαν.

Για τη μεγάλη του λοιπόν σπουδαιότητα, ο ήλιος λατρεύτηκε σ' όλα τα μέρη σαν θεός. Οι αρχαίοι Έλληνες μη μπορώντας να εξηγήσουν τα φυσικά φαινόμενα που προκαλούσε και ανίκανοι να προστατευτούν από το παντοδύναμο αυτό στοιχείο, το θεοποίησαν και έπλασαν πολλούς μύθους και θρύλους γύρω από τον ήλιο.

Πέρα όμως από τη μυθολογική εξήγηση, που έδιναν οι αρχαίοι στον ήλιο, έκαναν προσπάθειες να τον εξηγήσουν επιστημονικά, σύμφωνα βέβαια με τις γνώσεις της εποχής.

Για τον άνθρωπο ο ήλιος ήταν πηγή ζωής, φωτός και θερμότητας. Χάρης τον ήλιο ο άνθρωπος ζεσταίνονταν και έβλεπε κατά την διάρκεια της μέρας, οπότε και μπορούσε να κάνει απαραίτητες για την διαβίωση του δραστηριότητες, όπως το κυνήγι.

Οι αρχαίοι πολιτισμοί χρησιμοποιούσαν επίσης τον ήλιο για να προσδιορίσουν τον χρόνο. Ο πρόγονος του ψηφιακού ρολογιού είναι το ηλιακό ρολόι. Το ηλιακό ρολόι είναι μία κατασκευή για να μετράμε το χρόνο με τη βοήθεια της σκιάς ενός δείκτη που ονομάζεται «γνώμονας».

2.3 «Ηλιακό δυναμικό» στην Ελλάδα

Η Ελλάδα έχει σχετικά υψηλά επίπεδα ζήτησης ενέργειας, αλλά και μέσης κατανάλωσης ανά κάτοικο.

Αναλύοντας τον ενεργειακό τομέα της Ελλάδας, γίνεται εύκολα ορατή η υστέρηση στην εξοικονόμηση και αποδοτικότερη χρήση ενέργειας, η μικρή μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, όπως και η αντικατάσταση των συμβατικών μορφών καυσίμου.

Στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η Ελλάδα βρίσκεται σε σχετικά υψηλό επίπεδο αξιοποίησης του δυναμικού, ακολουθώντας την παγκόσμια και ευρωπαϊκή τάση.

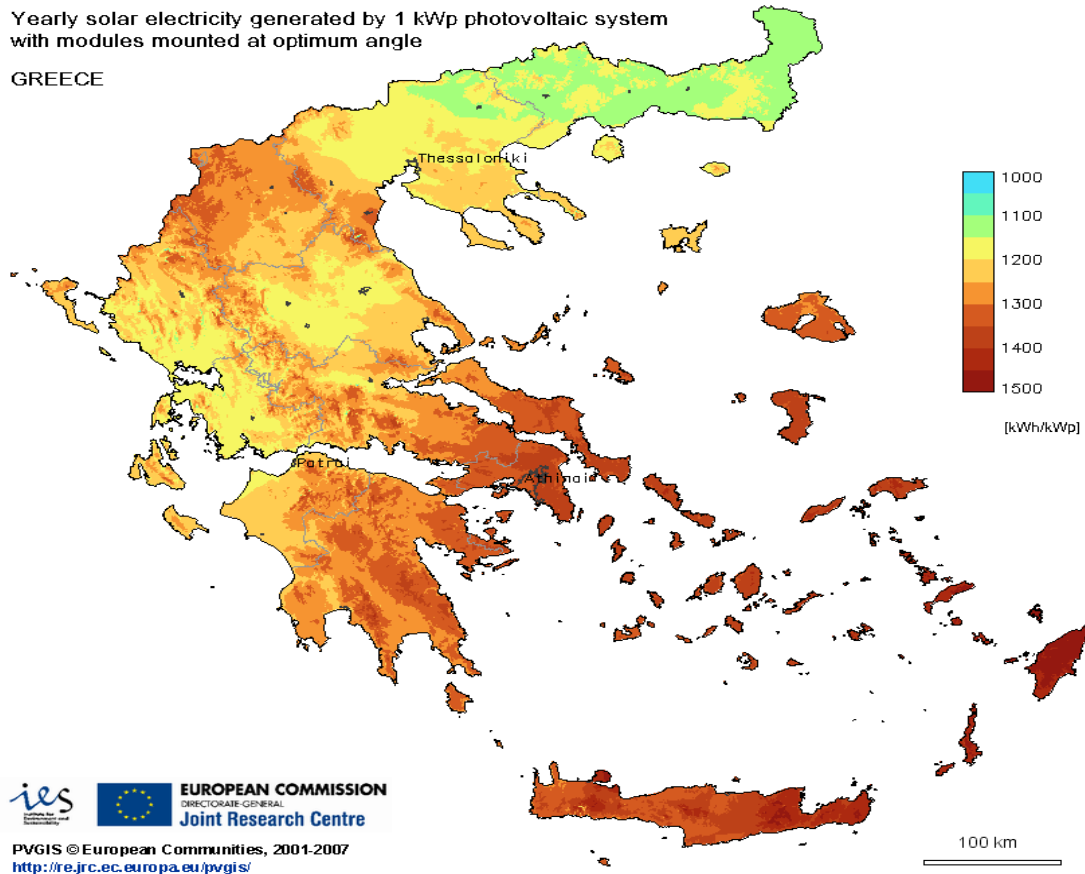
Το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας είναι ένα από τα κυριότερα στην Ευρωπαϊκή ένωση, μαζί με τις υπόλοιπες μεσογειακές χώρες. Η θέση της χώρας, δίνει ένα μεσογειακό ήπιο κλίμα κατάλληλο για συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το μέγιστο μέσο δυναμικό, μετρήσιμο με ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 1 KW, εντοπίζεται στα Δωδεκάνησα, στις Κυκλάδες, στην Κρήτη, στις Σποράδες, στα Νησιά του Ανατολικού Αιγαίου, στην Αττική, στην νότια Στερεά Ελλάδα και την Εύβοια, στην ανατολική Πελοπόννησο και τη Δυτική Μακεδονία. Οι χαμηλότερες τιμές εντοπίζονται στα βόρεια και συγκεκριμένα στην ανατολική Μακεδονία και τη Θράκη.

Στο πλαίσιο διερεύνησης και τελικά ανάπτυξης μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι απαραίτητο να προηγηθεί η εκτίμηση και πιθανώς η διενέργεια μετρήσεων σχετικά με το ηλιακό δυναμικό της προβλεπόμενης περιοχής ώστε να υπολογιστούν τα απαραίτητα δεδομένα αναφορικά με την απόδοση της εγκατάστασης αυτής.

Η εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού μιας συγκεκριμένης περιοχής, αναφέρεται στην αναζήτηση των διαθέσιμων πηγών για δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας στην επιθυμητή θέση εγκατάστασης ενός φωτοβολταϊκού σταθμού και τα εξής στάδια:

- Αξιολόγηση – σύγκριση δεδομένων από διάφορες πηγές.
- Εκτίμηση ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην θέση της εγκατάστασης σε οριζόντιο και σε κεκλιμένο επίπεδο.
- Υπολογισμός βέλτιστης κλίσης.
- Δημιουργία χρονοσειράς ωριαίων τιμών ολικής ακτινοβολίας, καθώς και διάχυτης και άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, για ένα τυπικό έτος.



Εικόνα 2.5 - Ηλιακό Δυναμικό Ελλάδας, σε μέσες τιμές παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά 1KW.

2.4 Υπολογισμός ηλιακής ενέργειας

2.4.1 Ηλιακή σταθερά

Λόγω των πυρηνικών αντιδράσεων που γίνονται στον ήλιο και της θερμότητας η οποία αποδεσμεύεται, η θερμοκρασία του ανεβαίνει και φτάνει περίπου τους 6000 βαθμούς κέλβιν στην επιφάνειά του. Ο ήλιος αρχίζει και ακτινοβολεί προς το διάστημα και ένα τμήμα αυτής της ακτινοβολίας φτάνει στη γη.

Όσο απομακρυνόμαστε από τον ήλιο, μειώνεται η ένταση της ακτινοβολίας. Όταν φτάσουμε στη μέση απόσταση της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου, έχει μειωθεί και έχει φτάσει περίπου τα 1367 W/m^2 .

$$\text{Ηλιακή σταθερά: } I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Η ηλιακή σταθερά έχει μεγάλη σημασία στους υπολογισμούς των ηλιακών συστημάτων διότι δίνει το μέτρο της ενεργειακής μας πηγής.

2.4.2 Ηλιακή ώρα

Μέσα σε 24 ώρες, η γη εκτελεί μια πλήρη περιστροφή γύρω από τον άξονά της. Για κάθε περιοχή υπάρχει μια χρονική στιγμή κατά την οποία ο ήλιος βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο σε σχέση με τον ορίζοντα. Αυτή η χρονική στιγμή ονομάζεται ηλιακό μεσημέρι. Η ηλιακή ώρα κατά το ηλιακό μεσημέρι είναι 12.

$$\text{Γωνία ώρας: } \omega = 15 \cdot (t_s - 12)$$

Όπου t_s η ηλιακή ώρα σε ώρες.

2.4.3 Ηλιακή απόκλιση

Ηλιακή απόκλιση είναι η γωνία που σχηματίζουν οι ακτίνες του ήλιου με το επίπεδο του ισημερινού κατά το ηλιακό μεσημέρι.

Η ηλιακή απόκλιση μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους και παίρνει τιμές από $-23,45^\circ$ έως $+23,45^\circ$, μηδενίζει επίσης τις τιμές της κατά τις ισημερίες.

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right]$$

Όπου N η ημέρα του έτους.

2.4.4 Θέση ηλίου στον ορίζοντα

Έχει επικρατήσει η θέση του ηλίου στον ορίζοντα σε σχέση με έναν παρατηρητή ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια της γης να προσδιορίζεται με βάση συγκεκριμένες γωνίες. Οι γωνίες αυτές είναι:

- Γωνία ύψους του ηλίου. Η γωνία αυτή είναι η γωνία που σχηματίζει η νοητή γραμμή από τον ήλιο στον παρατηρητή με το οριζόντιο επίπεδο.

$$\alpha = \arcsin (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi)$$

- Γωνία αζιμουθίου. Είναι η γωνία την οποία σχηματίζει το κατακόρυφο επίπεδο το οποίο ορίζεται από τον ήλιο και τον παρατηρητή σε σχέση με την κατεύθυνση του βορρά.

$$\sin A = \frac{-\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \alpha} \quad \text{ή} \quad \cos A = \frac{\sin \delta \cdot \cos \varphi - \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi}{\cos \alpha}$$

- Γωνία ζενίθ. Είναι η γωνία η συμπληρωματική της γωνίας ύψους του ηλίου.

2.5 Υπολογισμός της θέσης του ήλιου στον ορίζοντα

2.5.1 Θέση ανατολής και δύσης

Ο προσδιορισμός της θέσης ανατολής και δύσης γίνεται με την γωνία ώρας για την οποία η γωνία ύψους του ηλίου μηδενίζεται.

$$\omega_s = \arccos(-\tan\delta \cdot \tan\varphi) \quad [^\circ]$$

2.5.2 Ωρες ηλιοφάνειας

Οι ώρες ηλιοφάνειας είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος του υπολογισμού των ηλιακών συστημάτων.

$$\text{Ωρες ηλιοφάνειας} = \frac{2\omega_s}{15}$$

2.5.3 Ηλιακή ακτινοβολία έξω από την γήινη ατμόσφαιρα

Η ηλιακή ακτινοβολία έξω από την γήινη ατμόσφαιρα, αποτελεί τη βάση των υπολογισμών που γίνονται για τον προσδιορισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης. Η ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνει διάφορα μήκη κύματος, το σύνολο των οποίων ονομάζεται φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρεται από τα ορατά μήκη κύματος και από την υπέρυθη ακτινοβολία.

Με βάση τη μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς I_{sc} , μπορούμε να υπολογίσουμε την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα. Αυτή η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας συμβολίζεται I_0 .

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ήλιου I_0 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_0 = I_{sc} \left[1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot N}{365.25}\right) \right] \quad [\text{W/m}^2]$$

Από την I_0 μπορούμε να υπολογίσουμε την ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο με τη σχέση:

$$I_{0,\text{horizontal}} = I_0 \cdot \cos\theta_z$$

Όπου θ_z η γωνία ζενίθ του ηλίου.

Μπορούμε να υπολογίσουμε την συνολική ημερήσια ενέργεια από τον ήλιο η οποία προσπίπτει σε επιφάνεια παράλληλη με την επιφάνεια της γης με τη σχέση:

$$H_{o,h} = \frac{86400 \cdot I_o}{\pi} * (\omega_s \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\omega_s) \quad [J/m^2]$$

2.5.4 Ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα, αρχίζει η διαδικασία της σκέδασης και της απορρόφησης σημαντικού τμήματός της από τα μόρια της ατμόσφαιρας, τα σωματίδια κ.λ.π. Σε μια καθαρή ημέρα μόνο το 80% της ηλιακής ακτινοβολίας φθάνει στην επιφάνεια της γης ενώ σε μια συννεφιασμένη μέρα το ποσοστό μειώνεται ακόμη και στο 10%.

Η ηλιακή ακτινοβολία φθάνει στην επιφάνεια της γης μέσω δύο συνιστωσών, της άμεσης και της έμμεσης ή διάχυτης ακτινοβολίας.

Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που έρχεται κατευθείαν από τον ήλιο.

Έμμεση ή διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που προέρχεται από την ακτινοβολία που έχει σκεδαστεί στην γήινη ατμόσφαιρα.

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία διέρχεται μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα υπόκειται σε αλλαγές και το φάσμα της. Ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων του ηλίου, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να διανύει μικρότερη ή μεγαλύτερη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα.

2.6 Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης

Η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης σε επίπεδο κάθετο στις ακτίνες του ηλίου μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$I_{b,n} = I_o (a_o + a_1 \cdot e^{-k(1/\cos\theta_z)}) \quad [W/m^2]$$

Η έμμεση ηλιακή ακτινοβολία μια καθαρή ημέρα σε οριζόντιο επίπεδο μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$I_{d,h} = I_o \cdot \cos\theta_z [0,2710 - 0,2939 \cdot (a_o + a_1 \cdot e^{-k(1/\cos\theta_z)})] \quad [W/m^2]$$

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο είναι:

$$I_{t,h} = I_{b,n} \cdot \cos\theta_z + I_{d,h} \quad [W/m^2]$$

Οι συντελεστές α και k :

➤ Για καθαρή ατμόσφαιρα (ορατότητα 23km στο επίπεδο της θάλασσας)

$$\alpha_0 = 0,4237 - 0,00821*(6 - A)^2$$

$$\alpha_1 = 0,5055 + 0,00595*(6,5 - A)^2$$

$$k = 0,2711 + 0,01858*(2,5 - A)^2$$

➤ Για αστική ατμόσφαιρα (ορατότητα 5km στο επίπεδο της θάλασσας)

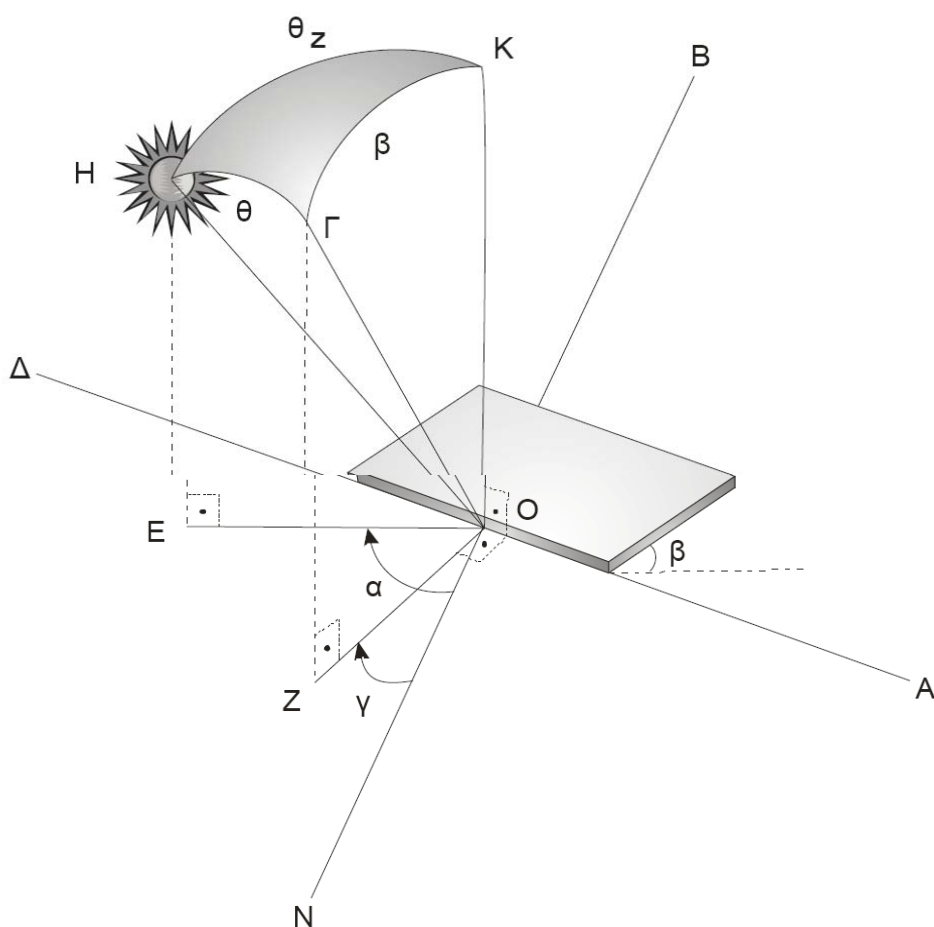
$$\alpha_0 = 0,2538 - 0,0063*(6 - A)^2$$

$$\alpha_1 = 0,7678 + 0,0010*(6,5 - A)^2$$

$$k = 0,249 + 0,081*(2,5 - A)^2$$

Όπου A είναι το υψόμετρο από την επιφάνεια της θάλασσας.

2.7 Ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια



Εικόνα 2.6 - Θέση του ηλίου ως προς το κεκλιμένο επίπεδο.

Η γωνία πρόσπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\theta_i = \cos\beta (\sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega) - \cos\delta \cdot \sin\omega \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma + \sin\beta \cdot \cos\gamma (\sin\delta \cdot \cos\varphi - \cos\delta \cdot \cos\omega \cdot \sin\varphi)$$

Εάν όμως ο συλλέκτης είναι προσανατολισμένος προς το νότο, στη περίπτωση αυτή η σχέση που δίνει την γωνία πρόσπτωσης γίνεται:

$$\cos\theta_i = \sin\alpha \cdot \cos\beta - \cos\alpha \cdot \sin\beta \cdot \cos A$$

Αφού υπολογιστεί η γωνία πρόσπτωσης της κεκλιμένης επιφάνειας σε σχέση με τις ακτίνες του ηλίου, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια προκύπτει από την ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια κάθετη ως προς τις ακτίνες του ηλίου μέσω της σχέσης:

$$I_{b,a} = I_{b,n} \cdot \cos\theta_i \quad [w/m^2]$$

Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια, προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

Αφού υπολογιστεί η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, λαμβάνοντας υπόψη και την ανάκλαση από το περιβάλλον, η ολική ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{t,a} = I_{b,n} * \cos\theta_i + [I_{d,h} * \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho * I_{t,h} * \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)] \quad [W/m^2]$$

Η συνολική προσπίπτουσα ενέργεια ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια μίας ημέρας προκύπτει από την στιγμιαία ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια ολοκληρώνοντας στη διάρκεια της ημέρας.

$$H_{b,a} = \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} I_{b,a} * dt \quad [J/m^2]$$

Ο συντελεστής ρ παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1, όταν ο συλλέκτης είναι τοποθετημένος πάνω σε ταράτσα με 100% αποδοτικό καθρέφτη.

2.8 Φωτοβολταϊκά

Στις μέρες μας, τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη και αυτό γίνεται λόγω της στροφής του ανθρώπου στις εναλλακτικές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Διακρίνονται στα φωτοβολταϊκά πάρκα και στα φωτοβολταϊκά σε στέγη.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα κατηγοριοποιούνται επίσης και με το σύστημα στήριξης που χρησιμοποιούν. Η διάκριση γίνεται σε:

- στήριξη με σταθερό σύστημα στο έδαφος
- στήριξη με σταθερό σύστημα σε επικλινή στέγη
- στήριξη με σταθερό σύστημα σε επίπεδη οροφή κτιρίου
- στήριξη με σύστημα ηλιοστατών στο έδαφος.

2.9 Φωτοβολταϊκά πάρκα

Τα φωτοβολταϊκά πάρκα είναι συνδεδεμένα συστήματα με τη ΔΕΗ και έχουν τη δυνατότητα να τροφοδοτούν με ενέργεια το ένα στο άλλο.

Ένα φωτοβολταϊκό πάρκο αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, τα οποία συνδέονται σε στοιχειοσειρές. Έπειτα παραλληλίζονται κατάλληλα οι στοιχειοσειρές ώστε να οδηγηθούν σε έναν οι περισσότερους αντιστροφείς AC/DC.

Για να υπάρξει σωστή λειτουργία του πάρκου γίνεται μελέτη από μηχανολόγο στην οποία ορίζεται το σωστό μέγεθος της στοιχειοσειράς και ο σωστός παραλληλισμός τους, ώστε να πετύχει την μέγιστη παραγωγή ενέργειας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Για να επιτευχθεί η σωστή διαστασιολόγηση πρέπει να έχουμε υπόψη:

- τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής που θα εγκατασταθεί το φωτοβολταϊκό πάρκο
- τις συνθήκες λειτουργίας μέγιστης παραγωγής που παρατηρούνται το χειμώνα.

2.9.1 Εγκατάσταση

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία συνήθως συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, σε συγκεκριμένες βάσεις στήριξης με γωνία 30 – 35 μοίρες και νότιο προσανατολισμό. Το ηλεκτρικό ρεύμα, ως παράγωγο του ηλιακού φωτός, διοχετεύεται σε έναν μετατροπέα τάσεως για μετασχηματισμό.

Για να πετύχουμε μεγαλύτερη απόδοση, μπορούμε να τοποθετήσουμε σύστημα παρακολούθησης της ηλιακής τροχιάς, με κινούμενα στοιχεία που ακολουθούν την κίνηση του ηλίου. Τα στοιχεία αυτά, μπορούν να συλλέξουν έως και 25% περισσότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Η άριστη γωνία κλίσεις εξαρτάται:

- από το γεωγραφικό πλάτος
- την αναλογία της διάχυτης ακτινοβολίας στην τοποθεσία και
- το είδος του φορτίου.



Εικόνα 2.7 - Φωτοβολταϊκό πάρκο.

Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού πάρκου έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Αυτά είναι:

- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Υψηλή αξιοπιστία – μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Δεν μολύνουν το περιβάλλον.
- Οι απαιτήσεις για τη συντήρηση είναι σχεδόν μηδενικές.
- Μπορούν να συνδυαστούν και με άλλες πηγές ενέργειας.
- Ενεργειακή ανεξαρτησία του χρήστη και χρηματικό όφελος.

2.10 Φωτοβολταϊκά σε στέγη

Τα φωτοβολταϊκά σε στέγες είναι συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με φωτοβολταϊκά με προορισμό την τοποθέτησή τους σε στέγες κτιρίων για εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων.



Εικόνα 2.8 - Φωτοβολταϊκά σε στέγη.

Τα οικιακά φωτοβολταϊκά αποτελούν μια από τις κυριότερες χρήσεις της ηλιακής τεχνολογίας. Συνήθως ονομάζονται φωτοβολταϊκά στέγης ή φωτοβολταϊκά σε στέγες και διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

- Φωτοβολταϊκά αυτονομίας

Ένα κτήριο το οποίο δεν έχει ρεύμα για διάφορους λόγους, μπορεί να εκμεταλλευτεί τον ήλιο εγκαθιστώντας ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.

Τα φωτοβολταϊκά αυτονομίας λειτουργούν χωρίς σύνδεση με τη ΔΕΗ, παράγοντας ρεύμα από τον ήλιο και αποθηκεύοντάς το σε μπαταρίες για τις περιόδους έλλειψης ηλιοφάνειας.

- Φωτοβολταϊκά σε στέγες αυτοπαραγωγής

Τα φωτοβολταϊκά αυτοπαραγωγής είναι διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά τα οποία παράγουν ενέργεια από τον ήλιο, η οποία αφαιρείται από την καταναλισκόμενη ενέργεια. Ο χρήστης με αυτόν τον τρόπο πληρώνει μόνο τη διαφορά ενέργειας αν η καταναλισκόμενη είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά.

- Φωτοβολταϊκά σε στέγες με ταρίφα

Τα φωτοβολταϊκά με ταρίφα συμφέρει να εγκατασταθούν από σπίτια που δεν είναι μόνιμες κατοικίες και έχουν ΔΕΗ.

2.10.1 Εγκατάσταση

Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού σε στέγη έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες σε σύγκριση με την εγκατάσταση σε ταράτσα.

Το βασικότερο χαρακτηριστικό μιας στέγης είναι ότι υπάρχει δεδομένη κλίση και προσανατολισμός. Έτσι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων γίνεται χωρίς να διαφοροποιηθεί η δομή της κεραμοσκεπής.

Θα πρέπει όμως να προσέξουμε πιθανές σκιάσεις που μπορεί να επισκιάζουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τέτοιες σκιάσεις μπορεί να δημιουργηθούν από καμινάδες, κεραίες, ηλιακούς θερμοσίφωνες, το οποία είναι και αυτά τοποθετημένα πάνω στη στέγη.

Δεν θέλουμε να σκιάζεται ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, διότι παράγει μικρότερο ρεύμα, το οποίο επιβάλλεται υποχρεωτικά σε όλη τη σειρά φωτοβολταϊκών με τα οποία είναι συνδεδεμένο, μειώνοντας ουσιαστικά τη συνολική παραγωγή ενέργειας. Επίσης, όταν ένα πλαίσιο σκιάζεται, μειώνεται ο χρόνος ζωής του.

3 Φωτοβολταϊκές κυψέλες

3.1 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, παράγοντας ηλεκτρική τάση. Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται στην ουσία από ένα σύνολο ημιαγωγών, δηλαδή από συστοιχίες κυψελίδων πυριτίου, τις λεγόμενες φωτοβολταϊκές κυψέλες.

Κατά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας διεγείρουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, δημιουργώντας ηλεκτρική τάση. Με την κατάλληλη συνδεσμολογία παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Οι ηλιακές κυψέλες παράγουν συνεχές ρεύμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία εξοπλισμού ή για τη φόρτιση μπαταρίας.

3.2 Οι ηλιακές κυψέλες

Επειδή η ενέργεια που παράγεται από μια ηλιακή κυψέλη είναι περιορισμένη και προκειμένου να παραχθεί μια σημαντική ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος, πολλές ηλιακές κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρονικά, σχηματίζοντας έτσι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Όταν πρόκειται για εγκαταστάσεις, στις οποίες γίνεται παραγωγή μέσης ή μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η ύπαρξη πολλών φωτοβολταϊκών πλαισίων, τα οποία συνδέονται και σχηματίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διατάσσονται με τέτοιο τρόπο, στο διαθέσιμο χώρο, ώστε να μην προκαλούνται προβλήματα σκίασης μεταξύ των διαφορετικών σειρών των πλαισίων.

3.3 Λειτουργία ηλιακής κυψέλης

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ή φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι κρυσταλλοδιόδοι οι οποίοι αποτελούνται από ημιαγωγούς. Το πυρίτιο είναι το πιο συχνό υλικό που χρησιμοποιείται στη κατασκευή ημιαγωγών για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους.

Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό κύτταρο, μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να κινούνται σχετικά ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου υποχρεώνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου η

ισχύς καθορίζεται από τη ροή των ηλεκτρονίων και την εφαρμοζόμενη τάση στο φωτοβολταϊκό κύτταρο.

3.4 Δομή ηλιακών κυψελών

Για λόγους μηχανικής αντοχής και ευχρηστίας, οι ηλιακές κυψέλες έχουν ενσωματωμένα στο περίγραμμα τους μεταλλικά ελάσματα ανοδιωμένου αλουμινίου και για λόγους προστασίας είναι αεροστεγώς και υδατοστεγώς κλεισμένα μέσα σε ειδικό γυαλί και ειδικό μονωτικό πλαστικό.

Οι ηλιακές κυψέλες αποτελούνται από:

- Μεταλλική βάση
- Πυρίτιο τύπου P
- Πυρίτιο τύπου N
- Μη – ανακλαστικό στρώμα επικάλυψης
- Μεταλλικά αγωγίμα ελάσματα.

3.5 Φωτοβολταϊκή τεχνολογία

Τα πιο σημαντικά μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι οι κυψέλες οι οποίες αποτελούν τις βασικές δομικές μονάδες και δημιουργούν συστοιχίες. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι αντιστροφείς για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος που παράγεται (DC), σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), συμβατό με τα χαρακτηριστικά του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας προς κάθε χρήση.

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες γενικά αποτελούνται είτε από κρυσταλλικό πυρίτιο, που παράγεται από τεμαχισμένα πλινθώματα ή από χυτά στοιχεία, είτε από λεπτές μεμβράνες, που εναποτίθενται σε λεπτές στοιβάδες πάνω σε υπόστρωμα. Η πλειονότητα της παραγωγής σήμερα χρησιμοποιεί τη πρώτη μορφή ενώ τα μελλοντικά σχέδια εστιάζουν στη δεύτερη. Η τεχνολογία λεπτής επίστρωσης βασισμένη στο πυρίτιο και άλλα υλικά αναμένεται να κερδίσει ένα πολύ μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς φωτοβολταϊκών στο μέλλον. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα όπως είναι η χαμηλή κατανάλωση υλικών, το χαμηλό βάρος και μία λεία οπτική εμφάνιση.

3.5.1 Το πυρίτιο

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με έμμεσο ενεργειακό διάκενο. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες του, δηλαδή έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή ενεργειακού διακένου δεν είναι ιδεώδεις για την φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή αλλά μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό έχουν να κάνουν με το γεγονός ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό των διατάξεων ηλεκτρονικής για πολλές δεκαετίες. Επομένως οι ιδιότητές του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με την χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία. Επιπλέον τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απόλυτα ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες καιρικές συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες εφαρμογές.

Εκτός του οξυγόνου, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους. Σχεδόν πάντα, όμως απαντάται με τη μορφή οξειδίου στο περιβάλλον, συγκεκριμένα ως διοξείδιο του πυριτίου. Για την αξιοποίησή του, επομένως, απαιτείται επεξεργασία έτσι ώστε να αποκτήσει υψηλή καθαρότητα.

Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά. Επί το πλείστον όμως χρησιμοποιείται κρυσταλλικό πυρίτιο. Οι κύριοι τύποι φ/β κυψελών είναι οι εξής:

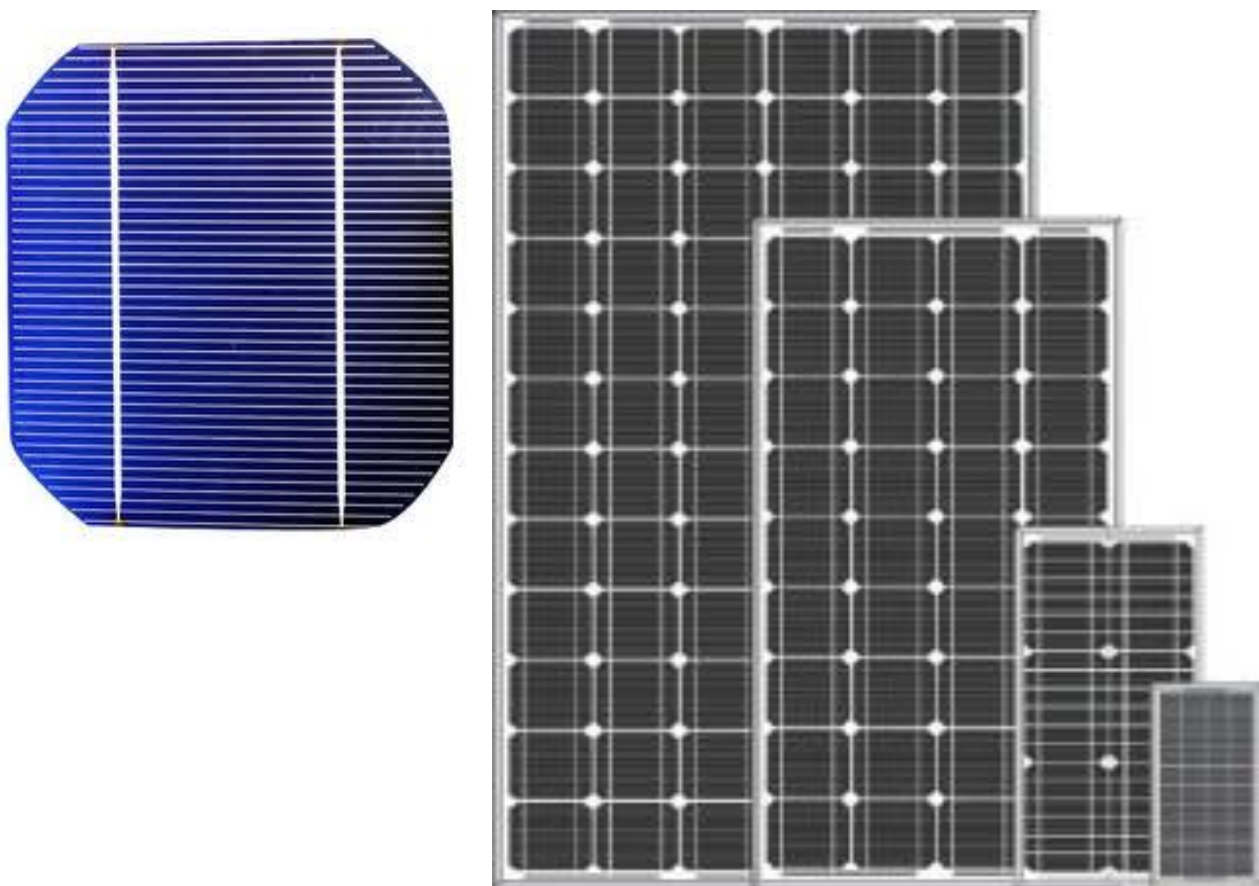
- Κυψέλες μονοκρυσταλλικού πυριτίου
- Κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου
- Τεχνολογία λεπτού υμένα (Thin film)

3.5.2 Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μια ομοιόμορφη μοριακή δομή. Συγκεκριμένο με υλικά που δεν είναι σε μορφή κρυστάλλου, η υψηλή του ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης.

Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο πυριτίου. Τα κελιά αυτά κατασκευάζονται με μία διαδικασία

γνωστή ως διαδικασία «Czochralski». Χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση, της τάξης του 15-18% αλλά και υψηλότερο κόστος. Τα ηλιακά κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου, ή σχεδόν κύκλου καθώς και τετράγωνα. Τα κυκλικά ηλιακά κελιά είναι φθηνότερα από τα υπόλοιπα επειδή είναι λιγότερα τα υπολείμματα κατά την κατασκευή τους. Ωστόσο δεν χρησιμοποιούνται συχνά στην κατασκευή φωτοβολταϊκών πάνελ επειδή δεν χρησιμοποιείται αποδοτικά μία επιφάνεια, λόγω των κενών μεταξύ τους όταν τοποθετούνται δίπλα το ένα στο άλλο. Αποτελούν όμως μία καλή προοπτική για ενσωμάτωση σε κτίρια όταν απαιτείται μερική διαπερατότητα στο φως. Το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο όταν διαθέτουν αντί-ανακλαστική επίστρωση ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).

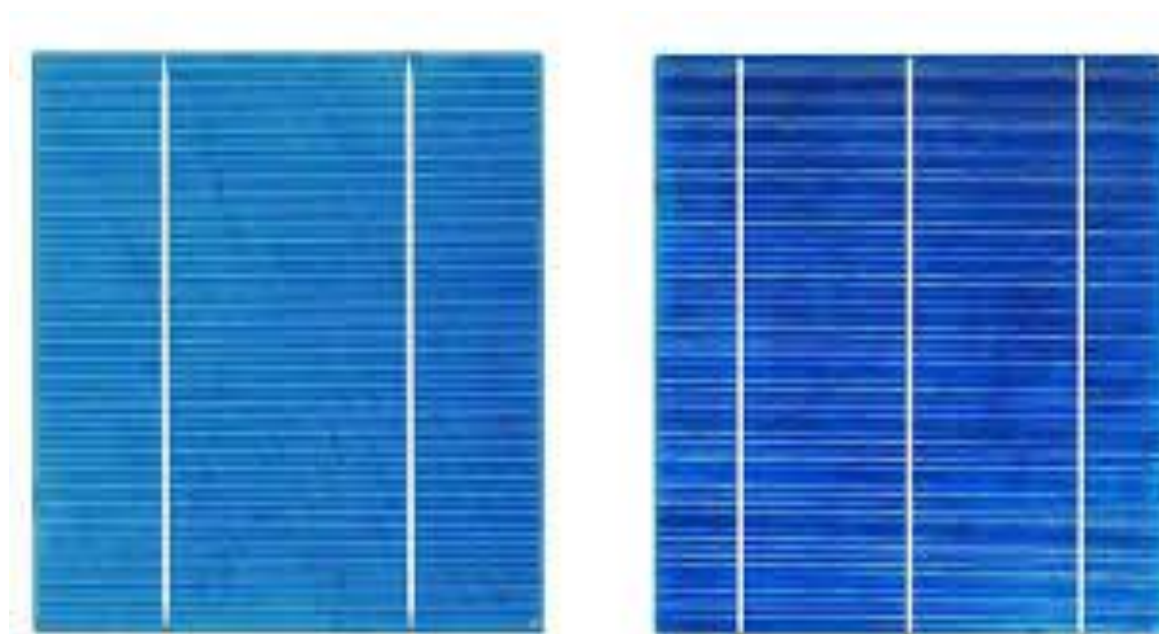


Εικόνα 3.9 - Μορφές μονοκρυσταλλικών κελιών πυριτίου.

3.5.3 Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτελείται από περιοχές μονοκρυσταλλίου πυριτίου, αλλά δεν έχει την ομοιόμορφη κρυσταλλική δομή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τα στοιχεία που αποτελούνται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο.

Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι φθηνότερα από αυτά του μονοκρυσταλλικού πυριτίου αλλά και λιγότερο αποδοτικά. Όπως προκύπτει και από τον όρο, κατασκευάζονται από δίσκους πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής ενός πολυκρυσταλλικού κελιού απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Η απόδοση τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα. Το χρώμα τους είναι συνήθως μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι – ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση).



Εικόνα 3.10 - Μορφές πολυκρυσταλλικών κελιών πυριτίου.

3.5.4 Τεχνολογία λεπτού υμενίου

Οι κυψέλες λεπτής επίστρωσης κατασκευάζονται με εναπόθεση εξαιρετικά λεπτών στρωμάτων από φωτοευπαθή υλικά σε υποστρώματα άλλου υλικού όπως το γυαλί, ο ανοξείδωτος χάλυβας ή το πλαστικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος παραγωγής εν συγκρίσει με την τεχνολογία κρυστάλλων. Το οικονομικό αυτό πλεονέκτημα ισοσταθμίζεται ωστόσο για την ώρα, με τον ουσιαστικά χαμηλότερο συντελεστή απόδοσης και τη λιγότερη εμπειρία ως προς την προσδοκόμενη διάρκεια ζωής των κυψελών αυτής της τεχνολογίας.

Τρία είδη κυψελών λεπτής επίστρωσης είναι εμπορικά διαθέσιμα αυτή τη στιγμή. Αυτά είναι κατασκευασμένα από άμορφο πυρίτιο (a-Si), δισηληνοϊνδιούχο χαλκό (CIS, CIGS) και τελλουριούχο κάδμιο (CdTe). Όλα έχουν ενεργά στρώματα σε περιοχές πάχους λεπτότερες από μερικά μικρά. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει

μεγαλύτερη αυτοματοποίηση αφού ενισχύει μια καθορισμένη παραγωγή κατ' όγκο, τη στιγμή που όλοι χρησιμοποιούν μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη δομή της κυψέλης. Αυτό είναι λιγότερο ενεργοβόρο και λιγότερο χρονοβόρο από τη συναρμολόγηση των κρυσταλλικών κυττάρων.

Ανάμεσα σε αυτές τις τρεις εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες λεπτής επίστρωσης, το άμορφο πυρίτιο είναι το πιο σημαντικό ως προς τον τρόπο παραγωγής και εγκατάστασης. Η πολυκρυσταλλική λεπτή επίστρωση σε γυαλί (CSG) είναι μια υποσχόμενη τεχνολογία λεπτής επίστρωσης αλλά βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης και δεν είναι εμπορικά διαθέσιμη. Η μικροκρυσταλλική τεχνολογία, και συγκεκριμένα ο συνδυασμός άμορφου πυριτίου και μικροκρυσταλλικού πυριτίου (a-Si/μ-Si) είναι μία άλλη προσέγγιση με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το παγκόσμιο ρεκόρ απόδοσης για τα κύτταρα με αυτή την τεχνολογία είναι σήμερα στο 14.7%, τη στιγμή που ορισμένες κυψέλες είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμες με απόδοση που κυμαίνεται σταθερά στο 10%. Ανάμεσα στις τρεις αυτές εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες λεπτής επίστρωσης, το τελλουριούχο κάδμιο έχει τη μεγαλύτερη προοπτική ως προς την παραγωγή και εγκατάσταση.

3.5.4.1 Κελιά άμορφου πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο χρησιμοποιείται για την παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων σύμφωνα με την τεχνολογία λεπτού φιλμ. Ως υλικό εμφανίζει μεγάλη αταξία στη δομή του, παρά ταύτα βρίσκει εφαρμογή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία με τη μορφή κράματος με υδρογόνο. Η προσθήκη υδρογόνου βελτιώνει τις ηλεκτρικές ιδιότητές του και περιέχεται σε 10-40% ατομική αναλογία. Διαφέρει ουσιαστικά από το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καθώς εμφανίζει ενεργειακό διάκενο με μεταβλητή τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 1,12eV και 1,7eV περίπου. Το κύριο πλεονέκτημα του είναι ότι έχει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και μάλιστα περίπου 40 φορές υψηλότερη από αυτή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ως προς αυτή την ιδιότητά του το a-Si συμπεριφέρεται σχεδόν σαν ημιαγωγός άμεσου ενεργειακού διακένου, για αυτό μια λεπτή επίστρωση είναι αρκετή για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων. Επιπλέον το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε ποικίλα, χαμηλού κόστους υποστρώματα, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα, του γυαλιού και του πλαστικού. Η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Έτσι το συνολικό κόστος του υλικού και του κόστους κατασκευής είναι χαμηλότερο ανά μονάδα επιφάνειας, συγκρινόμενο με τα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου.

Δύο είναι τα κυριότερα μειονεκτήματά του.

- Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που κυμαίνεται μεταξύ 6-9% για στοιχεία του εμπορίου και φτάνει το 13% για στοιχεία που έχουν φτιαχτεί στο εργαστήριο.
- Η βαθμιαία μείωση του βαθμού απόδοσης.

Τα κελιά άμορφου πυριτίου αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης. Το άμορφο πυρίτιο, η μη-κρυσταλλική μορφή του πυριτίου, μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα αγωγίμο υπόστρωμα σε ένα στρώμα πάχους μερικών μικρομέτρων δημιουργώντας ένα κελί τεχνολογίας λεπτού υμενίου. Η διαδικασία τοποθέτησης επιτρέπει στο άμορφο πυρίτιο να έχει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Επιπλέον, τα κελιά άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ.



Εικόνα 3.11 - Φωτοβολταϊκά πάνελ από άμορφο πυρίτιο.

3.5.4.2 Κελιά καδμίου-τελλουρίου (CdTe)

Η κρυσταλλική ένωση καδμίου – τελλουρίου είναι ένα αποτελεσματικό υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών κελιών. Για τη δημιουργία μίας ένωσης p-n σε ένα ηλιακό κελί, ένα στρώμα σουλφιδίου του καδμίου προστίθεται στο CdTe. Λόγω της αποτελεσματικότητας ένα κελί CdTe χρησιμοποιεί περίπου το 1% του ημιαγωγού υλικού σε σχέση με ένα κρυσταλλικό κελί. Μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλουρίου. Επιπλέον, η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το πέρας της ζωής τους.

3.5.4.3 Κελιά χαλκού – Ινδίου / Γαλλίου – Δισεληνιούχου

Αποτελεί μία από τις περισσότερο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού – ινδίου – δισεληνιούχου και χαλκού – γαλλίου – δισεληνιούχου. Τα κελιά αυτά έχουν επιδείξει αποδόσεις της τάξης του 19,9%, που αποτελεί την υψηλότερη για κελιά λεπτού υμενίου.

3.5.4.4 Άλλοι τύποι κελιών

Εκτός των παραπάνω συναντά κανείς και τους παρακάτω τύπους κελιών σε μικρό βαθμό ή σε εργαστηριακό επίπεδο:

- **Κελιά Γαλλίου – Αρσενικούχου (GaAs)**

Αποτελούν κελιά υψηλής απόδοσης, ωστόσο είναι ιδιαίτερα ακριβά.

- **Οργανικά / πολυμερή κελιά**

Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά κελιά λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά κελιά χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης – κλίμακας, χαμηλής – θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών κελιών σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι σήμερα της τάξης του 5-6%, ωστόσο η αύξηση της πρόκειται να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής ηλιακών κελιών.

3.6 Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών κυψελών

- Οι κυψέλες μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι αυτή την στιγμή οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι φωτοβολταϊκών και επίσης, τα σημαντικότερα στοιχεία στα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Οι γραμμές παραγωγής των μονο/πολυκρυσταλλικών κυψελών είναι πλήρως αυτοματοποιημένες. Γίνεται αυτόματος καθαρισμός και ενισχυμένη με πλάσμα χημική εναπόθεση ατμών, επιμεταλλοποίηση αυτόματης εκτύπωσης, θερμοσυσσωμάτωση μετάλλου και αυτόματη ανάλυση.

- Μέσα από προηγμένες διαδικασίες, όπως η παραγωγή άριστης ποιότητας matte, P-N junction diffusion, η θερμοσυσσώματωση με ηλεκτρόδια, η πλαστικοποιημένη συσκευασία κλπ, εξοπλίζουν τις φωτοβολταϊκές μας κυψέλες με τα χαρακτηριστικά της υψηλής απόδοσης φωτοηλεκτρικής μετατροπής, της μεγάλης διάρκειας ζωής, της σταθερότητας και αξιόπιστης λειτουργίας κλπ, επιτρέποντας τις μονο/πολυκρυσταλλικές κυψέλες να επιτυγχάνουν σημαντική απόδοση μετατροπής του φωτός σε ρεύμα.
- Με την κατάτμηση των υφιστάμενων φωτοβολταϊκών κυψελών, μπορούμε να πάρουμε τα προϊόντα σε διαφορετικά μεγέθη ώστε να εφαρμόζονται σε διαφορετικούς τομείς και να καλύπτουν ποικίλες ανάγκες.

3.7 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

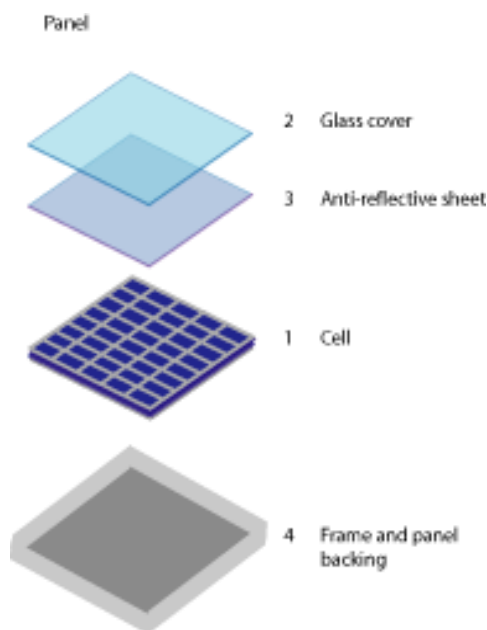
Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από έναν αριθμό ηλιακών κυψελών. Για να γίνει εφικτή η λειτουργία του πλαισίου, είναι σημαντικό να προστατεύονται οι ηλιακές κυψέλες από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι ηλιακές κυψέλες είναι πολύ λεπτές και άρα επιρρεπείς σε μηχανικές βλάβες. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών πλαισίων και η δομή τους συχνά είναι διαφορετική για τα διάφορα είδη ηλιακών κυψελών ή για τις ποικίλες εφαρμογές τους.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από διάφορα στρώματα, τα οποία είναι:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο υλικό για την ενθυλάκωση των κυψελών
- Ηλιακές κυψέλες
- Συμπυκνωμένο υλικό
- Ειδικό γυαλί
- Κενό αέρος
- Ειδικό γυαλί

Οι ηλιακές κυψέλες περικλείονται συνήθως από δύο κομμάτια γυαλιού ή ένα φύλλο γυαλιού και ένα πλαστικού, ενώ μερικές φορές εξ ολοκλήρου από πλαστικό. Τα είδη των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι διαφανή, χρωματισμένα και αντανακλούν

την θερμότητα. Το συμπυκνωμένο υλικό, είναι υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση και μεγάλη διαπερατότητα στο φως.



Εικόνα 3.12 - Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Οι ηλιακές κυψέλες συνδέονται σε σειρά, παράλληλα ή και συνδυασμένες προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες σε τάση και σε ρεύμα. Επίσης, οι ηλιακές κυψέλες πρέπει να είναι όμοιες, για να εμφανίζουν όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται επάνω σε περιστρεφόμενα στηρίγματα που ακολουθούν την τροχιά του ήλιου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας.

3.8 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που έχει σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή λειτουργεί ως σταθμός παραγωγής, μπορεί να χρησιμοποιηθούν πολλά φωτοβολταϊκά πλαίσια. Όπως είναι αναμενόμενο τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να ομαδοποιηθούν και να συνδεθούν κατάλληλα. Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι σκόπιμο οι συνδέσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων μέσα στα πλαίσια, αλλά και ανάμεσα στα πλαίσια να μην είναι μόνο στη σειρά αλλά και παράλληλες. Με αυτόν τον τρόπο, αν ένα

φωτοβολταϊκό στοιχείο σκιαστεί ή αν πάθει βλάβη δεν θα μηδενιστεί η ισχύς που παράγει το σύστημα.

Έτσι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ομαδοποιούνται σε φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τοποθετούνται σε κοινή βάση στήριξης, η οποία είναι συνήθως μεταλλική. Η σύνδεση των πλαισίων στη σειρά ή παράλληλα γίνεται έτσι ώστε η τάση εξόδου της γεννήτριας να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή.

3.8.1 Σταθερές συστοιχίες

Ο απλούστερος τύπος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι ο σταθερός, ο οποίος έχει το πλεονέκτημα των ακίνητων τμημάτων και το μειονέκτημα ότι δεν εκμεταλλεύεται με τον μέγιστο βαθμό την ηλιακή ακτινοβολία. Τα πλαίσια τοποθετούνται με νότιο προσανατολισμό, για το Βόρειο ημισφαίριο, και έχουν μια κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο κατάλληλη ώστε να μεγιστοποιείται η πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα με το χρονικό διάστημα που είναι επιθυμητό. Το ελαφρό τους βάρος και η απλότητά τους, τις καθιστά χρήσιμες για μια πληθώρα εφαρμογών. Ωστόσο, αν δεν είναι αρκετή η ενέργεια που παράγεται και δεν υπάρχει επιπλέον διαθέσιμος χώρος, αναγκαστικά πρέπει να καταφύγει κάποιος σε άλλη εναλλακτική.



Εικόνα 3.13 - Σταθερή συστοιχία.

3.8.2 Στρεφόμενες συστοιχίες

Για να βελτιωθεί η απόδοση συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες με κινητά πλαίσια, τα οποία θα παρακολουθούν την κίνηση του ηλίου. Για να μεγιστοποιηθεί η προσλαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία απαιτείται η κίνηση των συστοιχιών τόσο στον οριζόντιο άξονα, άξονας ανύψωσης, όσο και στον πολικό άξονα, αζιμούθιος άξονας. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν κινούνται σε έναν άξονα ή δύο άξονες.

1. Στρεφόμενες συστοιχίες ενός άξονα

Στις στρεφόμενες συστοιχίες ενός άξονα, ως άξονας κίνησής του μπορεί να επιλεγεί είτε ο οριζόντιος είτε ο πολικός. Ο πολικός άξονας πλεονεκτεί όσον αφορά την συγκομιδή ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας έναντι του οριζόντιου άξονα, κάνει όμως την εγκατάσταση πιο περίπλοκη μηχανικά.



Εικόνα 3.14 - Στρεφόμενη συστοιχία ενός άξονα.

2. Στρεφόμενες συστοιχίες δύο αξόνων

Αποτελούν την πλειοψηφία των στρεφόμενων συστοιχιών και επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας. Η καθοδήγηση των μηχανισμών γίνεται με την βοήθεια θερμοϋδραυλικών διατάξεων, μικροϋπολογιστών για την

πρόβλεψη της θέσης του ήλιου και ηλιακών αισθητήρων, όπως φωτοαντιστάσεις και φωτοτρανζίστορ.



Εικόνα 3.15 - Στρεφόμενη συστοιχία δύο αξόνων.

3.8.3 Συστοιχίες με ανακλαστήρες / κάτοπτρα

Ένας άλλος σχεδιασμός που βοηθά στην αύξηση της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος επιτυγχάνεται με την χρήση ανακλαστήρων / κατόπτρων. Κατασκευάζονται σε διάφορες μορφές, κοίλα, παραβολικά, ελλειπτικά, τριγωνικά, κωνικά, κ.α., και σκοπός τους είναι να ενισχύουν και να εστιάζουν το ποσό του ηλιακού φωτός προς τα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

3.8.4 Στρεφόμενες συστοιχίες με κάτοπτρα

Μπορεί να χρησιμοποιηθούν στρεφόμενες συστοιχίες ταυτόχρονα με κάτοπτρα για ακόμη μεγαλύτερη πρόσληψη ηλιακής ακτινοβολίας. Η παρακολούθηση του ήλιου επιτυγχάνεται είτε περιστρέφοντας την συστοιχία προς την κατεύθυνση των ηλιακών ακτίνων, είτε ανακλώντας τις ακτίνες με την χρήση περιστροφικών κατόπτρων προς το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν κινητά μέλη, ωστόσο το πλεονέκτημα της χρήσης κινητών κατόπτρων, αντί των κινητών συστοιχιών, είναι ότι η καταπόνηση, την οποία δέχεται η συστοιχία, αποφεύγεται. Επιπλέον οι ανακλαστήρες θα πρέπει να περιστρέφονται κατά το ήμισυ από ότι οι συστοιχίες, αφού το φαινόμενο της ανάκλασης διπλασιάζει την κίνηση του κατόπτρου.

3.9 Επίδραση σκίασης

Ένας σημαντικός παράγοντας, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα την μηδενική παραγωγή ρεύματος από της ηλιακές κυψέλες, είναι η σκίαση.

Η επίδραση της σκίασης, της έλλειψης δηλαδή ηλιακού φωτός, ανάγεται στην μερική ή ολική απώλεια δημιουργίας φωτορεύματος. Η σκίαση δημιουργείται συνήθως από την παρουσία φυσικών εμποδίων ή από παροδικά φαινόμενα.

Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ότι έχουμε τρεις ηλιακές κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Αν ένα κελί σκιάζεται πλήρως τότε η παραγωγή ρεύματος από αυτό θα είναι μηδενική και κατά συνέπεια θα συμπεριφέρεται ως ανοικτό κύκλωμα, μηδενίζοντας την συνολική παραγωγή ενέργειας.

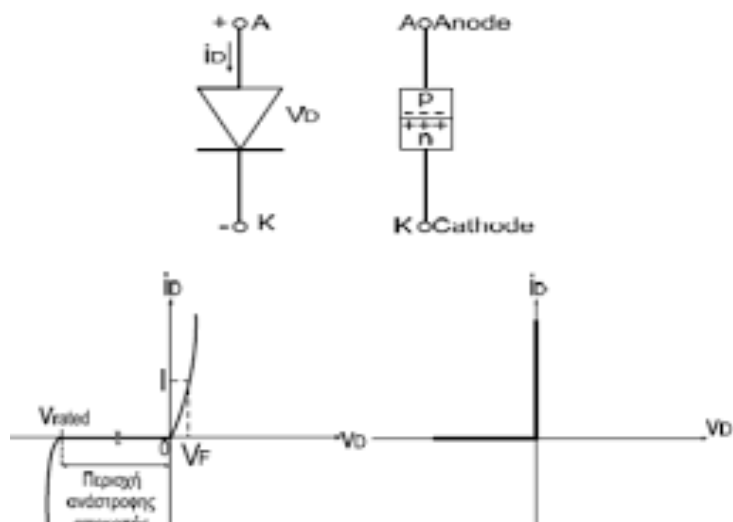
4 Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος

4.1 Εισαγωγή

Η δυνατότητα διαχείρισης αυξημένων ποσοτήτων ισχύος, η ευκολία ελέγχου και το μειωμένο κόστος των σύγχρονων ημιαγωγών ισχύος, συγκριτικά με εκείνους του παρελθόντος, έχουν καταστήσει τους μετατροπείς ισχύος οικονομικά εφικτούς, για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών και έχουν εγκαινιάσει ένα πλήθος από νέες τοπολογίες μετατροπέων. Για τη σαφή κατανόηση της πραγματοποιησιμότητας αυτών των νέων τοπολογιών και εφαρμογών, είναι σημαντικό να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων ημιαγωγών ισχύος. Για να γίνει αυτό, παρακάτω δίνεται μια σύντομη καταγραφή των χαρακτηριστικών τους και των δυνατοτήτων τάσης, ρεύματος και ταχύτητας μετάβασης των διαθέσιμων ημιαγωγών ισχύος.

Αν οι ημιαγωγοί ισχύος μπορούν να θεωρηθούν ιδανικοί διακόπτες, η ανάλυση των τοπολογιών των μετατροπέων γίνεται πολύ πιο εύκολη. Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι οι λεπτομέρειες της λειτουργίας του ημιαγωγικού στοιχείου δεν επισκιάζουν τη βασική λειτουργία του κυκλώματος. Έτσι, μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα βασικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων ισχύος. Η καταγραφή των χαρακτηριστικών καμπυλών των ημιαγωγών ισχύος θα μας δώσει τη δυνατότητα να εκτιμήσουμε το κατά πόσο μπορούν αυτοί να θεωρηθούν ιδανικά στοιχεία.

4.2 Δίοδοι



Εικόνα 4.16 - Δίοδος: σύμβολο, i - v χαρακτηριστική, ιδανική χαρακτηριστική.

Οι καταστάσεις αγωγιμότητας (κλειστό, on) και αποκοπής (ανοιχτό, off) ελέγχονται από το κύκλωμα ισχύος.

Στην εικόνα 4.16 δίνονται το κυκλωματικό σύμβολο της διόδου και η στατική i - v χαρακτηριστική της αντίστοιχα. Όταν η διάοδος είναι ορθά πολωμένη, αρχίζει να άγει (κλείνει) με μια μικρή πτώση τάση στα άκρα της, της τάξης του 1V. Όταν η διάοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, και μέχρι η τάση στα άκρα της να γίνει ίση με την ανάστροφη τάση διάσπασης, διαρρέεται μόνο από ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής. Κατά την κανονική λειτουργία της διόδου, η ανάστροφη τάση πόλωσης δεν θα πρέπει να φτάνει την ονομαστική τιμή της τάσης διάσπασης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πολύ μικρά ρεύματα διαρροής στην κατάσταση αποκοπής (ανάστροφη πόλωση) και τη μικρή πτώση τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας (ορθή πόλωση) σε σύγκριση με τις τάσεις και τα ρεύματα λειτουργίας του κυκλώματος στο οποίο χρησιμοποιείται η διάοδος, η i - v χαρακτηριστική της διόδου μπορεί να εξιδανικευτεί, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.16. Η ιδανική αυτή χαρακτηριστική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της τοπολογίας του μετατροπέα, αλλά δεν θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίασή του στην πράξη, για παράδειγμα, κατά τον υπολογισμό των απαιτήσεων απαγωγής θερμότητας για τη διάταξη.

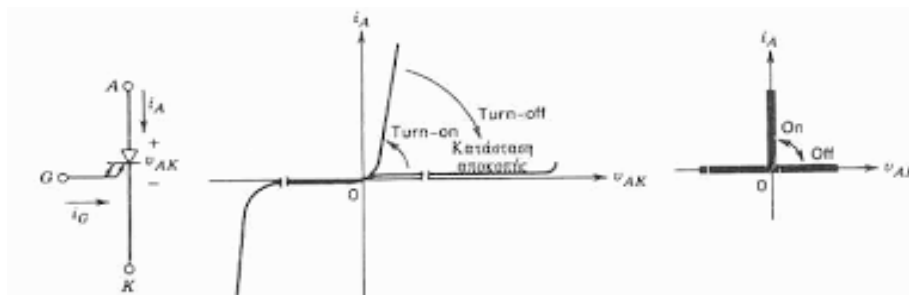
Κατά το κλείσιμο, η διάοδος μπορεί να θεωρηθεί ιδανικός διακόπτης, επειδή μεταβαίνει γρήγορα σε σύγκριση με τα μεταβατικά φαινόμενα που εμφανίζονται στο κύκλωμα ισχύος. Κατά το άνοιγμα όμως, το ρεύμα της διόδου αναστρέφεται για

κάποιο χρονικό διάστημα, πριν μηδενιστεί. Το χρονικό διάστημα αυτό ονομάζεται χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης (reverse recovery time) t_{rr} . Αυτό το αρνητικό ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης απαιτείται για να εξαλείψει την περίσσεια φορέων στη δίοδο και να της επιτρέψει την αποκοπή. Σε επαγωγικά κυκλώματα, το ρεύμα ανάστροφης αποκατάστασης μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάσεις. Στα περισσότερα κυκλώματα, αυτό το ανάστροφο ρεύμα δεν επηρεάζει τη χαρακτηριστική εισόδου/εξόδου του μετατροπέα και έτσι η δίοδος μπορεί και πάλι να θεωρηθεί ιδανική κατά τη μετάβαση στην κατάσταση αγωγιμότητας.

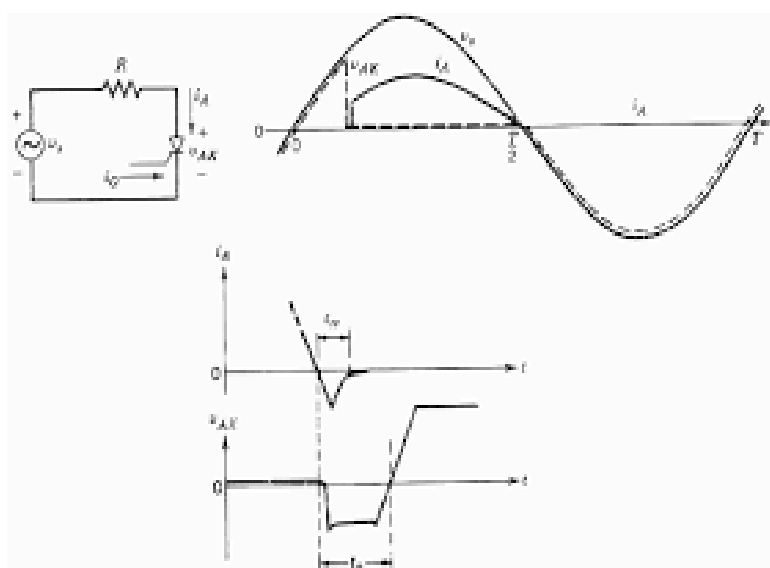
Τα είδη των διόδων είναι:

- 1) Δίοδοι Schottky. Οι δίοδοι αυτές χρησιμοποιούνται εκεί όπου απαιτείται μικρή ορθή πτώση τάσης, δηλαδή σε κυκλώματα με πολύ μικρή τάση εξόδου. Αυτές οι δίοδοι έχουν περιορισμένες τάσεις διάσπασης μέχρι 50-100V.
- 2) Δίοδοι ταχείας αποκατάστασης. Αυτές σχεδιάζονται για χρήση σε κυκλώματα υψηλής συχνότητας σε συνδυασμό με ελεγχόμενους διακόπτες, όπου απαιτείται μικρός χρόνος ανάστροφης αποκατάστασης. Στα επίπεδα ισχύος αρκετών εκατοντάδων volt και αρκετών εκατοντάδων amperes, τέτοιες δίοδοι έχουν ονομαστικούς χρόνους t_{rr} μικρότερους από μερικά μsec .
- 3) Δίοδοι συχνότητας δικτύου. Η τάση (πτώση τάσης) αγωγιμότητας αυτών των διόδων σχεδιάζεται, ώστε να είναι η μικρότερη δυνατή και κατά συνέπεια έχουν μεγαλύτερους χρόνους t_{rr} , που είναι αποδεκτοί μόνο για εφαρμογές στη συχνότητα του δικτύου. Οι δίοδοι αυτές διατίθενται με ονομαστικές τάσεις διάσπασης αρκετών kV και ονομαστικά ρεύματα αρκετών kA. Επιπλέον, μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή και παράλληλα, για να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε απαίτηση τάσης και ρεύματος.

4.3 Thyristors



Εικόνα 4.17 - Thyristor: σύμβολο, i - v χαρακτηριστική, ιδανικές χαρακτηριστικές.



Εικόνα 4.18 - Thyristor: κύκλωμα, κυματομορφές, χρόνος σβέσης t_q

Κλείνουν από ένα σήμα ελέγχου, αλλά πρέπει να ανοίξουν από το κύκλωμα ισχύος.

Το κυκλωματικό σύμβολο του thyristor και η i - v χαρακτηριστική του δίνονται στην εικόνα 4.17. Το κύριο ρεύμα ρέει από την άνοδο (A) προς την κάθοδο (K). Στην κατάσταση αποκοπής, το thyristor μπορεί να αποκοπεί μια ορθή τάση και να μην άγει, όπως φαίνεται από το τμήμα αποκοπής της i - v χαρακτηριστικής της εικόνας 4.17.

Το thyristor μπορεί να κλείσει με την εφαρμογή ενός σύντομου θετικού παλμού ρεύματος στην πύλη, με την προϋπόθεση ότι είναι σε κατάσταση ορθής αποκοπής (ορθά πολωμένο). Η σχέση ρεύματος-τάσης που προκύπτει φαίνεται στο τμήμα αγωγιμότητας της i - v χαρακτηριστικής της εικόνας 4.17. Η ορθή πτώση τάσης στο

thyristor, όταν αυτό είναι κλειστό, είναι μόνο μερικά volt (τυπικά 1 ως 3 V ανάλογα με την ονομαστική τιμή της τάσης διάσπασης του στοιχείου).

Εφόσον το thyristor κλείσει, παραμένει κλειστό και το ρεύμα της πύλης μπορεί να πάψει να εφαρμόζεται. Το thyristor δεν μπορεί να ανοίξει από την πύλη και άγει όπως η διάοδος. Το thyristor ανοίγει και το ρεύμα του μηδενίζεται μόνο όταν το ρεύμα ανόδου τείνει να γίνει αρνητικό, υπό την επίδραση του κυκλώματος μέσα στο οποίο βρίσκεται. Αυτό επιτρέπει στην πύλη να ανακτήσει τον έλεγχο, για να κλείσει και πάλι το thyristor σε κάποια ελεγχόμενη χρονική στιγμή, εφόσον αυτό επανέλθει σε κατάσταση ορθής αποκοπής.

Σε ανάστροφη πόλωση και τάσεις κάτω από την ανάστροφη τάση διάσπασης, μόνο ένα ασήμαντα μικρό ρεύμα διαρροής περνάει από το thyristor, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.17. Συνήθως οι προδιαγραφές τάσης του thyristor για τις ορθές και ανάστροφες τάσεις αποκοπής είναι οι ίδιες. Οι προδιαγραφές ρεύματος του thyristor δίνονται με τη μέγιστη ενεργό (rms) και τη μέση τιμή των ρευμάτων που μπορεί να άγει.

Κατά την ανάλυση των τοπολογιών των μετατροπέων, χρησιμοποιώντας τα ίδια επιχειρήματα όπως και στις διόδους, το thyristor μπορεί να παρασταθεί με τις ιδανικές χαρακτηριστικές που δίνονται στην εικόνα 4.17.

Σε μια εφαρμογή, όπως είναι το απλό κύκλωμα της εικόνας 4.18, έλεγχος της χρονικής στιγμής έναρξης της αγωγής ρεύματος μπορεί να ασκηθεί μόνο κατά τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου της τάσης της πηγής. Τη στιγμή που το ρεύμα του thyristor τείνει να αναστραφεί, δηλαδή όταν η τάση της πηγής γίνεται αρνητική, το ρεύμα του ιδανικού thyristor θα μηδενιζόταν αμέσως μετά τη χρονική στιγμή $t=T/2$, όπως φαίνεται στην κυματομορφή της εικόνας 4.18.

Όμως, όπως προδιαγράφεται στα φυλλάδια των κατασκευαστών (data sheets) των thyristor και παρίσταται με την κυματομορφή της εικόνας 4.18, το ρεύμα του thyristor αναστρέφεται πριν μηδενιστεί. Εδώ, η σημαντική παράμετρος δεν είναι ο χρόνος t_{tr} που χρειάζεται το ρεύμα για να μηδενιστεί οριστικά από τις αρνητικές του τιμές, αλλά μάλλον το χρονικό διάστημα σβάσης (turn-off time interval) t_q , που ορίζεται στην εικόνα 4.18 από το μηδενισμό του ρεύματος μέχρι το μηδενισμό της τάσης στα άκρα του thyristor. Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος t_q , πρέπει να διατηρείται μια ανάστροφη τάση στα άκρα του thyristor και μόνο μετά από χρόνο

t_q μπορεί το thyristor να θεωρηθεί ανοιχτό, δηλαδή μπορεί να αποκόψει μια ορθή τάση χωρίς να τεθεί σε κατάσταση αγωγιμότητας. Αν εφαρμοστεί μια ορθή τάση στο thyristor πριν περάσει αυτό το χρονικό διάστημα, τότε αυτό μπορεί να κλείσει πρόωρα και μπορεί να προκληθεί βλάβη σ' αυτό ή και στο κύκλωμα. Στα φυλλάδια των thyristor ο χρόνος t_q προδιαγράφεται για μια καθορισμένη ανάστροφη τάση που εφαρμόζεται για όλο αυτό το χρονικό διάστημα, καθώς επίσης, και για έναν καθορισμένο ρυθμό ανόδου της τάσης μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος. Αυτό το χρονικό διάστημα t_q ονομάζεται μερικές φορές και ελάχιστος χρόνος επανέντασης (circuit-commutated-recovery time) του thyristor.

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των εφαρμογών, διατίθενται διάφορα είδη thyristors. Εκτός από τις προδιαγραφές της τάσης και του ρεύματος, το χρόνο σβέσης t_q και την ορθή πτώση τάσης, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψιν, όπως ο ρυθμός ανόδου του ρεύματος (di/dt) κατά την έναυση και ο ρυθμός ανόδου της τάσης (dv/dt) κατά τη σβέση.

- 1) Thyristor για έλεγχο φάσης (phase-control thyristors). Μερικές φορές ονομάζονται thyristors-μετατροπείς και χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανόρθωση τάσεων και ρευμάτων με συχνότητα αυτήν του δικτύου. Βρίσκουν εφαρμογές στους ελεγχόμενους από φάση ανορθωτές για dc και ac κινητήρια συστήματα και στα δίκτυα μεταφοράς ισχύος υπό υψηλή dc τάση. Οι κύριες απαιτήσεις από αυτά είναι η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων τάσεων και ρευμάτων και η χαμηλή πτώση τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας. Αυτό το είδος των thyristor έχει παραχθεί με διαμέτρους υποστρώματος (wafer) μέχρι 10cm, όπου το μέσο ρεύμα είναι περίπου 4000A για τάσεις αποκοπής των 5-7 kV. Οι ορθές πτώσεις τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας κυμαίνονται από 1,5V για τα στοιχεία των 1000V μέχρι 3V για τα στοιχεία των 5-7kV.
- 2) Thyristor αντιστροφέων (inverter-grade thyristor). Αυτά σχεδιάζονται ώστε να έχουν μικρούς χρόνους σβέσης t_q και χαμηλές ορθές πτώσεις τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας, αν και αυτές είναι υψηλότερες στα thyristor με μικρότερες τιμές του t_q . Τα στοιχεία αυτά διατίθενται με προδιαγραφές τάσης και ρεύματος μέχρι 2500V και 1500^A αντίστοιχα. Οι χρόνοι σβέσης κυμαίνονται συνήθως από μερικά μέχρι 100μsec, ανάλογα με τις

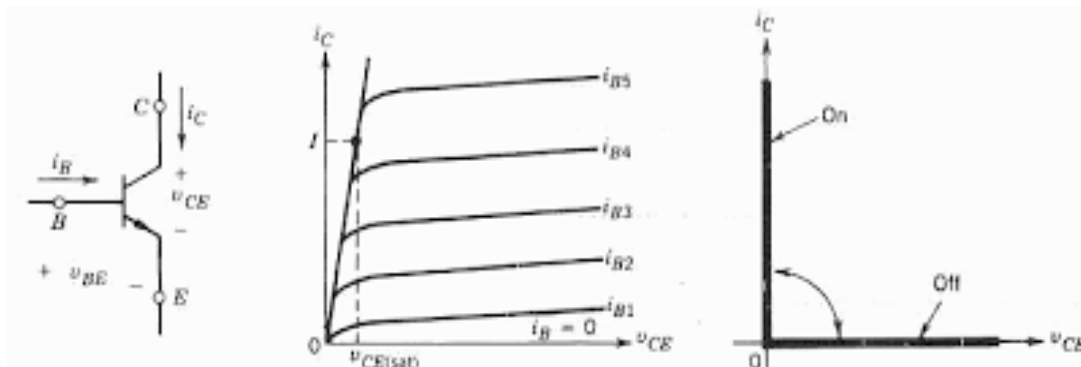
προδιαγραφές της τάσης αποκοπής και της ορθής πτώσης τάσης της κατάστασης αγωγιμότητας.

4.4 Χαρακτηριστικά των ελεγχόμενων διακοπών

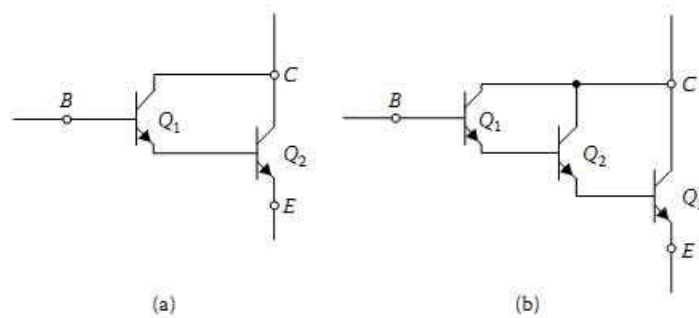
Αρκετά είδη ημιαγωγών ισχύος, όπως τα BJT, τα MOSFET, τα GTO και τα IGBT, μπορούν να κλείνουν και να ανοίγουν με σήματα ελέγχου που εφαρμόζονται στον ακροδέκτη ελέγχου του στοιχείου. Τα στοιχεία αυτά ονομάζονται ελεγχόμενοι διακόπτες. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός δεν ρέει καθόλου ρεύμα, ενώ όταν είναι κλειστός το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο κατά τη φορά του βέλους. Ο ιδανικός ελεγχόμενος διακόπτης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- 1) Όταν είναι ανοιχτός, αποκόπτει αυθαίρετα υψηλές ορθές και ανάστροφες τάσεις και δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- 2) Όταν είναι κλειστός, άγει αυθαίρετα υψηλά ρεύματα με μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του.
- 3) Όταν διεγερθεί, μεταβαίνει ακαριαία από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα.
- 4) Για να διεγερθεί ο διακόπτης, απαιτείται μηδενική ισχύς από την πηγή ελέγχου.

4.5 Διπολικά Transistor επαφής (BJT) και μονολιθικά Darlington (MD)



Εικόνα 4.19 - Διπολικό transistor επαφής (BJT): σύμβολο, i - v χαρακτηριστικές, ιδανικές χαρακτηριστικές.



Εικόνα 4.20 - Συνδεσμολογίες Darlington: Darlington, τριπλό Darlington.

Το κυκλωματικό σύμβολο του NPN διπολικού transistor επαφής και οι $i-v$ στατικές χαρακτηριστικές δίνονται στην εικόνα 4.19. Όπως φαίνεται στις $i-v$ χαρακτηριστικές, ένα επαρκώς μεγάλο ρεύμα βάσης (εξαρτώμενο από το ρεύμα του συλλέκτη) φέρνει το στοιχείο σε κατάσταση πλήρους αγωγιμότητας. Για να γίνει αυτό, απαιτείται από το κύκλωμα ελέγχου η παροχή ενός ρεύματος βάσης επαρκώς μεγάλου, ώστε να ισχύει η σχέση

$$I_B > \frac{I_C}{h_{FE}}$$

όπου h_{FE} είναι το dc κέρδος ρεύματος του στοιχείου.

Η τάση αγωγιμότητας $V_{CE(sat)}$ των transistor ισχύος είναι συνήθως της τάξης των 1-2V, έτσι ώστε οι απώλειες ισχύος αγωγιμότητας στο BJT να είναι αρκετά μικρές. Οι ιδανικές $i-v$ χαρακτηριστικές του BJT κατά τη διακοπτική του λειτουργία δίνονται στην εικόνα 4.19.

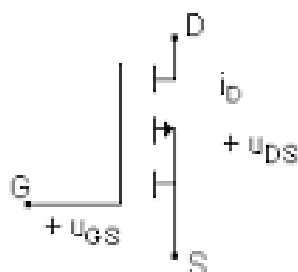
Τα BJT είναι διατάξεις ελεγχόμενες από ρεύμα και το ρεύμα της βάσης πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς για να τα κρατάει σε κατάσταση αγωγιμότητας. Το dc κέρδος ρεύματος h_{FE} των transistor υψηλής ισχύος είναι συνήθως μόνο 5-10 και έτσι τα στοιχεία αυτά συνδέονται μερικές φορές σε συνδεσμολογία Darlington ή τριπλό Darlington, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.20, ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερο κέρδος ρεύματος. Η συνδεσμολογία αυτή παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα, όπως είναι οι ελαφρά υψηλότερες τιμές της τάσης αγωγιμότητας $V_{CE(sat)}$ και οι χαμηλότερες ταχύτητες μετάβασης.

Τα BJT, είτε μεμονωμένα είτε σε μονολιθική συνδεσμολογία Darlington (σε ένα μεμονωμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα, μονολιθικό Darlington (MD)), έχουν

σημαντικό χρόνο συσσώρευσης (storage time) κατά τη μετάβαση της σβέσης. Οι τυπικοί χρόνοι μετάβασης είναι από μερικές εκατοντάδες nsec έως μερικά msec.

Τα BJT, συμπεριλαμβανομένων των μονολιθικών Darlington (MDs), διατίθενται με προδιαγραφές τάσης μέχρι 1400V και ρεύματος μερικών εκατοντάδων amperes. Παρά τον αρνητικό θερμοκρασιακό συντελεστή της αντίστασης αγωγιμότητας, τα σύγχρονα BJT που κατασκευάζονται με έλεγχο ποιότητας μπορούν να παραλληλιστούν, με την προϋπόθεση ότι αυτό λήφθηκε υπόψη κατά τη σχεδίαση του κυκλώματος και ότι παρέχεται κάποιο πρόσθετο περιθώριο ρεύματος. Με άλλα λόγια, όπου, με βάση την ισοκατανομή του ρεύματος, θεωρητικά θα αρκούσαν τέσσερα transistor παράλληλα, θα πρέπει πιθανά να χρησιμοποιηθούν πέντε, ώστε να αντέξουν μια ελαφριά ανισοκατανομή του ρεύματος.

4.6 Transistor μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (MOSFET)



Εικόνα 4.21 - Transistor MOSFET n-καναλιού: σύμβολο.

Το κυκλωματικό σύμβολο του transistor MOSFET N-καναλιού δίνεται στην εικόνα 4.21. Το ημιαγωγικό αυτό στοιχείο είναι μια διάταξη ελεγχόμενη από τάση. Η διάταξη είναι σε πλήρη αγωγιμότητα και προσεγγίζει έναν κλειστό διακόπτη, όταν η τάση πύλης-πηγής είναι επαρκώς υψηλή. Το MOSFET είναι σε κατάσταση αποκοπής, όταν η τάση πύλης-πηγής είναι χαμηλότερη από την τιμή κατωφλίου (gate-source threshold voltage) $V_{GS(th)}$.

Τα MOSFET απαιτούν τη συνεχή εφαρμογή μιας τάσης κατάλληλου μεγέθους μεταξύ της πύλης (gate) και της πηγής (source) για να βρίσκονται σε κατάσταση αγωγιμότητας. Από την πύλη δεν περνά ρεύμα, παρά μόνο κατά τις μεταβάσεις

σβέσης και έναυσης, όταν η χωρητικότητα της πύλης φορτίζεται ή εκφορτίζεται. Οι χρόνοι μετάβασης είναι πολύ μικροί, από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες nsec, ανάλογα με το είδος του στοιχείου.

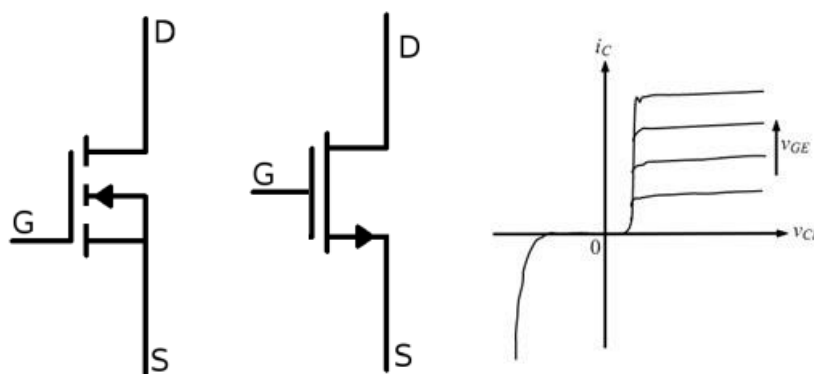
Η αντίσταση αγωγιμότητας $r_{DS(on)}$ του MOSFET μεταξύ του απαγωγού (drain) και της πηγής αυξάνεται γρήγορα με την ονομαστική τιμή της τάσης αποκοπής. Σε ανηγμένες ανά μονάδα (per unit, pu) μονάδες, η αντίσταση αγωγιμότητας μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της ονομαστικής τάσης αποκοπής BV_{DS} ως

$$r_{DS(on)} = k BV_{DSS}^{2.5-2.7}$$

όπου k είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης. Για τον λόγο αυτό στην αγορά διατίθενται μόνο MOSFET με χαμηλές ονομαστικές τάσεις, που έχουν χαμηλή αντίσταση αγωγιμότητας και κατά συνέπεια μικρές απώλειες αγωγιμότητας.

Ωστόσο, εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας μετάβασής τους, οι απώλειες μετάβασης μπορούν να είναι μικρές. Από την άποψη συνολικών απωλειών ισχύος, τα MOSFET των 300-400V συναγωνίζονται τα διπολικά transistor μόνο αν η συχνότητα μετάβασης είναι μεγαλύτερη των 30-100 kHz. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να οριστεί αυστηρά το όριο συχνότητας, επειδή εξαρτάται από τις τάσεις λειτουργίας και οι χαμηλές τάσεις ευνοούν τα MOSFET.

4.7 Διπολικά Transistor με μονωμένη πύλη (IGBT)



Εικόνα 4.22 - Διπολικό transistor με μονωμένη πύλη (IGBT): σύμβολο, i - v χαρακτηριστικές.

Το κυκλωματικό σύμβολο του διπολικού transistor με μονωμένη πύλη (insulated gate bipolar transistor, IGBT) και οι i - v χαρακτηριστικές δίνονται στην εικόνα 4.22. Τα IGBT έχουν κάποια από τα πλεονεκτήματα του MOSFET, του BJT και του GTO συνδυασμένα. Παρόμοια με το MOSFET, το IGBT έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση

πύλης και έτσι απαιτείται μια μικρή μόλις ποσότητα ενέργειας για τη μετάβασή του. Όπως το BJT, το IGBT έχει μικρή τάση αγωγιμότητας, ακόμη και σε στοιχεία με μεγάλες ονομαστικές τάσεις αποκοπής (για παράδειγμα, $V_{on} = 2-3V$ σε ένα στοιχείο των 1000V). Παρόμοια με το GTO, τα IGBT μπορούν να σχεδιαστούν για να αποκόψουν ανάστροφες τάσεις.

Τα IGBT έχουν χρόνους έναυσης και σβέσης της τάξης του 1 μsec και διατίθενται με μεγάλες ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος, όπως 1700V και 1200A, ενώ μελετούνται και με ονομαστικές τάσεις μέχρι 2-3kV.

4.8 Thyristor με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (GTO)

Το GTO thyristor ανήκει στην οικογένεια των thyristor και όπως το thyristor έτσι και το GTO μπορεί να οδηγηθεί σε αγωγή με έναν σύντομο παλμό ρεύματος στην πύλη και παραμένει σε αγωγή χωρίς να απαιτείται πλέον ρεύμα στην πύλη. Ωστόσο αντίθετα με το thyristor, το GTO μπορεί να οδηγηθεί σε αποκοπή με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης μεταξύ της πύλης και της καθόδου και έτσι να προκαλέσει την ροή ενός αρκετά μεγάλου αρνητικού ρεύματος στην πύλη. Τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος των GTO βρίσκονται μεταξύ αυτών των thyristor και αυτών των transistor. Δηλαδή μπορούν να χειριστούν ισχύ μεγαλύτερη από αυτή των transistor αλλά μικρότερη από αυτή των thyristor ενώ η ταχύτητα λειτουργίας τους είναι μεγαλύτερη από των thyristor, αλλά μικρότερη από των transistor.

4.9 Ελεγχόμενα MOS Thyristor (MCT)

Το MCT είναι ο συνδυασμός ενός GTO με δύο MOSFET. Το πρώτο MOSFET χρησιμοποιείται για την έναυση του GTO και το δεύτερο για τη σβέση του. Τα δύο λίγο διαφορετικά σύμβολα για το MCT δηλώνουν το αν το στοιχείο είναι P-MCT ή N-MCT. Η διαφορά μεταξύ τους προκύπτει από τις διαφορετικές θέσεις των ακροδεκτών ελέγχου. Έχει πολλές από τις ιδιότητες του GTO, ανάμεσα στις οποίες χαμηλή πτώση τάσης στην κατάσταση αγωγιμότητας σε σχετικά υψηλά ρεύματα και μια χαρακτηριστική μανδάλωση. Το MCT είναι μια διάταξη ελεγχόμενη από τάση,

όπως το MOSFET και το IGBT και απαιτείται περίπου η ίδια ενέργεια για να προκαλέσει την μετάβαση του, όπως για ένα MOSFET ή ένα IGBT.

Το MCT έχει δύο κύρια πλεονεκτήματα σε σχέση με το GTO:

- Πολύ απλούστερες απαιτήσεις διέγερσης (δεν απαιτείται μεγάλο αρνητικό ρεύμα πύλης για τη σβέση όπως στο GTO) και
- Μεγαλύτερες ταχύτητες μετάβασης.

Το μειονέκτημα του MCT είναι η μικρή ικανότητα αντοχής σε αντίστροφη τάση, αλλά θεωρείται ότι έχει μεγάλη δυνατότητα να αντικαταστήσει άλλα στοιχεία και να καλύψει μεγάλο εύρος εφαρμογών.

4.10 Σύγκριση ελεγχόμενων διακοπών

Λίγα σχόλια μπορούν να διατυπωθούν κατά τη σύγκριση αυτών των στοιχείων, επειδή πρέπει να ληφθούν υπόψη ταυτόχρονα ένα πλήθος ιδιοτήτων και γιατί τα στοιχεία αυτά εξελίσσονται ακόμη με γρήγορο ρυθμό. Μπορούν ωστόσο να γίνουν οι ποιοτικές παρατηρήσεις που δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Ημιαγωγικό Στοιχείο	Δυνατότητα Ισχύος	Ταχύτητα Μετάβασης
BJT/MD	Μέση	Μέση
MOSFET	Χαμηλή	Γρήγορη
GTO	Υψηλή	Αργή
IGBT	Μέση	Μέση
MCT	Μέση	Μέση

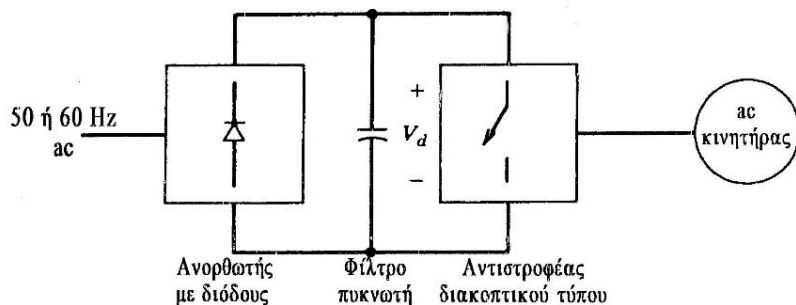
Πρέπει να σημειωθεί ότι παράλληλα με τις βελτιώσεις αυτών των ημιαγωγικών στοιχείων εξετάζονται και νέες διατάξεις. Η πρόοδος στην τεχνολογία των ημιαγωγών θα οδηγήσει αναμφισβήτητα σε υψηλότερες ονομαστικές τιμές ισχύος, μεγαλύτερες ταχύτητες μετάβασης και χαμηλότερο κόστος.

Από την άλλη, το κοινό thyristor εξαναγκασμένης μετάβασης, το οποίο είχε κάποτε διαδεδομένη χρήση σε κυκλώματα για εφαρμογές ελεγχόμενων διακοπών, δεν χρησιμοποιείται πια για τη σχεδίαση νέων μετατροπέων, με την πιθανή εξαίρεση των μετατροπέων ονομαστικής ισχύος πολλών MVA. Αυτό είναι ένα παράδειγμα σχετικό με τον τρόπο κατά τον οποίο οι εξελίξεις των ημιαγωγών ισχύος έχουν τροποποιήσει τη σχεδίαση των μετατροπέων ισχύος.

5 Αντιστροφείς DC-AC Διακοπτικού Τύπου

5.1 Εισαγωγή

Οι αντιστροφείς DC-AC διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούνται σε AC κινητήρια συστήματα και σε AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας, όπου ο αντικειμενικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς AC τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος όσο και τη συχνότητά της. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί το AC κινητήριο σύστημα, που δίνεται στην Εικόνα 5.23 με μορφή λειτουργικού διαγράμματος. Η DC τάση λαμβάνεται με ανόρθωση και εξομάλυνση της τάσης του δικτύου, συνήθως μέσω κυκλωμάτων ανορθωτών. Η τάση στους ακροδέκτες ενός AC κινητήρα είναι επιθυμητό να είναι ημιτονοειδής και ελεγχόμενη κατά πλάτος και συχνότητα. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του αντιστροφέα DC-AC διακοπτικού τύπου στην Εικόνα 5.23. Ο αντιστροφέας αυτός δέχεται DC τάση ως είσοδο και παράγει την επιθυμητή AC τάση εξόδου.

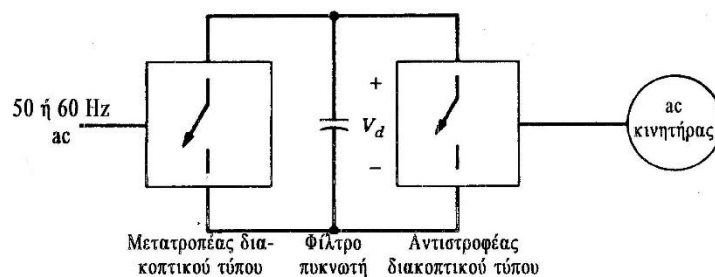


Εικόνα 5.23 - Αντιστροφέας διακοπτικού τύπου σε AC κινητήριο σύστημα

Για να είμαστε περισσότερο ακριβείς, ο αντιστροφέας διακοπτικού τύπου στην Εικόνα 5.23 είναι ένας μετατροπέας με αναστρέψιμη τη ροή της ισχύος. Ωστόσο, κατά τον περισσότερο χρόνο η ροή ισχύος είναι από τη DC πλευρά προς την AC πλευρά, οπότε ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας. Για το λόγο αυτό, αυτοί οι μετατροπείς διακοπτικού τύπου αναφέρονται συχνά ως αντιστροφείς διακοπτικού τύπου.

Για την επιβράδυνση του AC κινητήρα στην Εικόνα 5.23, ανακτάται η κινητική ενέργεια που σχετίζεται με την αδράνεια του κινητήρα και του φορτίου του, οπότε ο


AC κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια. Κατά την πέδηση του κινητήρα, η ισχύς ρέει από την AC πλευρά προς την DC πλευρά του μετατροπέα διακοπτικού τύπου και αυτός λειτουργεί ως ανορθωτής. Η ενέργεια που ανακτάται κατά την πέδηση του AC κινητήρα μπορεί να καταναλώνεται σε μια ωμική αντίσταση, η οποία μπορεί να τοποθετηθεί για το σκοπό αυτό παράλληλα με τον πυκνωτή στην Εικόνα 5.23. Ωστόσο, σε εφαρμογές όπου η πέδηση αυτή εκτελείται συχνά, καλύτερη εναλλακτική λύση είναι να γίνεται με επιστροφή της ενέργειας στο δίκτυο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.24. Για να γίνει αυτό, απαιτείται ο μετατροπέας που συνδέει τον κινητήρα στο δίκτυο να είναι μετατροπέας δύο τεταρτημορίων με αναστρέψιμο DC ρεύμα. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργεί ως ανορθωτής κατά την κανονική λειτουργία του AC κινητήρα και ως αντιστροφέας κατά την πέδηση του κινητήρα. Ένας τέτοιος μετατροπέας δύο τεταρτημορίων με αναστρέψιμο ρεύμα μπορεί να υλοποιηθεί με δύο αντιπαράλληλα συνδεδεμένους μετατροπείς με thyristor, ή μέσω ενός μετατροπέα διακοπτικού τύπου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.24. Υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τη χρήση ενός τέτοιου ανορθωτή διακοπτικού τύπου (ονομάζεται ανορθωτής, επειδή κατά τον περισσότερο χρόνο η ισχύς ρέει από την AC προς την DC πλευρά) που σχετίζονται με τη διασύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο.





Εικόνα 5.24 - Μετατροπείς διακοπτικού τύπου για κίνηση και πέδηση AC κινητήριου συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν αντιστροφείς με μονοφασικές και τριφασικές AC εξόδους. Ως είσοδος των αντιστροφέων διακοπτικού τύπου θα υποτεθεί μια πηγή DC τάσης, όπως υποτέθηκε στα λειτουργικά διαγράμματα των Εικόνων 4.1 και 4.2. Τέτοιοι αντιστροφείς αναφέρονται ως *αντιστροφείς πηγής τάσης* (voltage-source inverters, VSI). Το άλλο είδος των αντιστροφέων, που σήμερα χρησιμοποιούνται μόνο για AC κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος, είναι οι *αντιστροφείς πηγής ρεύματος* (current-source inverters, CSI), όπου η DC είσοδος του αντιστροφέα είναι μια πηγή DC ρεύματος. Εξαιτίας των περιορισμένων εφαρμογών τους, οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος δεν εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τρεις γενικές κατηγορίες:

 *Αντιστροφείς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM):* Στους αντιστροφείς αυτούς η DC τάση εισόδου έχει ουσιαστικά σταθερό πλάτος, όπως στο κύκλωμα στην Εικόνα 5.23, όπου, για την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής με διόδους. Επομένως, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγχει το πλάτος και τη συχνότητα των AC τάσεων εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών των διακοπών του αντιστροφέα και έτσι τέτοιοι αντιστροφείς ονομάζονται αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM). Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης PWM των διακοπών του αντιστροφέα με σκοπό την επίτευξη AC τάσεων εξόδου που να πλησιάζουν την ημιτονοειδή κυματομορφή. Από τις διάφορες αυτές μεθόδους διαμόρφωσης PWM, θα εξεταστεί λεπτομερώς αυτή που ονομάζεται *ημιτονοειδής διαμόρφωση PWM*.

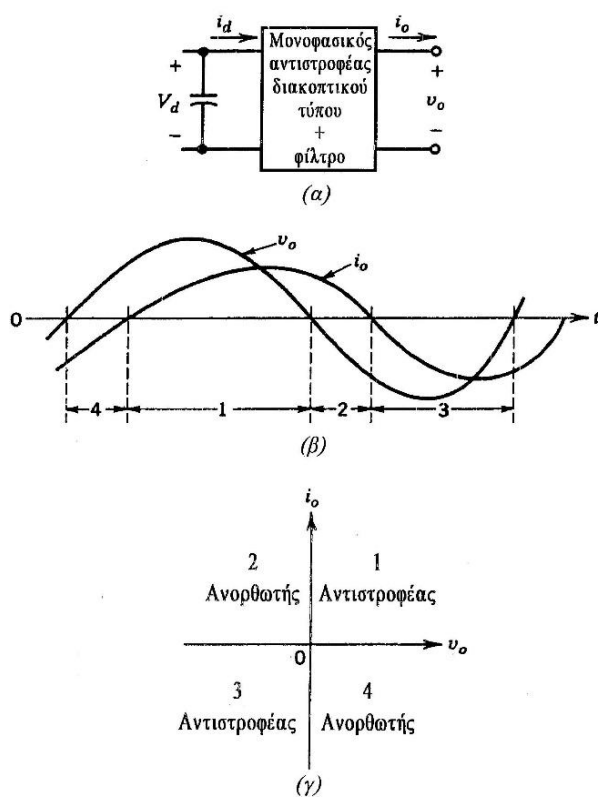
 *Αντιστροφείς με Τετραγωνική Κυματομορφή:* Στους αντιστροφείς αυτούς, για έλεγχο του πλάτους της AC τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της DC τάσης εισόδου. Έτσι, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή παρόμοια με τετραγωνική και γι' αυτό το λόγο οι αντιστροφείς αυτοί ονομάζονται αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή.

 *Μονοφασικοί Αντιστροφείς με Απαλοιφή Τάσης:* Στην περίπτωση αντιστροφέων με μονοφασική έξοδο είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, αν και η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια σταθερή τάση και στους διακόπτες του μετατροπέα δεν επιβάλλεται διαμόρφωση PWM (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Επομένως, οι αντιστροφείς αυτοί συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων αντιστροφέων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η *τεχνική της απαλοιφής τάσης* (voltage cancellation technique) λειτουργεί μόνο στους μονοφασικούς και όχι στους τριφασικούς αντιστροφείς.

5.2 Βασικές αρχές των αντιστροφέων διακοπτικού τύπου

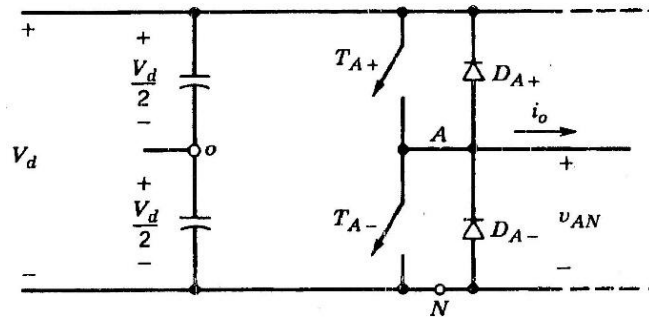
Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν οι απαιτήσεις του αντιστροφέα διακοπτικού τύπου. Για λόγους απλότητας, ας θεωρηθεί ένας μονοφασικός αντιστροφέας, ο οποίος δίνεται με μορφή λειτουργικού διαγράμματος στην Εικόνα 5.25α. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα εξομαλύνεται, έτσι ώστε η u_0 να μπορεί να θεωρηθεί ημιτονοειδής. Αν ο αντιστροφέας τροφοδοτεί ένα επαγωγικό φορτίο, για παράδειγμα έναν AC κινητήρα, το i_0 θα καθυστερεί σε σχέση με τη u_0 , όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.25β. Στις κυματομορφές της εξόδου στην Εικόνα 5.25β φαίνεται ότι κατά το χρονικό διάστημα 1, οι τιμές των u_0 και i_0 είναι και οι δύο θετικές, ενώ κατά το χρονικό διάστημα 3, οι τιμές των u_0 και i_0 είναι και οι δύο αρνητικές. Επομένως, κατά τα χρονικά διαστήματα

1 και 3, η στιγμιαία ροή ισχύος $p_o (=u_o i_o)$ είναι από τη DC πλευρά προς την AC πλευρά, αντιστοιχώντας σε λειτουργία αντιστροφέα. Αντίθετα, οι τιμές των u_o και i_o είναι ετερόσημες κατά τα χρονικά διαστήματα 2 και 4 και επομένως η p_o ρέει από την AC πλευρά προς τη DC πλευρά του αντιστροφέα, αντιστοιχώντας σε λειτουργία ανορθωτή. Για το λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου της AC εξόδου, ο αντιστροφέας διακοπτικού τύπου στην Εικόνα 5.25α πρέπει να μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου i_o - u_o , όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.25γ. Ένας τέτοιος αντιστροφέας τεσσάρων τεταρτημορίων, έχει αποδειχθεί ότι σε ένα μετατροπέα με πλήρη γέφυρα, το i_o είναι αναστρέψιμο και η u_o μπορεί να έχει θετική ή αρνητική πολικότητα, ανεξάρτητα από τη φορά του i_o .



Εικόνα 5.25 - Μονοφασικός αντιστροφέας διακοπτικού τύπου

Στην Εικόνα 5.26 φαίνεται μόνο ένα από τα δύο σκέλη του μετατροπέα με πλήρη γέφυρα, για παράδειγμα το σκέλος Α. Όλες οι διατάξεις αντιστροφέων DC-AC, που περιγράφονται στο κεφάλαιο αυτό, προέρχονται από το μετατροπέα ενός σκέλους στην Εικόνα 5.26. Για λόγους ευκολίας, θα υποτεθεί ότι στον αντιστροφέα στην Εικόνα 5.26, το σημείο "0" της DC τάσης εισόδου είναι διαθέσιμο, αν και στους περισσότερους αντιστροφείς δε χρειάζεται και έτσι δεν είναι διαθέσιμο.

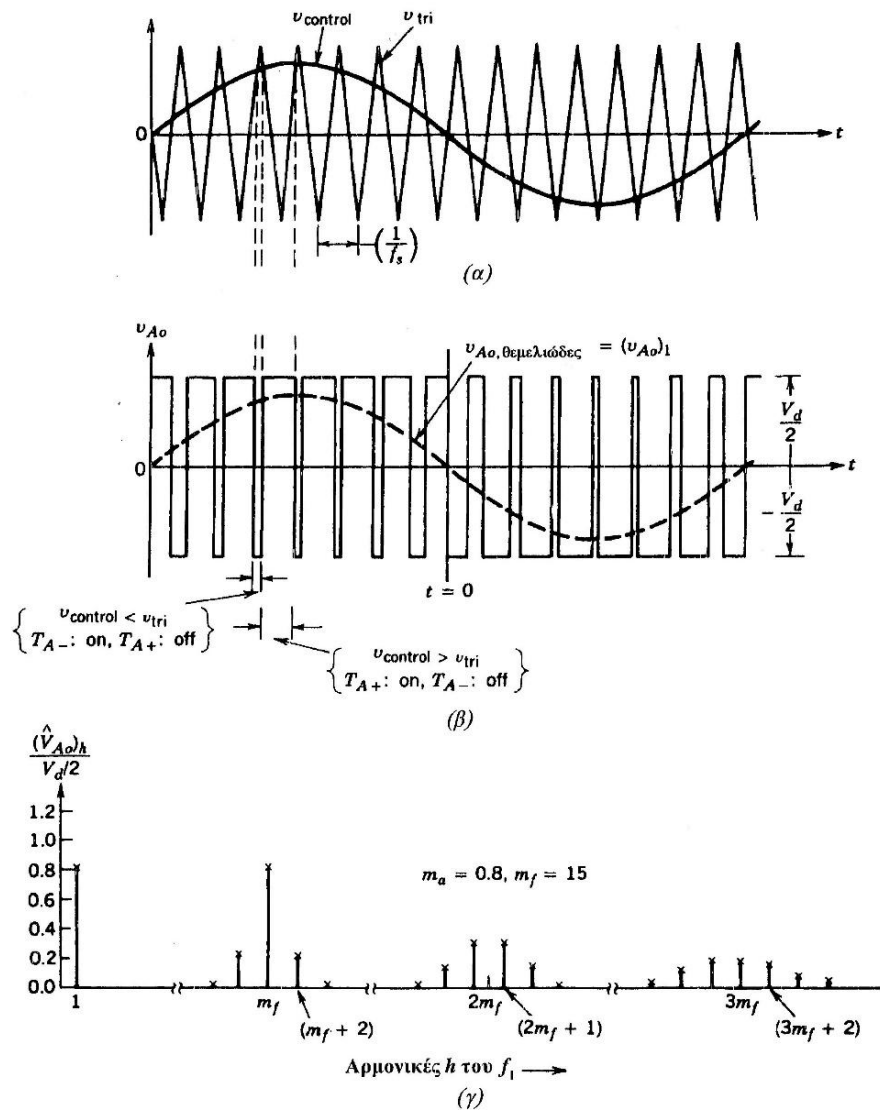


Εικόνα 5.26 - Αντιστροφέας διακοπτικού τύπου με ένα σκέλος

Για να γίνουν κατανοητά τα χαρακτηριστικά του αντιστροφέα DC-AC ενός σκέλους στην Εικόνα 5.26, θα υποθεθεί ότι η DC τάση εισόδου V_d είναι σταθερή και ότι στους διακόπτες του αντιστροφέα γίνεται διαμόρφωση PWM για τη μορφοποίηση και τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Αργότερα, θα αποδειχθεί ότι η λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή είναι ειδική περίπτωση της διαμόρφωσης PWM.

5.2.1 Στρατηγική της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

Έχει εξεταστεί η διαμόρφωση εύρους παλμού των μετατροπέων DC-DC με πλήρη γέφυρα. Εκεί συγκρινόταν ένα σήμα ελέγχου u_{control} (σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο με το χρόνο) με μια περιοδική τριγωνική κυματομορφή, με σκοπό την παραγωγή των σημάτων μετάβασης. Ο έλεγχος της σχετικής διάρκειας των παλμών κατά τον τρόπο αυτό, επέτρεπε τον έλεγχο της μέσης DC τάσης εξόδου.



Εικόνα 5.27 - Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)

Σε κυκλώματα αντιστροφών η διαμόρφωση PWM είναι λίγο πιο περίπλοκη, εφόσον, όπως αναφέρθηκε ωρίτερα, είναι επιθυμητό η έξοδος του αντιστροφέα να είναι ημιτονοειδής και να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του πλάτους και της συχνότητάς της. Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου στην επιθυμητή συχνότητα με μια τριγωνική κυματομορφή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.27α. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει τη συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή, όπως και το στέλεχος της V_{tri} .

Πριν από την εξέταση της συμπεριφοράς της διαμόρφωσης PWM, είναι απαραίτητο να οριστούν μερικοί όροι. Η συχνότητα f_s της τριγωνικής κυματομορφής v_{tri} στην Εικόνα 5.27α καθορίζει τη συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται *συχνότητα μετάβασης* (switching frequency).

Ακόμη, ονομάζεται και *φέρουσα συχνότητα* (carrier frequency). Το σήμα ελέγχου u_{control} χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει μια συχνότητα f_1 , η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα (η f_1 ονομάζεται και *συχνότητα διαμόρφωσης*, modulating frequency). Η τάση εξόδου του αντιστροφέα δε θα είναι μια τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει αρμονικές της f_1 . Ο *συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους* (amplitude modulation ratio) m_a ορίζεται ως:

$$m_a = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \quad (4-1)$$

όπου V_{control} είναι το πλάτος του σήματος ελέγχου. Το πλάτος V_{tri} του τριγωνικού σήματος διατηρείται γενικά σταθερό.

Ο *συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας* (frequency modulation ratio) m_f ορίζεται ως:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (4-2)$$

Στον αντιστροφέα στην Εικόνα 5.26β οι διακόπτες T_{A+} και T_{A-} , ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των u_{control} και u_{tri} και προκύπτει η ακόλουθη τάση εξόδου, ανεξάρτητα από τη φορά του i_o :

$$V_{\text{control}} > V_{\text{tri}}, T_{A+} \text{ είναι on, } v_{A0} = \frac{1}{2}V_d \quad (4-3)$$

ή

$$V_{\text{control}} < V_{\text{tri}}, T_{A-} \text{ είναι on, } v_{A0} = -\frac{1}{2}V_d$$

Εφόσον οι δύο διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα ανοικτοί, η τάση εξόδου u_{A0} κυμαίνεται μεταξύ δύο τιμών ($V_d/2$ και $-V_d/2$). Η u_{A0} και η θεμελιώδης συχνότητά της (καμπύλη που σημειώνεται με διακεκομμένη γραμμή) φαίνονται στην Εικόνα 5.27β, η οποία σχεδιάζεται για $m_f=15$ και $m_a=0.8$.

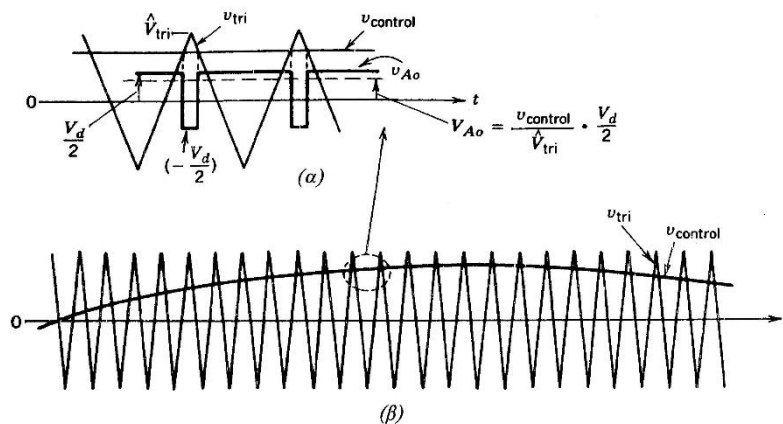
Το φάσμα της u_{A0} , για τις συνθήκες που σημειώνονται στην Εικόνα 5.27α και 4.5β, φαίνεται στην Εικόνα 5.27γ, όπου σχεδιάζονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές τάσεις $(V_{A0})_h / \frac{1}{2}V_d$ που έχουν σημαντικά πλάτη. Αυτή η παράσταση (για $m_a \leq 1$)

επιδεικνύει τρία σημαντικά στοιχεία:

📁📄 Το πλάτος της θεμελιώδους συχνότητας (V_{Ao}), είναι m_a φορές το ($V_d/2$). Αυτό εξηγείται θεωρώντας αρχικά ένα σταθερό $u_{control}$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.28α. Έτσι προκύπτει μια κυματομορφή εξόδου u_{Ao} . Από τη μελέτη της διαμόρφωσης εύρους παλμών στον μετατροπέα DC-DC με πλήρη γέφυρα, μπορεί να σημειωθεί ότι η μέση τάση εξόδου (ή ακριβέστερα, η μέση τάση εξόδου στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης $T_s=1/f_s$) V_{Ao} εξαρτάται από το λόγο του $u_{control}$ προς τη V_{tri} για δεδομένη V_d :

$$V_{Ao} = \frac{u_{control} V_d}{V_{tri} \cdot 2} \quad u_{control} \leq V_{tri} \quad (4-4)$$

Ας υποθεθεί (παρά το ότι η υπόθεση αυτή δεν είναι απαραίτητη) ότι το $u_{control}$ μεταβάλλεται πολύ λίγο κατά τη διάρκεια της περιόδου μετάβασης, δηλαδή ο m_f είναι μεγάλος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.28β. Επομένως, θεωρώντας το $u_{control}$ σταθερό κατά τη διάρκεια της περιόδου μετάβασης, η εξίσωση 4-4 δείχνει το πώς η “στιγμιαία” μέση τιμή της u_{Ao} (στο διάστημα περιόδου μετάβασης T_s) μεταβάλλεται από μια περίοδο μετάβασης στην επόμενη. Αυτή η “στιγμιαία” μέση τιμή είναι ίδια με τη θεμελιώδη συνιστώσα της u_{Ao} .



Εικόνα 5.28 - Ημιτονοειδής διαμόρφωση PWM

Το προηγούμενο επιχείρημα δείχνει το λόγο για τον οποίο το $u_{control}$ επιλέγεται ημιτονοειδές, ώστε να παράγεται ημιτονοειδής τάση εξόδου με λιγότερες αρμονικές. Τώρα, ας θεωρηθεί ημιτονοειδής μεταβολή της τάσης ελέγχου στη συχνότητα $f_1=\omega_1/2\pi$, η οποία είναι η επιθυμητή (ή η θεμελιώδης) συχνότητα της εξόδου του αντιστροφέα:

$$V_{control} = V_{control} \sin \omega_1 t$$

όπου

$$V_{\text{control}} \leq V_{\text{tri}} \quad (4-5)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις 4-4 και 4-5 και τα προηγούμενα επιχειρήματα που δείχνουν ότι η θεμελιώδης συνιστώσα $(u_{A0})_1$ μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και σε φάση με το u_{control} προκύπτει:

$$(V_{A0})_1 = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \sin \omega_1 t \frac{V_d}{2} = m_a \sin \omega_1 t \frac{V_d}{2} \quad \text{για } m_a \leq 1 \quad (4-6)$$

Επομένως

$$(V_{A0})_1 = m_a \frac{V_d}{2} \quad m_a \leq 1 \quad (4-7)$$

Η σχέση αυτή δείχνει ότι σε μια ημιτονοειδή διαμόρφωση PWM το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a (με την προϋπόθεση ότι $m_a \leq 1$). Για το λόγο αυτό, η περιοχή του m_a από 0 έως 1 αναφέρεται ως γραμμική περιοχή.



Οι αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο τη συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιές της, δηλαδή γύρω από τις αρμονικές $m_f, 2m_f, 3m_f$ κοκ. Αυτό το γενικό πρότυπο ισχύει για όλες τις τιμές του m_a στην περιοχή από 0 έως 1.

Για ένα συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας $m_f \geq 9$ (που πάντα συμβαίνει, εκτός από πολύ υψηλές απαιτήσεις ισχύος), τα πλάτη των αρμονικών είναι σχεδόν ανεξάρτητα από τον m_f , αν και ο m_f καθορίζει τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται (οι αρμονικές). Θεωρητικά, οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές μπορούν να εκφραστούν ως:

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1$$

δηλαδή η αρμονική τάξη h αντιστοιχεί στην k -τάξης πλευρική ζώνη της, j -φορές το συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f :

$$h = j(m_f) \pm k \quad (4-8)$$

όπου η θεμελιώδης συχνότητα αντιστοιχεί στο $h=1$. Για περιττές τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για άρτιες τιμές του k . Για άρτιες τιμές του j , οι αρμονικές υπάρχουν μόνο για περιττές τιμές του k .

Στον πίνακα 4.1, καταγράφονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές $(V_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d$, ως συνάρτηση του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a , θεωρώντας $m_f \geq 9$. Φαίνονται μόνο εκείνες με σημαντικά πλάτη, για τιμές του j μέχρι $j=4$ στην εξίσωση 4.8.

Θα είναι χρήσιμο αργότερα να ληφθεί υπόψη ότι στο κύκλωμα του αντιστροφέα της εικόνας 4.8 ισχύει η σχέση:

$$V_{AN} = V_{Ao} + \frac{1}{2}V_d \quad (4-9)$$

Επομένως, οι αρμονικοί όροι των u_{AN} και u_{Ao} είναι οι ίδιοι:

$$(V_{AN})_h = (V_{Ao})_h \quad (4-10)$$

Στον Πίνακα 5.1 φαίνεται ότι η εξίσωση 4-7 ακολουθείται σχεδόν ακριβώς και ότι το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τον συντελεστή m_a .

Γενικευμένες αρμονικές της V_{Ao} για μεγάλο m_f .

h \ m_a	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Θεμελιώδη					
m_f	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

Σημείωση: Ο λόγος $(\hat{V}_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d [=(\hat{V}_{AN})_h / \frac{1}{2}V_d]$ δίνεται ως συνάρτηση του m_a .

Πίνακας 5.1 - Γενικευμένες αρμονικές της V_{Ao} για μεγάλο m_f



Η συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος. Η επιλογή μιας περιττής ακέραιης τιμής για τον m_f έχει ως αποτέλεσμα μια περιττή συμμετρία [$f(-t) = -f(t)$], όπως επίσης μια συμμετρία μισού κύματος [$f(t) = -f(t+T_s/2)$] με την αρχή του χρόνου που φαίνεται στην Εικόνα 5.27β, η οποία σχεδιάζεται για $m_f=15$. Επομένως, υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές, ενώ οι άρτιες αρμονικές εξαφανίζονται από την κυματομορφή της u_{Ao} .

Επίσης, στην ανάλυση Fourier μόνο οι συντελεστές της σειράς των ημιτόνων είναι διάφοροι του μηδενός, ενώ αυτοί της σειράς των συνημιτόνων είναι μηδενικοί. Το φάσμα σχεδιάζεται στην Εικόνα 5.27γ.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επιλογή της συχνότητας μετάβασης και του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f . Οι αρμονικές με υψηλή συχνότητα φιλτράρονται σχετικά ευκολότερα από τις αρμονικές με χαμηλή συχνότητα. Άρα, είναι επιθυμητή η χρήση όσο το δυνατό υψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης. Από την άλλη μεριά οι απώλειες μετάβασης στους διακόπτες του αντιστροφέα αυξάνουν ανάλογα προς τη συχνότητα μετάβασης f_s . Επομένως, στις περισσότερες εφαρμογές, η συχνότητα μετάβασης επιλέγεται είτε χαμηλότερη των 6kHz είτε υψηλότερη των 20kHz, ώστε να είναι πάνω από την ακουστική περιοχή συχνοτήτων. Αν η βέλτιστη συχνότητα μετάβασης (με βάση τη συνολική απόδοση του συστήματος) προκύψει κάπου στην περιοχή από 6 έως 20 kHz, τότε τα μειονεκτήματα της αύξησής της στα 20kHz αντισταθμίζονται συχνά από το πλεονέκτημα ότι δεν υπάρχει ακουστικός θόρυβος για f_s των 20kHz ή μεγαλύτερη. Επομένως, σε εφαρμογές των 50 ή 60Hz, όπως είναι τα AC-κινητήρια συστήματα (όπου η θεμελιώδης συχνότητα εξόδου του μετατροπέα μπορεί να απαιτείται να είναι μέχρι 200Hz), ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f μπορεί να είναι 9 ή ακόμη μικρότερος για συχνότητες μετάβασης μικρότερες των 2kHz. Από την άλλη μεριά, ο m_f θα είναι μεγαλύτερος από 100 για συχνότητες μετάβασης μεγαλύτερες των 20kHz. Οι επιθυμητές σχέσεις μεταξύ του σήματος τριγωνικής κυματομορφής και του σήματος της τάσης ελέγχου καθορίζονται από το πόσο μεγάλος είναι ο m_f . Στην εξέταση που γίνεται εδώ, η τιμή $m_f=21$ αντιμετωπίζεται ως όριο μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών του, αν και η επιλογή της είναι κάπως αυθαίρετη. Εδώ θεωρείται ότι ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m_a είναι μικρότερος από 1.

5.2.2 Μικρός m_f ($m_f \leq 21$)

1. *Συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM:* Για μικρές τιμές του m_f , το σήμα της τριγωνικής κυματομορφής και το σήμα ελέγχου πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους (συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.27α. Η συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM απαιτεί ακέραιη τιμή του m_f . Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM είναι ότι η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM (όπου ο m_f δεν είναι ακέραιος) έχει ως αποτέλεσμα υποαρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας, οι οποίες είναι τελείως ανεπιθύμητες στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής μεταβάλλεται με την επιθυμητή συχνότητα του αντιστροφέα (για παράδειγμα, αν η συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα και έτσι η συχνότητά του u_{control} είναι 65.42Hz και $m_f = 15$, η

συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής θα πρέπει να είναι ακριβώς $15 \times 65.42 = 981.3\text{Hz}$).

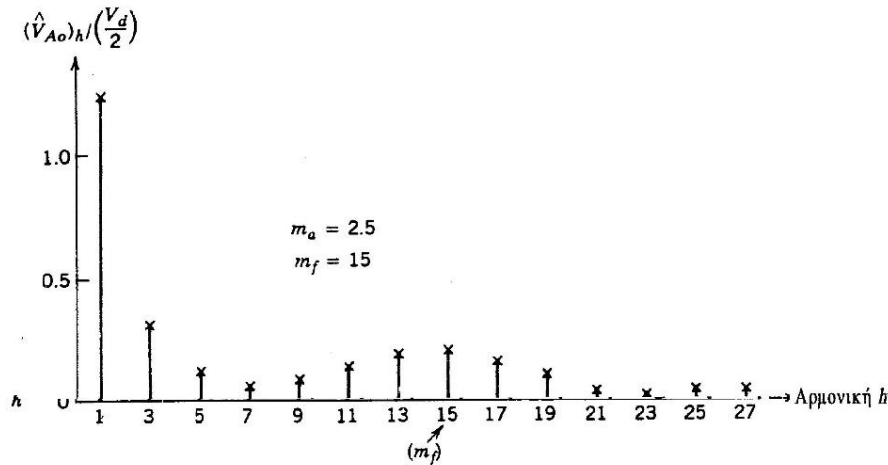
2. *Ο συντελεστής m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος:* Όπως εξετάστηκε προηγουμένως, ο m_f πρέπει να είναι περιττός ακέραιος, εκτός από την περίπτωση μονοφασικών αντιστροφών με διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου, οι οποίοι θα εξεταστούν στην ενότητα 4.3.2.2.

5.2.3 Μεγάλος m_f ($m_f > 21$)

Τα πλάτη των υποαρμονικών που οφείλονται σε ασύγχρονη διαμόρφωση PWM είναι μικρά, όταν οι τιμές του m_f είναι μεγάλες. Επομένως, σε μεγάλες τιμές του m_f , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM, όπου η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής διατηρείται σταθερή, ενώ η συχνότητα u_{control} μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του m_f (εφόσον αυτές είναι μεγάλες). Ωστόσο, αν ο αντιστροφέας τροφοδοτεί ένα φορτίο, όπως ο AC κινητήρας, οι υποαρμονικές στη μηδενική ή κοντά στη μηδενική συχνότητα, παρά το ότι έχουν μικρό πλάτος, θα έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλα ρεύματα, τα οποία είναι τελείως ανεπιθύμητα. Επομένως, η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM πρέπει να αποφεύγεται.

5.2.4 Υπερδιαμόρφωση ($m_a > 1$)

Στα προηγούμενα θεωρήθηκε ότι $m_a \leq 1$ γεγονός που αντιστοιχεί σε μια ημιτονοειδή διαμόρφωση PWM στη γραμμική περιοχή. Επομένως, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a , όπως προκύπτει από την εξίσωση 4-7. Στην περιοχή με $m_a \leq 1$ η διαμόρφωση PWM ωθεί τις αρμονικές σε μια περιοχή υψηλών συχνοτήτων γύρω από τη συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιές της. Παρά το επιθυμητό αυτό χαρακτηριστικό της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης PWM στη γραμμική περιοχή, ένα από τα μειονεκτήματα είναι ότι το μέγιστο δυνατό πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας δεν είναι τόσο υψηλό όσο είναι επιθυμητό. Αυτό είναι φυσική συνέπεια των αιχμών στην κυματομορφή της τάσης εξόδου της Εικόνα 5.27β.

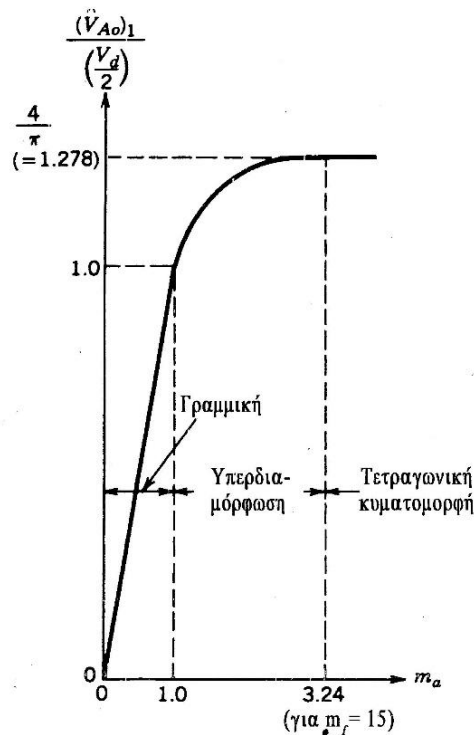


Εικόνα 5.29 - Αρμονικές που οφείλονται σε υπερδιαμόρφωση. Το σχήμα σχεδιάστηκε για $m_a = 2.5$ και $m_f = 15$

Για την παραπέρα αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου, ο m_a αυξάνεται πέρα από την τιμή 1, έχοντας ως αποτέλεσμα αυτό που ονομάζεται *υπερδιαμόρφωση*. Η υπερδιαμόρφωση κάνει την τάση εξόδου να περιέχει περισσότερες αρμονικές στις πλευρικές ζώνες σε σύγκριση με τη γραμμική περιοχή (με $m_a \leq 1$), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.29. Οι αρμονικές που υπερισχύουν στη γραμμική περιοχή μπορεί να μην υπερισχύουν κατά την υπερδιαμόρφωση. Σημαντικότερο, με την υπερδιαμόρφωση, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας δε μεταβάλλεται γραμμικά με το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a . Στην Εικόνα 5.30 δίνεται το κανονικοποιημένο πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας $(V_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d$ ως συνάρτηση του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a . Στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης, ακόμη και για λογικά μεγάλες τιμές του m_f , το $(V_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d$ εξαρτάται από τον m_f . Αυτό είναι αντίθετο με όσα συμβαίνουν στη γραμμική περιοχή ($m_a \leq 1$), όπου το $(V_{Ao})_h / \frac{1}{2}V_d$ μεταβάλλεται γραμμικά με τον m_a , σχεδόν ανεξάρτητα από τον m_f (με την προϋπόθεση ότι $m_f > 9$).

Με την υπερδιαμόρφωση, ανεξάρτητα από τις τιμές του m_f , συνιστάται η χρήση συγχρονισμένης διαμόρφωσης PWM, ικανοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις που σημειώθηκαν προηγουμένως, για μικρές τιμές του m_f .

Η περιοχή υπερδιαμόρφωσης αποφεύγεται σε αδιάλειπτες τροφοδοσίες ισχύος, εξαιτίας της αυστηρής απαίτησης ελαχιστοποίησης της παραμόρφωσης της τάσης εξόδου.



Εικόνα 5.30 - Έλεγχος τάσης με μεταβολή του m_a

Για επαρκώς μεγάλες τιμές του m_a , η κυματομορφή της τάσης του αντιστροφέα εκφυλίζεται από κυματομορφή με διαμόρφωση PWM σε τετραγωνική, η οποία εξετάζεται λεπτομερώς στην επόμενη ενότητα. Από την Εικόνα 5.30 και την εξέταση της μετάβασης σε τετραγωνική κυματομορφή, που θα παρουσιαστεί στην επόμενη ενότητα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης με $m_a > 1$ ισχύει η σχέση:

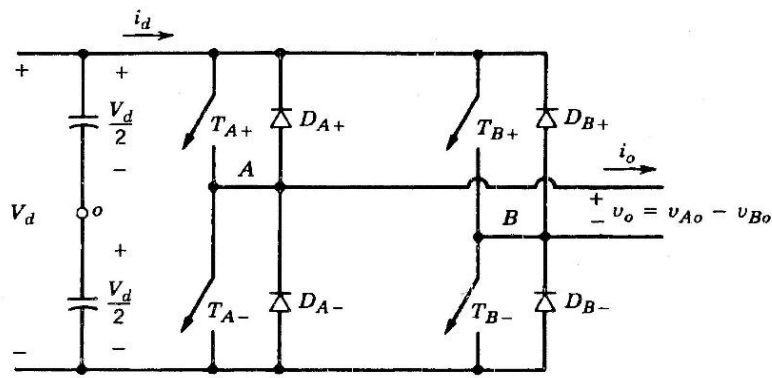
$$\frac{V_d}{2} < (V_{Ao})_1 < \frac{4 V_d}{\pi 2} \quad (4-12)$$

5.3 Μονοφασικοί αντιστροφείς

5.3.1 Αντιστροφείς με πλήρη γέφυρα (μονοφασικοί)

Ένας αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα φαίνεται στην Εικόνα 5.31. Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από δύο αντιστροφείς ενός σκέλους της μορφής που εξετάστηκε στην Ενότητα 4.2 και προτιμάται σε σχέση με άλλες διατάξεις σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Με την ίδια DC τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι διπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα

ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.



Εικόνα 5.31 - Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα

5.3.2 Διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου

Εδώ, τα ζεύγη των διακοπών (T_{A+} , T_{B-}) και (T_{A-} , T_{B+}) από τα δύο σκέλη στην Εικόνα 5.31 αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Με το είδος αυτό της μετάβασης με διαμόρφωση PWM, η κυματομορφή της τάσης εξόδου του σκέλους A ταυτίζεται με την έξοδο του βασικού αντιστροφέα ενός σκέλους της Ενότητας 4.2, η οποία καθορίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με σύγκριση του u_{control} και της u_{tri} στην Εικόνα 5.32α. Η έξοδος του σκέλους B του αντιστροφέα είναι αντίθετη της εξόδου του σκέλους A. Για παράδειγμα, όταν ο T_{A+} είναι κλειστός και η u_{A0} ισούται με $+V_d/2$, ο T_{B-} είναι επίσης κλειστός και $u_{B0} = -V_d/2$. Επομένως:

$$v_{B0}(t) = -v_{A0}(t) \quad (4-17)$$

και

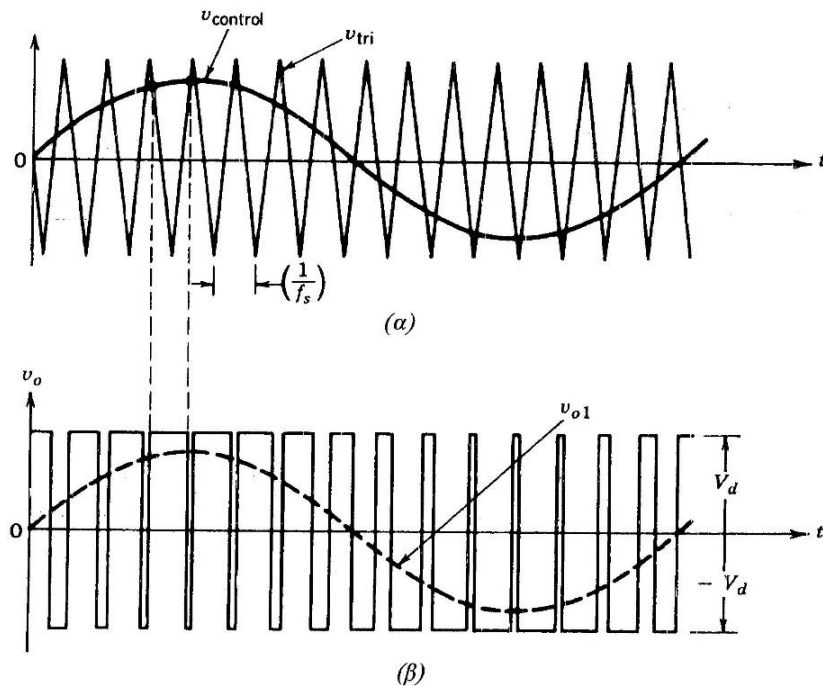
$$v_o(t) = v_{A0}(t) - v_{B0}(t) = 2v_{A0}(t) \quad (4-18)$$

Η κυματομορφή της u_o φαίνεται στην Εικόνα 5.32β. Η ανάλυση που έγινε στην Ενότητα 4.2 για το βασικό αντιστροφέα ενός σκέλους, βρίσκει πλήρη εφαρμογή σ' αυτήν την μορφή μετάβασης με διαμόρφωση PWM. Επομένως, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου $(V_o)_1$, μπορεί να βρεθεί από τις εξισώσεις 4-7, 4-12 και 4-18 και είναι:

$$V_{o1} = m_a V_a \quad (m_a \leq 1) \quad (4-19)$$

και

$$V_d < V_{o1} < \frac{4}{\pi} V_d \quad (m_a > 1) \quad (4-20)$$

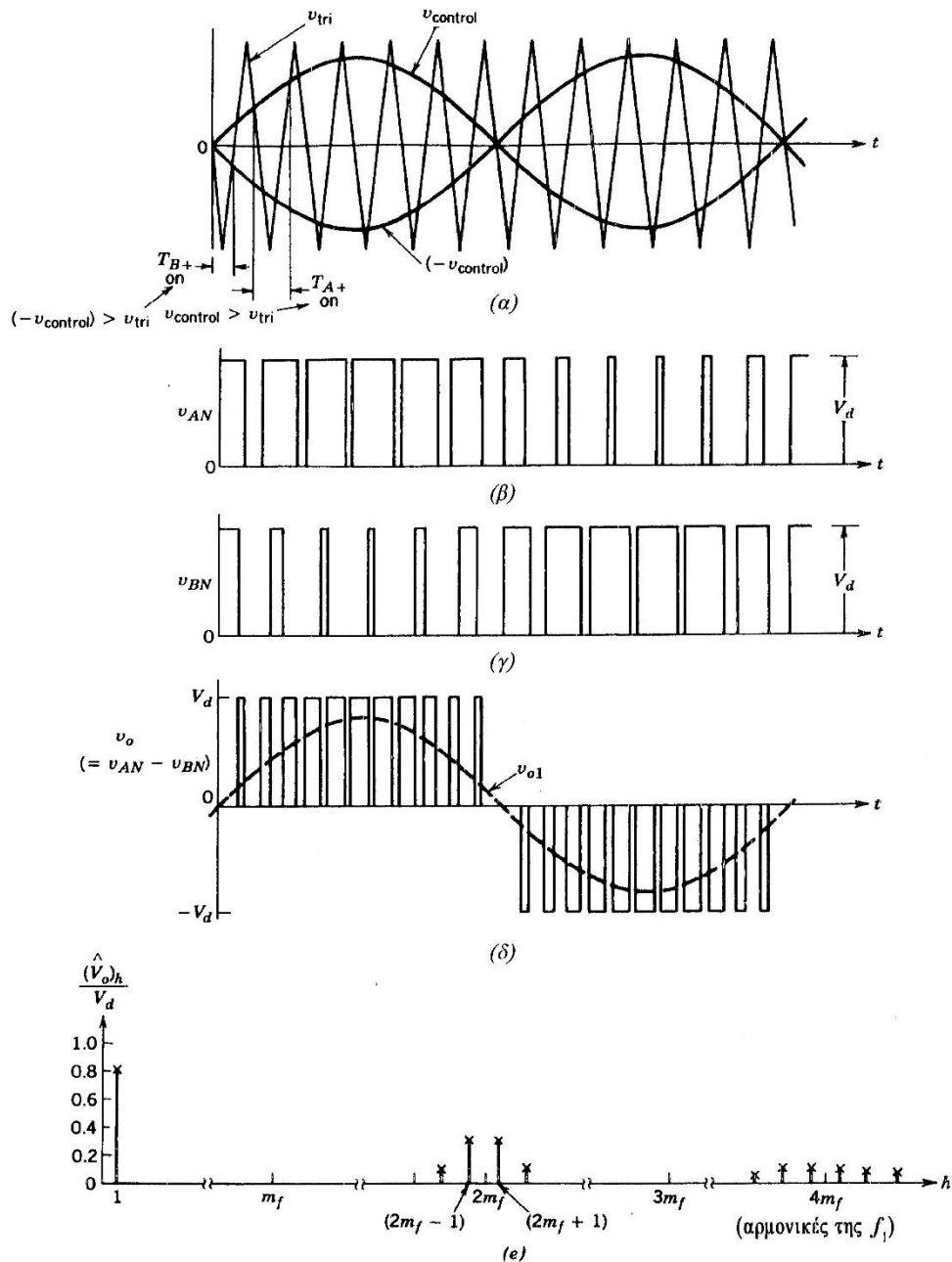


Εικόνα 5.32 - Διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου

Στην Εικόνα 5.32β, παρατηρείται ότι η τάση εξόδου v_o μεταβαίνει μεταξύ των επιπέδων τάσης $-V_d$ και V_d . Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτή η μορφή μετάβασης ονομάζεται διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου. Τα πλάτη των αρμονικών της τάσης εξόδου μπορούν να βρεθούν από τον Πίνακα 5.1, όπως υποδεικνύεται στο παράδειγμα που ακολουθεί.

5.3.3 Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου

Στη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα στην Εικόνα 5.31 δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, όπως στην προηγούμενη διάταξη διαμόρφωσης PWM. Εδώ, στα σκέλη Α και Β του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της v_{tri} με τα $v_{control}$ και $-v_{control}$ αντίστοιχα.



Εικόνα 5.33 - Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου (μονοφασική)

Όπως φαίνεται στη Εικόνα 5.33α, η σύγκριση του $v_{control}$ με την τριγωνική κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα λογικά σήματα για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους A:

$$v_{control} > v_{tri}: T_{A+} \text{ on και } v_{AN} = V_d$$

$$v_{control} < v_{tri}: T_{A-} \text{ on και } v_{AN} = 0 \quad (4-29)$$

Η τάση εξόδου του σκέλους A του αντιστροφέα σε σχέση με τον αγωγό N που φέρει την αρνητική DC τάση φαίνεται στην Εικόνα 5.33β. Για τον έλεγχο των διακοπών

του σκέλους B, το $(-u_{\text{control}})$ συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή, δίνοντας τα ακόλουθα:

$$(-v_{\text{control}}) > v_{\text{tri}}: T_{B+} \text{ on και } v_{BN} = V_d$$

$$(-v_{\text{control}}) < v_{\text{tri}}: T_{B-} \text{ on και } v_{BN} = 0 \quad (4-30)$$

Εξαιτίας των διόδων ανατροφοδότησης που συνδέονται αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες, οι τάσεις που δίνονται από τις Εξισώσεις 4-29 και 4-30 είναι ανεξάρτητες από τη φορά του ρεύματος εξόδου i_o .

Από τις κυματομορφές στην Εικόνα 5.33 φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις συνδυασμοί κλειστών διακοπών και των αντίστοιχων επιπέδων τάσης:

1. T_{A+}, T_{B-} κλειστοί: $u_{AN} = V_d, u_{BN} = 0, u_o = V_d$
2. T_{A-}, T_{B+} κλειστοί: $u_{AN} = 0, u_{BN} = V_d, u_o = -V_d$
3. T_{A+}, T_{B+} κλειστοί: $u_{AN} = V_d, u_{BN} = V_d, u_o = 0$
4. T_{A-}, T_{B-} κλειστοί: $u_{AN} = 0, u_{BN} = 0, u_o = 0 \quad (4-31)$

Παρατηρείται ότι όταν και οι δύο επάνω διακόπτες T_{A+} και T_{B+} , είναι κλειστοί, η τάση εξόδου είναι μηδέν. Το ρεύμα εξόδου κυκλοφορεί σ' ένα βρόχο μέσω των (T_{A+} και D_{B+}) ή (D_{A+} και T_{B+}), ανάλογα με τη φορά του i_o . Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος το ρεύμα εισόδου i_d είναι μηδέν. Μια παρόμοια κατάσταση συμβαίνει, όταν και οι δύο κάτω διακόπτες T_{A-} και T_{B-} , είναι κλειστοί.

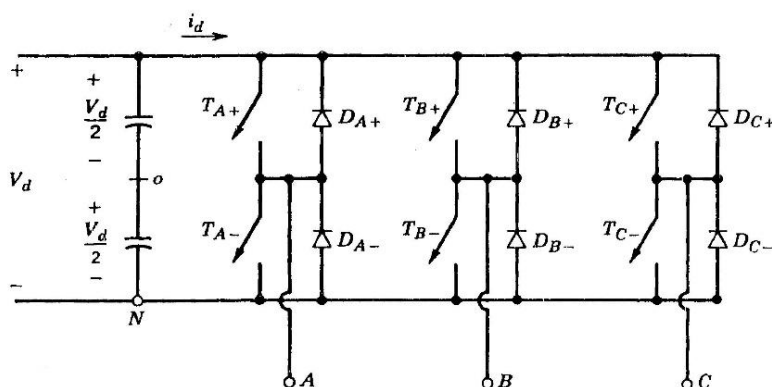
Σ' αυτήν τη διάταξη διαμόρφωσης PWM, όταν συμβαίνει μια μετάβαση, η τάση εξόδου αλλάζει μεταξύ των επιπέδων τάσης 0 και $+V_d$ ή μεταξύ των 0 και $-V_d$. Για το λόγο αυτό, αυτή η μορφή διαμόρφωσης PWM ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμού με μονοπολική τάση εξόδου, σε αντίθεση με τη διάταξη PWM με διπολική τάση εξόδου (μεταξύ $+V_d$ και $-V_d$) που περιεγράφηκε προηγουμένως. Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα του “ουσιαστικού” διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου, σε σύγκριση με τη διάταξη διπολικής μετάβασης τάσης. Επίσης, τα άλματα της τάσης εξόδου σε κάθε μετάβαση μειώνονται σε V_d από $2V_d$ στην προηγούμενη διάταξη.

Το πλεονέκτημα του “ουσιαστικού” διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης εμφανίζεται στο φάσμα της τάσης εξόδου, όπου οι χαμηλότερες αρμονικές (στο εξιδανικευμένο κύκλωμα) εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια

της θεμελιώδους. Αυτό είναι εύκολο να γίνει κατανοητό σ' ένα μονοφασικό αντιστροφέα, αν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f (ο m_f πρέπει να είναι περιττός στη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου). Οι κυματομορφές της τάσης u_{AN} και u_{BN} μετατοπίζονται κατά 180° από τη θεμελιώδη συχνότητα f_1 , η μία σε σχέση με την άλλη. Επομένως, οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις u_{AN} και u_{BN} έχουν την ίδια φάση ($\varphi_{AN}-\varphi_{BN} = 180^\circ$, $m_f = 0$, εφόσον οι κυματομορφές είναι κατά 180° μετατοπισμένες και ο m_f θεωρείται άρτιος). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή του αρμονικού όρου στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου $u_o = u_{AN}-u_{BN}$. Επίσης, εξαλείφονται οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης. Κατά παρόμοιο τρόπο, εξαλείφεται η άλλη κύρια αρμονική με συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, ενώ οι πλευρικές ζώνες της παραμένουν.

5.4 Τριφασικοί αντιστροφέες

Σε τριφασικές εφαρμογές, όπως τα AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας και τα AC κινητήρια συστήματα, χρησιμοποιούνται συνήθως τριφασικοί αντιστροφέες. Είναι δυνατή η τροφοδοσία ενός τριφασικού φορτίου μέσω τριών ξεχωριστών μονοφασικών αντιστροφέων, όπου κάθε αντιστροφέας παράγει μια έξοδο (στη θεμελιώδη συχνότητα) μετατοπισμένη κατά 120° σε σχέση με τις άλλες. Παρά το ότι αυτή η διάταξη μπορεί να είναι προτιμότερη κάτω από ορισμένες συνθήκες, απαιτεί είτε έναν τριφασικό μετασχηματιστή εξόδου ή ξεχωριστή πρόσβαση σε καθεμία από τις τρεις φάσεις του φορτίου. Στην πράξη, μια τέτοια πρόσβαση δεν είναι, γενικά, δυνατή. Επιπλέον, απαιτεί δώδεκα (12) διακόπτες.



Εικόνα 5.34 - Τριφασικός αντιστροφέας

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα αποτελείται από τρία σκέλη, ένα για κάθε φάση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.34. Το καθένα από τα

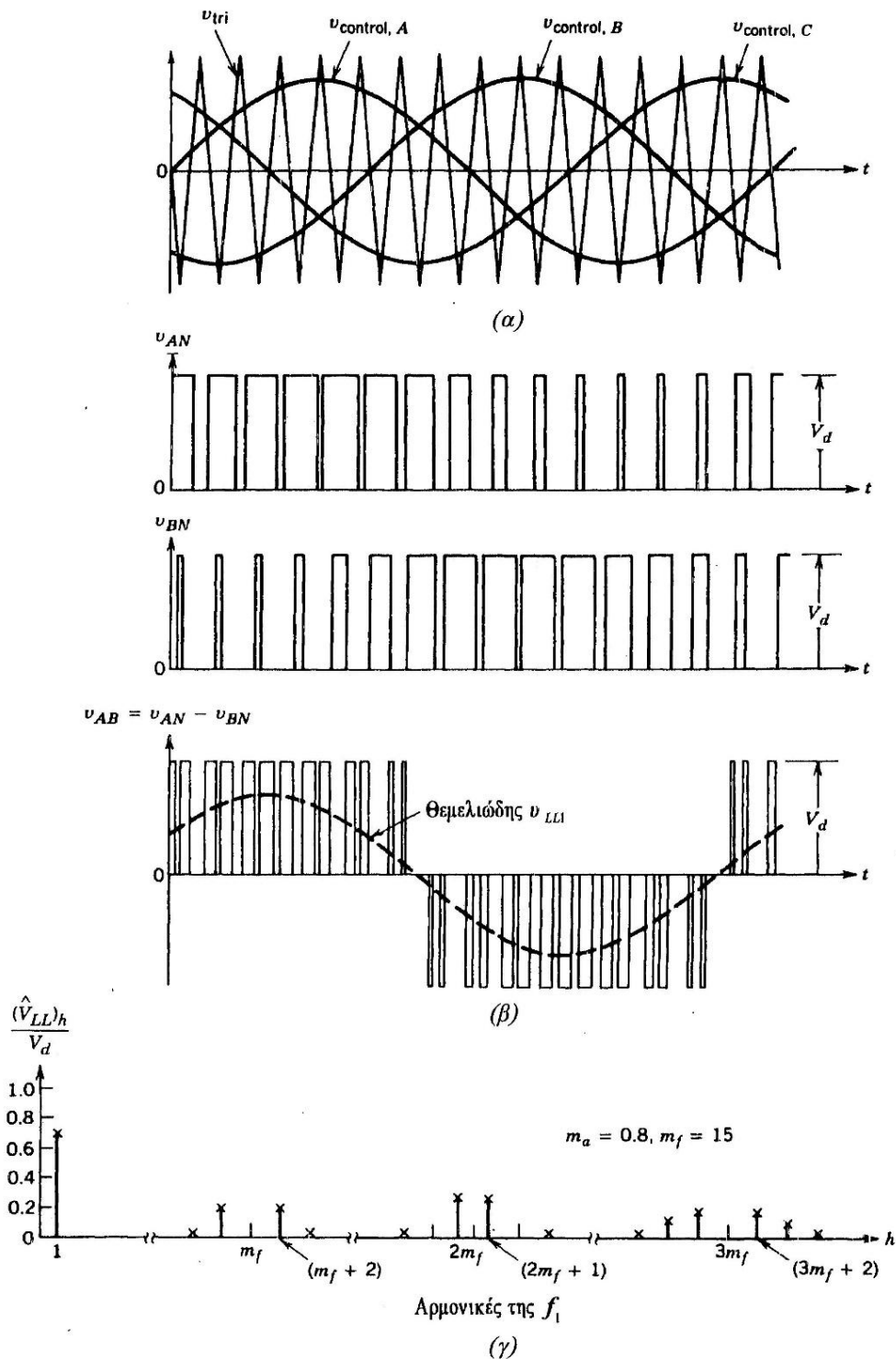
σκέλη του αντιστροφέα είναι όμοιο μ' εκείνο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή του βασικού αντιστροφέα ενός σκέλους στην Ενότητα 4.2. Επομένως, η έξοδος του κάθε σκέλους, για παράδειγμα η u_{AN} (σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική DC τάση) εξαρτάται μόνο από τη V_d και την κατάσταση των διακοπών. Η τάση εξόδου είναι ανεξάρτητη του ρεύματος εξόδου, εφόσον σε κάθε χρονική στιγμή ένας από τους δύο διακόπτες σε κάθε σκέλος είναι πάντα κλειστός. Εδώ, με την υπόθεση ιδανικών διακοπών, αγνοείται και πάλι ο κενός χρόνος που απαιτείται στα πρακτικά κυκλώματα. Επομένως, η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι ανεξάρτητη της φοράς του ρεύματος φορτίου.

5.4.1 Διαμόρφωση PWM σε τριφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης

Παρόμοια με τους μονοφασικούς αντιστροφείς, ο αντικειμενικός σκοπός στους τριφασικούς αντιστροφείς με διαμόρφωση PWM είναι η μορφοποίηση και ο έλεγχος των τριφασικών τάσεων εξόδου κατά πλάτος και συχνότητα, με μια ουσιαστικά σταθερή τάση εισόδου V_d . Για την επίτευξη συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου σ' έναν τριφασικό αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM, συγκρίνεται η ίδια τριγωνική κυματομορφή τάσης με τρεις ημιτονοειδείς τάσεις ελέγχου, οι οποίες είναι κατά 120° εκτός φάσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.35α (η οποία σχεδιάζεται για $m_f=15$).

Όπως προκύπτει από την Εικόνα 5.35β, στις τάσεις εξόδου u_{AN} και u_{BN} , οι οποίες μετρούνται σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική DC τάση, υπάρχει η ίδια ακριβώς DC συνιστώσα. Οι DC συνιστώσες απαλείφονται στις πολικές τάσεις, για παράδειγμα στη u_{AB} που φαίνεται στην Εικόνα 5.35β. Αυτό είναι παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει σ' έναν μονοφασικό αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα που λειτουργεί με διαμόρφωση PWM.

Στους τριφασικούς αντιστροφείς, ενδιαφέρουν μόνο οι αρμονικές των πολικών τάσεων. Οι αρμονικές εξόδου οποιουδήποτε σκέλους, για παράδειγμα της u_{AN} στην Εικόνα 5.35β, είναι ίδιες με τις αρμονικές της u_{Ao} στην Εικόνα 5.27, όπου εμφανίζονται μόνο οι περιττές αρμονικές ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο τον m_f και τα πολλαπλάσιά του, με την προϋπόθεση ότι ο m_f είναι περιττός.



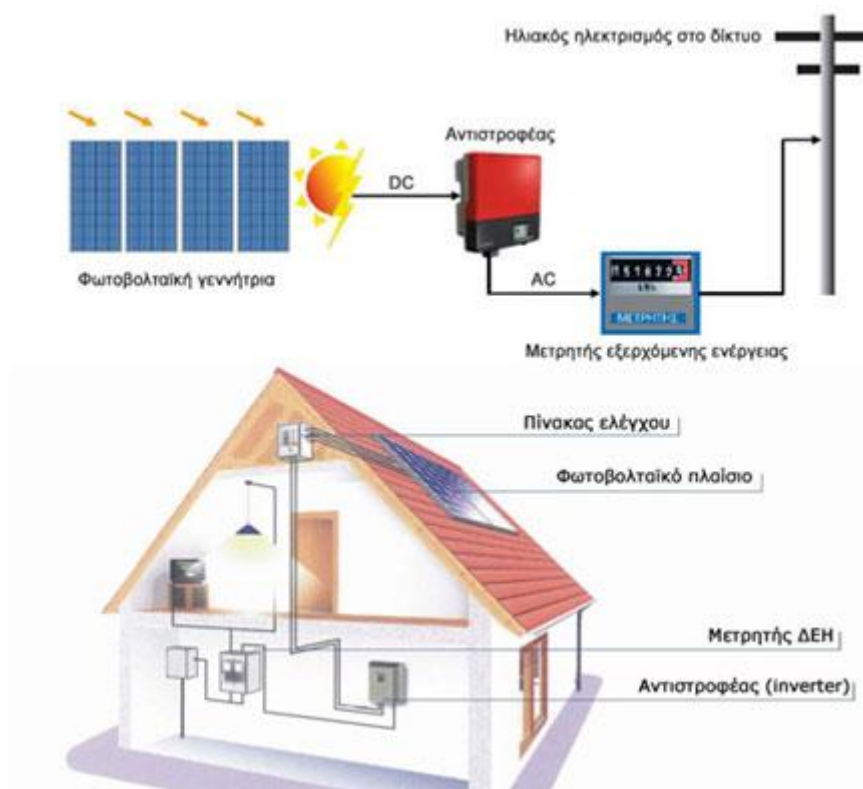
Εικόνα 5.35 - Τριφασικές κυματομορφές με διαμόρφωση PWM και φάσμα αρμονικών

Θεωρώντας μόνο την αρμονική στο m_f (το ίδιο ισχύει και στα περιττά πολλαπλάσιά του), η διαφορά φάσης μεταξύ της αρμονικής στο m_f των u_{AN} και u_{BN} είναι $(120m_f)^\circ$. Αυτή η διαφορά φάσης θα ισοδυναμεί με μηδέν (ένα πολλαπλάσιο των 360°), αν ο m_f είναι περιττός και πολλαπλάσιο του 3. Κατά συνέπεια, η αρμονική στο m_f δεν εμφανίζεται στην πολική τάση u_{AB} . Το ίδιο ισχύει για τις αρμονικές στα περιττά πολλαπλάσια του m_f , αν ο m_f επιλέγεται περιττό πολλαπλάσιο του 3 (όπου ο λόγος

επιλογής περιττού πολλαπλάσιου του 3 για τον m_f , είναι η διατήρηση του m_f περιττού και, έτσι, η εξάλειψη των άρτιων αρμονικών). Έτσι, κάποιες από τις κύριες αρμονικές στον αντιστροφέα ενός σκέλους μπορούν να εξαλειφθούν από την πολική τάση ενός τριφασικού αντιστροφέα.

6 Προσομοίωση-Αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

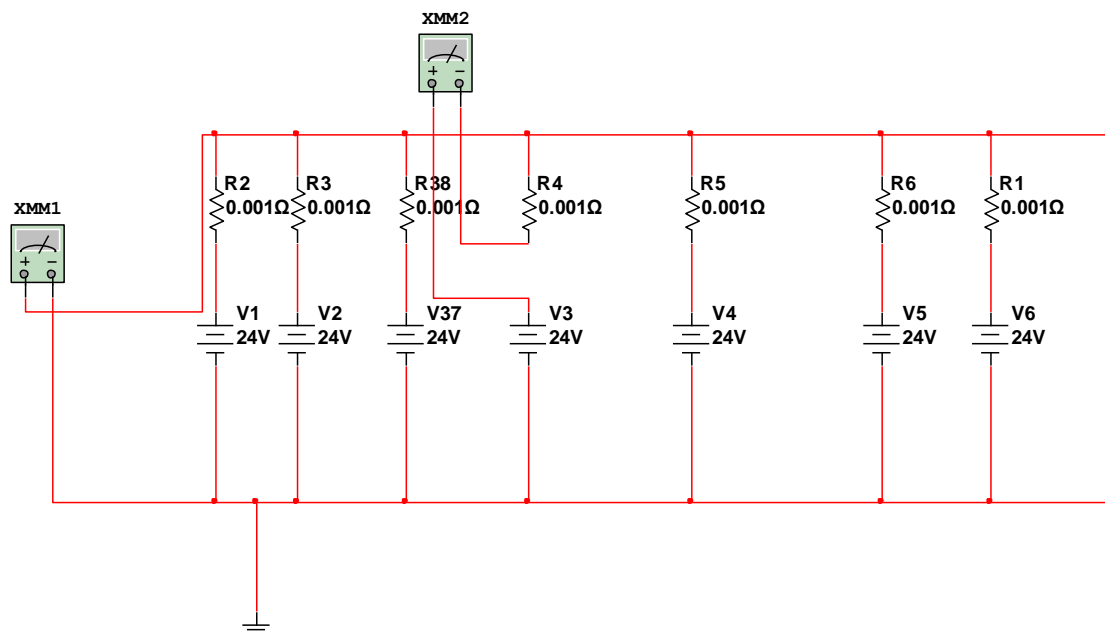


Εικόνα 6.36 - Σχεδιάγραμμα μετατροπής ενέργειας από φωτοβολταϊκά σε στέγη.

Στην εικόνα 6.36, φαίνεται πως λαμβάνεται η ηλιακή ενέργεια, πως μετατρέπεται και στη συνέχεια πως πηγαίνει στο σπίτι ή στο δίκτυο για κατανάλωση. Αρχικά τα φωτοβολταϊκά παίρνουν την ηλιακή ενέργεια, όπου μας δίνουν ρεύμα συνεχής τάσης και στη συνέχεια το ρεύμα αυτό πηγαίνει στον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας με τη σειρά του, μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο, στο ρεύμα δηλαδή που χρησιμοποιούμε. Μετά τον αντιστροφέα, το ρεύμα οδηγείται στον μετρητή και έπειτα είναι διαθέσιμο για κατανάλωση.

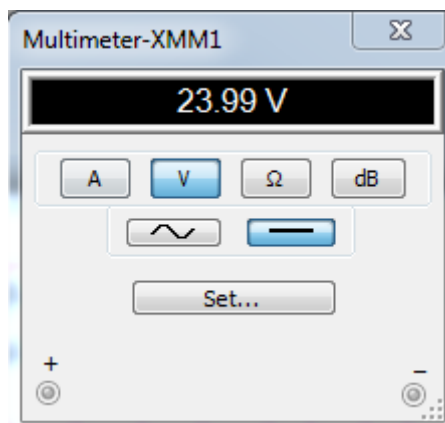
Το σχέδια που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.36, θα γίνει προσομοίωση και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε παρακάτω ενότητα.

6.2 Παράλληλη σύνδεση



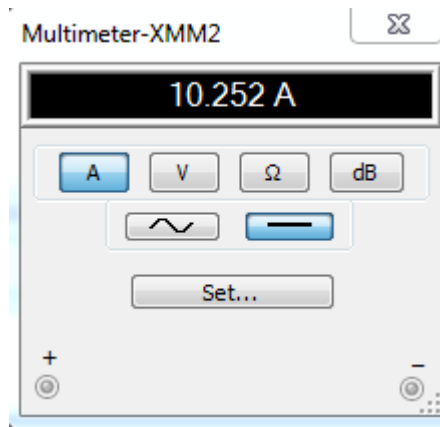
Εικόνα 6.37 - Παράλληλη σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Στο παραπάνω σχήμα, φαίνεται η διάταξη φωτοβολταϊκών στοιχείων σε παράλληλη σύνδεση. Υπάρχουν 40 πάνελ των 24V, το οποία βρίσκονται παράλληλα μεταξύ τους και για το οποία θα πάρουμε μετρήσεις.



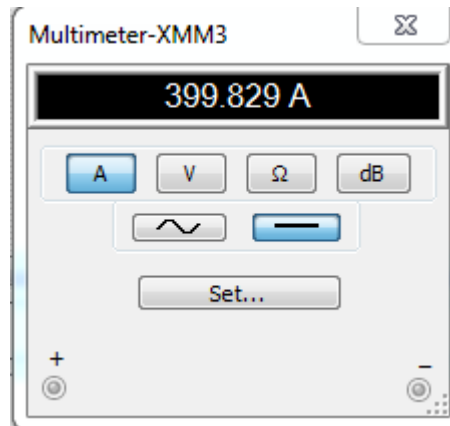
Εικόνα 6.38 - Βολτόμετρο XMM1.

Στο σχήμα της Εικόνας 6.37, υπάρχει συνδεδεμένο ένα βολτόμετρο στα άκρα ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Η τιμή που προκύπτει από την μέτρηση είναι 23,99V, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.38.



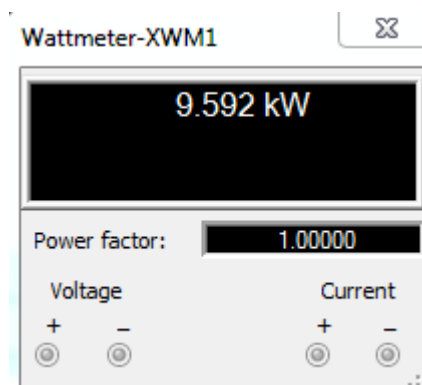
Εικόνα 6.39 - Αμπερόμετρο XMM2.

Η τιμή που προκύπτει στην παραπάνω εικόνα είναι από το αμπερόμετρο που τοποθετήθηκε στα άκρα πάνελ και μας δίνει το ρεύμα που κυκλοφορεί σε κάθε πάνελ. Οπότε για το κάθε πάνελ έχουμε ρεύμα 10,252A.



Εικόνα 6.40 - Αμπερόμετρο XMM3.

Στο σχήμα που μελετάμε, έχει τοποθετηθεί ακόμη ένα αμπερόμετρο το οποίο βρίσκεται στην έξοδο των φωτοβολταϊκών στοιχείων ή αλλιώς στην είσοδο του inverter. Η τιμή που πήραμε είναι 399,829A.

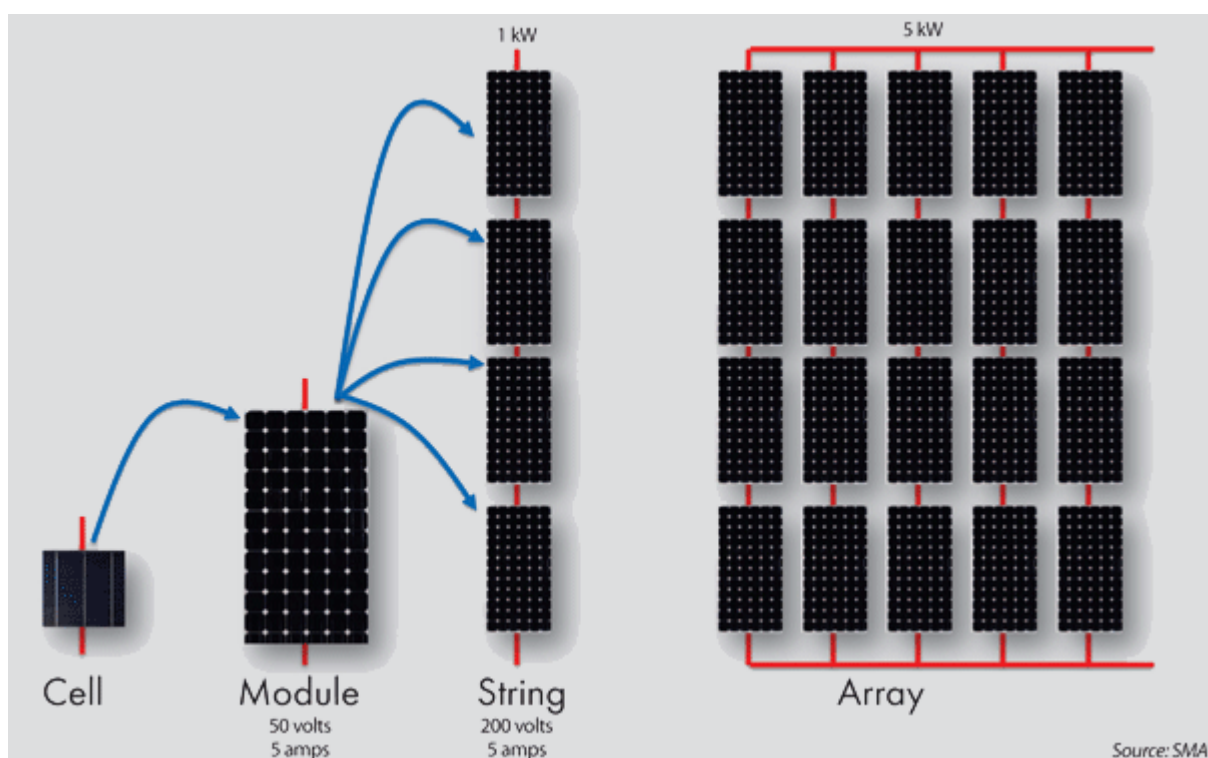


Εικόνα 6.41 - Wattmeter XWM1.

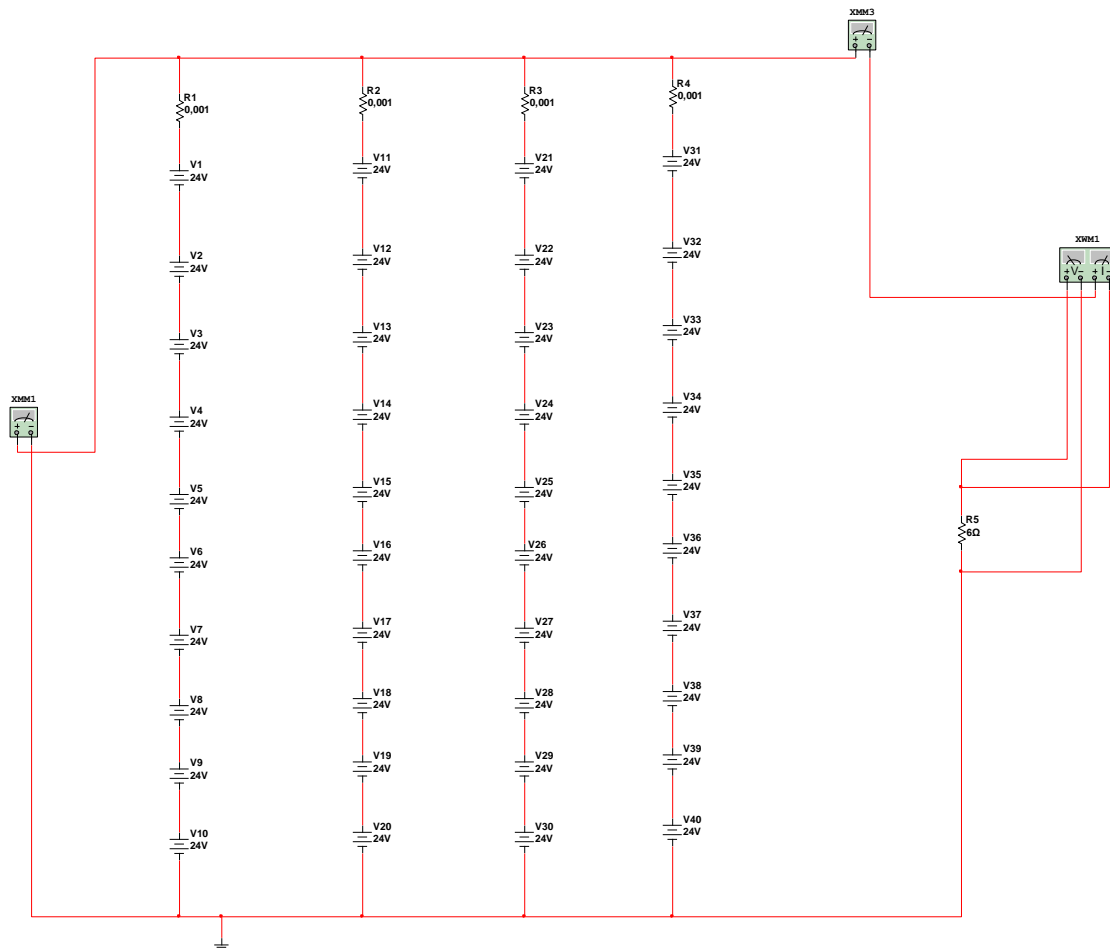
Στην Εικόνα 6.41, φαίνονται τα kW που παίρνουμε σύμφωνα με την προσομοίωση του παραπάνω σχήματος. Έτσι στο σχήμα της Εικόνας 6.37 έχουμε 9.592kW.

Επειδή το ρεύμα που παίρνουμε από την παραπάνω σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι πολύ μεγάλο και θα θέλουμε πολύ χοντρά καλώδια για να υλοποιήσουμε την συγκεκριμένη σύνδεση, που σημαίνει ότι θα έχουμε μεγάλο κόστος παραγωγής, για το λόγο αυτό θα προσομοιώσουμε παρακάτω άλλη σύνδεση.

6.3 Σύνδεση σε σειρά/παράλληλα

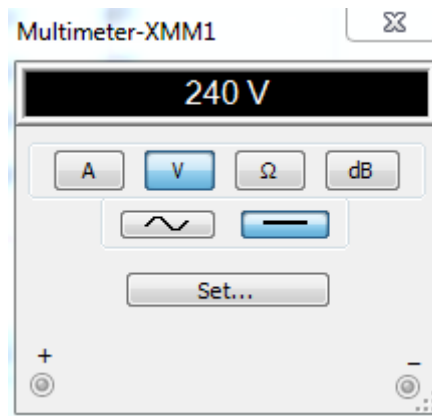


Εικόνα 6.42 - Συστοιχία από φωτοβολταϊκά πάνελ



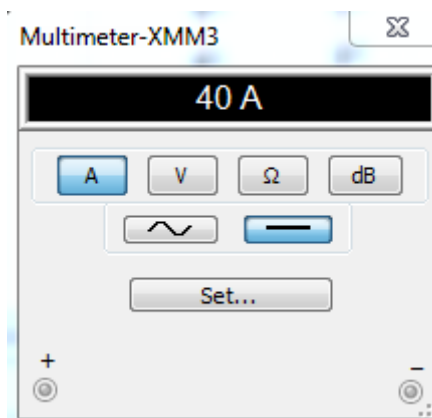
Εικόνα 6.43 - Σύνδεση φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σειρά/παράλληλα.

Στο σχέδιο της Εικόνας 6.43, υπάρχουν τοποθετημένα 40 πάνελ των 24V σε σειρά αλλά και παράλληλα. Όπως φαίνεται υπάρχουν 4 σειρές παράλληλες όπου η κάθε σειρά έχει 10 στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι μετρήσεις που θα πάρουμε από αυτή την σύνδεση των φωτοβολταϊκών πάνελ.



Εικόνα 6.44 - Βολτόμετρο XMM1.

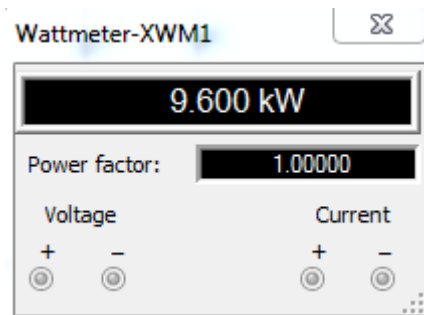
Όπως και στην προηγούμενη σύνδεση έτσι και εδώ υπάρχει τοποθετημένο ένα βολτόμετρο στα άκρα ενός πάνελ. Η τιμή που παίρνουμε για τη συγκεκριμένη σύνδεση είναι 240V.



Εικόνα 6.45 - Αμπερόμετρο XMM3.

Στο κύκλωμα μας υπάρχει συνδεδεμένο ένα αμπερόμετρο, το οποίο μας δείχνει το ρεύμα που περνάει από κάθε γραμμή. Η τιμή που πήραμε είναι 40A.

Παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με το προηγούμενο κύκλωμα, σ' αυτό έχουμε μικρή τιμή ρεύματος και μεγάλη τάση.

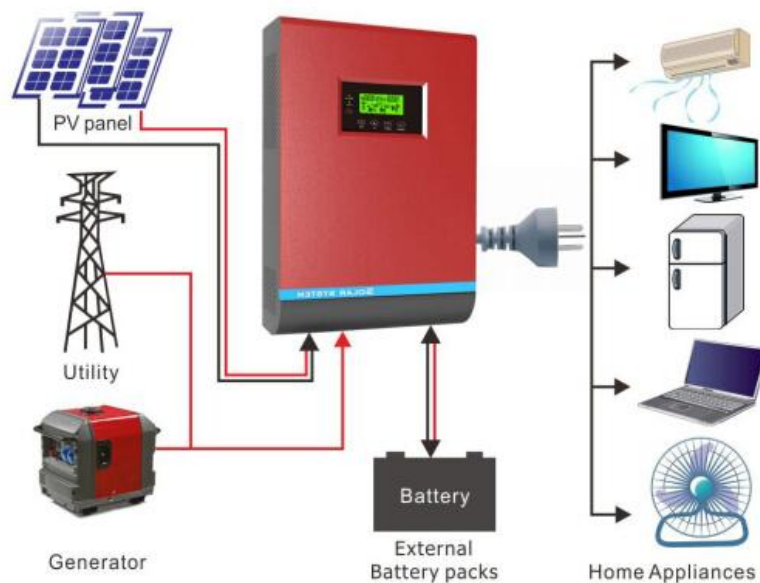


Εικόνα 6.46 - Wattmeter XWM1.

Σύμφωνα με την προσομοίωση, το παραπάνω κύκλωμα δίνει 9.600kW, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.46.

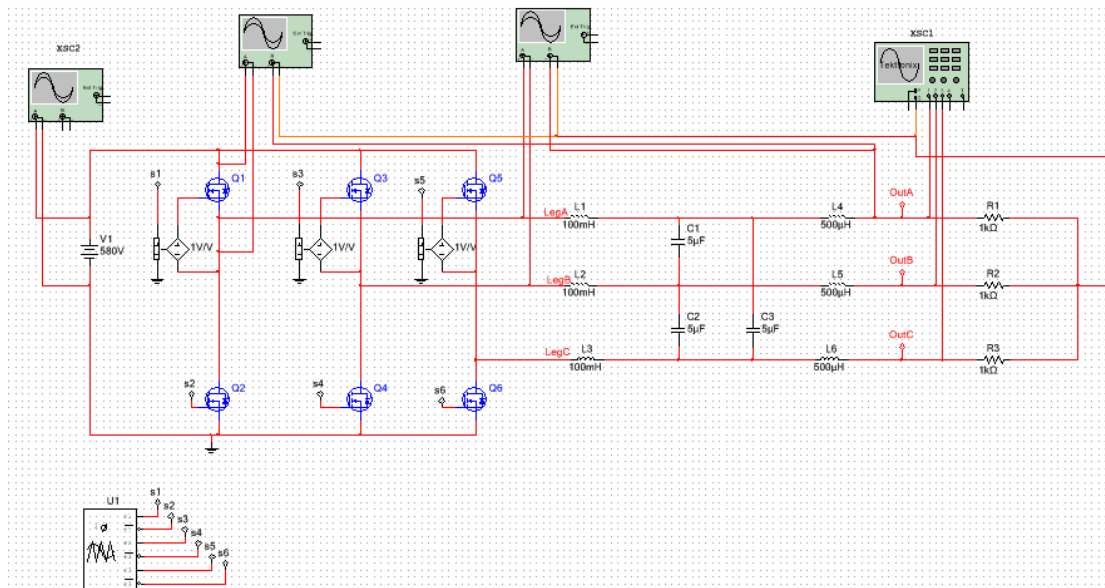
6.4 Μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το ρεύμα που φτάνει στα σπίτια μας, στα κτήρια και γενικά το ρεύμα που χρησιμοποιούμε είναι εναλλασσόμενο, όμως το ρεύμα που παίρνουμε από τα πάνελ είναι συνεχές.



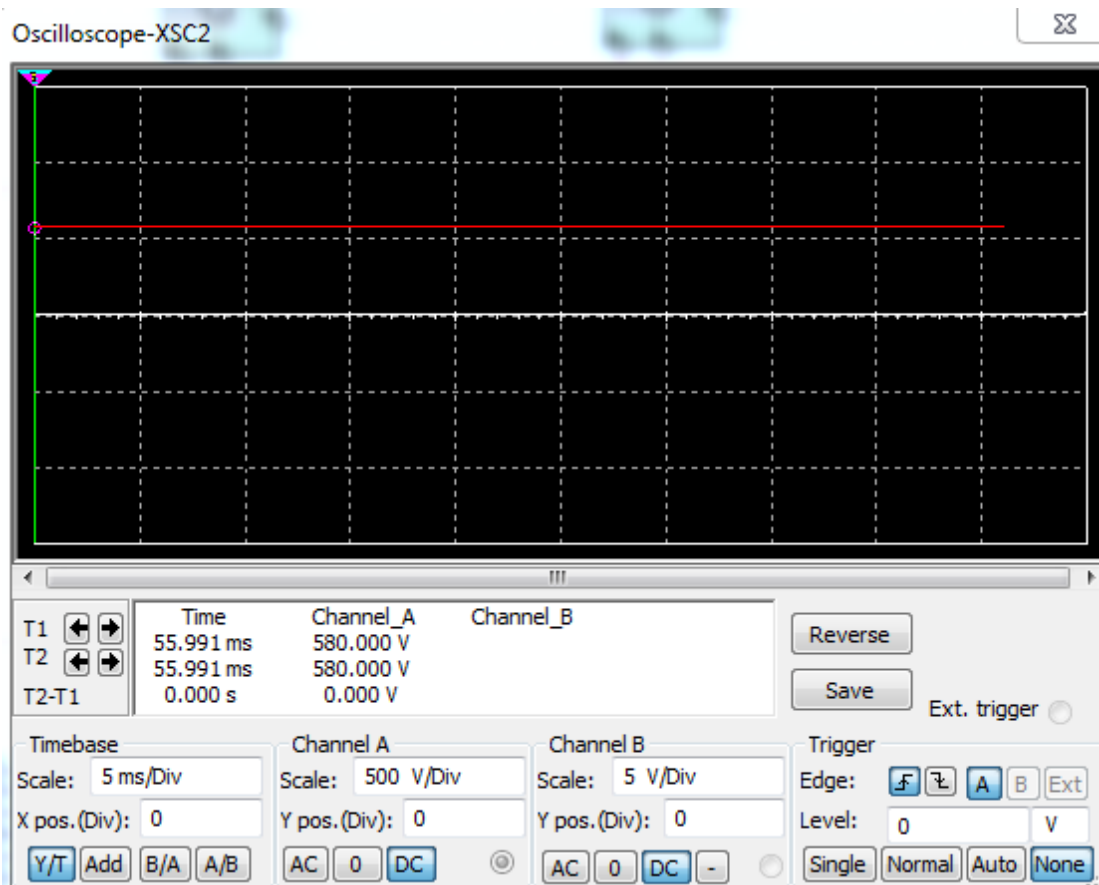
Εικόνα 6.47 - Το ηλεκτρολογικό σύστημα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε το ρεύμα που παράγεται θα πρέπει να το μετατρέψουμε σε εναλλασσόμενο. Η μετατροπή γίνεται με τη χρήση του παρακάτω κυκλώματος.



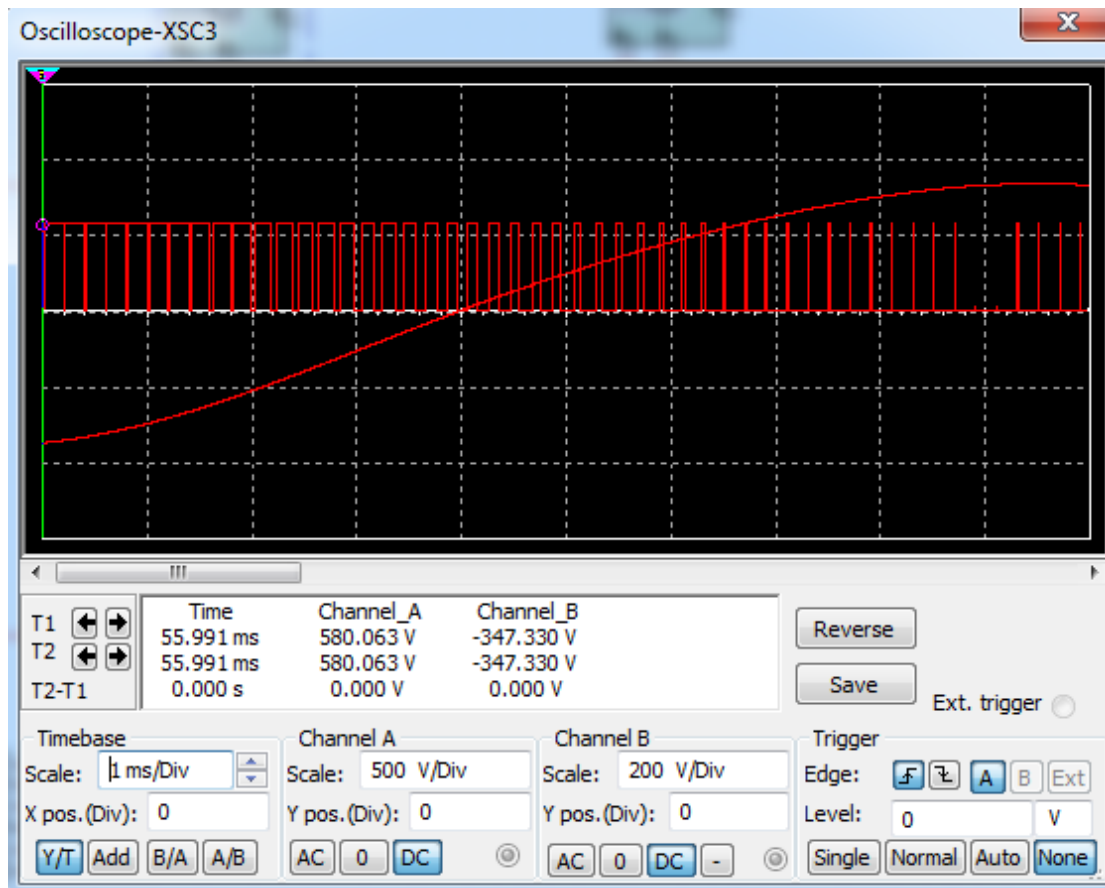
Εικόνα 6.48 - Κύκλωμα inverter.

Το κύκλωμα έχει μία είσοδο 580V η οποία τιμή προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ της προηγούμενης σύνδεσης. Στη συνέχεια υπάρχουν 6 τρανζίστορ τα οποία αποτελούν τον αντιστροφέα. Στην είσοδο του αντιστροφέα έχουμε συνεχές ρεύμα ενώ κατά την έξοδο το ρεύμα έχει μετατραπεί σε εναλλασσόμενο.



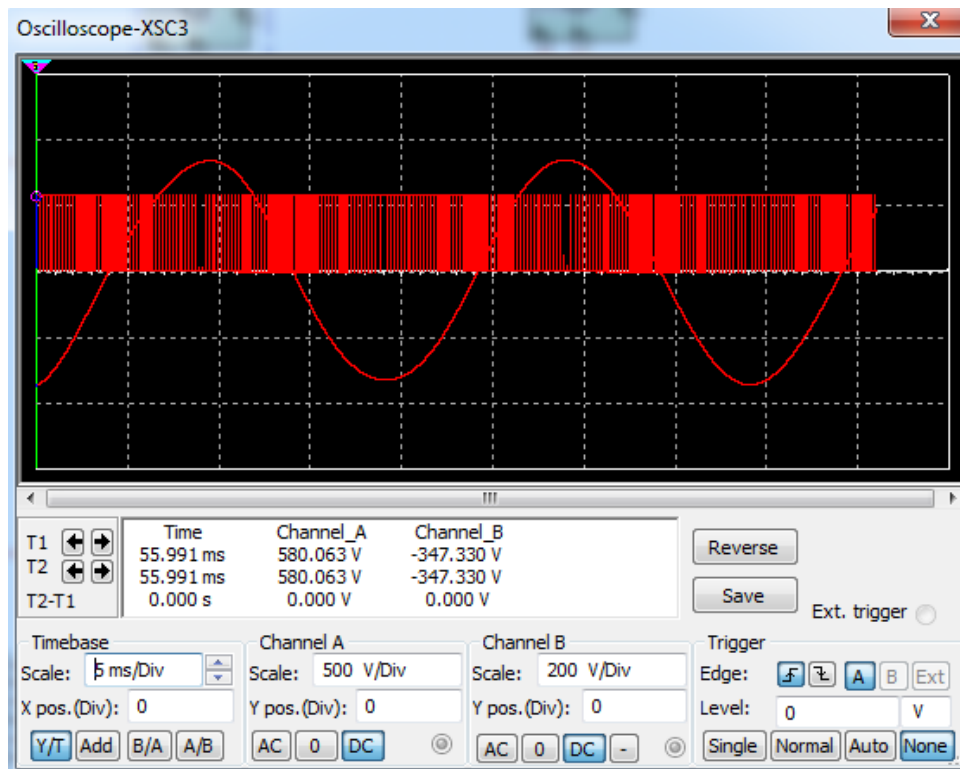
Εικόνα 6.49 - Oscilloscope XSC2.

Στην Εικόνα 6.49 είναι ο παλμογράφος που είναι τοποθετημένος στα άκρα της πηγής από τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Η γραφική παράσταση είναι ευθεία γραμμή, διότι όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, το ρεύμα που προέρχεται από τα πάνελ είναι συνεχής τάσης.



Εικόνα 6.50 - Oscilloscope XSC3.

Ο παραπάνω παλμογράφος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος στα άκρα του αντιστροφέα, δείχνει τους παλμούς που δημιουργούνται ακριβώς μετά από τον αντιστροφέα.



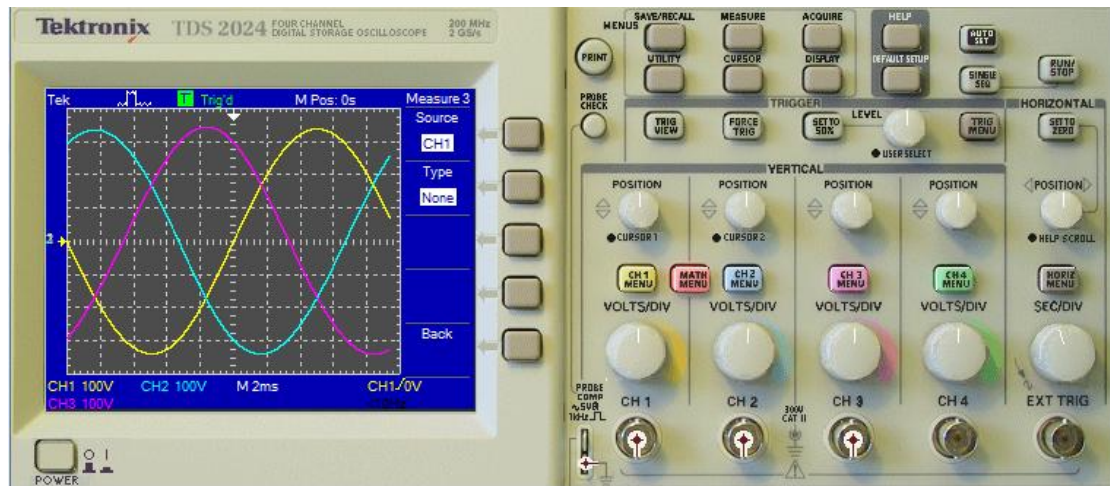
Εικόνα 6.51 - Oscilloscope XSC3.

Στα άκρα των πηνίων είναι συνδεδεμένος ακόμη ένας παλμογράφος. Στην Εικόνα 6.51 φαίνεται η παράσταση των παλμών σε σχέση με την κυματομορφή.



Εικόνα 6.52 - Oscilloscope XSC4.

Στην πιο πάνω εικόνα παρατηρούμε ότι οι παλμοί βρίσκονται μία από την πάνω πλευρά και μία από την κάτω. Αυτή είναι η πολική τάση και είναι ακριβώς μετά από την έξοδο του αντιστροφέα.



Εικόνα 6.53 - Παράσταση τριών φάσεων.

Τέλος στην Εικόνα 6.53, απεικονίζονται οι παραστάσεις και των τριών φάσεων του κυκλώματος που προσομοιώσαμε.

7 Παραρτήματα

NDF10N60Z, NDP10N60Z

N-Channel Power MOSFET 600 V, 0.75 Ω

Features

- Low ON Resistance
- Low Gate Charge
- ESD Diode-Protected Gate
- 100% Avalanche Tested
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free/BFR Free and are RoHS Compliant

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_C = 25°C unless otherwise noted)

Rating	Symbol	NDF	NDP	Unit
Drain-to-Source Voltage	V _{DSS}	600		V
Continuous Drain Current, R _{θJC} (Note 1)	I _D	10		A
Continuous Drain Current T _A = 100°C, R _{θJC} (Note 1)	I _D	6.0		A
Pulsed Drain Current, t _p = 10 μs	I _{DM}	40		A
Power Dissipation, R _{θJC}	P _D	39	178	W
Gate-to-Source Voltage	V _{GS}	±30		V
Single Pulse Avalanche Energy, L = 6.0 mH, I _D = 10 A	E _{AS}	300		mJ
ESD (HBM) (JESD22-A114)	V _{ESD}	3900		V
RMS Isolation Voltage (t = 0.3 sec., R.H. ≤ 30%, T _A = 25°C) (Figure 13)	V _{ISO}	4500		V
Peak Diode Recovery (Note 2)	dv/dt	4.5		V/ns
Continuous Source Current (Body Diode)	I _S	10		A
Maximum Temperature for Soldering Leads	T _L	260		°C
Operating Junction and Storage Temperature Range	T _J , T _{stg}	-55 to 150		°C

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

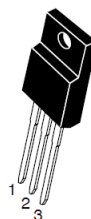
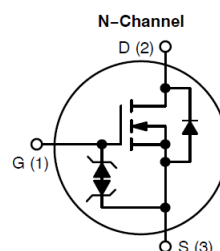
1. Limited by maximum junction temperature
2. I_S ≤ 10 A, di/dt ≤ 200 A/μs, V_{DD} = 80% BV_{DSS}



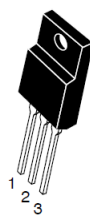
ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

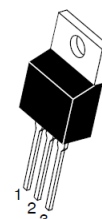
V _{DSS}	R _{DS(ON)} (MAX) @ 5 A
600 V	0.75 Ω



NDF10N60ZG
TO-220FP
CASE 221D



NDF10N60ZH
TO-220FP
CASE 221AH



NDP10N60ZG
TO-220AB
CASE 221A

ORDERING AND MARKING INFORMATION

See detailed ordering, marking and shipping information in the package dimensions section on page 6 of this data sheet.

NDF10N60Z, NDP10N60Z

THERMAL RESISTANCE

Parameter	Symbol	NDF10N60Z	NDP10N60Z	Unit
Junction-to-Case (Drain)	$R_{\theta JC}$	3.2	0.7	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
Junction-to-Ambient Steady State (Note 3)	$R_{\theta JA}$	50	50	

3. Insertion mounted

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_J = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Test Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
----------------	-----------------	--------	-----	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Drain-to-Source Breakdown Voltage	$V_{GS} = 0\text{ V}, I_D = 1\text{ mA}$	BV_{DSS}	600			V
Breakdown Voltage Temperature Coefficient	Reference to 25°C , $I_D = 1\text{ mA}$	$\Delta BV_{DSS}/\Delta T_J$		0.6		$\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Drain-to-Source Leakage Current	$V_{DS} = 600\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V}$	I_{DSS}	25°C		1	μA
			150°C		50	
Gate-to-Source Forward Leakage	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	I_{GSS}			± 10	μA

ON CHARACTERISTICS (Note 4)

Static Drain-to-Source On-Resistance	$V_{GS} = 10\text{ V}, I_D = 5.0\text{ A}$	$R_{DS(on)}$		0.65	0.75	Ω
Gate Threshold Voltage	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 100\ \mu\text{A}$	$V_{GS(th)}$	3.0		4.5	V
Forward Transconductance	$V_{DS} = 15\text{ V}, I_D = 10\text{ A}$	g_{FS}		7.9		S

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Input Capacitance	$V_{DS} = 25\text{ V}, V_{GS} = 0\text{ V},$ $f = 1.0\text{ MHz}$	C_{iss}		1425		pF
Output Capacitance		C_{oss}		150		
Reverse Transfer Capacitance		C_{rss}		35		
Total Gate Charge	$V_{DD} = 300\text{ V}, I_D = 10\text{ A},$ $V_{GS} = 10\text{ V}$	Q_g		47		nC
Gate-to-Source Charge		Q_{gs}		9.0		
Gate-to-Drain ("Miller") Charge		Q_{gd}		26		
Gate Resistance		R_g		1.5		

RESISTIVE SWITCHING CHARACTERISTICS

Turn-On Delay Time	$V_{DD} = 300\text{ V}, I_D = 10\text{ A},$ $V_{GS} = 10\text{ V}, R_G = 5\ \Omega$	$t_{d(on)}$		15		ns
Rise Time		t_r		31		
Turn-Off Delay Time		$t_{d(off)}$		40		
Fall Time		t_f		23		

SOURCE-DRAIN DIODE CHARACTERISTICS ($T_C = 25^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted)

Diode Forward Voltage	$I_S = 10\text{ A}, V_{GS} = 0\text{ V}$	V_{SD}			1.6	V
Reverse Recovery Time	$V_{GS} = 0\text{ V}, V_{DD} = 30\text{ V}$ $I_S = 10\text{ A}, di/dt = 100\text{ A}/\mu\text{s}$	t_{rr}		395		ns
Reverse Recovery Charge		Q_{rr}		3.0		μC

4. Pulse Width $\leq 380\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$.

NDF10N60Z, NDP10N60Z

TYPICAL CHARACTERISTICS

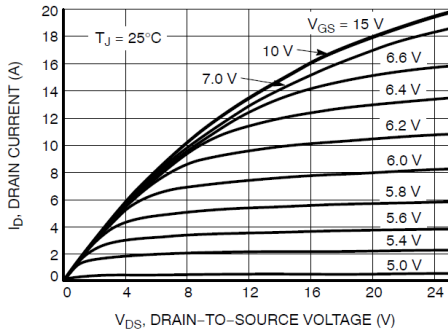


Figure 1. On-Region Characteristics

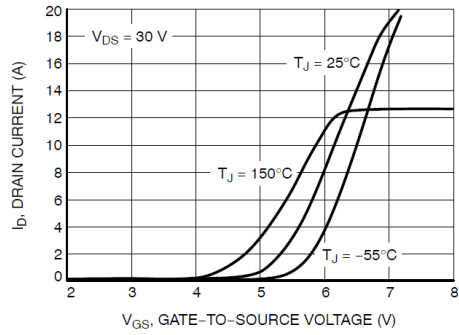


Figure 2. Transfer Characteristics

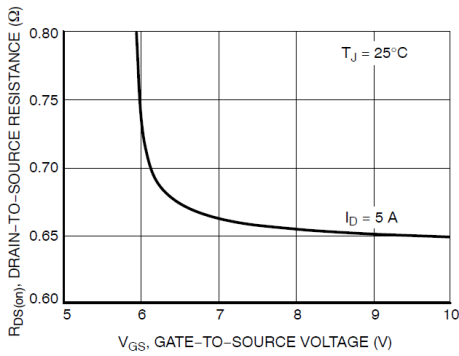


Figure 3. On-Resistance vs. Gate Voltage

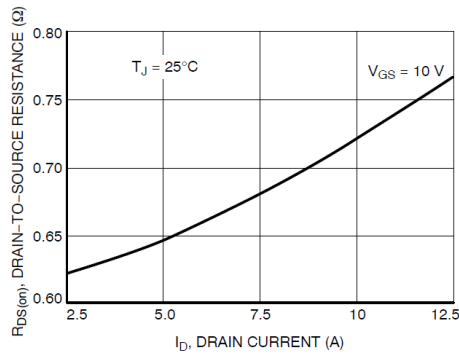


Figure 4. On-Resistance vs. Drain Current and Gate Voltage

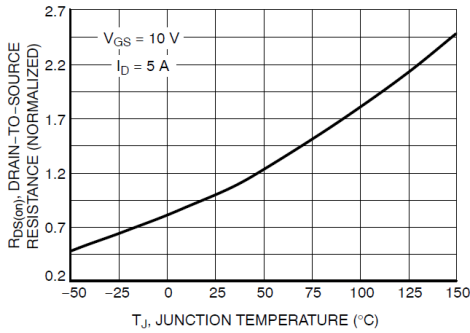


Figure 5. On-Resistance Variation with Temperature

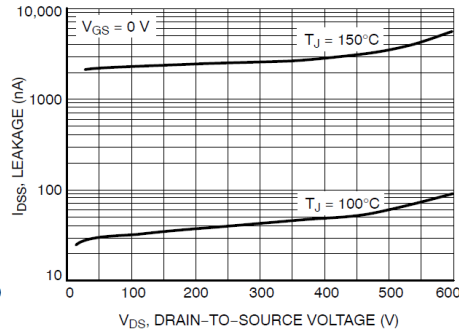


Figure 6. Drain-to-Source Leakage Current vs. Voltage

NDF10N60Z, NDP10N60Z

TYPICAL CHARACTERISTICS

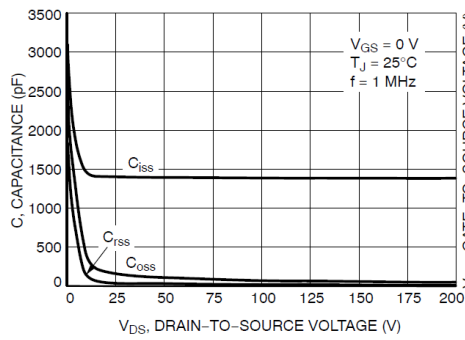


Figure 7. Capacitance Variation

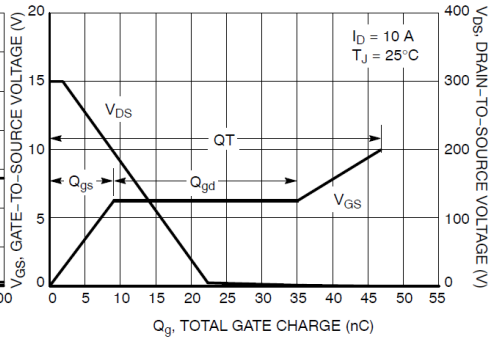


Figure 8. Gate-to-Source and Drain-to-Source Voltage vs. Total Charge

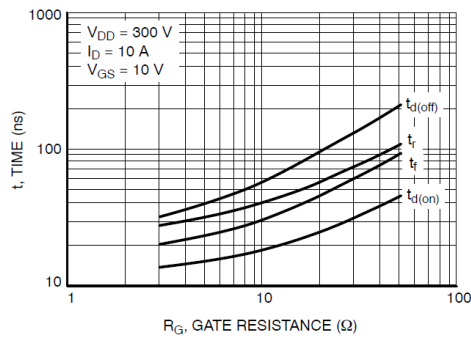


Figure 9. Resistive Switching Time Variation vs. Gate Resistance

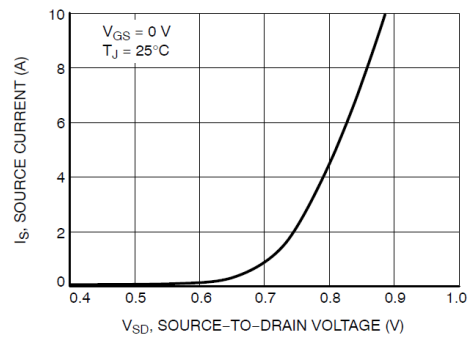


Figure 10. Diode Source Current vs. Forward Voltage

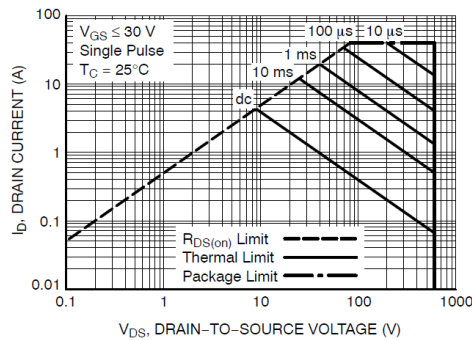


Figure 11. Maximum Rated Forward Biased Safe Operating Area for NDF10N60Z

NDF10N60Z, NDP10N60Z

TYPICAL CHARACTERISTICS

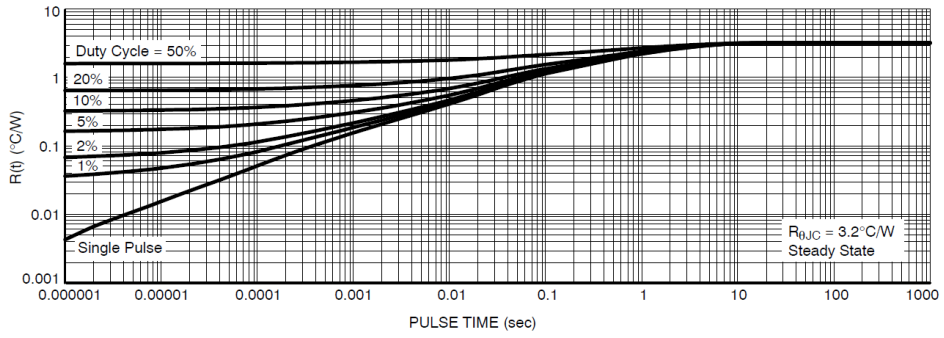


Figure 12. Thermal Impedance for NDF10N60Z

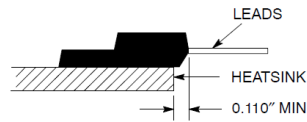


Figure 13. Mounting Position for Isolation Test

Measurement made between leads and heatsink with all leads shorted together.

*For additional mounting information, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

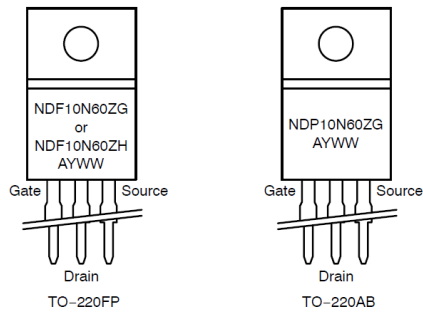
NDF10N60Z, NDP10N60Z

ORDERING INFORMATION

Order Number	Package	Shipping [†]
NDF10N60ZG	TO-220FP (Pb-Free, Halogen-Free)	50 Units / Rail
NDF10N60ZH	TO-220FP (Halogen-Free)	50 Units / Rail
NDP10N60ZG	TO-220AB (Pb-Free)	50 Units / Rail (In Development)

[†]For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

MARKING DIAGRAMS

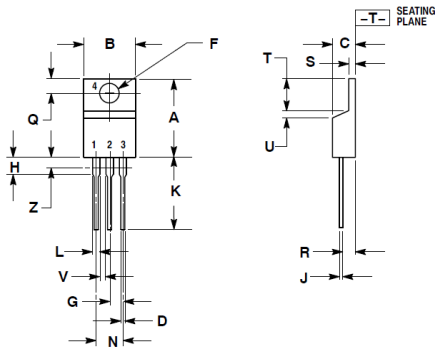


A = Location Code
 Y = Year
 WW = Work Week
 G, H = Pb-Free, Halogen-Free Package

NDF10N60Z, NDP10N60Z

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220AB
CASE 221A-09
ISSUE AF

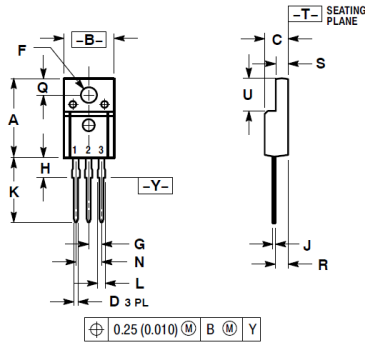


- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION Z DEFINES A ZONE WHERE ALL BODY AND LEAD IRREGULARITIES ARE ALLOWED.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.570	0.620	14.49	15.75
B	0.580	0.405	9.66	10.28
C	0.160	0.190	4.07	4.82
D	0.025	0.035	0.64	0.88
F	0.142	0.161	3.61	4.09
G	0.095	0.105	2.42	2.66
H	0.110	0.155	2.80	3.93
J	0.014	0.025	0.36	0.64
K	0.500	0.562	12.70	14.27
L	0.045	0.060	1.15	1.52
N	0.190	0.210	4.83	5.33
Q	0.100	0.120	2.54	3.04
R	0.080	0.110	2.04	2.79
S	0.045	0.055	1.15	1.39
T	0.235	0.255	5.97	6.47
U	0.000	0.050	0.00	1.27
V	0.045	---	1.15	---
Z	---	0.080	---	2.04

- STYLE 5:
PIN 1: GATE
2: DRAIN
3: SOURCE
4: DRAIN

TO-220 FULLPAK
CASE 221D-03
ISSUE K



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. 221D-01 THRU 221D-02 OBSOLETE, NEW STANDARD 221D-03.

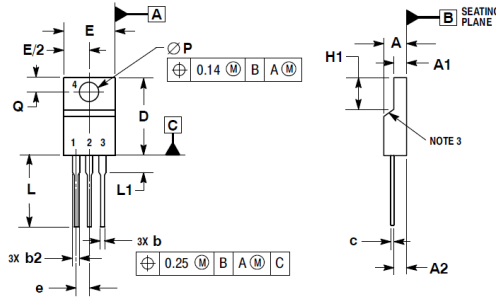
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.617	0.635	15.67	16.12
B	0.392	0.419	9.96	10.63
C	0.177	0.193	4.50	4.90
D	0.024	0.039	0.60	1.00
F	0.116	0.129	2.95	3.28
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.118	0.135	3.00	3.43
J	0.018	0.025	0.45	0.63
K	0.503	0.541	12.78	13.73
L	0.048	0.058	1.23	1.47
N	0.200 BSC		5.08 BSC	
Q	0.122	0.138	3.10	3.50
R	0.099	0.117	2.51	2.96
S	0.092	0.113	2.34	2.87
U	0.239	0.271	6.06	6.88

- STYLE 1:
PIN 1: GATE
2: DRAIN
3: SOURCE

NDF10N60Z, NDP10N60Z

PACKAGE DIMENSIONS

TO-220 FULLPAK, 3-LEAD
CASE 221AH-01
ISSUE O



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
 2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETERS.
 3. CONTOUR UNCONTROLLED IN THIS AREA.
 4. DIMENSIONS D AND E DO NOT INCLUDE MOLD FLASH AND GATE PROTRUSIONS. MOLD FLASH AND GATE PROTRUSIONS NOT TO EXCEED 0.13 PER SIDE. THESE DIMENSIONS ARE TO BE MEASURED AT OUTERMOST EXTREME OF THE PLASTIC BODY.
 5. DIMENSION b2 DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. LEAD WIDTH INCLUDING PROTRUSION SHALL NOT EXCEED 2.00.

DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	4.30	4.70
A1	2.50	2.90
A2	2.50	2.70
b	0.54	0.84
b2	1.10	1.40
c	0.49	0.79
D	14.22	15.88
E	9.65	10.67
e	2.54 BSC	
H1	5.97	6.48
L	12.70	14.73
L1	---	2.80
P	3.00	3.40
Q	2.80	3.20

ON Semiconductor and are registered trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:
Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5773-3850

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com
Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>
For additional information, please contact your local Sales Representative

NDF10N60Z/D

Ultrafast Recovery Rectifier

MUR3060

FEATURES

- Ultrafast Recovery Time
- Low Forward Voltage
- Low Leakage Current
- 175°C Operating Junction Temperature
- High Temperature Glass Passivated Junction

MECHANICAL CHARACTERISTICS

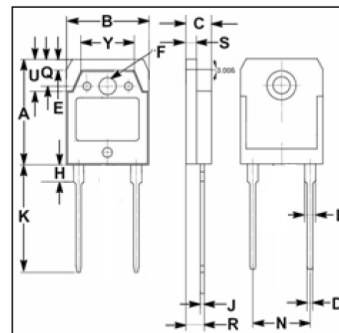
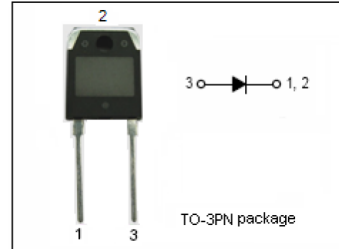
- Case: Epoxy, Molded
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds

APPLICATIONS

- Designed for use in switching power supplies, inverters and as free wheeling diodes.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(T_a=25°C)

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
V _{RRM} V _{RWM} V _R	Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	600	V
I _{F(AV)}	Average Rectified Forward Current (Rated V _R)	30	A
I _{FRM}	Peak Repetitive Forward Current (Rated V _R , Square Wave, 20kHz)	30	A
I _{FSM}	Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions half-wave, single phase, 60Hz)	300	A
T _J	Junction Temperature	-65~175	°C
T _{stg}	Storage Temperature Range	-65~175	°C



DIM	mm	
	MIN	MAX
A	19.90	20.10
B	15.38	15.42
C	4.75	4.85
D	0.90	1.10
E	1.90	2.10
F	3.40	3.60
H	3.20	3.40
J	0.595	0.605
K	19.95	20.25
L	1.98	2.02
N	10.89	10.91
Q	4.95	5.05
R	3.35	3.45
S	1.995	2.005
U	5.90	6.10
Y	9.90	10.10

Ultrafast Recovery Rectifier**MUR3060****THERMAL CHARACTERISTICS**

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
R_{thj-c}	Thermal Resistance, Junction to Case	1.0	$^{\circ}C/W$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS($T_a=25^{\circ}C$) (Pulse Test: Pulse Width=300 μ s, Duty Cycle \leq 2%)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MAX	UNIT
V_F	Maximum Instantaneous Forward Voltage	$I_F=30A$	1.68	V
I_R	Maximum Instantaneous Reverse Current	$V_{RRM}=600V$	20	μ A
t_{rr}	Maximum Reverse Recovery Time	$I_F=0.5A, I_R=1A, I_{rr}=0.25A$	80	ns

8 Επίλογος

Τα τελευταία χρόνια, οι άνθρωποι έχουν στρέψει την προσοχή τους στην μελέτη και την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η συγκεκριμένη εργασία στηρίζεται κυρίως στην ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο, γνωστή ως ηλιακή ενέργεια, στον τρόπο εκμετάλλευσής της με τη χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και στη μετατροπή από ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια για διάφορες χρήσεις.

Η παρούσα μελέτη αφορά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων πάνω σε στέγη οικίας. Αρχικά έγινε προσομοίωση με 40 φωτοβολταϊκά πάνελ των 24V τα οποία είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους. Μία δεύτερη προσομοίωση έγινε με 4 σειρές που η κάθε μία είχε συνδεδεμένα 10 φωτοβολταϊκά πάνελ των 24V. Και στις δύο περιπτώσεις πήραμε τιμές και στη συνέχεια έγιναν οι παραστάσεις καταλήγοντας πως η δεύτερη περίπτωση είναι αυτή που χρησιμοποιείται στην πραγματικότητα για τη συνδεσμολογία των φωτοβολταϊκών σε στέγη.

Στη δεύτερη περίπτωση αφού πήραμε τις μετρήσεις για το ρεύμα και την τάση, στη συνέχεια συνδέσαμε το κύκλωμα του inverter και μέσω των παλμογράφων παρουσιάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις στα σημεία που είναι συνδεδεμένοι. Έτσι, μέσω των παραστάσεων είδαμε πώς οι παλμοί γίνονται κυματομορφή, δηλαδή πως το ρεύμα από συνεχές μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο.

9 Βιβλιογραφία

1. S. J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC*: 2η έκδοση, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., 1991.
2. N. Mohan, T. Underland, and W. Robbins, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*: 2η έκδοση, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., 1995.
3. Basic electrical power and machines, David Bradley, Chapman & Hall, 1994
4. <http://www.sopray-solar.gr/fotovoltaika-p-1.html>
5. <http://roscovnicoff.blogspot.gr/2010/10/blog-post.html>
6. <http://www.rescompass.org/greek,79/80,80/91,91.html>
7. Antonia V. Herzog, Timothy E. Lipman, and Daniel M. Kammen, "Renewable Energy Sources," University of California, Berkeley, USA, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) Forerunner Volume "Perspectives and Overview of Life Support Systems and Sustainable Development," Part 4C, 2001.
8. Dawn Stover. (2011). The myth of renewable energy. Available: <http://thebulletin.org/myth-renewable-energy>
9. S. Kalogirou, *Solar energy engineering : processes and systems*. Amsterdam ; London: Elsevier/Academic Press, 2009.
10. N. Mohan, *Electric machines and drives : a first course*. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.
11. T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 6th ed., International ed. ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education International, 2006.
12. D. Kalpaktsoglou. (2009). Power factor correction for stand-alone wave energy conversion buoys [electronic resource].
13. G. G. Karady, T. H. Ortmeier, B. R. Pilvelait, and D. Maratukulam, "Continuously regulated series capacitor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1348-1355, 1993.
14. M. H. Rashid, *Power electronics : circuits, devices and applications*, 3rd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2004.