



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος στην Παραγωγή και
Μεταφορά της Ηλεκτρικής Ενέργειας**
**(Applications of Power Electronics in the Generation and Distribution of
Electricity)**

Πτυχιακή Εργασία:

ΒΗΣΣΑΡΙΩΝ ΚΟΝΤΟΓΩΝΗΣ (38494)

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ (38298)

Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Λέκτορας

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2018

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| Εισαγωγή – Πρόλογος | 5 |
| 1. Σημερινή τεχνολογική κατάσταση των ηλεκτρονικών ισχύος | 6 |
| 1.1.Εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος | 6 |
| 1.2.Τα είδη των ηλεκτρονικών ισχύος | 8 |
| 1.2.1. Ημιαγωγό στοιχείο πυρίτιο (Si) | 8 |
| 1.2.2. Δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p και τύπου -n | 10 |
| 1.2.3. Δίοδος (επαφή-pn) | 11 |
| 1.2.4. Διπολικό τρανζίστορ (BJT – Bipolar Junction Transistor) | 14 |
| 1.2.5. Τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Τρανζίστορ MOS-FET) | 17 |
| 1.2.6. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) | 19 |
| 1.2.7. Θυρίστορ (thyristor) | 20 |
| 1.2.8. GTO (Gate Turn-off) | 24 |
| 1.2.9. Αμφίδρομο τριαδικό θυρίστορ (Triac) | 26 |
| 1.3.Εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος | 30 |
| 1.4.Είδη μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας | 32 |
| 2. Ανεμογεννήτριες | 37 |
| 2.1.Αιολική ενέργεια | 37 |
| 2.2.Εφαρμογές ηλεκτρονικών δικτύων σε ανεμογεννήτριες | 38 |
| 2.2.1. Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών | 38 |
| 2.2.2. Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών | 38 |
| 2.2.3. Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού | 39 |
| 2.2.4. Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα | 42 |
| 2.2.5. Σύγχρονη γεννήτρια | 43 |
| 2.3.Διασύνδεση ανεμογεννητριών με το δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος | 45 |
| 2.4.Διασύνδεση αιολικών πάρκων μεγάλης ισχύος | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 3. Φωτοβολταϊκά Συστήματα | 50 |
| 3.1. Γενικά | 50 |
| 3.2. Κατηγορίες φωτοβολταϊκών κυττάρων | 51 |
| 3.3. Φωτοβολταϊκά Πλαίσια | 51 |
| 3.3.1. Τεχνολογίες οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων | 52 |
| 3.4. Κατηγοριοποίηση μετατροπέων | 56 |
| 3.5. Σφαιρική προσέγγιση του βαθμού απόδοσης ενός αντιστροφέα | 58 |
| 3.6. Επιδράσεις από την ενωμάτωση των μετατροπέων στα Φ/Β πλαίσια | 59 |
| 4. Ηλεκτρικές γεννήτριες | 61 |
| 4.1. Διέγερση σύγχρονης γεννήτριας | 61 |
| 4.2. Βασική δομή του πλήρους ηλεκτροκινητηρίου συστήματος | 62 |
| 4.2.1. Κύκλωμα ισχύος | 64 |
| 4.2.2. Κύκλωμα μέτρησης ρευμάτων | 66 |
| 4.2.3. Κύκλωμα μέτρησης τάσεων | 66 |
| 4.2.4. Κύκλωμα μέτρησης στροφών | 66 |
| 4.2.5. Κύκλωμα διαμόρφωσης | 67 |
| 4.2.6. Κύκλωμα κύριου μικροεπεξεργαστή | 67 |
| 4.2.7. Κύκλωμα ενύσχισης παλμών | 67 |
| 4.2.8. Κύκλωμα απομακυσμένης λειτουργίας | 68 |
| 4.2.9. Κύκλωμα τροφοδοτικών | 68 |
| 4.3. Τεχνική ελέγχου της ολοκληρωμένης διάταξης | 69 |
| 4.3.1. Φιλοσοφία της τεχνικής μέτρησης της τάσης στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας | 69 |
| 4.3.2. Φιλοσοφία της τεχνικής ελέγχου του κυκλώματος ισχύος | 70 |
| 4.3.3. Φιλοσοφία υπολογισμού του επιθυμητού ρεύματος διέγερσης | 71 |
| 4.3.4. Επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου | 72 |
| 4.3.5. Πλήρες διάγραμμα ροής της τεχνικής ελέγχου | 73 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Εφαρμογή ηλεκτρικών ισχύος στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας | 74 |
| 5.1. Γενικά | 74 |
| 5.2.Μετατροπή AC ηλεκτρικής ενέργειας σε DC | 76 |
| 5.2.1. Ιδανική λειτουργία της Ανορθωτικής Διάταξης | 77 |
| 5.3.Τρόποι διασύνδεσης ανορθωτικών διατάξεων | 83 |
| 5.3.1. Μονοπολική διασύνδεση | 84 |
| 5.3.2. Ομοπολική διασύνδεση | 87 |
| 5.3.3. Σταθμοί μετατροπής ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ | 88 |
| 5.3.4. Διασυνδέσεις με πολλούς σταθμούς μετατροπής | 89 |
| 5.3.5. Μικρές ενδιάμεσες λήψεις | 91 |
| 5.4.Μη ιδανική λειτουργία της ανορθωτικής διάταξης (φαινόμενο μετάβασης) | 93 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 94 |

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πτυχιακή εργασία με τίτλο “Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος στην Παραγωγή και Μεταφορά της Ηλεκτρικής Ενέργειας” έχει σκοπό να αναλύσει πως συμβάλουν τα ηλεκτρονικά ισχύος στην παραγωγή και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραπάνω πτυχιακή για πρακτικούς λόγους αλλά και για την καλύτερη εκπόνηση της διαχωρίστηκε σε πέντε επιμέρους κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση όλων των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και των μετατροπών ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο δεύτερο και στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών καθώς και η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος σε αυτά.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύουμε τη λειτουργία μιας γεννήτριας, και τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με την εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

1.1 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Πριν από οποιαδήποτε αναφορά στην επιστήμη και την τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Ισχύος είναι σκόπιμο να διευκρινισθούν ορισμένες θεμελιακές έννοιες. Γενικά με τον όρο «ηλεκτρονικά» εννοούμε τα ηλεκτρονικά δομικά στοιχεία και τις συσκευές που στηρίζονται στις ιδιότητες των ημιαγωγικών υλικών, τα οποία, από την άποψη των δυνατοτήτων δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος, βρίσκονται μεταξύ των μεταλλικών αγωγών και των μονωτικών υλικών.

Οι ημιαγωγοί διακρίνονται από τα αγωγά μέταλλα ως προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα, η οποία είναι πολύ μικρότερη εκείνης των μετάλλων, καθώς και ως προς τη χαρακτηριστική ιδιότητα ότι διαθέτουν φορείς αρνητικού και θετικού φορτίου, αλλά και τη δυνατότητα επηρεασμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η τιμή της αγωγιμότητας μπορεί να μεταβάλλεται εντός μίας ευρείας περιοχής. Με βάση αυτή τη δυνατότητα επιτυγχάνεται ο μηδενισμός του ρεύματος που ρέει μέσα στα ημιαγωγικά στοιχεία καθώς και η επιλογή ρεύματος μιας επιθυμητής τιμής, φθάνοντας μέχρι μία ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή. Η ελεγχσιμότητα της ροής του ρεύματος με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια αποτέλεσε την ιδιότητα κλειδί για την «επαναστατική» ηλεκτρονική τεχνολογία των τελευταίων δεκαετιών.

Η συνολική περιοχή των ηλεκτρονικών μπορεί να θεωρηθεί ως σύνθεση δύο μεγάλων υποπεριοχών, δηλ. της περιοχής των ηλεκτρονικών για την επεξεργασία πληροφοριών, όπου κυριαρχεί η απαίτηση να μην υπάρχουν απώλειες πληροφοριών, και της περιοχής των ηλεκτρονικών ισχύος για το μετασχηματισμό και τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη δεύτερη περιοχή κυρίαρχη απαίτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας και έτσι η επίτευξη υψηλού βαθμού απόδοσης, παρέχοντας με αξιοπιστία την εκάστοτε επιθυμητή ποσότητα ενέργειας. Η κατάταξη αυτή φαίνεται παραστατικά στο διάγραμμα του σχήματος 1.1, όπου διακρίνονται οι κατηγορίες των ιδιαίτερων γνωστικών περιοχών και αντικειμένων έρευνας και ανάπτυξης, που σχετίζονται με τα Ηλεκτρονικά Ισχύος.



Σχ. 1.1. Σχηματική παράσταση των περιοχών επιστήμης και τεχνολογίας

Σκοπός των Ηλεκτρονικών Ισχύος είναι ο μετασχηματισμός των κυματομορφών των ηλεκτρικών μεγεθών, όπως είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, ή αντίστροφα η μετατροπή συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη, μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή αυτής. Μέσω αυτών των μετατροπών επιτυγχάνεται η τροφοδοσία των διαφόρων ηλεκτρικών φορτίων π.χ. μηχανών συνεχούς ρεύματος, μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος κ.λ.π., όπου ιδιαίτερη σημασία έχει ο έλεγχος της ποσότητας ισχύος σε κάθε χρονική στιγμή ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του χρήστη, οι οποίες συνήθως είναι αρκετά πολύπλοκες. Επιπλέον, οι διαδικασίες μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών με ταυτόχρονη μετατροπή της ενέργειας, π. χ. από ηλεκτρική σε μηχανική, πρέπει να διεκπεραιώνεται γρήγορα, αξιόπιστα, με υψηλές τιμές του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος, καθώς και με μικρό κόστος. Στις εφαρμογές τα συστήματα με ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος εκτείνονται από την περιοχή των μικρών μεγεθών ισχύος (mW) μέχρι πολύ μεγάλες τιμές (τάξεως εκατοντάδων MW).

Πρέπει να επισημανθεί με ιδιαίτερη έμφαση, ότι οι διαδικασίες μετατροπών ενέργειας διεκπεραιώνονται από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος με τη βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων χαμηλής ισχύος, κυρίως δε μέσω μικροεπεξεργαστών και γενικά της ψηφιακής τεχνολογίας. Αυτό είναι αναγκαίο, διότι τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος στην ουσία είναι διακοπτικές μονάδες, των οποίων η διακοπτική λειτουργία διεκπεραιώνεται με εντολές προερχόμενες από ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα κατάλληλα προγραμματισμένα σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των φορτίων. Συνεπώς, η πρόοδος της επιστήμης και της τεχνολογίας των Ηλεκτρονικών Ισχύος καθορίζεται αφενός από τα επιτεύγματα στη δημιουργία νέων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος αφετέρου και από τις εξελίξεις στα ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος, π. χ. στη μικροηλεκτρονική.

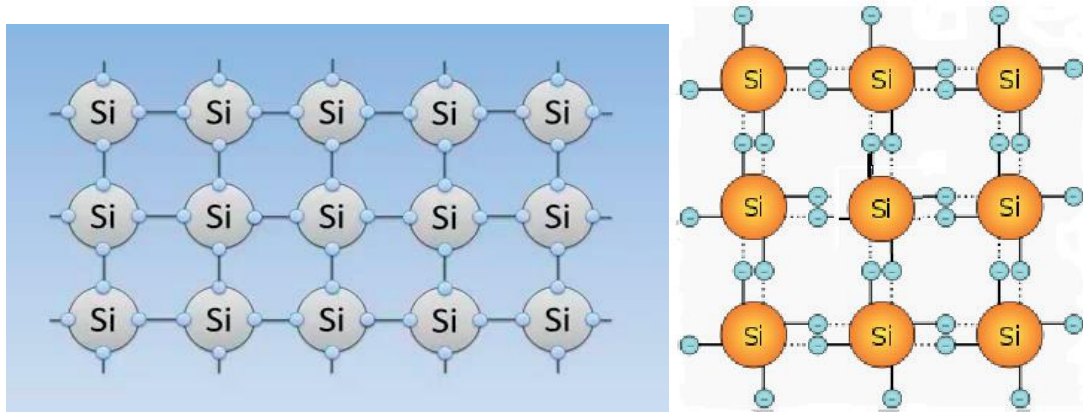
1.2 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

1.2.1 Ημιαγωγό στοιχείο πυρίτιο (Si)

Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία των ηλεκτρονικών ισχύος κατασκευάζονται από ημιαγωγά στοιχεία κυρίως από πυρίτιο (Si). Η δίοδος είναι το πιο απλό στοιχείο που έχει κατασκευαστεί από ημιαγωγό στοιχείο (πυρίτιο, Si). Παρακάτω, θα δώσουμε με απλό τρόπο τη λειτουργία της διόδου.

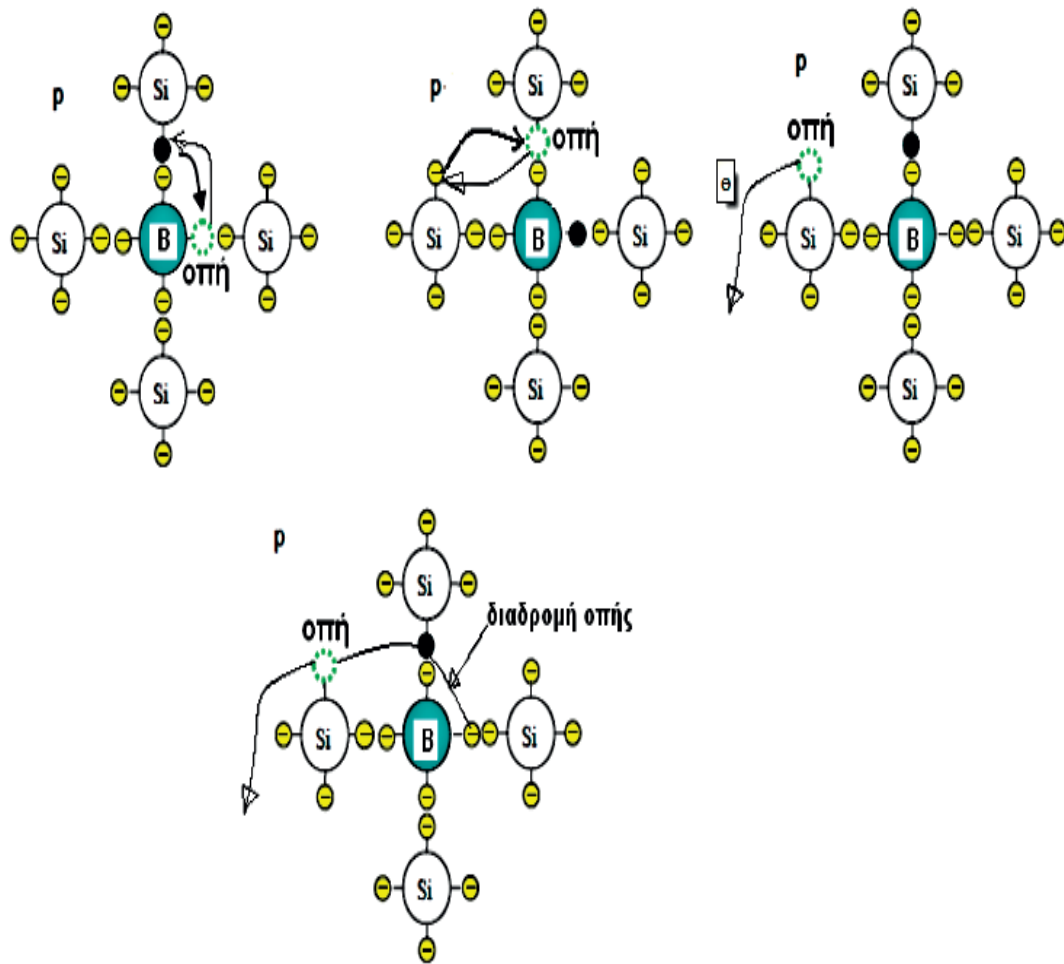
Μηχανισμός λειτουργίας επαφής p-n

Το ημιαγωγό στοιχείο που χρησιμοποιείται σήμερα στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι το πυρίτιο (Si), διότι αντέχει σε υψηλότερη θερμοκρασία ($\theta_{Jmax}=160^{\circ}C$) και διαθέτει μεγαλύτερη ενεργειακή ζώνη από το αντίστοιχο ημιαγωγό στοιχείο το γερμάνιο (Ge). Το πυρίτιο έχει τέσσερα (4) ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική στιβάδα. Συνεπώς, κάθε άτομο πυριτίου συνδέεται με τέσσερα (4) γειτονικά άτομα σχηματίζοντας, έτσι, ομοιοπολικούς δεσμούς (σχ. 1.4).



Σχ. 1.4: Κρυσταλλική δομή πυριτίου: δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων με θερμικό ιονισμό.

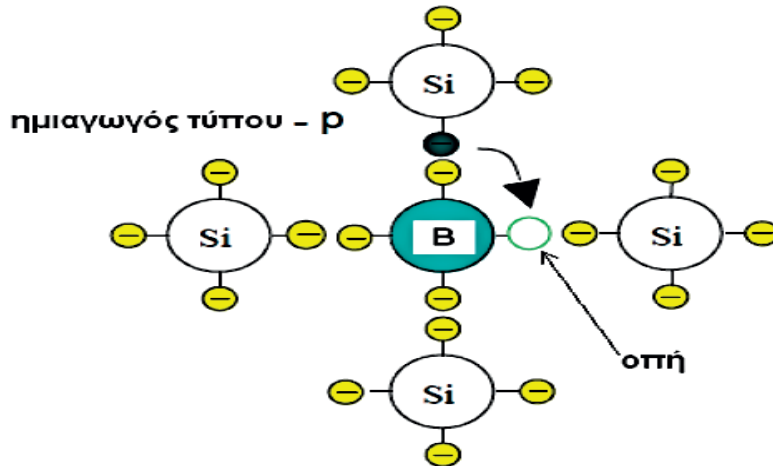
Όταν η θερμοκρασία του πυριτίου είναι μεγαλύτερη των 273K, τότε μερικά ηλεκτρόνια, λόγω της θερμικής τους ενέργειας, ξεφεύγουν από τον ομοιοπολικό δεσμό και κινούνται ελεύθερα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Την ίδια στιγμή, το άτομο, από το οποίο έφυγε ένα ηλεκτρόνιο, εμφανίζεται φορτισμένο θετικά. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται ιονισμός. Το θετικό φορτίο που δημιουργήθηκε ονομάζεται οπή. Εύλογο είναι ότι ο αριθμός των οπών ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων. Όταν ένα ηλεκτρόνιο φύγει από το άτομο και, κατά την κίνησή του, πέσει σε μια οπή, τότε λέμε ότι έχουμε κίνηση οπών (σχ. 1.5).



Σχ. 1.5: Κίνηση σπών σε ημιαγωγό

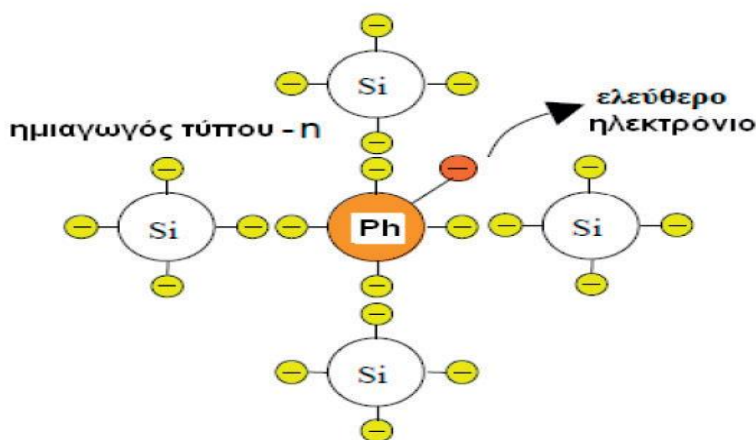
1.2.2 Δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p και τύπου -n

Εάν σ' έναν ημιαγωγό προσθέσουμε ένα τρισθενές στοιχείο, π.χ. βόριο, τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους ενώνονται με τα γειτονικά άτομα του πυριτίου και δημιουργείται μία οπή (σχ. 1.6). Εισάγοντας περισσότερα άτομα βορίου δημιουργούμε περισσότερες οπές και το ημιαγωγό υλικό εμφανίζει θετική συμπεριφορά. Ο ημιαγωγός λέμε, ότι είναι τύπου-p. Επειδή, όμως, οι οπές είναι περισσότερες από τα ηλεκτρόνια, λέμε ότι οι οπές είναι φορείς πλειονότητας.



Σχ. 1.6: Πρόσμιξη πυριτίου με δέκτες βορίου για δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p .

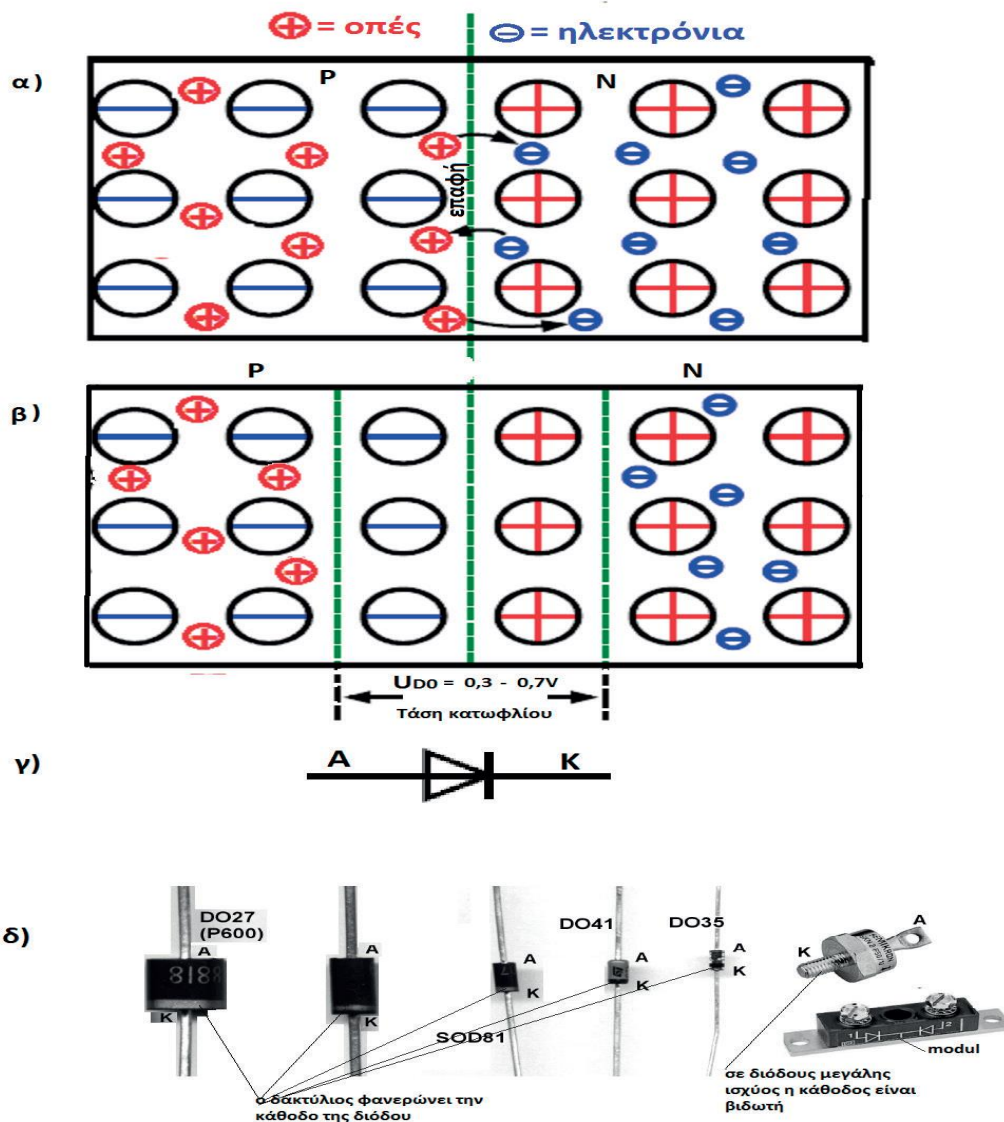
Αντίθετα, αν στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου εισάγουμε άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου, όπως λ.χ. ο φώσφορος (Ph), τότε τα τέσσερα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα αντίστοιχα γειτονικά άτομα του πυριτίου και περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο ελεύθερο. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούμε ημιαγωγά υλικά με περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια (φορείς πλειονότητας) από ότι οπές (φορείς μειονότητας). Το ημιαγωγό υλικό λέμε ότι είναι τύπου-n



Σχ. 1.7: Πρόσμιξη πυριτίου με φώσφορο για δημιουργία ημιαγωγού τύπου-n.

1.2.3 Δίοδος (επαφή-pn)

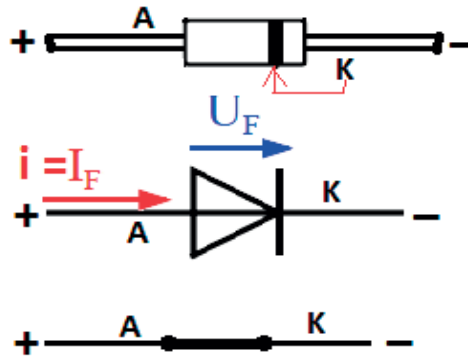
Εάν φέρουμε σ' επαφή ένα ημιαγωγό υλικό τύπου-p μ' ένα ημιαγωγό υλικό τύπου-n (σχ. 1.8), τότε δημιουργείται ένα σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρονικών γενικότερα. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται δίοδος. (σχ.1.8)



Σχ. 1.8: Δομή και σύμβολο δίοδου
α) και β) επαφή-pn γ) σύμβολο δίοδου δ) εμπορική μορφή της δίοδου

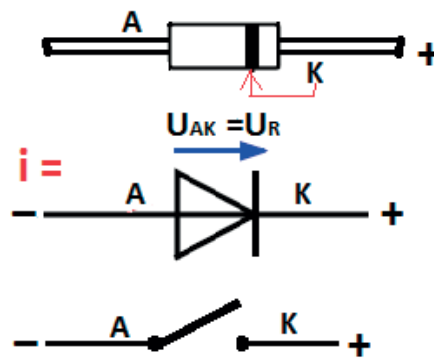
Σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να γνωρίζουμε για τη δίοδο:

- Αποτελείται από δύο ζώνες ημιαγωγού υλικού, τύπου-p και τύπου-n.
- Διαθέτει δύο ακροδέκτες: την άνοδο (A), που βρίσκεται στη ζώνη-p, και την κάθοδο (K), που βρίσκεται στη ζώνη-n.
- Λειτουργεί σαν ένας μη ελεγχόμενος διακόπτης.
- Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, δηλαδή θετική άνοδος και αρνητική κάθοδος και η τάση είναι $U_F \leq 0,7V$, τότε συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης και άγει. Δηλαδή: (σχ.1.9)



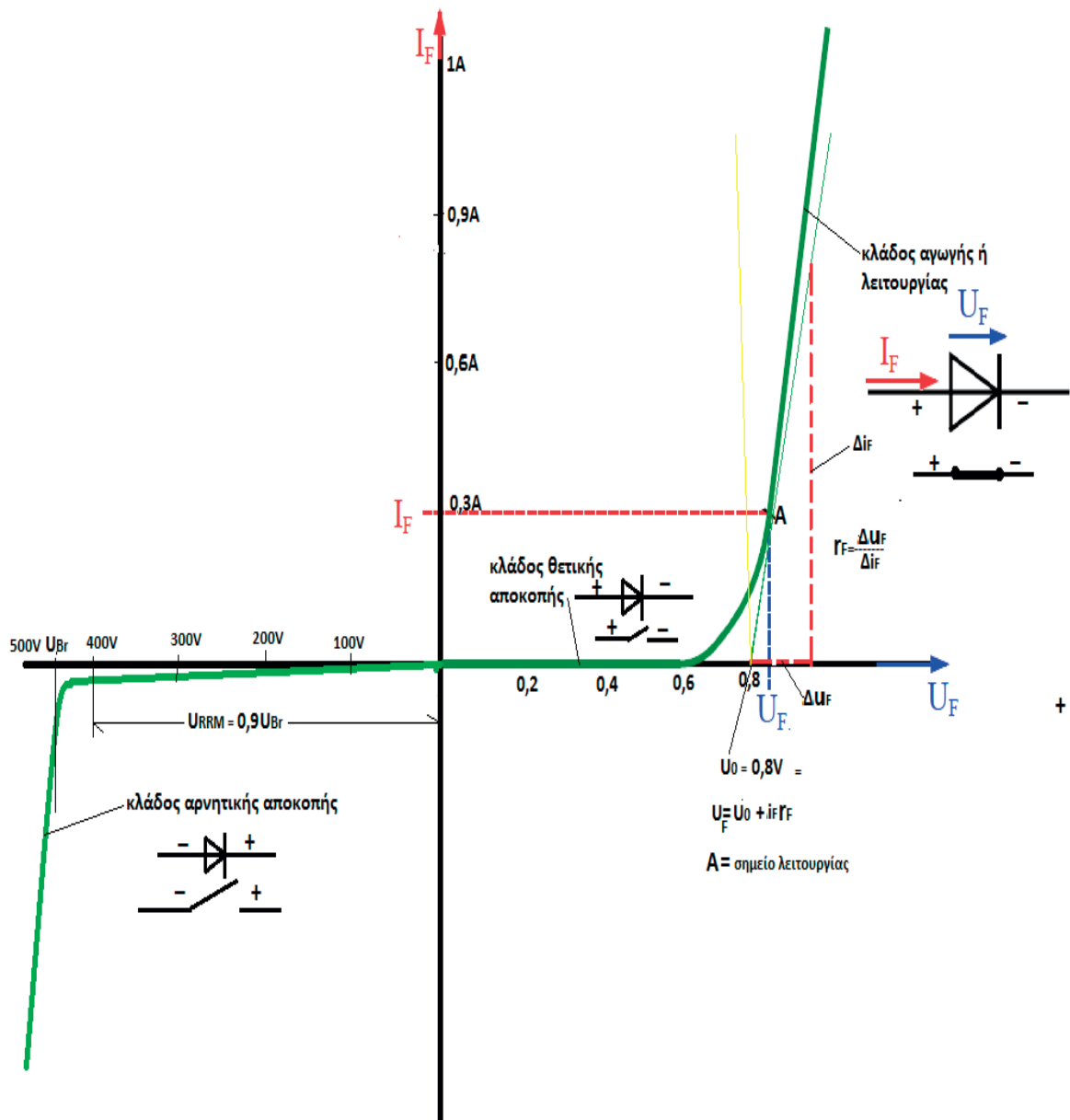
Σχ. 1.9: Ορθή πόλωση διόδου

- Όταν, αντίθετα, η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη, συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης και δεν άγει. Ανάστροφη πόλωση σημαίνει: αρνητική άνοδος και θετική κάθοδος.(σχ.1.10)



Σχ. 1.10: Ανάστροφη πόλωση διόδου

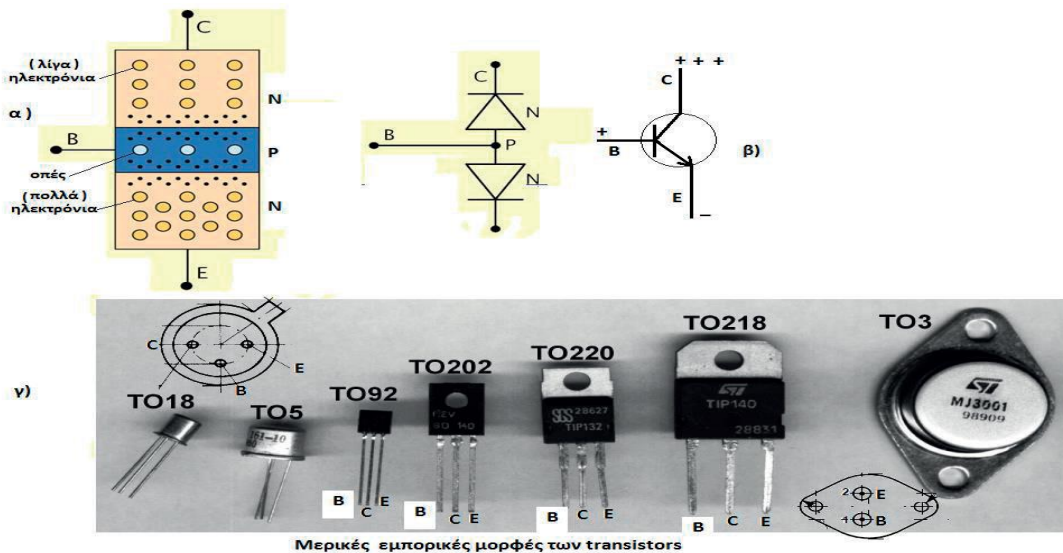
Η στατική χαρακτηριστική της διόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (1.11):



Σχ. 1.11: Στατική χαρακτηριστική της διόδου πυριτίου

1.2.4 Διπολικό τρανζίστορ (BJT – Bipolar Junction Transistor)

Το τρανζίστορ είναι ένα ημιαγωγό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από τρεις ζώνες ημιαγωγού στοιχείου διαδοχικά τοποθετημένες. Επομένως, έχουμε δύο τύπους τρανζίστορ: το τρανζίστορ npn και το τρανζίστορ pnp. Στα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούμε αποκλειστικά το τρανζίστορ npn.



Σχ. 1.12: Τρανζίστορ-npn

- α) Δομή ενός τρανζίστορ npn β) Σύμβολο τρανζίστορ τύπου-npn με ορθή πόλωση
 γ) Τρανζίστορ του εμπορίου

Λειτουργία npn-τρανζίστορ

Το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ελεγχόμενος διακόπτης. Για να λειτουργήσει, όμως, απαιτείται ορθή πόλωση. Δηλαδή:

- θετική τάση (+) στον συλλέκτη (C)
- αρνητική τάση (-) στον εκπομπό (E ή γειωμένο εκπομπό)
- θετική τάση (+) στη βάση (B)

Σημείωση: Όταν το βέλος του εκπομπού δείχνει προς την περιφέρεια του κύκλου, τότε είναι τρανζίστορ-npn. Εάν το βέλος του εκπομπού δείχνει προς τη βάση τότε είναι τρανζίστορ-pnp.

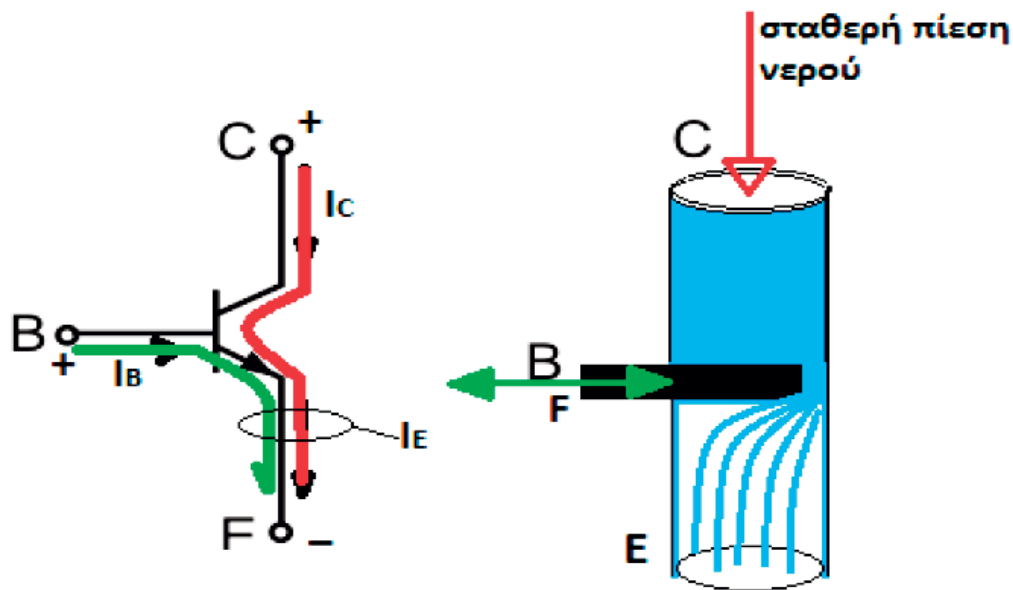
– Όταν το τρανζίστορ είναι ορθά πολωμένο, τότε ρέει ένα μικρό ρεύμα I_B από τη βάση στον εκπομπό, το οποίο ρυθμίζει τη ροή ενός μεγάλου ρεύματος ($I_C \sim I_E$) από τον συλλέκτη στον εκπομπό. Όσο μεγαλώνουμε το ρεύμα βάσης (I_B), τόσο περισσότερο μεγαλώνει το ρεύμα συλλέκτη (I_C). Ο λόγος

$$\frac{I_C}{I_B}$$

ονομάζεται ενίσχυση (B). Συνήθεις τιμές του B = 50-200.

Π.χ.:

Εάν B=200 και $I_B = 5\text{mA}$, τότε $I_C = B \cdot I_B = 200 \cdot 5 = 1000\text{ mA} = 1\text{A}$



Σχ. 1.13: α) Πόλωση npn-τρανζίστορ και β) μηχανικό ανάλογο του τρανζίστορ

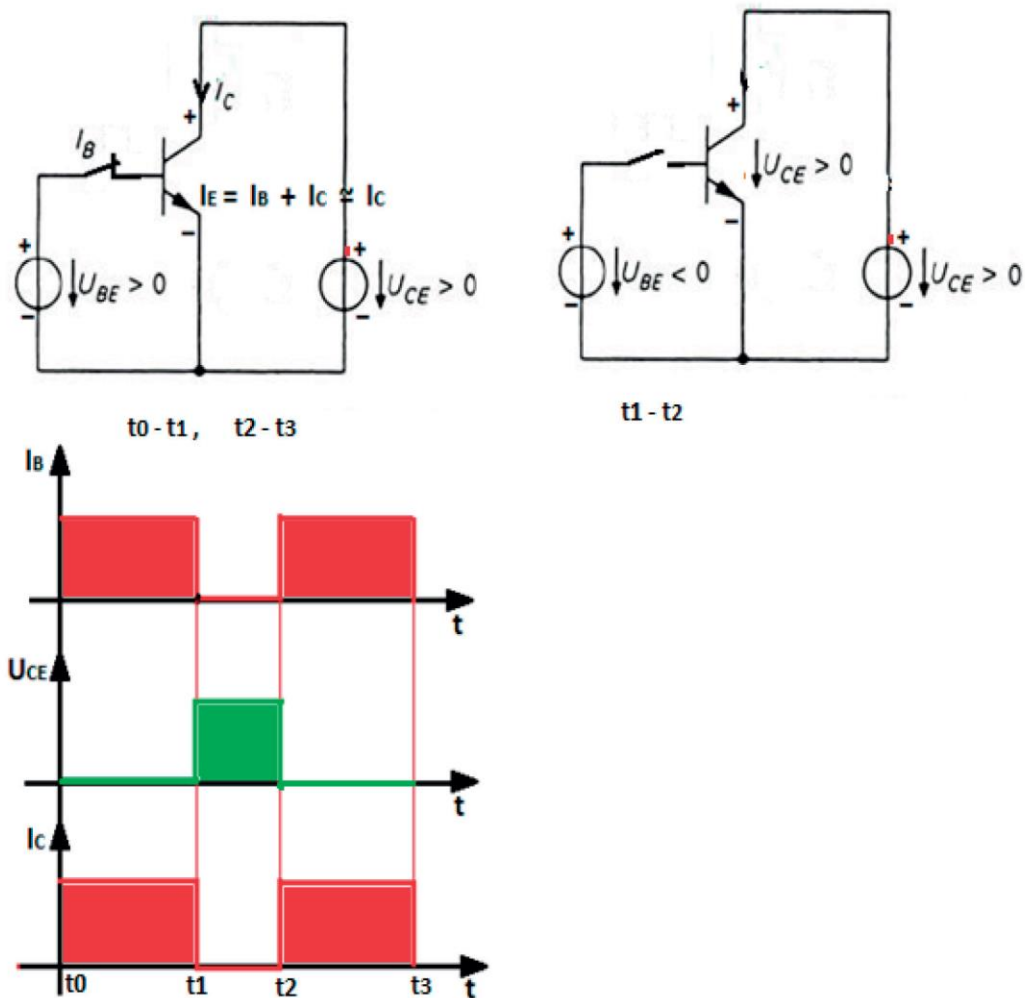
Το ρεύμα I_B ρέει από τη βάση του τρανζίστορ προς τον εκπομπό, μόνο όταν η τάση U_{BE} φθάσει στα $0,7V$. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση κατωφλίου ($U_{BE} = 0,7V$).

Για την κατανόηση της λειτουργίας του τρανζίστορ χρησιμοποιούμε ένα σωλήνα (σχ. 1.13β), μέσα από τον οποίο στέλνουμε νερό με σταθερή πίεση (ρεύμα συλλέκτη I_C). Τραβώντας προς τα έξω τον υδατοφράκτη (δύναμη έλξης F του υδατοφράκτη, ρεύμα βάσης I_B) αυξάνουμε την ποσότητα του νερού (ρεύμα συλλέκτη I_C), που περνάει από το άνοιγμα του υδατοφράκτη. Άρα, εφαρμόζοντας σχετικά μικρή δύναμη στον υδατοφράκτη, ελέγχουμε μια μεγάλη ροή νερού μέσα από το σωλήνα. Ανάλογα, αυξομειώνοντας το μικρό ρεύμα βάσης (I_B), αυξομειώνουμε, αντίστοιχα, το μεγάλο ρεύμα συλλέκτη (I_C).

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του npn-τρανζίστορ είναι:

- η σχετικά μικρή αντίσταση εξόδου
- η μεγάλη αντίσταση εισόδου (επομένως απαιτείται σχετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος για τον έλεγχο του τρανζίστορ)
- η μικρή συχνότητα λειτουργίας.

Ένα τρανζίστορ για να λειτουργήσει, πρέπει αφενός να είναι ορθά πολωμένο και αφετέρου να εφαρμοστεί μια θετική τάση στη βάση. Δηλαδή:



Σχ. 1.14: Τάσεις και ρεύματα κατά τη λειτουργία του τρανζίστορ

Από τις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 1.14 διαπιστώνουμε:

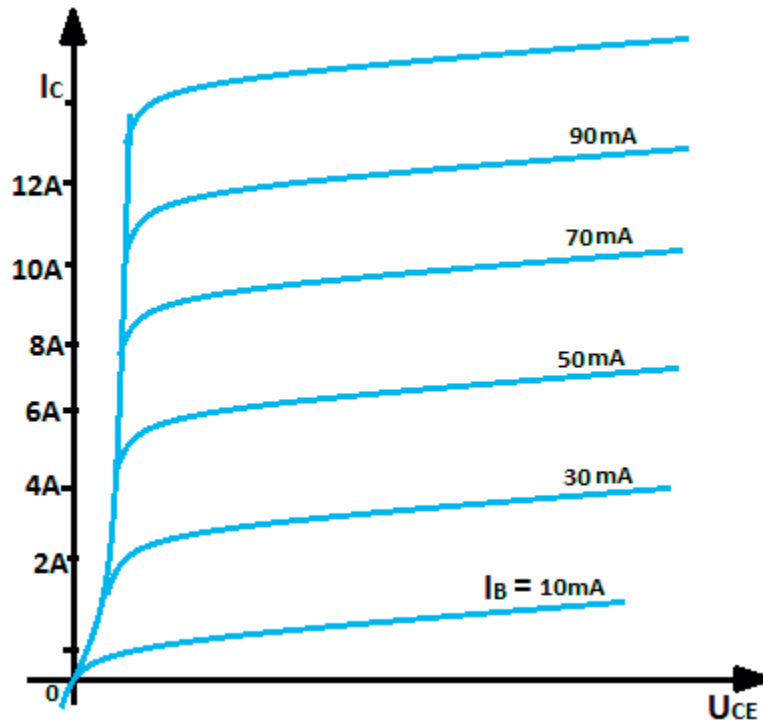
– Χρονικό διάστημα 0 έως t_1 και t_2 έως t_3 :

όταν μεταξύ βάσης και εκπομπού εφαρμόσουμε μια θετική συνεχή τάση (DC-Voltage), τότε οι pn-ζώνες είναι αγώγιμες, δηλαδή το τρανζίστορ λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης.

– Χρονικό διάστημα t_1 έως t_2 :

όταν δεν υπάρχει τάση (U_{BE}) (ή ρεύμα I_B) στον ακροδέκτη της βάσης, τότε το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης. Το ρεύμα $I_C = 0$.

– Ανάλογα με το ρεύμα βάσης I_B (ή την τάση U_{BE}), λαμβάνουμε και διαφορετικό ρεύμα I_C . Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές εξόδου $I_C = f(U_{CE})$, με παράμετρο το ρεύμα βάσης I_B .

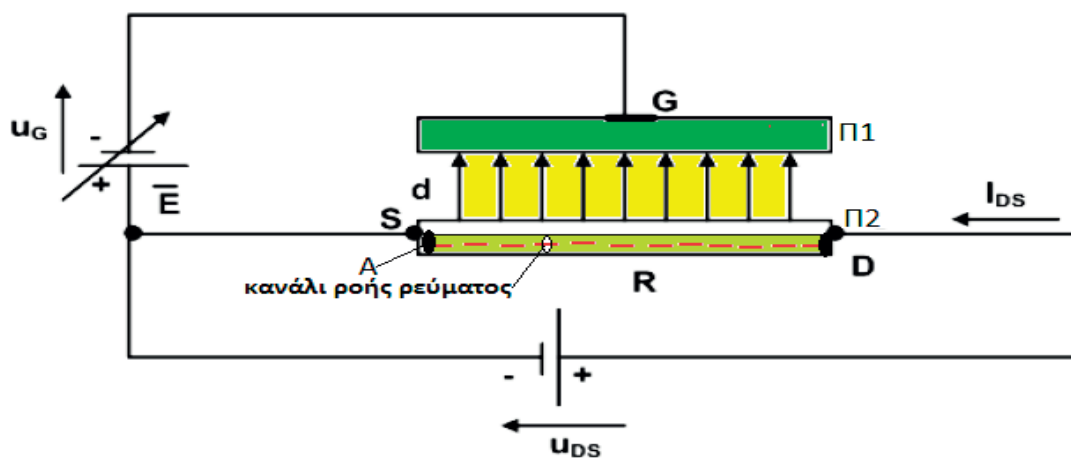


Σχ. 1.15: Χαρακτηριστικές $I_C = f(U_{CE})$

1.2.5 Τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Τρανζίστορ MOS-FET)

Στο διπολικό τρανζίστορ έπρεπε να καταναλώσουμε ισχύ στο κύκλωμα της βάσης, για να μπορέσουμε να ελέγξουμε το ρεύμα του συλλέκτη. Το MOS-FET τρανζίστορ κατασκευάστηκε για να μειώσει την κατανάλωση της ισχύος εισόδου.

Παρακάτω φαίνεται μια απλοποιημένη διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET (σχ. 1.16).



Σχ. 1.16: Διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET

Μεταξύ των δύο «πλακών» Π1 και Π2, δημιουργείται, εξαιτίας της τάσης U_G , ένα ηλεκτρικό πεδίο (E). Λόγω του μονωτικού υλικού που έχει τοποθετηθεί μεταξύ των δύο πλακών, δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Η πλάκα Π2, όμως, χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σαν αντίσταση στο κύκλωμα της πηγής U_{DS} . Έτσι, η πηγή U_{DS} ωθεί το ρεύμα I_{DS} διαμέσου της πλάκας Π2. Αυξάνοντας την τάση U_G , το ηλεκτρικό πεδίο (E) εισέρχεται βαθύτερα μέσα στην πλάκα Π2 και ωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια όλο και περισσότερο σε μικρότερη επιφάνεια (A). Από τη σχέση

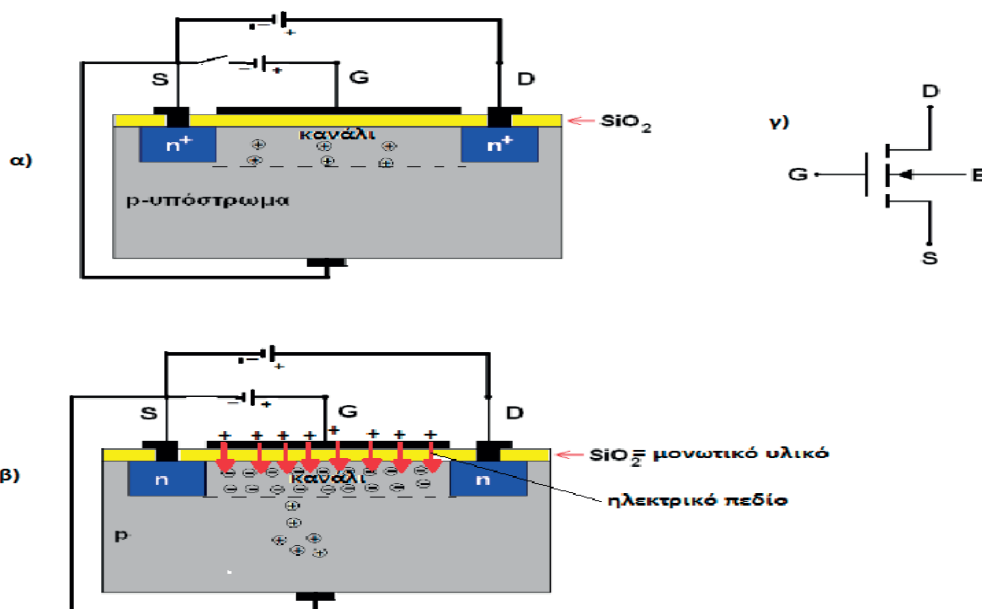
$$R = \frac{l}{\rho \cdot A}$$

όπου (l): το μήκος του αγωγού, (A): η διατομή του και ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού. Γνωρίζουμε, ότι όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια (A), μέσα από την οποία περνάει το ρεύμα I_D , τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση R της πλάκας Π2. Από το νόμο του Ohm γνωρίζουμε, εξάλλου, ότι:

$$I_D = \frac{U_{DS}}{R}$$

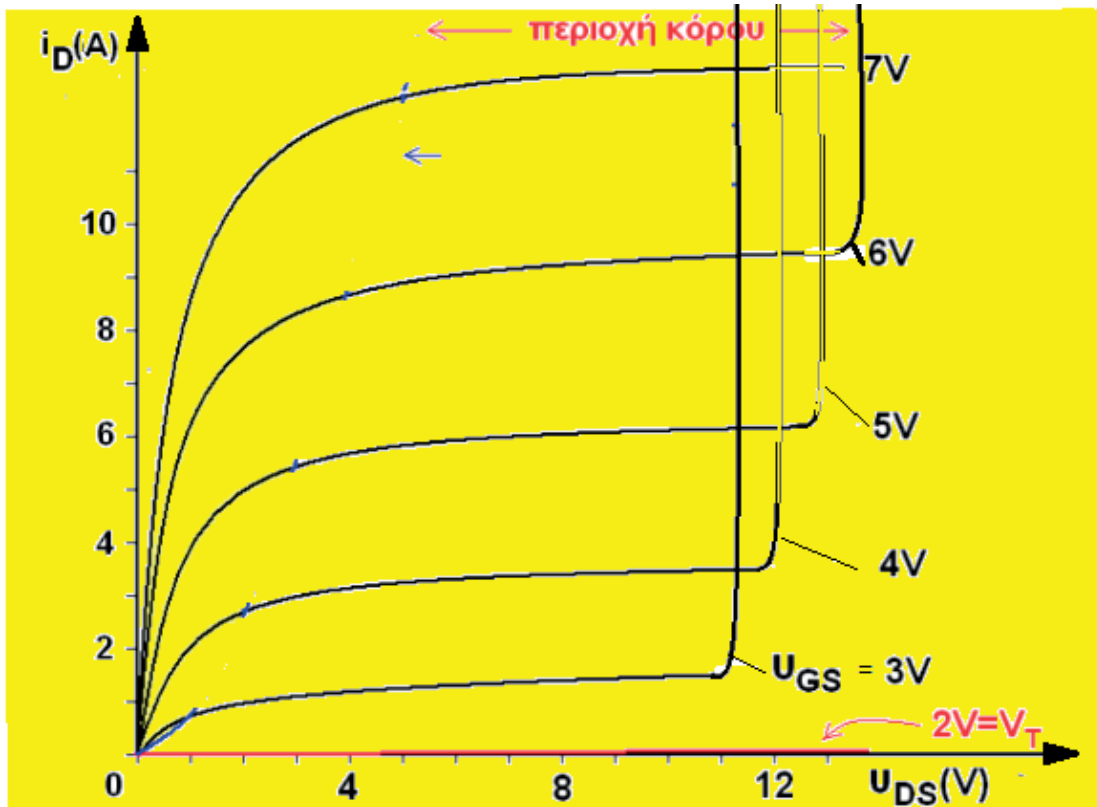
Επομένως, μεταβάλλοντας την τάση U_G , μεταβάλλεται και το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή. Η αυξομείωση του πεδίου, έχει ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της αντίστασης (R) της πλάκας Π2. Η αύξηση της αντίστασης (R), όμως, συνεπάγεται τη μείωση του ρεύματος (I). Σ' αυτή τη διαδικασία, η πηγή U_G δεν τροφοδοτεί με ρεύμα τον πυκνωτή. Συνεπώς, έχουμε αυξομείωση του ρεύματος I_0 , χωρίς, όμως, κατανάλωση ισχύος από το κύκλωμα της πύλης. Στα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιείται το MOS-FET τύπου n-καναλιού. Το υλικό των δύο πλακών είναι το πυρίτιο (Si). Το μονωτικό υλικό μεταξύ των πλακών είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Η αντίσταση της πλάκας Π2 ονομάζεται καναλική αντίσταση R_{DS} .

Στο σχ. 1.16 απεικονίζεται η συγκεκριμένη διάταξη, για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET. Παρακάτω φαίνεται μια πραγματική τομή του MOS-FET (σχ. 1.17).



Σχ. 1.17: Τομή ενός MOS-FET

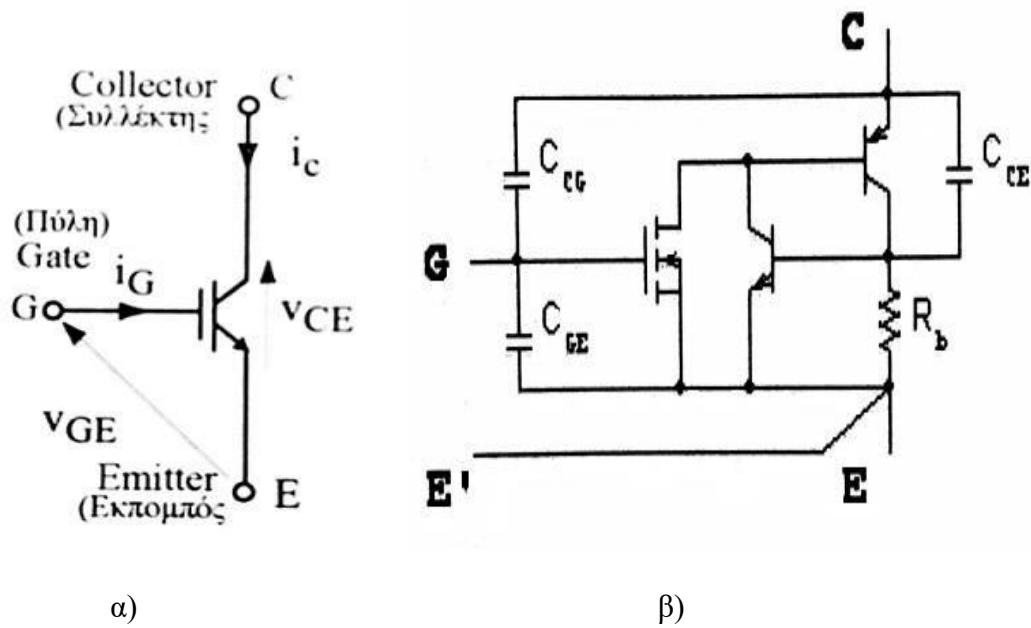
Σύμφωνα με την παραπάνω διάταξη (σχ. 1.17α), εάν $U_{GS} = 0$, τότε μεταξύ D και S δεν υπάρχει ροή ρεύματος ($I_0 = 0$), διότι η pn-επαφή μεταξύ G και D είναι ανάστροφα πολωμένη. Μόλις εφαρμόσουμε μια τάση U_{GS} στην πύλη, τότε το ηλεκτρικό πεδίο απωθεί τις οπές του καναλιού και έλκει τα ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) (σχ. 1.17β). Έτσι, το κανάλι εμπλουτίζεται με ηλεκτρόνια και γίνεται αγώγιμο. Η ροή του ρεύματος I_{DS} είναι πλέον δυνατή. Μια βασική χαρακτηριστική του MOS-FET είναι η χαρακτηριστική $I_{DS} = f(U_{DS})$, που δίνεται στο σχ. 1.18.



Σχ. 1.18: Χαρακτηριστικές εξόδου του MOS-FET

1.2.6 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Το IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1980, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά ενός MOSFET με τα χαρακτηριστικά ενός BJT και αποτελεί σημαντικό στοιχείο ισχύος. Η λειτουργία του IGBT στηρίζεται στην αγωγή του με την εφαρμογή θετικής τάσης στην Πύλη, ενώ με την αφαίρεση της συμβαίνει σβέση. Η συχνότητα λειτουργίας ενός τυπικού IGBT είναι μέχρι περίπου 50KHz και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να χειριστεί είναι μικρότερη από μερικές εκατοντάδες KWatts. Βρίσκει ίδιες εφαρμογές με το BJT, αλλά με καλύτερα χαρακτηριστικά. Συνήθεις εφαρμογές είναι μετατροπείς DC-DC και αντιστροφείς.



Σχ.1.19: α) Σύμβολο IGBT και β) ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας IGBT

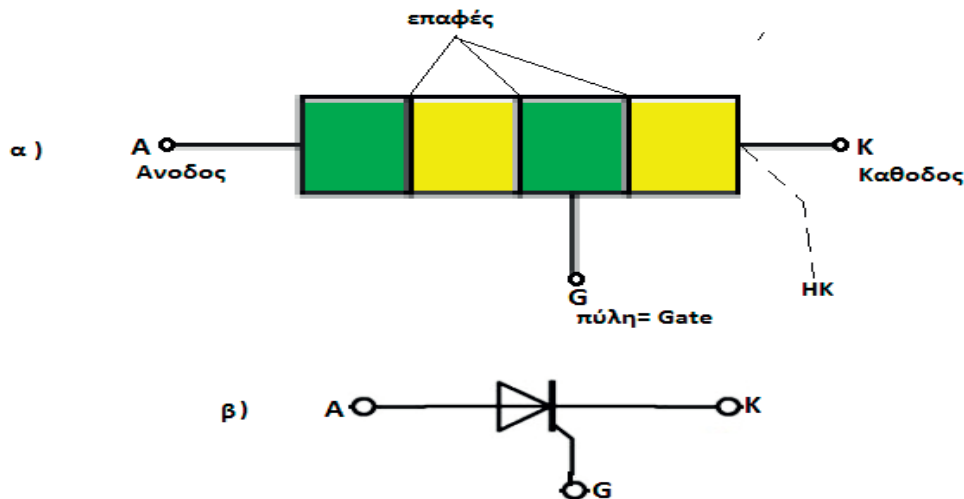
1.2.7 Θυρίστορ (thyristor)

Κατασκευή

Το θυρίστορ είναι ένα ελεγχόμενο ημιαγωγό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από:

- το ημιαγωγό στοιχείο
- το περίβλημα
- τους ακροδέκτες και, τέλος,
- το σώμα απαγωγής θερμότητας (κοινώς ψήκτρα).

Το ημιαγωγό στοιχείο αποτελείται από τέσσερις ζώνες τύπου-p και τύπου-n διαδοχικά τοποθετημένες (σχ. 1.20α).

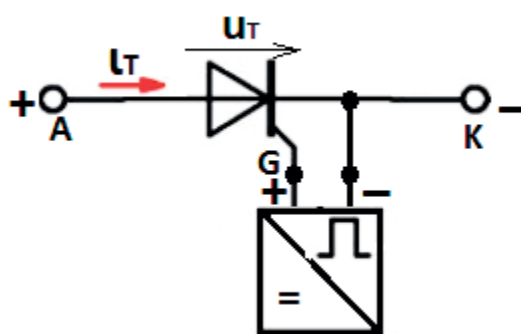


Σχ. 1.20: α) Δομή θυρίστορ β) Σύμβολο θυρίστορ

Το θυρίστορ διαθέτει τρεις (3) ακροδέκτες και τα μεγάλης ισχύος θυρίστορ διαθέτουν έναν επιπλέον (τέταρτο) ακροδέκτη. Οι ακροδέκτες χαρακτηρίζονται με τα γράμματα A = άνοδος, K = κάθοδος, G = πύλη και HK = βοηθητική κάθοδος. Το ημιαγωγό στοιχείο, προκειμένου να προφυλάσσεται από τις καιρικές συνθήκες, περιβάλλεται από ένα πλαστικό περίβλημα. Επειδή το θυρίστορ διαρρέεται από μεγάλα ρεύματα και το ημιαγωγό στοιχείο είναι μικρό σε όγκο (π.χ. ίσο με το μέγεθος μιας κοινής ταμπλέτας), αναπτύσσονται θερμοκρασίες, οι οποίες καταστρέφουν το θυρίστορ ή μεταβάλλουν τη συμπεριφορά του. Για να απάγουμε τη θερμότητα στο περιβάλλον, τοποθετούμε το θυρίστορ πάνω σ' ένα σώμα απαγωγής θερμότητας (ψήκτρα).

Λειτουργία

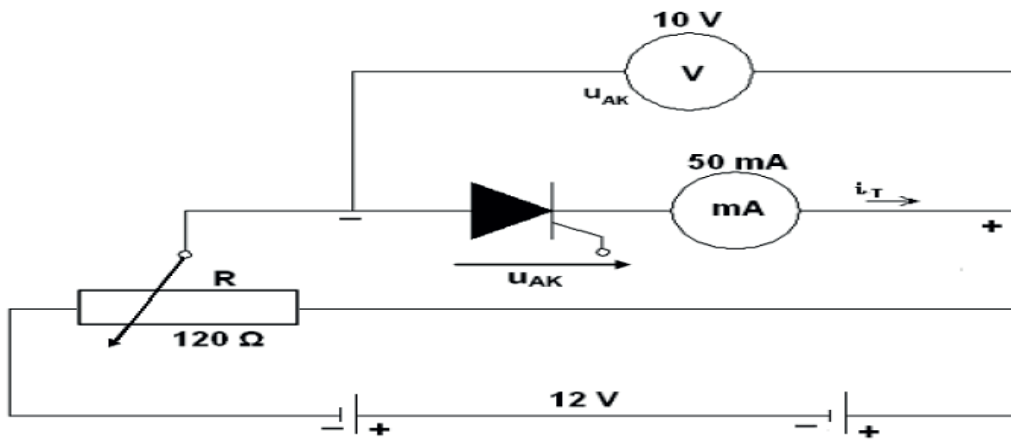
Προκειμένου το θυρίστορ να γίνει αγωγίμο (και να λειτουργήσει όπως ένας αγωγίμος διακόπτης), θα πρέπει να πολωθεί σωστά. Η πόλωση του θυρίστορ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ.1.21):



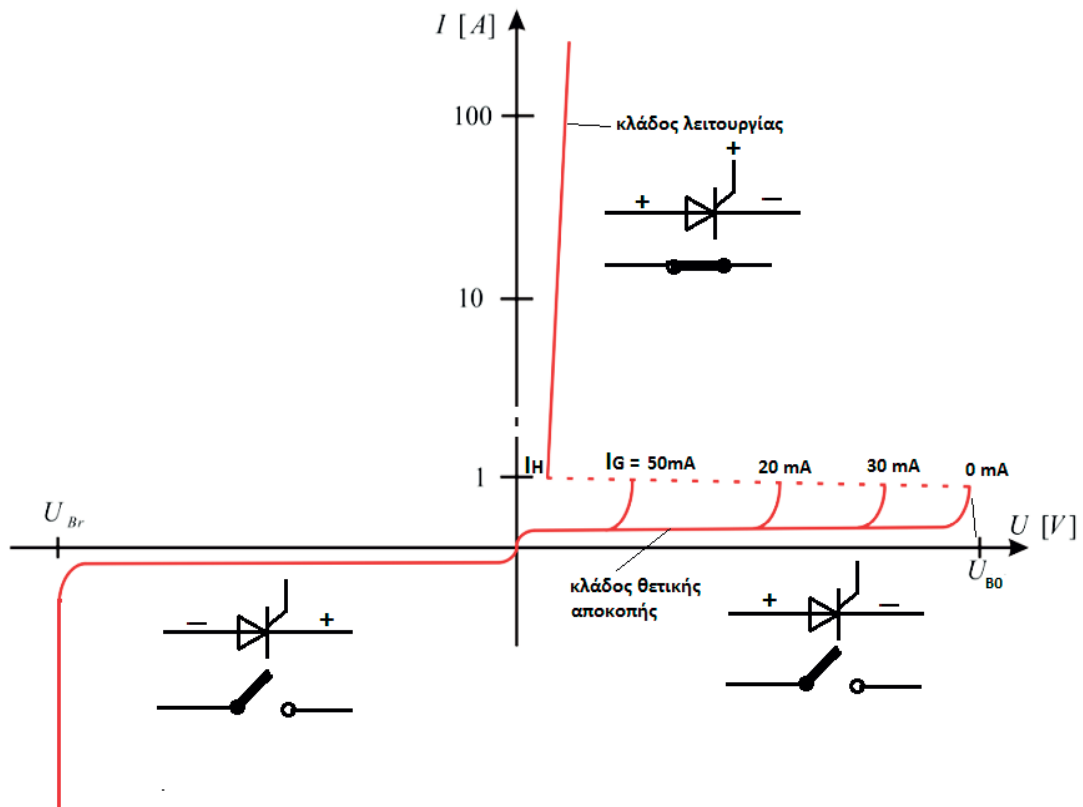
Σχ. 1.21: Ορθή πόλωση του θυρίστορ

Όταν ένα θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο (θετική άνοδος, αρνητική κάθοδος), τότε για να γίνει αγωγίμο, δηλαδή για να αφήσει το ρεύμα I_T να περάσει από την άνοδο (A) προς την κάθοδο (K), θα πρέπει να δώσουμε στην πύλη έναν κατάλληλο παλμό έναυσης (παλμός έναυσης, παλμός πυροδότησης). Ο παλμός έναυσης είναι μικρής διάρκειας. Όταν το θυρίστορ γίνει αγωγίμο, τότε ο παλμός μηδενίζεται και το θυρίστορ συνεχίζει να λειτουργεί, για όσο χρονικό διάστημα είναι ορθά πολωμένο.

Για να κατανοήσουμε τη συνολική λειτουργία του θυρίστορ, παρατηρούμε το παρακάτω απλοποιημένο κύκλωμα (σχ. 1.22) και σχεδιάζουμε τη στατική χαρακτηριστική(σχ.1.23).



Σχ. 1.22: Απλοποιημένη πειραματική διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του θυρίστορ στην ανάστροφη πόλωση.

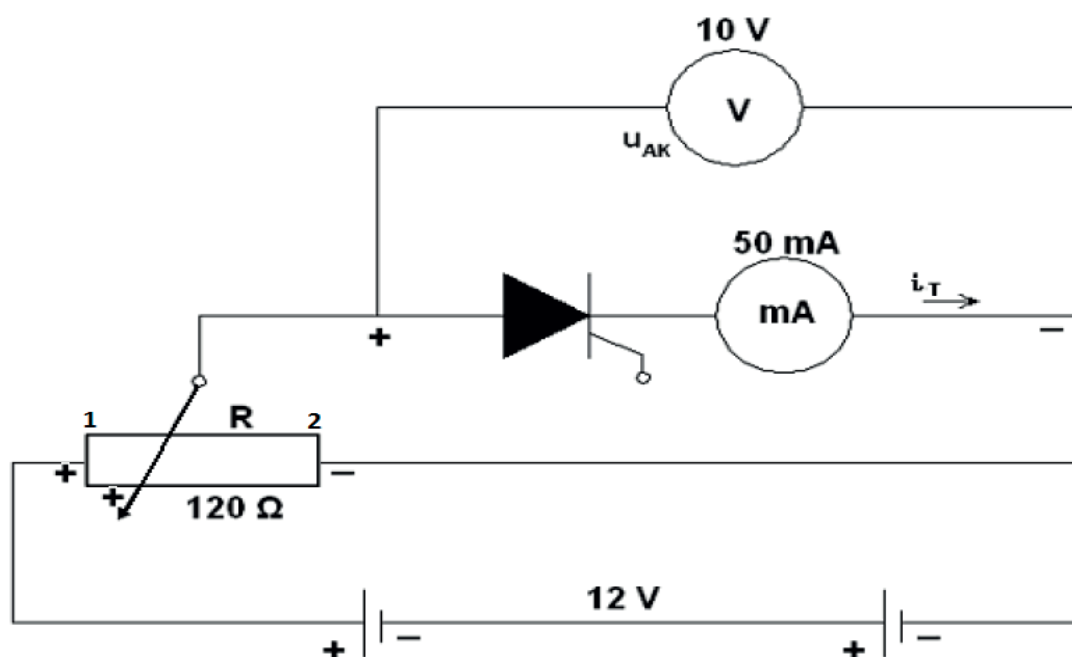


Σχ. 1.23: Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ.

Παρατηρώντας το παραπάνω κύκλωμα (σχ. 1.21) διαπιστώνουμε ότι ο θετικός πόλος της πηγής U_0 είναι συνδεδεμένος με την κάθοδο (K) του θυρίστορ. Επομένως, το θυρίστορ είναι ανάστροφα πολωμένο και, σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω, λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης, αλλά σαν ηλεκτρονικός διακόπτης δεν είναι τέλειος. Έτσι, μετακινώντας τον δρομέα από τη θέση (1) προς τη θέση (2) του ποτενσιόμετρου (P), διαπιστώνουμε τα εξής:

- Η τάση (U_{AK} - ένδειξη βολτομέτρου) στα άκρα του θυρίστορ είναι αρνητική και μειώνεται σταδιακά από το μηδέν μέχρι την τάση $-U_0$.
- Ταυτόχρονα, το αμπερόμετρο, το οποίο μετρά το ρεύμα (I_T) που περνά μέσα απ' το θυρίστορ, δείχνει μια μικρή σταθερή αρνητική τιμή.
- Αυξάνοντας, ωστόσο, σε μεγαλύτερες τιμές την ανάστροφη τάση στα άκρα του θυρίστορ, διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα I_T αυξάνει απότομα, χωρίς παλμό έναυσης στην πύλη. Η ανάστροφη τάση, στην οποία το θυρίστορ έγινε αγωγίμο, ονομάζεται κρίσιμη τάση θλάσης U_{Br} .
- Αναπαριστώντας γραφικά τις τιμές του ρεύματος (I_T) και της τάσης (U_{AK}), λαμβάνουμε τον κλάδο αρνητικής αποκοπής (σχ. 1.23).
- Όταν μεταξύ ανόδου-καθόδου εφαρμόσουμε την κρίσιμη τάση θλάσης (U_{Br}), τότε το θυρίστορ καταστρέφεται.
- Η συμπεριφορά του θυρίστορ στο τρίτο τεταρτημόριο είναι όμοια με αυτήν της διόδου.

Στη συνέχεια, αντιστρέφουμε τους πόλους της πηγής (U_0) και έχουμε, έτσι, το κύκλωμα (σχ. 1.24)

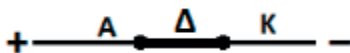


Σχ. 1.24: Απλοποιημένη πειραματική διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του θυρίστορ στην ορθή πόλωση.

Στην παραπάνω διάταξη αντιστρέψαμε την πηγή (U_0), με αποτέλεσμα το πλην (-) της πηγής (U_0) να είναι συνδεδεμένο με την κάθοδο (K) του θυρίστορ. Επομένως, το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο. Μετακινώντας τη μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου από το άκρο (2) προς το άκρο (1), παρατηρούμε ότι η τάση U_{AK} αυξάνει προς θετικές

τάσεις (0 έως $+U_0$), ενώ το ρεύμα I_T (ένδειξη αμπερομέτρου) αποκτά μια μικρή και σταθερή τιμή. Μεταφέροντας τις τιμές του I_T και της U_{AK} σ' ένα ορθογώνιο σύστημα, λαμβάνουμε τον κλάδο θετικής αποκοπής (σχ. 1.23). Αν αυξήσουμε την τάση U_{AK} πέραν μιας ορισμένης τιμής, το θυρίστορ γίνεται ξαφνικά αγωγίμο, δηλαδή το ρεύμα I_T αυξάνει απότομα σε μεγάλες τιμές και η τάση U_{AK} πέφτει σε πολύ χαμηλή τιμή (π.χ. $U_{AK} \sim 3,2V$). Η τάση U_{AK} , στην οποία το θυρίστορ γίνεται αγωγίμο χωρίς παλμό έναυσης στην πύλη, ονομάζεται κρίσιμη τάση θετικής αποκοπής και συμβολίζεται με το γράμμα (U_{B0}). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας δεν είναι επιτρεπτός, διότι το θυρίστορ καταστρέφεται.

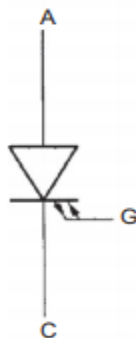
Όταν το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο (δηλαδή βρίσκεται στον κλάδο θετικής αποκοπής, όπου η τάση $0 < U_{AK} < U_{B0}$) και δώσουμε παλμό έναυσης στην πύλη, τότε το θυρίστορ γίνεται αγωγίμο, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης.



Το ρεύμα I_T παίρνει μεγάλες τιμές και η τάση του θυρίστορ μειώνεται απότομα σε μια μικρή τιμή $U_{T0} \sim 3,2V$, η οποία ονομάζεται τάση κατωφλίου (U_{T0}). Μ' αυτόν τον τρόπο, το θυρίστορ μεταπίπτει από τον κλάδο θετικής αποκοπής σ' έναν νέο κλάδο, τον κλάδο λειτουργίας. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας του θυρίστορ είναι ο μόνος σωστός, διότι το θυρίστορ ελέγχεται με τη βοήθεια του παλμού έναυσης στην πύλη. Το ελάχιστο ρεύμα του κλάδου λειτουργίας ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης.

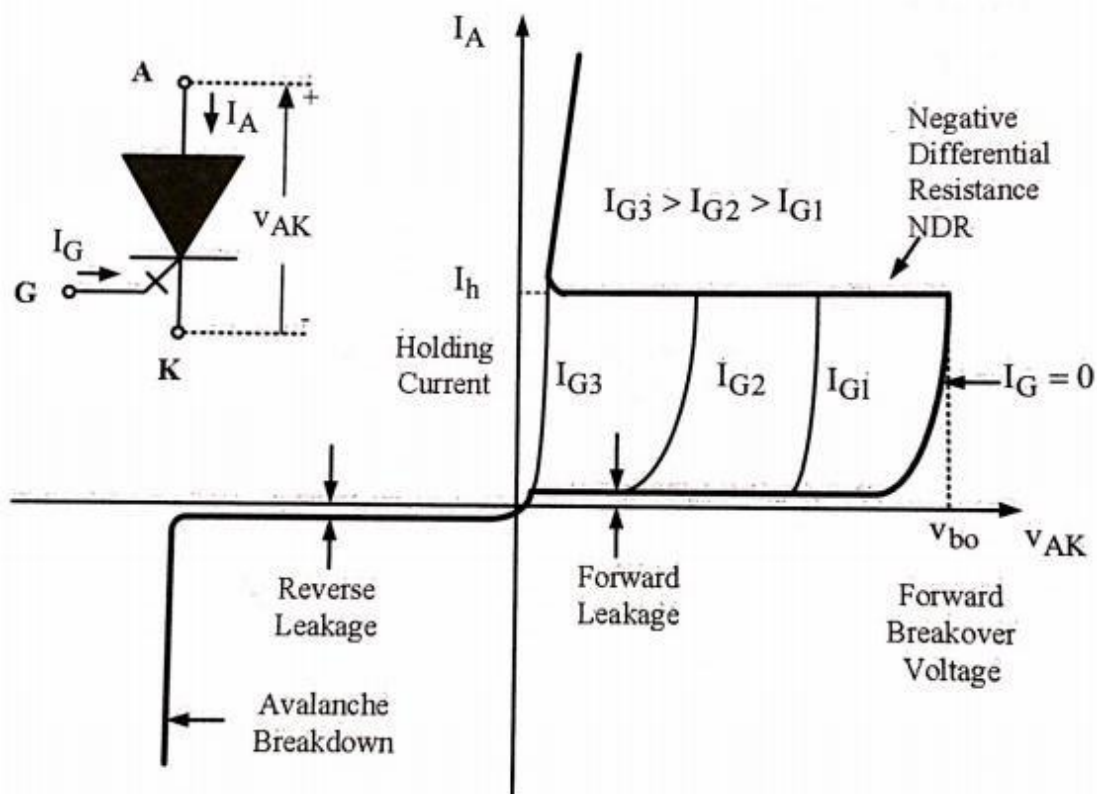
1.2.8 GTO (Gate Turn-off)

Το Gate Turn-Off θυρίστορ γνωστό ως GTO είναι ένας ημιαγωγίμος διακόπτης ισχύος τριών ακροδεκτών. Το GTO ανήκει στην οικογένεια των θυρίστορ τα οποία αποτελούνται από δομή τεσσάρων – επιπέδων. Τα GTO ανήκουν επίσης σε μια ομάδα ημιαγωγών ισχύος τα οποία έχουν την ιδιότητα να έχουν πλήρη έλεγχο στην κατάσταση αγωγής και στην κατάσταση αποκοπής μέσω του τερματικού ελέγχου (Gate). Για την πλήρη κατανόηση του σχεδιασμού, της ανάπτυξης και της λειτουργίας του GTO θα πρέπει να το συγκρίνουμε με ένα συμβατικό θυρίστορ. Όπως σε ένα συμβατικό θυρίστορ, η εφαρμογή ενός θετικού σήματος - πύλης στον τερματικό πύλης μπορεί να ωθήσει το GTO στην κατάσταση αγωγής. Σε αντίθεση με ένα τυπικό θυρίστορ το GTO είναι σχεδιασμένο ώστε να απενεργοποιείται όταν εφαρμόζεται στην πύλη του αρνητικό σήμα. Υπάρχουν δυο είδη GTO τα συμμετρικά και ασύμμετρα. Τα ασύμμετρα GTO είναι τα πιο κοινά είδη στην αγορά. Αυτού του είδους τα GTO συνήθως έχουν μια αντιπαράλληλη δίοδο με αποτέλεσμα ο υψηλός αποκλεισμός αναστροφής να μην είναι διαθέσιμος. Η ανάστροφη αγωγιμότητα επιτυγχάνεται με μια αντιπαράλληλη δίοδο ενσωματωμένη στο ίδιο στρώμα πυριτίου. Τα συμμετρικά είδη GTO έχουν ίση ικανότητα ορθού και ανάστροφου αποκλεισμού.



Σχ. 1.25: Σύμβολο GTO.

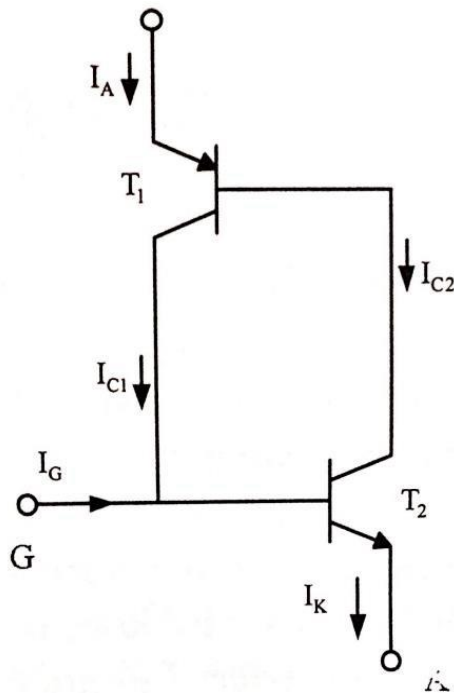
Οι εφαρμογές ισχύος μεταξύ 3 και 10MW αποτελούν το πεδίο χρήσης του GTO ως ημιαγωγικού διακόπτη. Η διακοπτική του ταχύτητα φτάνει μέχρι 10 KHz. Το GTO είναι σε θέση να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του κατά την αγωγή του γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση υψηλών τιμών ρεύματος ενώ ένας μικρής διάρκειας παλμός ρεύματος αρκεί για να το μεταφέρει σε κατάσταση αγωγής. Από την άλλη πλευρά το GTO έχει μεγάλους χρόνους μετάβασης και κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων αυτών παρουσιάζει υψηλές διακοπτικές απώλειες γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη διακοπτική του συχνότητα σε μερικές εκατοντάδες Hz. Το GTO επίσης είναι αρκετά ευαίσθητο σε απότομες μεταβολές ρεύματος κατά τη μετάβαση αγωγής και σε απότομες μεταβολές τάσης κατά τη μετάβαση αποκοπής. Αυτή η ευαισθησία επιβάλλει τη χρήση προστατευτικών κυκλωμάτων (snubbers) για να περιορισθούν οι ρυθμοί αύξησης ρεύματος και τάσης (di/dt , dv/dt). Το GTO μεταβαίνει σε κατάσταση αγωγής όταν μια θετική τάση εφαρμοσθεί μεταξύ πύλης και καθόδου δημιουργώντας έτσι ένα θετικό ρεύμα οδήγησης στην πύλη του. Το GTO μεταβαίνει από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης μεταξύ της πύλης και της καθόδου του. Το αρνητικό ρεύμα που δημιουργείται στην πύλη του λόγω της εφαρμογής της αρνητικής τάσης είναι αυτό που δίνει την εντολή σβέσης του. Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του GTO.



Σχ. 1.26: V-I χαρακτηριστική του GTO.

Η λειτουργία του GTO μπορεί να εξηγηθεί χρησιμοποιώντας το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα που είναι το ίδιο ισοδύναμο κύκλωμα με αυτό του απλού θυρίστορ. Όπως και με το θυρίστορ το GTO μπορεί να μεταβεί στην κατάσταση αγωγής εφαρμόζοντας ένα σχετικά μικρό παλμό τάσης και κατά συνέπεια μικρό παλμό ρεύματος διότι η πύλη έχει ωμική σύνθετη αντίσταση στην πύλη του. Για να σβήσει όμως δηλαδή να μεταβεί στην κατάσταση αποκοπής χρειάζεται ένα πάρα πολύ μεγάλο αρνητικό παλμό ρεύματος περίπου το 1/3 έως 1/5 του ρεύματος της ανόδου

στην πύλη του. Ο χρόνος της εφαρμογής αυτού του αρνητικού ρεύματος πύλης είναι της τάξης μερικών μsec .



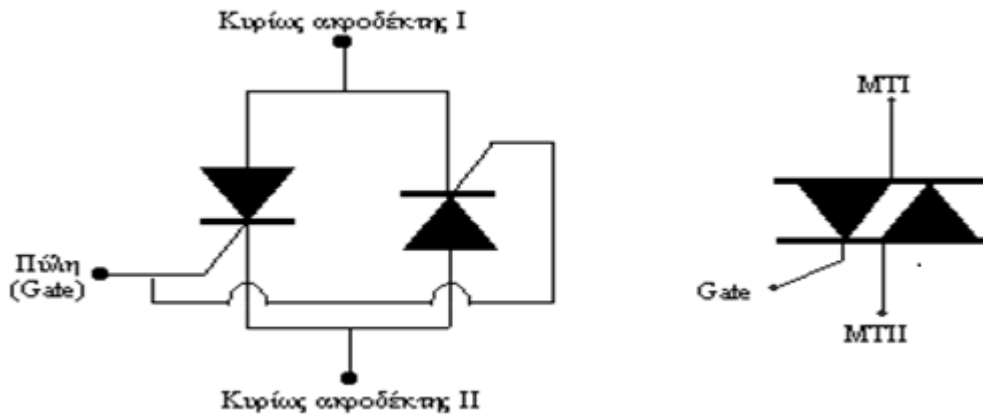
Σχ. 1.27: Ισοδύναμο κύκλωμα λειτουργίας GTO.

1.2.9 Αμφίδρομο τριαδικό θυρίστορ (Triac)

Στις εφαρμογές όπου είναι απαραίτητο να επιτύχουμε πλήρη έλεγχο ενός AC σήματος, είναι πολύ πιο εύκολο να χρησιμοποιήσουμε μία συσκευή, γνωστή ως αμφίδρομο τριοδικό θυρίστορ. Αυτή η συσκευή είναι πιο γνωστή ως triac. Το triac έχει, βασικώς, τα ίδια χαρακτηριστικά διακόπτη, όπως ένας SCR, εν τούτοις, επιδεικνύει αυτά τα ίδια χαρακτηριστικά και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτό κάνει το triac ισοδύναμο με δύο SCR συνδεδεμένα παραλλήλως, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Βασική Δομή και Λειτουργία

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός triac φαίνεται στο Σχήμα 1.28. Σημειώστε ότι η συσκευή έχει τρεις αγωγούς σύνδεσης, οι οποίοι προσδιορίζονται ως κύριος ακροδέκτης 1, κύριος ακροδέκτης 2 και πύλη. Ο κύριος ακροδέκτης 1 και ο κύριος ακροδέκτης 2 είναι συνδεδεμένοι σε μία PN επαφή, σε αντίθετα άκρα της συσκευής. Η πύλη είναι επίσης συνδεδεμένη σε μία PN επαφή, η οποία στο ίδιο άκρο, με τον ακροδέκτη 1. Αν εξετάσετε προσεκτικά ολόκληρη την κατασκευή, θα παρατηρήσετε ότι από τον ακροδέκτη 1 στον ακροδέκτη 2, μπορείτε να περάσετε δια μέσω μιας σειράς στρωμάτων NPNP ή PNP. Με άλλα λόγια, το triac είναι μία συσκευή τεσσάρων στρωμάτων NPNP, παραλλήλως συνδεδεμένη με μία συσκευή τεσσάρων στρωμάτων PNP. Αυτές οι NPNP, PNPN συσκευές συχνά παραβάλλονται με δύο SCR, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παραλλήλως, αλλά σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η περιοχή πύλης του triac είναι πιο πολύπλοκη και μία λεπτομερής ανάλυση της λειτουργίας του δέ θα μελετηθεί αυτή τη στιγμή. Εν τούτοις, η πύλη είναι κυρίως ικανή να θέσει, απευθείας ή από απόσταση, οποιονδήποτε από τους ισοδύναμους SCR σε κατάσταση αγωγιμότητας.



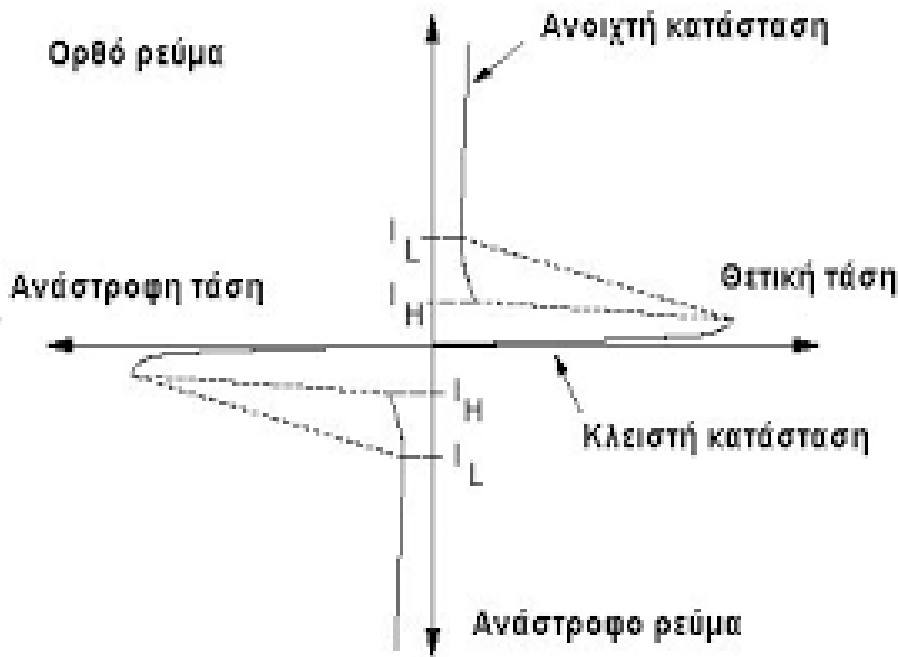
Σχ. 1.28: Σύμβολο TRIAC

Το κύκλωμα δεν είναι πάντα ισοδύναμο του triac. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται, απλώς, για να εξηγήσει τη βασική ιδέα. Η κύρια διαφορά είναι ότι δύο ισοδύναμοι SCR θα απαιτούσαν, στην πραγματικότητα, διαφορετικά ρεύματα πύλης, για να τεθούν σε κατάσταση αγωγιμότητας, αλλά το triac είναι σχεδιασμένο να ανταποκρίνεται σε ρεύματα που ρέουν δια μέσω του απλού ακροδέκτη πύλης.

Σε αντίθεση με τον SCR, που μπορεί να ελέγχει ρεύματα που ρέουν μόνο σε μία κατεύθυνση, το triac μπορεί να ελέγχει ρεύματα που ρέουν σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Το triac επομένως, χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο εφαρμογής AC ισχύος σε διάφορους τύπους φορτίων ή κυκλωμάτων. Οι συνθήκες που απαιτούνται για την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός triac, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση, είναι παρόμοιες με τις συνθήκες που απαιτούνται για τον έλεγχο του SCR. Αμφότερες οι συσκευές μπορούν να ενεργοποιηθούν, από ένα ρεύμα πύλης και να απενεργοποιηθούν, μειώνοντας τα ανοδικά ρεύματα λειτουργίας, κάτω από τις σχετικές τιμές συγκράτησής τους. Στην περίπτωση του SCR, το ρεύμα πρέπει να ρέει στην ορθή κατεύθυνση, από την κάθοδο προς την άνοδο. Εν τούτοις, το triac είναι σχεδιασμένο να άγει και ορθά και ανάστροφα ρεύματα, δια μέσω των κυρίων ακροδεκτών του.

Το σχηματικό σύμβολο, που χρησιμοποιείται, συνήθως, για να αναπαραστήσει το triac φαίνεται στο Σχήμα 1.28. Σημειώστε ότι το σύμβολο συνίσταται από δύο παράλληλες διόδους, συνδεδεμένες σε αντίθετες κατευθύνσεις, με ένα απλό ακροδέκτη συνδεδεμένο. Η συσκευή, συνήθως, τοποθετείται μέσα σε ένα κύκλο, όπως φαίνεται, και οι κύριοι ακροδέκτες του, κάποιες φορές, σημειώνονται ως MT_1 και MT_2 .

Η χαρακτηριστική καμπύλη τάσης - ρεύματος (V-I) για ένα τυπικό triac, φαίνεται στο Σχήμα 1.29. Η καμπύλη αυτή δείχνει τη σχέση μεταξύ της ροής ρεύματος διαμέσου των κυρίων ακροδεκτών του, σε κάθε κατεύθυνση (συμβολίζονται ως $+I_T$ και $-I_T$) και της παρεχόμενης τάσης στους κύριους ακροδέκτες του, σε κάθε κατεύθυνση (συμβολίζονται ως $+V$ και $-V$). Επιπλέον, αυτή η καμπύλη σχεδιάστηκε δίχως ροή ρεύματος διαμέσου του triac και ο κύριος ακροδέκτης 1 χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς, για όλες τις τιμές τάσης και ρεύματος.



Σχ. 1.29 : V-I χαρακτηριστικές ενός τυπικού triac

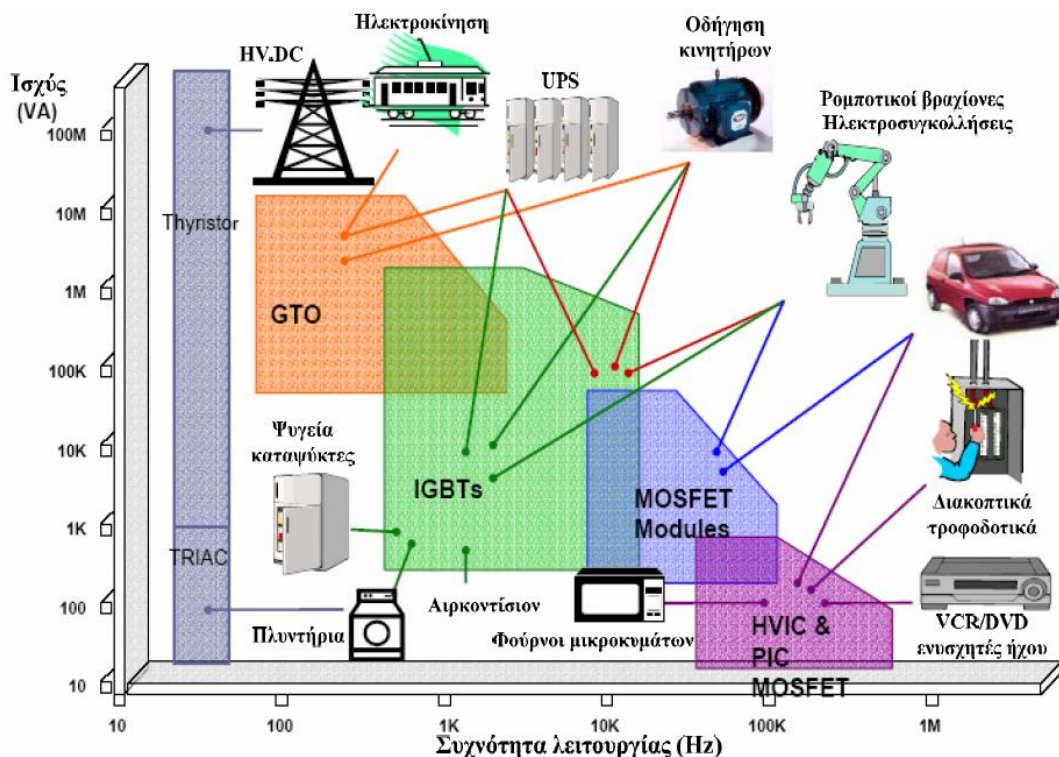
Το Σχήμα 1.25 δείχνει ότι όταν ο κύριος ακροδέκτης (MT_2) είναι θετικός σε σχέση με τον MT_1 (ή όταν η τάση τροφοδοσίας είναι ίση με $+V$), το ρεύμα δια μέσω της συσκευής ($+I_T$) παραμένει σε μία χαμηλή τιμή διαρροής, έως ότου η $+V$ ξεπεράσει την τάση διάσπασης ($+V_{BO}$) της συσκευής. Σε αυτή την περίπτωση, το triac μεταβαίνει από τη μη αγωγή στην αγωγή κατάσταση και το $+I_T$ μειώνεται, ουσιαστικά, από την εξωτερική αντίσταση του κυκλώματος. Το triac πρέπει να παραμείνει στην αγωγή κατάσταση, έως ότου το $+I_T$ μειωθεί κάτω από την τιμή ενός συγκεκριμένου ρεύματος συγκράτησης (I_H), όπως φαίνεται. Αυτό είναι ακριβώς ότι συμβαίνει, όταν ένας SCR υπόκειται σε μία ορθή τάση, η οποία υπερβαίνει τη σχετική της ορθή τάση διάσπασης.

Όταν ο MT_2 είναι αρνητικός σε σχέση με τον MT_1 , το triac παρουσιάζει την ίδια βασική V-I χαρακτηριστική, εφόσον το ρεύμα δια μέσω της συσκευής ($-I_T$) παραμένει σε μία χαμηλή τιμή διαρροής, έως ότου η $-V$ υπερβεί την τιμή διάσπασης ($-V_{BO}$) της συσκευής. Σε αυτή τη στιγμή, το triac μεταβαίνει από τη μη αγωγή στην αγωγή κατάσταση και παραμένει έτσι, ώσπου το $-I_T$ πέσει κάτω απ

Η καμπύλη V-I στο Σχήμα 1.29, επομένως, δείχνει ότι το triac παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά ενός SCR, σε οποιαδήποτε κατεύθυνση. Εν τούτοις, αυτή η καμπύλη δέ δείχνει, πως η πύλη του triac χρησιμοποιείται για να ελέγχει τη λειτουργία του. Όπως στον SCR που περιγράφηκε προηγουμένως, η τάση διάσπασης του triac (σε οποιαδήποτε κατεύθυνση) μπορεί να μεταβληθεί, ελέγχοντας το ποσό του ρεύματος πύλης, που ρέει δια μέσω της συσκευής. Όταν το ρεύμα πύλης αυξάνεται, η τάση διάσπασης ελαττώνεται. Εν τούτοις, υπάρχει ακόμη μία πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών λειτουργίας πύλης του SCR και εκείνων ενός triac. Ο SCR πάντα απαιτεί μια θετική τάση πύλης, αλλά το triac ανταποκρίνεται είτε σε θετική είτε σε αρνητική τάση πύλης. Με άλλα λόγια, η τάση διάσπασης του triac (σε οποιαδήποτε κατεύθυνση) μπορεί να ελαττωθεί, κάνοντας την πύλη πιο θετική ή πιο αρνητική, σε σχέση με τον MT_1 , ο οποίος χρησιμοποιείται ως ακροδέκτης αναφοράς. Αυτή η θετική ή αρνητική τάση πύλης, αντιστοίχως, παράγει ένα ρεύμα πύλης, το

οποίο ρέει έξω από ή προς τον αγωγό σύνδεσης της πύλης. Αυτά τα ρεύματα, με τη σειρά τους, ρυθμίζουν το σημείο στο οποίο η συσκευή ενεργοποιείται. Όπως ο SCR, το triac συνήθως υπόκειται σε τάσεις λειτουργίας, οι οποίες είναι μικρότερες από την τάση διάσπασής του (σε οποιαδήποτε κατεύθυνση). Η συσκευή ενεργοποιείται, υποβάλλοντάς την, σε ένα επαρκώς υψηλό ρεύμα πύλης, το οποίο ρέει προς ή από τον αγωγό σύνδεσης πύλης. Η συσκευή απενεργοποιείται, απλώς ελαττώνοντας το ρεύμα λειτουργίας της ($+I_T$ ή $-I_T$) κάτω από τη σχετική του τιμή I_H . Το triac είναι περισσότερο ευαίσθητο, όταν υποβάλλεται σε τιμές $+V$ και $+I_T$, σε συνδυασμό με θετική τάση πύλης. Υπό αυτές τις συνθήκες, η συσκευή απαιτεί το ελάχιστο ρεύμα πύλης, για να ενεργοποιηθεί για κάθε δεδομένη τιμή $+V$. Άλλοι συνδυασμοί τάσεων λειτουργίας και ρευμάτων λειτουργίας έχουν ως αποτέλεσμα μία απώλεια ευαισθησίας. Για να βοηθήσουν το σχεδιαστή του κυκλώματος να προσδιορίσει τις απαραίτητες συνθήκες για την ενεργοποίηση ενός triac, οι κατασκευαστές αυτών των στοιχείων, συνήθως, καθορίζουν ελάχιστες ή τυπικές τιμές του ρεύματος πύλης (σε οποιαδήποτε κατεύθυνση), που απαιτούνται για την ενεργοποίηση της συσκευής. Αυτές οι τιμές δίνονται για μία συγκεκριμένη τάση λειτουργίας, η οποία παρέχεται πρώτη στη μία κατεύθυνση και μετά στην άλλη ($+V$ και $-V$). Με αυτήν την πληροφορία, ο σχεδιαστής του κυκλώματος διασφαλίζει ότι επαρκές ρεύμα πύλης χρησιμοποιείται για να ενεργοποιηθεί το triac, την κατάλληλη στιγμή. Όπως και στα κυκλώματα SCR, αυτό το ρεύμα πύλης χρειάζεται να εφαρμοσθεί, στιγμιαίως, για να προκαλέσει την αλλαγή κατάστασης του triac.

Πιο κάτω βλέπουμε τα ηλεκτρονικά ισχύος και τις συνήθειες χρήσεις τους στην ζωή μας.



1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, όπως είναι το μηχανικό έργο, η θερμότητα, ο φωτισμός κ.λ.π. Στη συνέχεια αναφέρονται οι πιο γνωστές αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις χρήσεως, όπου η παρεμβολή των ηλεκτρονικών ισχύος μεταξύ πηγής τροφοδοσίας και φορτίου είναι πλέον αναπόφευκτη.

Ηλεκτροκίνηση στη βιομηχανία, όπου η κίνηση των διαφόρων μηχανών παραγωγής έργου γίνεται μέσω ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος. Τα βιομηχανικά ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα είναι, σχεδόν πάντα, ελεγχόμενα δηλ. η ταχύτητα ή η ροπή και συνεπώς η παρεχόμενη ισχύς ως συνάρτηση του χρόνου πρέπει να ακολουθεί δεδομένο χρονοδιάγραμμα με ακρίβεια, ταχύτητα και αξιοπιστία. Οι απαιτήσεις αυτές αποθηκεύονται ως πληροφορία σε μικροϋπολογιστές και η απόκλιση της πραγματικής κατάστασης από την επιθυμητή δημιουργεί κατάλληλα σήματα, με βάση τα οποία οδηγείται ένας μετατροπέας παράγοντας τα αναγκαία ηλεκτρικά μεγέθη. Παραδείγματα: Τσιμεντοβιομηχανία, χαρτοποιία, μεταλλοβιομηχανία, κλωστοϋφαντουργία, βιομηχανίες τροφών και ποτών, αντλιοστάσια, εργαλειομηχανές για την επεξεργασία μετάλλου και άλλων υλικών, κ.λ.π.

Ηλεκτροκίνηση Μέσα Μεταφορών, όπου οι ηλεκτρικοί κινητήρες παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσεως. Η αντιμετώπιση δύο αρνητικών παραγόντων, η ρύπανση του περιβάλλοντος και η απεξάρτηση από τους υδρογονάνθρακες, επιτυγχάνεται κατά τον καλύτερο τρόπο χρησιμοποιώντας την ηλεκτροκίνηση. Λόγω της φύσεως των φορτίων πρέπει να ελέγχεται η ροή της ισχύος πολύ δραστικά, κάτι που εξασφαλίζεται με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Παραδείγματα: Τρένο, μετρό, τρόλεϊ, αυτοκίνητα, υποβρύχια και άλλα πλωτά μεταφορικά μέσα.

Παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής χρειάζονται διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο της διέγερσης των σύγχρονων γεννητριών και την οδήγηση πλήθους κινητήρων για βοηθητικές λειτουργίες και κυρίως για τη μεταφορά του λιγνίτη στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Επίσης στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας υπό υψηλή συνεχή τάση για την αποφυγή των απωλειών και για την απλούστευση του συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς πολύ υψηλών τάσεων και πολύ υψηλής ισχύος.

Εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, π.χ. μετατροπή της αιολικής ή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η φύση των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών γεννητριών είναι τέτοια, ώστε να απαιτείται παρέμβαση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος μεταξύ πηγής και ηλεκτρικού δικτύου, για τη σταθεροποίηση της τάσης και της συχνότητας και για μετασχηματισμό των παραγόμενων ηλεκτρικών μεγεθών σε άλλα, που να είναι κατάλληλα τόσο για τον παραλληλισμό με το δίκτυο όσο και για τη δημιουργία μεμονωμένων πηγών τροφοδοσίας σε απομακρυσμένες περιοχές.

Συστήματα αδιάλειπτης παροχής ηλεκτρικής ενέργειας για την εξασφάλιση τροφοδοσίας κρίσιμων ηλεκτρικών φορτίων σε περιπτώσεις διαταράξεων του ηλεκτρικού δικτύου. Παραδείγματα: Νοσοκομειακές χρήσεις, αεροδρόμια, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, κ.λ.π.

Ηλεκτρικές συσκευές και εργαλεία για οικιακές χρήσεις ή εργαστηριακές χρήσεις, όπου απαιτείται έλεγχος της ροής ισχύος. Παραδείγματα: Κλιματιστικά, πλυντικά, ηλεκτροσυγκολλήσεις, κ.λ.π.

Ηλεκτροχημικές και ηλεκτρομεταλλουργικές διεργασίες, όπως είναι η ηλεκτρόλυση όπου απαιτείται χαμηλή συνεχής τάση και υψηλά συνεχή ρεύματα, ο γαλβανισμός, η τήξη των μετάλλων όπου απαιτείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας, κ.λ.π.

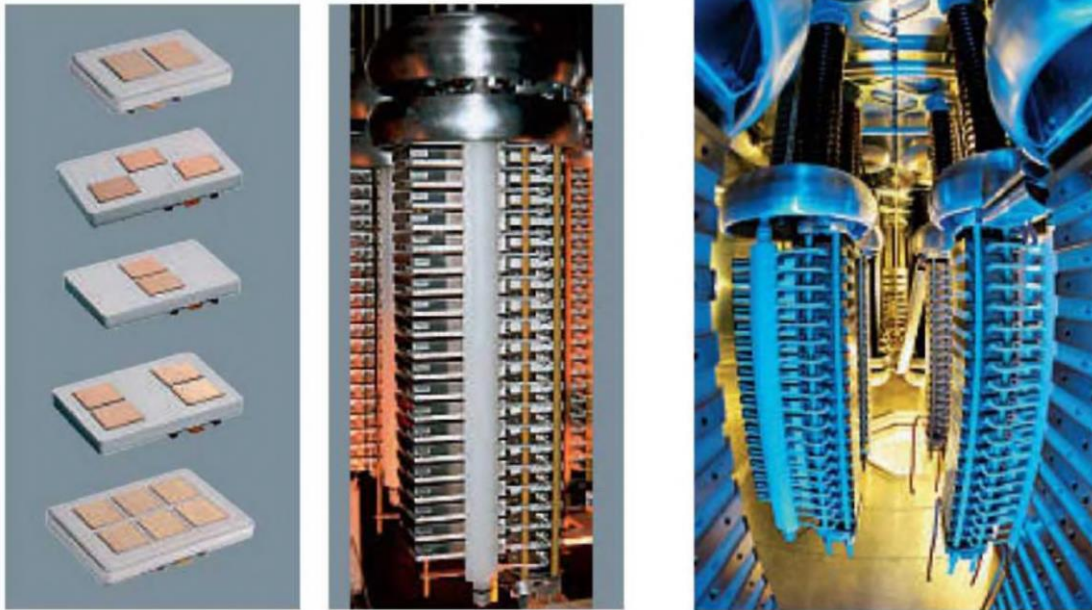
Φωτισμός, όπου απαιτείται αυτόματη ρύθμιση της φωτεινής έντασης, π.χ. ηχοφωτορυθμικές διατάξεις, κ.λ.π.

Θερμότητα, όπου η θερμική ενέργεια που προέρχεται από μία ηλεκτρική πηγή πρέπει να ακολουθεί κάποιο επιθυμητό χρονοδιάγραμμα και συγκεκριμένες προδιαγραφές. Παραδείγματα: Επαγωγική θέρμανση, θερμική σκλήρυνση υλικών, θέρμανση ειδικών χώρων για διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε ορισμένο επίπεδο, κ.λ.π.

Ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση εφαρμογών χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς με θυρίστορ (μεγάλα φορτία υπό υψηλές τάσεις και μεγάλα ρεύματα) ή τρανζίστορ ισχύος με σπουδαιότερο εκπρόσωπο το IGBT (για μικρότερης κλίμακας ισχύ) κ.ο.κ. Ειδικά στις περιπτώσεις υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας των μετατροπέων, π.χ. 500kHz, χρησιμοποιούνται τρανζίστορ MOSFET. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μετατροπείς συντονισμού, οι οποίοι γενικά είναι μικρής ισχύος. Ακολουθούν μερικές εικόνες από τυπικές εφαρμογές των παραπάνω περιοχών.



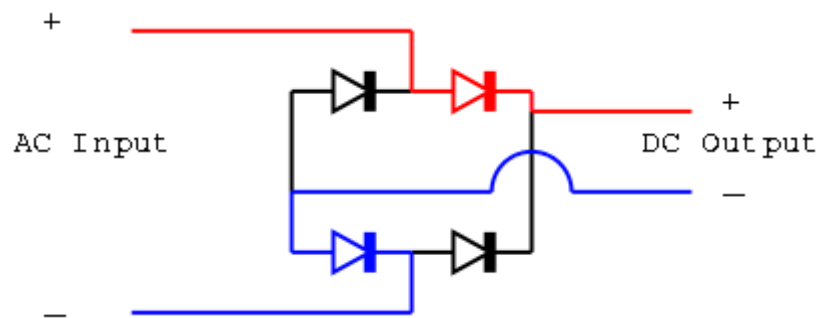
Σχ.1.3 Το μαγνητικό τρένο "Transrapid" στη Σαγκάη (Κίνα) το έτος 2003, 430 km/h, πρώτη εμπορική εφαρμογή στον κόσμο. Δεξιά φαίνεται το σύστημα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος για την τροφοδοσία των γραμμικών



Σχ. 1.4 Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή με στοιχεία IGBT για υπόγεια μεταφορά ισχύος υπό υψηλή κινητήρων.

1.4 ΕΙΔΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

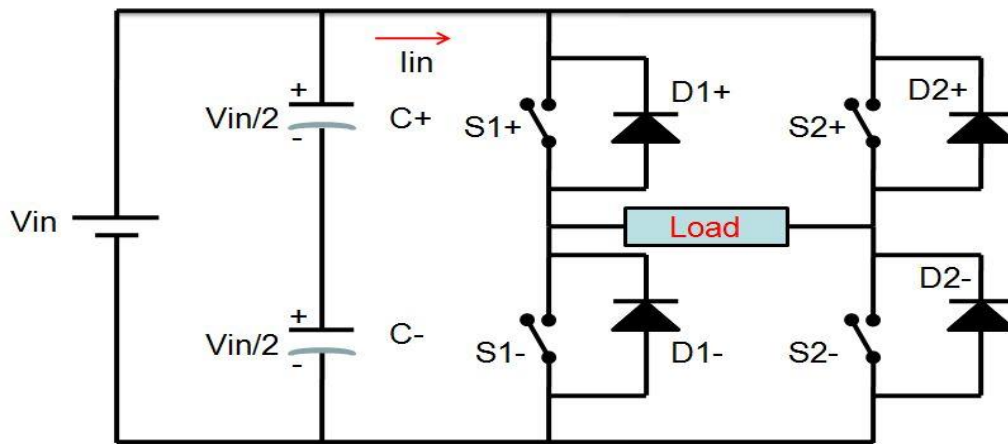
Οι μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας (ισχύος) διακρίνονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της ισχύος εισόδου και εξόδου. Αυτές είναι: **Μετατροπείς ac-dc ή Ανορθωτές (Rectifiers)**. Ανορθωτές ονομάζονται οι διατάξεις ισχύος, οι οποίες μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Ανάλογα με τη μορφή της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές διακρίνονται σε *μονοφασικούς* και *πολυφασικούς* (διφασικούς, τριφασικούς, εξαφασικούς). Ακόμη διακρίνονται σε *ελεγχόμενους* και *μη ελεγχόμενους*, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μεταβαλλόμενη ή σταθερή.



Σχ. 1.5: Ανορθωτής πλήρους γέφυρας.

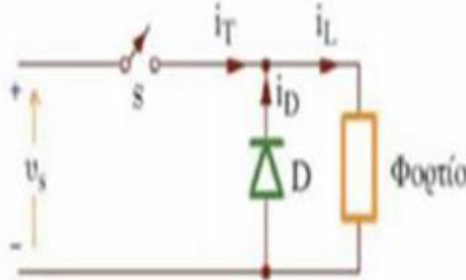
Μετατροπείς dc-ac ή Αντιστροφείς (Inverters). Οι αντιστροφείς μετατρέπουν την ενέργεια συνεχούς μορφής σε εναλλασσόμενη. Η λειτουργία τους είναι δηλαδή αντίθετη από εκείνη των ανορθωτών. Η έξοδος των αντιστροφέων είναι μονοφασική

είτε πολυφασική (συνήθως τριφασική). Επίσης, η συχνότητα και το πλάτος της τάσης ή του ρεύματος εξόδου είναι ελεγχόμενα.

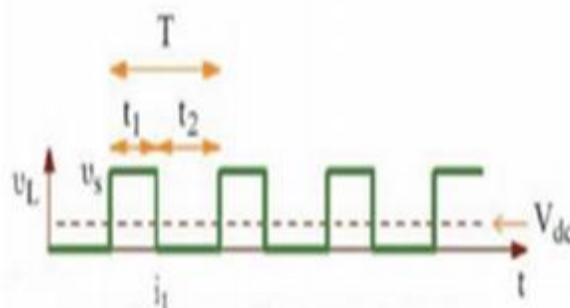


Σχ. 1.6: Μονοφασικός Αντιστροφέας Πλήρους Γέφυρας.

Μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (dc-dc converters, choppers). Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν τη συνεχή τάση με ορισμένο πλάτος και πολικότητα σε συνεχή τάση με διαφορετικό πλάτος ή/και πολικότητα.



Σχ. 1.7: Κύκλωμα μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ



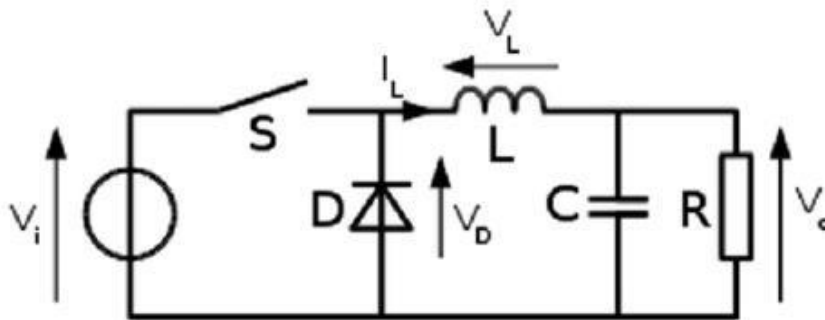
Σχ. 1.8 Χαρακτηριστική της τάσης εξόδου

Σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα, διαπιστώνουμε ότι η μέση τιμή της τάσης U_L η οποία τροφοδοτεί το φορτίο μπορεί να πάρει τιμές τάσης πολύ χαμηλές σχεδόν κοντά στο μηδέν έως τιμές που να πλησιάζουν την τιμή της τάσης U_s .

Η μέση τιμή της τάσης U_L εξαρτάται από τους συγκεκριμένους παράγοντες:

- Από την συχνότητα επανάληψης του ανοίγματος και κλεισίματος του διακόπτη S. Η συχνότητα F είναι ανάλογη με την μέση τιμή της τάσης U_L , επομένως όσο αυξάνεται η συχνότητα F τότε αυξάνεται και η μέση τιμή της τάσης U_L .
- Από την διάρκεια του χρόνου t_{on} κατά τον οποίο παραμένει ανοικτός ο διακόπτης S. Η διάρκεια του χρόνου t_{on} είναι ανάλογη με την μέση τιμή της τάσης U_L , άρα όσο αυξάνεται η διάρκεια του χρόνου t_{on} , αυξάνεται και η μέση τιμή της τάσης U_L .
- Από συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων

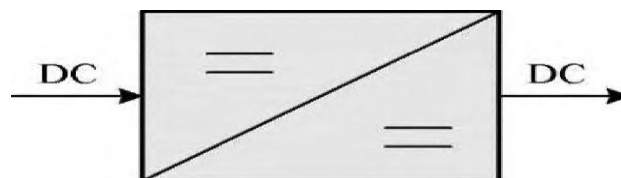
Διακρίνονται επίσης σε **μετατροπείς υποβιβασμού (step-down) και ανύψωσης (step-up)** της τάσης, ανάλογα με το αν η τάση εξόδου είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της τάσης εισόδου.



Σχ. 1.9: Κύκλωμα Μετατροπέα Σ.Ρ/Σ.Ρ Υποβιβασμού.

Μετατροπείς εναλλασσομένου ρεύματος ή Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters).

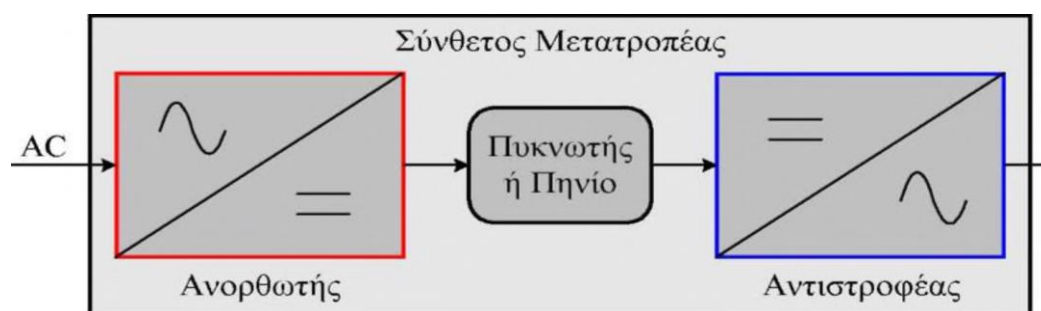
Οι κυκλομετατροπείς μετατρέπουν απευθείας, την εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας, σε εναλλασσόμενη τάση με ρυθμιζόμενο πλάτος και συχνότητα. Ο κυκλομετατροπέας ονομάζεται υποβιβασμού συχνότητας (step-down) όταν η συχνότητα εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας εισόδου. Διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως ανύψωσης συχνότητας (step-up). Οι κυκλομετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές πολύ μεγάλης ισχύος. Μια ειδική κατηγορία των μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος είναι οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης παρέχουν στην έξοδό τους μια τάση μεταβαλλόμενου πλάτους, η συχνότητα της οποίας είναι σταθερή και ίση.



Σχ. 1.10 Γενικό σύμβολο του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος

Η παραπάνω διάκριση των μετατροπέων ισχύος δεν είναι απόλυτα ακριβής, καθώς προϋποθέτει ότι η ροή της ισχύος είναι μονόδρομη, από την είσοδο προς την έξοδο του μετατροπέα. Στην πραγματικότητα η ροή της ισχύος στους περισσότερους μετατροπείς είναι αμφίδρομη. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύς μπορεί να ρέει και από την έξοδο του μετατροπέα προς την είσοδό του. Η αμφίδρομη ροή της ισχύος παριστάνεται στο Σχ. 1.10, στην περίπτωση του μετατροπέα που χαρακτηρίσαμε "ανορθωτή". Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί συμβατικά ως ανορθωτής, δηλαδή

μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου σε συνεχή τάση στην έξοδο. Στην περίπτωση αυτή η ροή της ισχύος είναι θετική, από την είσοδο στην έξοδο του μετατροπέα. Ο ίδιος μετατροπέας με κατάλληλο έλεγχο των διακοπών του μπορεί να λειτουργήσει και ως αντιστροφέας, μεταφέροντας αρνητική ισχύ. Τότε, ο μετατροπέας μεταφέρει ισχύ συνεχούς μορφής από την έξοδό του, στο εναλλασσόμενο δίκτυο. Η αμφίδρομη ροή της ισχύος προϋποθέτει ότι ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου $io-uo$ όπου, io είναι το ρεύμα εξόδου και uo η τάση εξόδου του μετατροπέα. Σ' ένα μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων η φορά του ρεύματος io μπορεί να αντιστραφεί, ενώ η πολικότητα της uo μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος. Ο συμβατικός ανορθωτής με *SCR* λειτουργεί μόνο στα δύο από τα τέσσερα τεταρτημόρια και ειδικότερα στο πρώτο και το δεύτερο. Ένας πρακτικός μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας συχνά περιλαμβάνει περισσότερους από ένα στοιχειώδεις μετατροπείς ισχύος. Έτσι η συνεχής τάση εισόδου των αντιστροφέων παρέχεται συνήθως από ένα ανορθωτή, καθώς το διαθέσιμο δίκτυο ισχύος είναι εναλλασσόμενο (Σχ.1.11). Στην περίπτωση αυτή απαιτείται η αποσύζευξη των δύο μετατροπέων. Η αποσύζευξη εξασφαλίζει ότι η λειτουργία του κάθε μετατροπέα δεν επηρεάζει τους υπόλοιπους. Η αποσύζευξη επιτυγχάνεται με την προσθήκη μεταξύ των μετατροπέων στοιχείων αποθηκεύουν ενέργεια, δηλαδή πυκνωτών ή πηνίων. Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ακόμη σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο μετάβασης των διακοπτικών στοιχείων τους:



Σχ. 1.11 Λειτουργικό διάγραμμα ενός σύνθετου μετατροπέα.

Μετατροπείς με φυσική μετάβαση (natural, line, load commutated ή phase controlled converters). Οι διακόπτες των μετατροπέων με φυσική μετάβαση ανοίγουν ή και κλείνουν με τη βοήθεια της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου (εισόδου), ή των συνθηκών που επιβάλλει το φορτίο. Οι μετατροπείς με φυσική μετάβαση έχουν περιορισμένες δυνατότητες και χρήσεις. Η εξέλιξή τους έχει σημειωθεί άλλωστε πριν από αρκετές δεκαετίες, με την κατασκευή του *SCR*. Η τάση εξόδου των μετατροπέων με φυσική μετάβαση αποτελείται από τμήματα της τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ισχυρές αρμονικές συνιστώσες στην είσοδο και την έξοδο του μετατροπέα. Έτσι, ένας αντιστροφέας τάσης δεν μπορεί να ανήκει στην κατηγορία των μετατροπέων με φυσική μετάβαση. Αντίθετα, οι τυπικοί ανορθωτές με διόδους ή *SCR* και οι κυκλομετατροπείς υποβιβασμού της συχνότητας, είναι μετατροπείς με φυσική μετάβαση.

Μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση (force commutated ή switch mode converters). Η κατάσταση των διακοπών στους μετατροπείς με εξαναγκασμένη μετάβαση ορίζεται αποκλειστικά από τη μονάδα ελέγχου της διάταξης ισχύος. Οι διακόπτες των μετατροπέων αυτών λειτουργούν συνήθως σε υψηλές συχνότητες και

έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως διακοπτικοί ενισχυτές ισχύος με υψηλό κέρδος (switching-mode power amplifiers).

Μετατροπείς συντονισμού (resonant converters). Η έναυση και η σβέση των διακοπών στους μετατροπείς συντονισμού επιτελείται όταν η τάση στα άκρα τους, ή/και το ρεύμα που τους διαρρέει, είναι μηδέν. Επειδή οι περισσότερες τοπολογίες των μετατροπέων αυτών απαιτούν κάποιο κύκλωμα συντονισμού LC , επικράτησε να ονομάζονται μετατροπείς συντονισμού. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων συντονισμού έναντι των δύο προηγούμενων τύπων είναι ότι περιορίζονται δραστικά οι μεταβατικές απώλειες ισχύος στους διακόπτες και η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

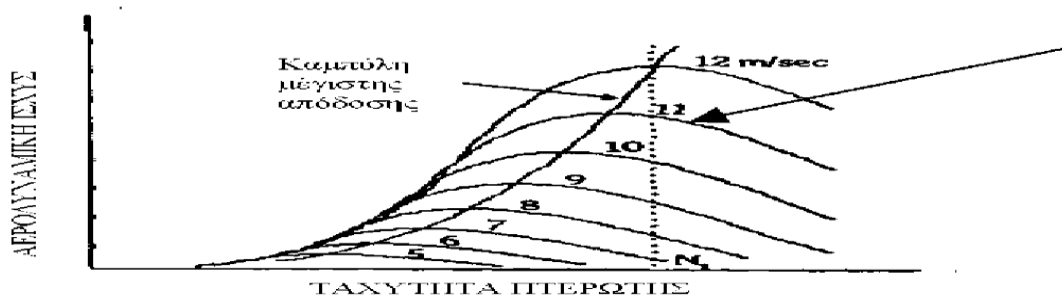
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί την κυριότερη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και βρίσκεται σε μεγάλη άνθηση την τελευταία δεκαετία στην Ευρώπη αλλά και παγκόσμια. Η χώρα μας έδειξε έντονο ενδιαφέρον από το 2000 και έπειτα αποφασίζοντας να εκμεταλλευτεί το πλούσιο αιολικό δυναμικό και να δώσει ώθηση σε μεγάλες επενδύσεις προς αυτή την κατεύθυνση η οποίες θα εμφανίζουν συνεχώς αυξητικές τάσεις στο μέλλον λόγω της σχετικής Ευρωπαϊκής οδηγίας.

Όλοι γνωρίζουμε ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ραγδαία αύξηση στη ζήτηση «καθαρής» ενέργειας, ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η επιβάρυνση στο περιβάλλον. Η στροφή προς τις ήπιες μορφές ενέργειας έδωσε ώθηση στην εξέλιξη των τεχνολογιών των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική και στην εμπορευματοποίηση των ανεμογεννητριών. Δημιουργήθηκε λοιπόν η ανάγκη εκπόνησης εκτεταμένων ερευνών για βελτιστοποίηση των συστημάτων αυτών. Η μελέτη τους οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αξιοπιστίας τους, παράλληλα με την αύξηση του μεγέθους και της ενεργειακής τους απόδοσης. Η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών έχει ξεπεράσει ήδη τα 2 MW φτάνοντας μέχρι και τα 3 MW, ενώ σήμερα οι πιο εμπορικές μηχανές έχουν ισχύ της τάξεως των 500 με 1000 KW. Τα προβλήματα που εμφανίζονται γενικά σ' αυτά τα συστήματα σχετίζονται κυρίως με τη στοχαστική φύση της ενεργειακής πηγής τους που είναι ο άνεμος. Όπως είναι γνωστό ο άνεμος είναι μεταβαλλόμενος και φυσικά μη προβλέψιμος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα συνεχείς μεταβολές της παραγόμενης ισχύος των συστημάτων αυτών και συνεπώς συνεχείς διαταραχές στα ηλεκτρικά δίκτυα που συνδέονται, λόγω της συνεχούς διακύμανσης της τάσης και της συχνότητας, της απορρόφησης άεργου ισχύος και γενικότερα της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Εξαιτίας αυτών στόχος όλων των ερευνητικών δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες, είναι εκτός της βέλτιστης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού, η παραγωγή ηλεκτρικής με τα καλύτερα κατά το δυνατόν χαρακτηριστικά για τα ηλεκτρικά δίκτυα. (Σχ.2.1).

Η μέχρι σήμερα ερευνητική δραστηριότητα έδειξε ότι μόνο τα συστήματα μεταβλητών στροφών σταθερής συχνότητας οδηγούν σε βέλτιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν άλλα προβλήματα τα οποία σχετίζονται με το κόστος κατασκευής τους αλλά και με το φαινόμενο της έγχυσης αρμονικών στο δίκτυο λόγω της διακοπτικής λειτουργίας τους, αφού η εφαρμογή τους στηρίζεται στη χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.



Σχ.2.1 Καμπύλη ισχύος ανεμοκινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας

2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

2.2.1 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος σε Α/Γ σταθερών στροφών περιορίζεται στη βελτίωση της λειτουργίας της γεννήτριας. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται για να γίνεται ομαλή εκκίνηση της γεννήτριας και σύνδεση με το δίκτυο και για να μειωθεί η τάση της γεννήτριας και οι μαγνητικές απώλειες σε χαμηλές ταχύτητες ανέμων. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να δώσουν σημαντική βελτίωση στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των Α/Γ σταθερών στροφών. Οι γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα παραπάνω συστήματα μπορεί να είναι ασύγχρονες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή και σύγχρονες. Η λειτουργία με σταθερό αριθμό στροφών αν τη δούμε σχηματικά σε ένα διάγραμμα ισχύος - ταχύτητας αντιστοιχεί σε μία ευθεία κάθετη στον άξονα των ταχυτήτων που τέμνει τις αεροδυναμικές καμπύλες της πτερωτής σε σημεία διαφορετικά από το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος (Σχ.2.1). Κατά την εκκίνηση της Α/Γ υπάρχουν υψηλά ρεύματα τα οποία δημιουργούν προβλήματα στα δίκτυα, αλλά και καταπόνηση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού του συστήματος λόγω ταλαντώσεων. Με τη βοήθεια μετατροπέα Ε.Τ. που αποτελείται από τρία ζεύγη αντιπαράλληλων θυρίστορ ρυθμίζουμε την τάση της γεννήτριας με αποτέλεσμα την ομαλή ένταξη στο δίκτυο.



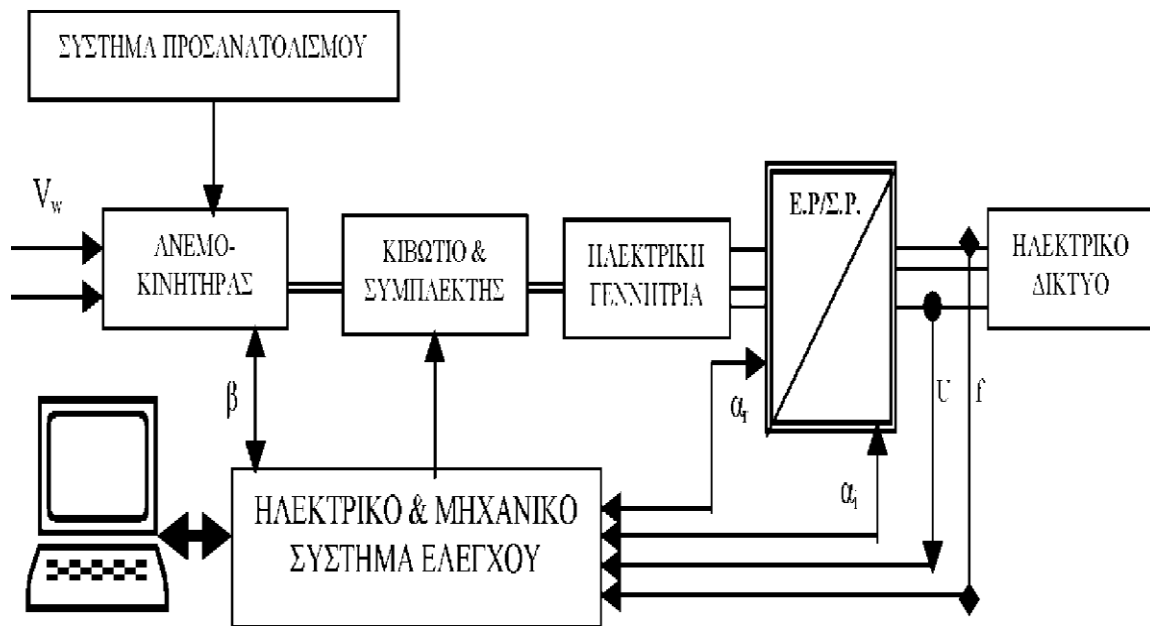
Σχ. 2.2: Βασική δομή συστήματος σταθερών στροφών-σταθερής συχνότητας

2.2.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

Αντίθετα με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών η χρήση γεννητριών μεταβλητών στροφών δίνει λύση σε αρκετά από τα προβλήματα που αναφέραμε παραπάνω. Αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι η γεννήτρια να δουλεύει στη βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας (σχ.2.1). Προσπαθούμε δηλαδή να επιτύχουμε τη λειτουργία της γεννήτριας με τέτοιο τρόπο ώστε ο ρότορας να ακολουθεί τις μεταβολές του ανέμου, για να επιτύχουμε μέγιστο συντελεστή c_p και συνεπώς βέλτιστο λόγο ακροπερυγίου. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η λειτουργία στη βέλτιστη αεροδυναμική καμπύλη περιορίζεται μέχρι κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα πέρα από την οποία αρχίζουν να λειτουργούν παράλληλα και τα μηχανικά συστήματα ελέγχου (περιστροφή των πτερυγίων - pitch control) για το περιορισμό της ισχύος στο ονομαστικό όριο της ανεμογεννήτριας. Έτσι επιτυγχάνεται μείωση των καταπονήσεων στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας με ταυτόχρονη μείωση του

εκπεμπόμενου θορύβου, αλλά και βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος. Η απ' ευθείας σύνδεση όμως της γεννήτριας στο δίκτυο σημαίνει ότι η ταχύτητα του ρότορα καθορίζεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου, άρα δεν είναι δυνατόν να ακολουθήσει η ταχύτητα του ρότορα την ταχύτητα του ανέμου. Θα πρέπει λοιπόν να απομονώσουμε τη γεννήτρια από το δίκτυο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε όπως είπαμε και παραπάνω διάφορες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος. Μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης των ηλεκτρονικών στοιχείων των τοπολογιών που θα περιγράψουμε μπορούμε να ελέγξουμε τη μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας και άρα τη μέγιστη παραγωγή.

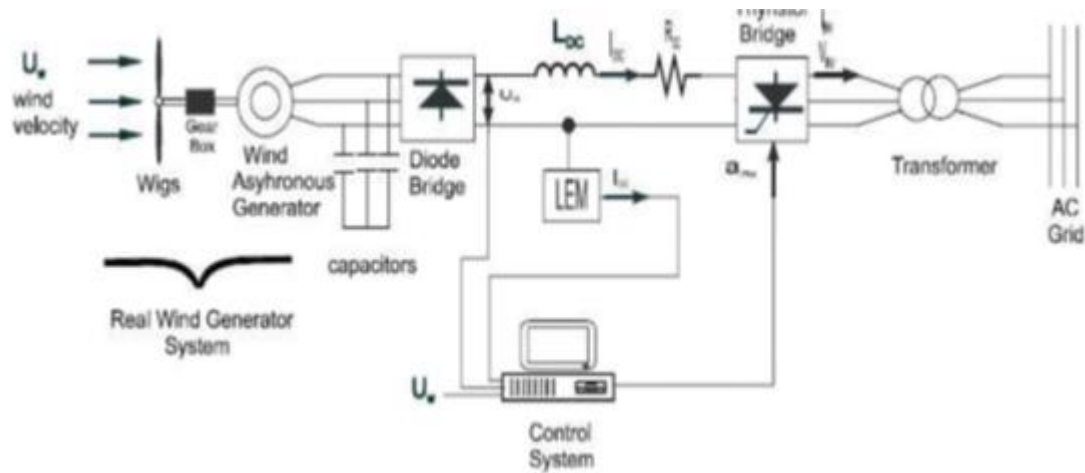
Παρακάτω θα δούμε τους τύπους γεννητριών που χρησιμοποιούμε για λειτουργία με μεταβλητές στροφές και τις διάφορες τοπολογίες που χρησιμοποιούνται για κάθε μία από αυτές, καθώς επίσης τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.



Σχ.2.3 Βασική δομή συστήματος μεταβλητών στροφών - σταθερής συχνότητας (Μ.Σ.Σ.Σ)

2.2.3 ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ

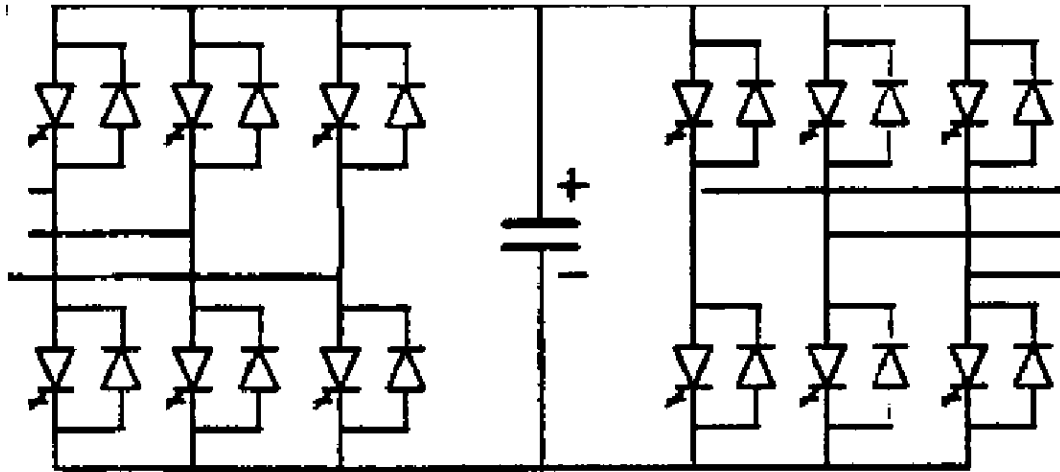
Οι ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού μπορούν να λειτουργήσουν με μεταβλητό αριθμό στροφών αν χρησιμοποιήσουμε μετατροπείς πηγής τάσης ή πηγής ρεύματος. Ο πιο απλός μετατροπέας που χρησιμοποιείται σε τέτοια συστήματα είναι ο μετατροπέας πηγής τάσης που αποτελείται από ένα απλό αντιστροφέα με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση του δικτύου και συνδέεται στην πλευρά του δικτύου, μαζί με ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων ή ένα μετατροπέα με φυσική μετάβαση στην πλευρά του στάτη (Σχ.2.4). Αυτός είναι ένας απλός μετατροπέας πηγής τάσης. Στις περισσότερες εφαρμογές η ασύγχρονη γεννήτρια πρέπει να έχει πυκνωτές.



Σχ. 2.4: Μετατροπέας πηγής τάσης

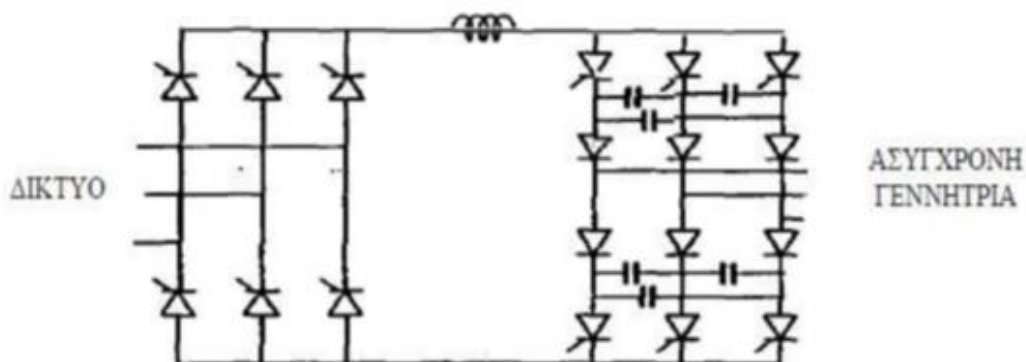
Η τεχνική που χρησιμοποιείται στηρίζεται στη ρύθμιση της γωνίας έναυσης των θυρίστωρ ώστε να αρχίζει η αγωγή τους όταν η γεννήτρια έχει επιταχυνθεί, αποκτώντας ταχύτητα τέτοια ώστε η τάση εξόδου του ανορθωτή να είναι μεγαλύτερη από τη τάση του δικτύου. Η ταχύτητα, το ρεύμα και η ισχύς αυξάνονται με σχεδόν σταθερό συντελεστή ισχύος καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να αποτελείται από θυρίστωρ GTO ώστε να μπορούν να λειτουργήσουν σε ισχύς της τάξεως των MW και τα οποία προοπτικά αντικαθίστανται με στοιχεία IGBT εξαιτίας της αύξησης της ονομαστικής τάσης και του ρεύματος αυτών. Η διάταξη αυτή παρουσιάζει προβλήματα λόγω της αυτοδιέγερσης των πυκνωτών και των ανεπιθύμητων συντονισμών ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου όπου έχουμε σημαντικές μεταβολές της παραγόμενης ισχύος, ενώ ο έλεγχος της τάσης δεν είναι εύκολος με τους πυκνωτές σταθερού μεγέθους.

Μια άλλη τοπολογία που χρησιμοποιείται συχνά, περιέχει δύο όμοιους μετατροπείς πηγής τάσης PWM (Σχ.2.5). Η χρήση του μετατροπέα αυτού στην έξοδο εξασφαλίζει δυνατότητα ροής ισχύος προς τις δύο κατευθύνσεις, ελαχιστοποιεί την αρμονική παραμόρφωση των ρευμάτων εξόδου και επιτρέπει τον έλεγχο της άεργου ισχύος του συστήματος. Ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας περιορίζει τις αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της δυναμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από θυρίστωρ GTO για μεγάλες γεννήτριες της τάξεως των MW και τα οποία όπως και στον προηγούμενο μετατροπέα τείνουν να αντικατασταθούν με ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος IGBT. Το κόστος βέβαια αυτού του μετατροπέα παραμένει υψηλό και οριακά συμφέρον για τέτοιου είδους εφαρμογές.

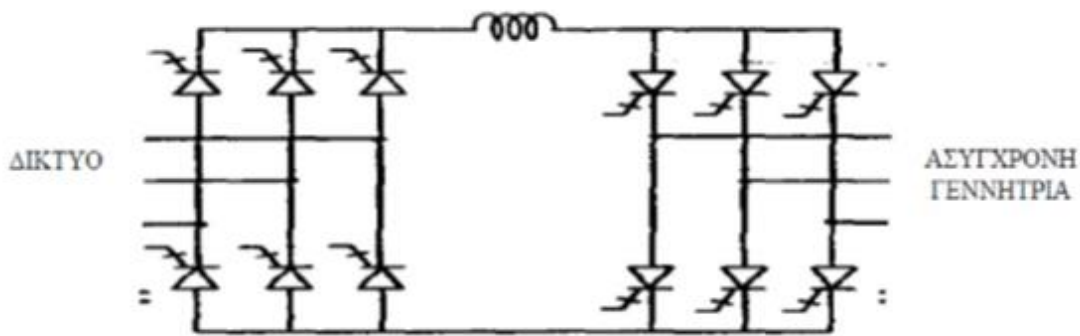


Σχ.2.5 Σύστημα με δύο μετατροπείς πηγής τάσης.

Μία άλλη συνδεσμολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από έναν μετατροπέα πηγής ρεύματος που συνδέεται στην πλευρά της γεννήτριας, σε συνδυασμό με ένα μετατροπέα με μεταγωγή από την τάση του δικτύου στην πλευρά του δικτύου (Σχ.6). Χρησιμοποιείται ευρέως σε επαγωγικές μηχανές σε άλλες εφαρμογές (έλεγχος ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων) αλλά δεν έχει εφαρμοσθεί ιδιαίτερα σε ανεμογεννήτριες. Είναι απλή κατασκευή, αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και έχει τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος. Παρ' όλα αυτά δε δίνει λύση στα προβλήματα των υψηλών αρμονικών και των αιχμών των τάσεων της μηχανής λόγω των κυκλωμάτων μεταγωγής των θυρίστορ. Ο δε μετατροπέας εξόδου παρουσιάζει ανάλογα προβλήματα αρμονικών και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος, γεγονός το οποίο απαιτεί την εγκατάσταση φίλτρων αρμονικών και διόρθωσης του συντελεστού ισχύος. Αυτό καθιστά απαγορευτική την εγκατάσταση τέτοιων τοπολογιών σε ασθενή δίκτυα με μεγάλη διεύθυνση ισχύος. Καλύτερα αποτελέσματα έχουμε με τη χρήση διπλών μετατροπέων πηγής ρεύματος PWM με ημιαγωγικά στοιχεία τύπου GTO, όπου έχουμε μείωση των αρμονικών των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής, καθώς και έλεγχο της άεργου ισχύος



Σχ. 2.6: Σύστημα μετατροπέα πηγής ρεύματος

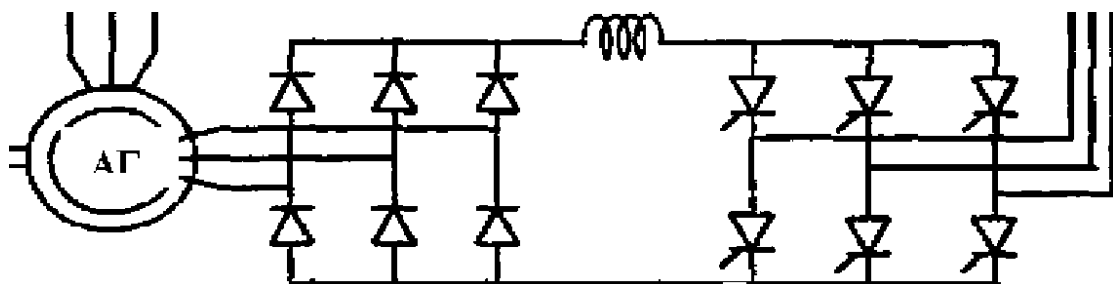


Σχ. 2.7: Σύστημα με δύο μετατροπείς, πηγή ρεύματος

2.2.4 ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Μία άλλη διάταξη που έχει εφαρμοσθεί σε ανεμογεννήτριες περιλαμβάνει επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με σύστημα μετατροπών συνδεδεμένων στα άκρα του. Ο μετατροπέας μπορεί να αποτελείται από ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων στο δρομέα και ένα αντιστροφέα στην έξοδο (Σχ.2.8). Μέσω αυτού του κυκλώματος γίνεται ανάκτηση της ισχύος ολισθήσεως και επιστροφή της στο δίκτυο. Η χρησιμοποίηση βέβαια τέτοιου είδους γεννήτριας έχει το μειονέκτημα του υψηλού κόστους με μεγαλύτερες απαιτήσεις ως προς τη συντήρηση και τη λειτουργία της. Η απαίτηση όμως για χρήση απλών τοπολογιών μετατροπών μικρότερης ισχύος έχει το πλεονέκτημα της απλής και φθηνής λύσης, που δε δίνει όμως λύση στα προβλήματα των αρμονικών στο δίκτυο και στην υψηλή κατανάλωση άεργου ισχύος, φαινόμενα τα οποία είναι μειωμένα σε σχέση με τη χρήση ενός ανάλογου μετατροπέα στη μεριά του στάτη. Προφανώς η λειτουργία αυτής της γεννήτριας είναι δυνατή μόνο σε υπερσύγχρονες στροφές. Είναι δυνατόν, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις να χρησιμοποιήσουμε ελεγχόμενο μετατροπέα με θυρίστορ, ή μετατροπέα πηγής ρεύματος ή και σύστημα διπλών μετατροπών PWM. Σ' αυτή την περίπτωση μπορεί η γεννήτρια να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε ταχύτητα με κατάλληλη διαστασιολόγηση του μετατροπέα και παρουσιάζει άριστα χαρακτηριστικά ελέγχου και ρύθμιση του συντελεστή φορτίου με ταυτόχρονη μείωση των αρμονικών.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε κυκλομετατροπέα, για τη διασύνδεση μεταξύ του δρομέα και του δικτύου, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς της ισχύος και προς τις δύο διευθύνσεις. Η περιοχή λειτουργίας της γεννήτριας επεκτείνεται και σε στροφές κάτω από τη σύγχρονη και είναι δυνατός ο έλεγχος της άεργου ισχύος εξόδου. Είναι απλή λύση για μεγάλες ανεμογεννήτριες και ιδιαίτερα αξιόπιστη, αλλά το κόστος του κυκλομετατροπέα είναι ακόμα υψηλό.



Σχ.2.8 Σύστημα με Α.Γ. δακτυλιοφόρου δρομέα με μετατροπέα για ανάκτηση της ισχύος ολίσθησης.

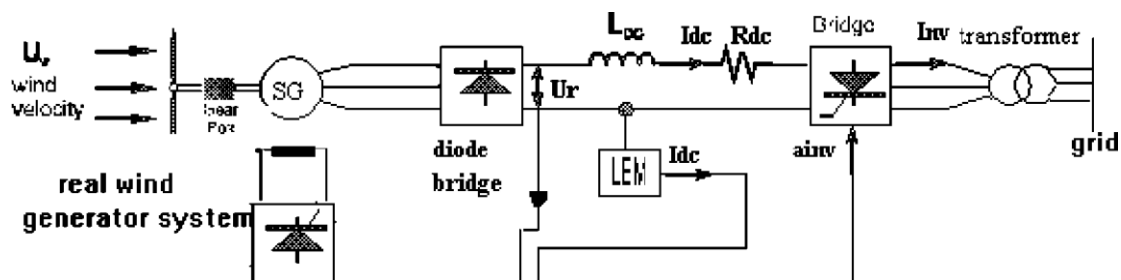
Υπάρχουν επίσης εφαρμογές, με ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα όπου μέσω των εξωτερικών κυκλωμάτων του δρομέα επιτυγχάνεται περιορισμένη μεταβολή των στροφών, της τάξεως της 10%, ώστε να περιοριστούν τα δυναμικά προβλήματα που εμφανίζονται εξ' αιτίας του μηχανικού ελέγχου της γωνίας κλίσης των πτερυγίων και να εξομαλυνθούν οι ροπές και η ισχύς εξόδου, χωρίς όμως να είναι δυνατή η πλήρης ανάκτηση της ισχύος του δρομέα.

2.2.5 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η σύγχρονη γεννήτρια μέσω της δυνατότητας ρύθμισης του πεδίου δίνει τη δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος, χωρίς την ανάγκη τοποθέτησης πυκνωτών. Μέχρι τώρα οι σύγχρονες γεννήτριες δε βρήκαν μεγάλη εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες κυρίως λόγω της απαίτησης για συγχρονισμό με το δίκτυο και της άμεσης διασύνδεσης με αυτό σε συνδυασμό με τις μεγάλες μεταβολές του αέρα γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα μεγάλες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Με τη χρήση όμως των ηλεκτρονικών ισχύος είναι δυνατή η εφαρμογή αυτών των γεννητριών σε αιολικά συστήματα αφού απορροφούν τις ταλαντώσεις. Η τοπολογία ανορθωτών που απαιτείται είναι φυσικής μεταγωγής αφού δεν υπάρχει ανάγκη παραγωγής άεργου ισχύος όπως στην ασύγχρονη γεννήτρια όπου απαιτούνται ανορθωτές εξαναγκασμένης μεταγωγής ή αυτομεταγωγής.

Το σύστημα αυτό είναι πιο απλό και μειώνει συνολικά το κόστος σε επίπεδο συγκρίσιμο με αυτό της επαγωγικής γεννήτριας, αλλά δε δίνει λύση στα προβλήματα των αρμονικών στο δίκτυο και δίνει χαμηλό συντελεστή ισχύος, ενώ δεν υπάρχει επίσης δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος. Μία καλύτερη διάταξη προκύπτει αν μεταξύ του ανορθωτή και του αντιστροφέα τοποθετήσουμε ένα άλλο GTO το οποίο άγει και δίνει ένα αυξανόμενο ρεύμα και μετά αφού διακοπεί η αγωγή σε κάποιο προκαθορισμένο σημείο η αποθηκευμένη στην επαγωγή ενέργεια μεταφέρεται στον πυκνωτή ο οποίος ανυψώνει την τάση του αντιστροφέα. Μ' αυτό τον τρόπο ελέγχεται η τάση του αντιστροφέα καθώς και το ρεύμα του και άρα η ροή ισχύος (Σχ.2.9).

Τα τελευταία χρόνια, σε εμπορικές εφαρμογές σε αιολικά συστήματα χρησιμοποιούνται και οι σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμο μαγνήτη (permanent motor), σε συνδυασμό με αυτού του είδους μετατροπέα πηγής τάσης που περιγράφηκε παραπάνω, δηλ. με μετατροπέα DC/DC ενδιάμεσα αλλά και με τη χρήση ημιαγωγικών στοιχείων τύπου IGBT στον αντιστροφέα. Έχουμε δηλαδή ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύστημα Ε.Ρ. / Σ.Ρ. / Ε.Ρ. μεταξύ της σύγχρονης μηχανής και του δικτύου και στις οποίες ο μόνος έλεγχος που γίνεται είναι αυτός της γωνίας έναυσης των στοιχείων του ηλεκτρονικού αντιστροφέα ισχύος.



Σχ.2.9 Σύστημα μετατροπέα πηγής τάσης με δυνατότητα ελέγχου της τάσης του αντιστροφέα και της διέγερσης της Σ.Γ.

Μέσω των προαναφερόμενων τεχνικών ξεπεράστηκε η αναγκαιότητα χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων μέσω της χρήσης πολυπολικών σύγχρονων γεννητριών με διεγέρτρια ή με μόνιμους μαγνήτες, και παρ' όλο που παραμένουν τα προβλήματα αμφίδρομης ροής ισχύος και αρμονικών στο δίκτυο καθιστούν το συνολικό σύστημα πιο ευέλικτο σε σχέση με τη συνεργασία του με το δίκτυο. Τα θετικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι, η εξάλειψη των μηχανικών θορύβων, η βελτίωση της αξιοπιστίας και η μείωση του βάρους. Η γεννήτρια είναι απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο χωρίς την ύπαρξη μηχανικών μερών που σημαίνει εξάλειψη των αρμονικών του μηχανικού συστήματος και αύξηση του χρόνου ζωής της ανεμογεννήτριας, ενώ μπορεί να γίνει άμεσος έλεγχος της τάσης εξόδου, μείωση των αρμονικών στο δίκτυο καθώς και της άεργου ισχύος.

Επισημαίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης και ασύγχρονων γεννητριών έξι φάσεων. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται μετατροπείς ισχύος E.P. 12 παλμών με μετασχηματιστές συνδεσμολογίας Υγο και Υds για τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τέλος, από μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί διεθνώς είναι προφανές ότι η χρήση συστημάτων μεταβλητών στροφών - σταθερής συχνότητας δημιουργεί 3-20% μεγαλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα συγκριτικά με τα συστήματα σταθερών στροφών - σταθερής συχνότητας

Μία άλλη συνδεσμολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από έναν μετατροπέα πηγής ρεύματος που συνδέεται στην πλευρά της γεννήτριας, σε συνδυασμό με ένα μετατροπέα με μεταγωγή από την τάση του δικτύου στην πλευρά του δικτύου (Σχ.2.4). Χρησιμοποιείται ευρέως σε επαγωγικές μηχανές σε άλλες εφαρμογές (έλεγχος ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων) αλλά δεν έχει εφαρμοσθεί ιδιαίτερα σε ανεμογεννήτριες. Είναι απλή κατασκευή, αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και έχει τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος. Παρ' όλα αυτά δε δίνει λύση στα προβλήματα των υψηλών αρμονικών και των αιχμών των τάσεων της μηχανής λόγω των κυκλωμάτων μεταγωγής των θυρίστορ. Ο δε μετατροπέας εξόδου παρουσιάζει ανάλογα προβλήματα αρμονικών και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος, γεγονός το οποίο απαιτεί την εγκατάσταση φίλτρων αρμονικών και διόρθωσης του συντελεστού ισχύος. Αυτό καθιστά απαγορευτική την εγκατάσταση τέτοιων τοπολογιών σε ασθενή δίκτυα με μεγάλη διείσδυση ισχύος. Καλύτερα αποτελέσματα έχουμε με τη χρήση διπλών μετατροπέων πηγής ρεύματος PWM με ημιαγωγικά στοιχεία τύπου GTO, όπου έχουμε μείωση των αρμονικών των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής, καθώς και έλεγχο της άεργου ισχύος (Σχ.2.5)

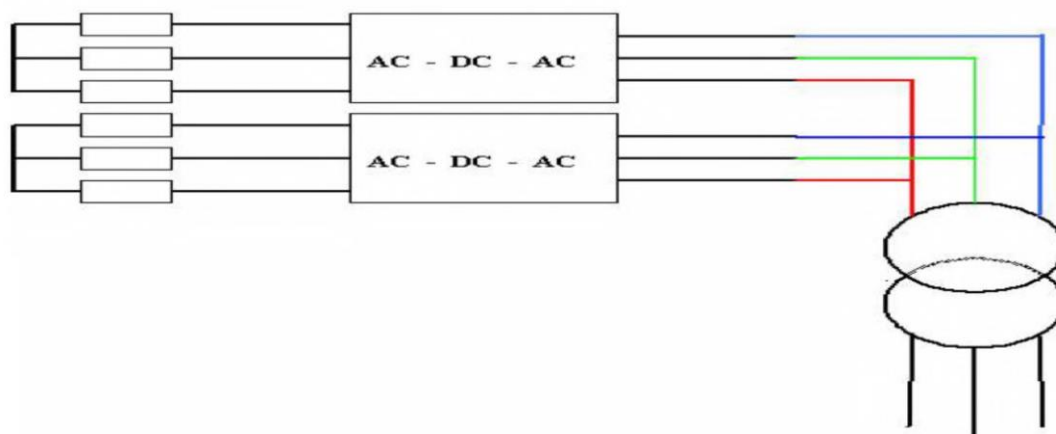
2.3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Δύο από τους τρόπους διασύνδεσης αιολικών πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είτε κατευθείαν. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση βασισμένη στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών μιας γνωστής γερμανικής εταιρείας ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάζει η συγκεκριμένη εταιρεία έχουν το χαρακτηριστικό ότι η κάθε ηλεκτρογεννήτρια (σύγχρονη) είναι απευθείας οδηγούμενη (direct-driven) από τον ανεμοκινητήρα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρείας η τάση που παράγει η μηχανή είναι η ονομαστική (400V) εφόσον ο δρομέας (A/K) περιστρέφεται μέσα στην περιοχή επιτρεπτών ταχυτήτων του και το μόνο μέγεθος που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα που παράγει η γεννήτρια, η οποία είναι διαφορετική από 50Hz. (Λόγω του χαρακτηριστικού της ηλεκτρογεννήτριας να διατηρεί σταθερή την τάση της η εταιρεία έχει δώσει ένα ιδιαίτερο όνομα στις γεννήτριες και τις ονομάζει ring generators). Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Συνεπώς για να υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο είναι απαραίτητη η ύπαρξη διπλής γέφυρας με ηλεκτρονικά ισχύος, ο λεγόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος.

Ο τελευταίος αναλαμβάνει το ρόλο του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής με το ισχυρό δίκτυο αφού φροντίζει να οδηγεί στην έξοδο την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια και να μετατρέπει τη συχνότητά της σε 50Hz που είναι η ονομαστική τιμή.

Όσον αφορά την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια το ύψος εξαρτάται εκτός της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και από τη διέγερσή του, δηλαδή από το μαγνητικό πεδίο. Η διέγερση φροντίζει ώστε η τάση που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια να είναι σταθερή.

Η ανεμογεννήτρια της εν λόγω εταιρείας συνδέεται με το δίκτυο μέσω δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Ο λόγος ύπαρξης των δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι επειδή υπάρχουν 6 φάσεις στη σύγχρονη γεννήτρια.

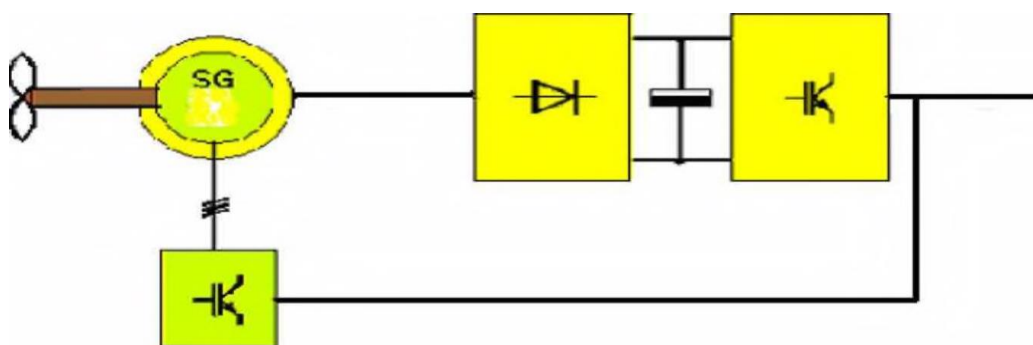


Σχ.2.10 Σύνδεση της Σ.Μ. μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος με το δίκτυο διανομής

Στη συνέχεια τα τυλίγματα συνδέονται με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος και καταλήγουν στο μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Όσον αφορά την λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του ενός και τα ίδια ισχύουν και για τον άλλο.

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αυτός είναι Ε.Ρ.-Σ.Ρ.-Ε.Ρ. (AC-DC-AC) ο οποίος όπως φαίνεται και από το Σχ.2.10 αποτελείται από δύο μέρη, το μετατροπέα Ε.Ρ.-Σ.Ρ. που είναι στη μεριά της μηχανής, και το μετατροπέα που είναι στη μεριά του δικτύου Σ.Ρ.-Ε.Ρ. Ο μετατροπέας στη μεριά της μηχανής είναι ανορθωτής δηλαδή Ε.Ρ.-Σ.Ρ. ο οποίος μετατρέπει την εκάστοτε εναλλασσόμενη τάση που βγάζει η μηχανή σε συνεχή. Η ανόρθωση γίνεται με διόδους ισχύος όπως φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής της φοράς του ρεύματος. Επιπλέον αν αυτό χρειαζόταν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γέφυρα με IGBT ή με αντιπαράλληλες διόδους ισχύος. Στην πλευρά του μετατροπέα στην οποία επικρατεί συνεχής τάση υπάρχουν και κατάλληλοι πυκνωτές οι οποίοι εξομαλύνουν και διατηρούν σταθερή την τάση. Εν συνεχεία ο μετατροπέας που είναι στην πλευρά του δικτύου είναι γέφυρα με IGBT η οποία είναι ο αντιστροφέας δηλαδή μετατρέπει με κατάλληλο κύκλωμα παλμοδότησης τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη με χαρακτηριστικά 400V-50Hz.

Όσον αφορά την εκκίνηση της σύγχρονης μηχανής αυτή γίνεται με τη βοήθεια του ανέμου ο οποίος έχει το ρόλο της κινητήριας δύναμης. Εφόσον η ταχύτητα του ανέμου είναι κατάλληλη δηλαδή ίση με την ταχύτητα σύζευξης τότε ο ανεμοκινητήρας αρχίζει και περιστρέφεται. Εν συνεχεία με ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης το οποίο όπως φαίνεται στο Σχ.2.11 αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος Ε.Ρ.-Σ.Ρ. ο οποίος ανορθώνει την τάση του δικτύου και τη μετατρέπει σε συνεχή η οποία τελικά θα αποτελέσει τη διέγερση του δρομέα.



Σχ.2.11 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος Α/Γ

Καθώς η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται ο εν λόγω μετατροπέας παρακολουθεί τις αλλαγές στην ταχύτητα του Α/Κ και ρυθμίζει ανάλογα τη διέγερση ώστε η τάση να είναι αυτή που πρέπει. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν παίζει μόνο το ρόλο που είδαμε, αλλά ρυθμίζει και την άεργο ισχύ της γεννήτριας. Σε περίπτωση που στη μεριά του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος που είναι στο δίκτυο παρατηρηθεί μείωση της τάσης τότε θα μειωθεί και η τάση στην περιοχή του μετατροπέα που επικρατεί συνεχής τάση και κατόπιν η τάση της γεννήτριας, οπότε ο μετατροπέας μέσω πολυάριθμων μικροελεγκτών δίνει εντολή στο κύκλωμα διέγερσης να αυξηθεί το ρεύμα διέγερσης στο δρομέα της σύγχρονης μηχανής οπότε αντίστοιχα θα ανεβεί η τάση της γεννήτριας και η συχνότητα και η γεννήτρια θα τροφοδοτήσει τελικά το

δίκτυο με άεργο ισχύ. Έτσι ο μετατροπέας με τον τρόπο αυτό καθορίζει και τον τρόπο λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας (χωρητικά ή επαγωγικά).

Ο μετατροπέας εκτός από το να πραγματοποιεί όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να φροντίζει ώστε οι στροφές του ανεμοκινητήρα να είναι κατάλληλες ώστε να πετυχαίνεται λειτουργία του (ανεμοκινητήρα) στο μέγιστο C_p για κάθε ταχύτητα ανέμου. Συνεπώς απαιτείται να υπάρχουν τέτοιες στροφές του δρομέα ώστε να υπάρχει το λ_{opt} και το C_{popt} . Αυτό είναι ευθύνη του αντιστροφέα αφού ρυθμίζει την ενεργό ισχύ που στέλνεται στο δίκτυο συνεπώς με βάση τον τύπο:

$$\frac{r}{\Omega} (dt) = \frac{1}{J} (M_{WIND} - M_{ELEC})$$

επηρεάζεται ο αριθμός περιστροφής του δρομέα. Ο αναγνώστης πρέπει να λάβει υπόψη του ότι η βέλτιστη ταχύτητα Ω_{opt} περιστροφής του δρομέα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της ακτίνας του πτερυγίου, της γωνίας pitch και πολλών άλλων παραμέτρων.

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος προκειμένου να πετύχει όλα τα παραπάνω πρέπει να επικοινωνεί με πολλαπλούς μικροελεγκτές και φυσικά με τον κεντρικό επεξεργαστή της ανεμογεννήτριας ώστε να πετυχαίνει την αποδοτικότερη, συμφέρουσα και ασφαλέστερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Χρειάζεται να επισημανθεί ότι η απρόσκοπτη και εύρυθμη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας και ενός αιολικού πάρκου γενικότερα βασίζεται κυρίως στο θέμα του αεροδυναμικού ελέγχου, ελέγχου ηλεκτρικής ισχύος και εσωτερικού ελέγχου κάθε Α/Γ. Στη συνέχεια ο αναγνώστης θα διαπιστώσει την πολυπλοκότητα των συστημάτων. Άλλωστε ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν είναι ανεξάρτητος από τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας και βρίσκεται σε διαρκή ανταλλαγή δεδομένων διάφορους μικροελεγκτές.

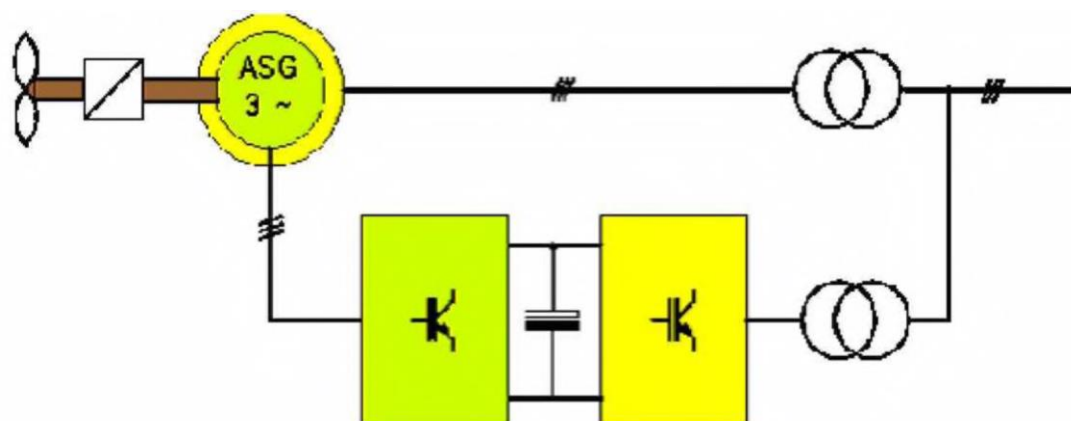
Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας επικοινωνεί και με τον έλεγχο "pitch" βοηθά στην εκκίνηση του ανεμοκινητήρα και ρυθμίζει την αεροδυναμική ισχύ όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ταχύτητα του δρομέα. Ο έλεγχος "pitch" επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μέσω της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας της ανεμογεννήτριας. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η καρδιά όλων των υποσυστημάτων είναι ο κεντρικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας όπου αν κάτι δεν πάει καλά γίνεται αυτοδιάγνωση και προσπάθεια για διόρθωση του σφάλματος, ειδάλλως υπάρχει κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, δίνει εντολή να σταματήσει πλήρως η περιστροφή του ανεμοκινητήρα και του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

Συνεπώς ο αναγνώστης αντιλαμβάνεται ότι η λειτουργία τόσο του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος όσο και η γενικότερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που γνωρίζει μόνο η κατασκευάστρια εταιρεία και μόνο αυτή.

2.4.1 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει περιγραφή του τρόπου της κατευθείαν διασύνδεσης ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Η περιγραφή βασίζεται στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών γνωστής δανέζικης εταιρείας

Οι ανεμογεννήτριες αυτής της εταιρείας χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα. Σύμφωνα με αυτό βλέπουμε ότι η ασύγχρονη μηχανή είναι διπλά τροφοδοτούμενη (double-fed). Προς πληροφόρηση αναφέρεται ότι η γεννήτρια είναι έχει ονομαστικά στοιχεία $U_n=690V$, $I_n=711A$, $n=1620$ σ.α.λ. Από το εν λόγω σχήμα βλέπουμε ότι ο στάτης είναι κατευθείαν συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Ο τελευταίος αποτελείται από μια διπλή γέφυρα από στοιχεία IGBT.



Σχ.2.12 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος Α/Γ.

Το σύστημα αυτό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως πρόσφατα στα αιολικά συστήματα (μεταβλητών στροφών). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος διαπερνάται από ένα ποσοστό της ισχύος της τάξης του 20-30% της συνολικής ισχύος και συνεπώς εμφανίζονται λιγότερες απώλειες σε σχέση με ένα σύστημα απευθείας οδηγούμενο από τον ανεμοκινητήρα. Επίσης το κόστος του ηλεκτρονικού μετατροπέα είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό του μετατροπέα που χρησιμοποιείται σε αιολικά πάρκα όπως αυτό του προηγούμενου κεφαλαίου και λόγω του παραπάνω ισχυρισμού αλλά και επειδή δεν χρειάζεται εξωτερικό κύκλωμα διέγερσης αφού αυτή προέρχεται απευθείας από το «δίκτυο».

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ηλεκτρική γεννήτρια είναι δακτυλιοφόρου δρομέα η οποία είναι διπλά τροφοδοτούμενη και φαίνεται στο Σχ.2.12. Ως γνωστόν μία μέθοδος μετατόπισης των καμπυλών ροπής-στροφών είναι μέσω διάφορων αντιστάσεων. Ο τρόπος αυτός εκτός του ότι εμφανίζει πολλές απώλειες (ωμικές) δεν έχει και τη δυνατότητα ενεργητικού ελέγχου δηλαδή δεν μπορεί ανά πάσα στιγμή η τιμή της αντίστασης να αλλάζει τόσο λόγω συνδεσμολογίας της όσο και λόγω έλλειψης επικοινωνίας με το υπόλοιπο κύκλωμα. Αντίθετα με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P.-Σ.P.-E.P. ο οποίος ουσιαστικά παίζει τον ρόλο των αντιστάσεων, δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες και υπάρχει ανά πάσα στιγμή δυνατότητα ρύθμισης σε μεγάλο εύρος της ροπής εκκίνησης της γεννήτριας μετατοπίζοντας την καμπύλη ροπής-στροφών δεξιά ή αριστερά ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Με αυτό τον τρόπο εκτός του ότι υπάρχει η δυνατότητα

εκμετάλλευσης ακόμα και των πιο χαμηλών ταχυτήτων αέρα (εφόσον είναι πάνω από την ταχύτητα σύζευξης), και ταυτόχρονα προστατεύεται η ηλεκτρική γεννήτρια από την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων κατά την εκκίνηση. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει τη δυνατότητα ανά πάσα στιγμή να επικοινωνεί με την Κεντρική Μονάδα Ελέγχου της ανεμογεννήτριας και ρυθμίζει τη συμπεριφορά του σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνει από αυτή (ΚΜΕ). Έτσι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αλλάζοντας ουσιαστικά την αντίσταση του δρομέα αλλάζει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής και πετυχαίνει τη μετακίνηση της καμπύλης Cr-λ στην επιθυμητή τιμή λ,ρ όπου υπάρχει μέγιστο Cr. Με αυτό τον τρόπο η ανεμογεννήτρια παρακολουθεί τις αλλαγές του ανέμου και προσαρμόζει τη λειτουργία της. Χάρη στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος υπάρχει μεγάλο εύρος ρύθμισης της τάσης και συνεπώς της αέργου ισχύος.

Συνοψίζοντας, μπορεί να αναφερθεί ότι οι λόγοι που δικαιολογούν την ευρεία εφαρμογή των ασύγχρονων διπλά τροφοδοτούμενων ηλεκτρικών γεννητριών είναι ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούν εμφανίζουν λιγότερες απώλειες αφού έχουν να διαχειριστούν μικρό μέρος της συνολικής ισχύος 20-30% και το κόστος τους είναι μικρότερο σε σχέση με τον μετατροπέα που χρησιμοποιείται σε απευθείας οδηγούμενες από τον ανεμοκινητήρα σύγχρονες μηχανές. Βέβαια με το μετατροπέα που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα έχουμε πιο αξιόπιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αφού αυτός αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου τη σύνδεση με το δίκτυο άρα μπορεί να υπάρχει άμεσος έλεγχος ενώ εδώ έχουμε κατευθείαν σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

3.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των μικρών Φ/Β μονάδων διασπαρμένης παραγωγής οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης των αστικών περιοχών. Όμως η αποδοχή της Φ/Β τεχνολογίας από το ευρύ αγοραστικό κοινό προϋποθέτει ότι τα εμπορικά προϊόντα θα εξασφαλίζουν στον ιδιώτη παραγωγό - καταναλωτή ασφάλεια, μεγάλο βαθμό απόδοσης, μικρό κόστος αγοράς και συντήρησης της εγκατάστασης καθώς επίσης και όσο το δυνατόν συντομότερο διάστημα απόσβεσης της επένδυσης. Προς αυτή λοιπόν την κατεύθυνση θα αναλυθεί ένα Φ/Β σύστημα στις δομικές του μονάδες και θα αναζητηθούν οι βέλτιστες λύσεις.

Οι δομικές μονάδες ενός Φ/Β συστήματος είναι:

- Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.
- Το ενδιαφέρον εστιάζεται στο υλικό κατασκευής των κυττάρων, μελετώντας το βαθμό απόδοσης, την αποδιδόμενη ισχύ, την τιμή της τάση εξόδου και τη διάρκεια ζωής αυτών.
- Μια άλλη παράμετρος είναι ο αριθμός Φ/Β πλαισίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν και ο βέλτιστος τρόπος διασύνδεσης αυτών.
- Ο τύπος (τοπολογία) του μετατροπέα και ο έλεγχος αυτού.

Ανεξαρτήτως της τοπολογίας του μετατροπέα θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις:

α) Υψηλός βαθμός απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, β) Χαμηλό κόστος και μεγάλη αξιοπιστία και γ) Συμμόρφωση με τα πρότυπα IEEE 929-2000 και IEEE 1547.

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης του μετατροπέα στα Φ/Β πλαίσια.

Σκοπός αυτής της μελέτης είναι το όλο σύστημα (Φ/Β πλαίσιο-μετατροπέας) να συνιστά βέλτιστη αισθητικά λύση για οικιακές και κτιριακές εφαρμογές χωρίς να παρεμποδίζεται η απαγωγή θερμότητα..

3.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Τα Φ/Β πλαίσια δημιουργούνται από την εν σειρά και παράλληλη διασύνδεση φωτοβολταϊκών κυττάρων που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Για την κατασκευή των τελευταίων χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά υλικά όπως το GaAs, CdTe, αλλά τη μερίδα του λέοντος στην παγκόσμια παραγωγή Φ/Β πλαισίων κατέχουν τα κύτταρα πυριτίου (Si).

Τα Φ/Β κύτταρα πυριτίου χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά και τα άμορφα.

1. Μονοκρυστάλλικα κύτταρα Si

Η ονομασία τους προέρχεται από την μορφή του κρυσταλλικού πλέγματος των ατόμων Si που πλησιάζει τον τέλειο κρύσταλλο. Κατασκευάζονται ύστερα από ψύξη λιωμένου Si και πριονισμό του σε λεπτές πλάκες - τα κύτταρα. Η ανάγκη χρησιμοποίησης ιδιαίτερα καθαρού Si (ακριβή «πρώτη» ύλη), η χρήση εξειδικευμένων μεθόδων τήξης και κοπής για την επίτευξη του μονοκρυσταλλικού πλέγματος αυξάνει το κόστος παραγωγής δίνοντας τους όμως τον καλύτερο βαθμό απόδοσης από τις τρεις κατηγορίες φθάνοντας το 15-18%. Το ποσοστό αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα είναι πιο ευαίσθητα στην υπέρυθη ακτινοβολία που το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό.

2. Πολυκρυσταλλικά κύτταρα Si

Σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα στο πλέγμα τους περιλαμβάνουν κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών. Αιτία αυτής της διαφοροποίησης, η μαζική και λιγότερο ελεγχόμενη ψύξη του Si, κάτι που μειώνει αισθητά το κόστος παραγωγής. Όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, μετά την ψύξη το πολυκρυσταλλικό πλέγμα πριονίζεται στα λεπτά Φ/Β κύτταρα. Η ύπαρξη διαφόρων κρυστάλλων μέσα στο πλέγμα αυξάνει την εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους, με αποτέλεσμα ο συνολικός βαθμός απόδοσης να μην μπορεί να ξεπεράσει το 13-15%.

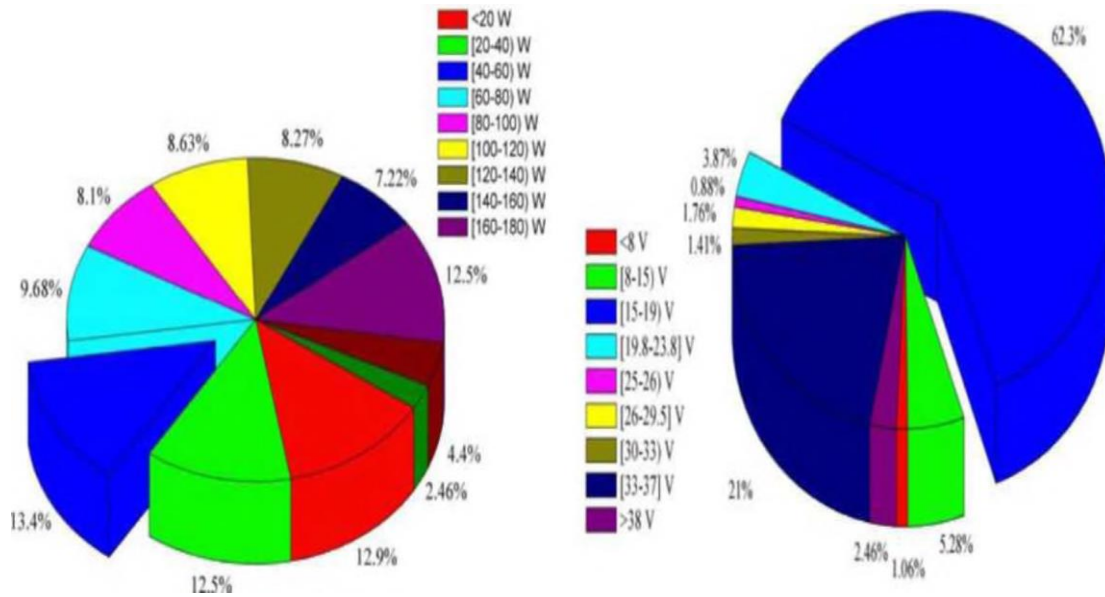
3. Άμορφα κύτταρα Si

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι η μη κρυσταλλική της δομή. Κατασκευάζονται με την εφαρμογή Si σε ειδικό υπόστρωμα γυαλιού. Η μικρή και οικονομική ποσότητα πρώτων υλών, ο απλός τρόπος κατασκευής, η ευκολία στην εγκατάσταση και συναρμολόγηση καθιστούν τα άμορφα κύτταρα ικανά για μαζική παραγωγή. Δυστυχώς, η έλλειψη του κρυσταλλικού πλέγματος από την δομή τους περιορίζει τον βαθμό απόδοσης μόλις στο 5-8%. Για τον λόγο αυτό τα άμορφα κύτταρα δεν απαρτίζουν αμιγώς Φ/Β πλαίσια αλλά προτιμούνται σε τεχνολογίες όπως υβριδικά Φ/Β πλαίσια ή Thin Film.

3.3 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

Η διαφοροποίηση των Φ/Β πλαισίων πέρα από το υλικό κατασκευής τους, συντελείται βάσει των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα όλοι οι κατασκευαστές δίνουν για κάθε Φ/Β πλαίσιο ένα πίνακα στον οποίο αναφέρονται οι τιμές της μέγιστης δυνατής αποδιδόμενης ισχύος P_{mp} , της τάσης ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} , του ρεύματος βραχυκυκλώματος I_{sc} καθώς επίσης και οι τιμές της τάσης V_{MP} και του ρεύματος I_{MP} στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Τα μεγέθη αυτά μετρούνται για συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (θερμοκρασία $25^{\circ}C$ και ακτινοβολία $1000/m$). Από αυτά, εκείνα που θεωρούνται ιδιαίτερης σημασίας προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη Φ/Β

γεννήτρια για την εκάστοτε εφαρμογή είναι η μέγιστη δυνατή αποδιδόμενη ισχύς και η τιμή της τάσης εξόδου αυτής στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος. Για την κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων με γνώμονα τα παραπάνω χαρακτηριστικά μεγέθη, διεξήχθη έρευνα αγοράς μεταξύ 36 κατασκευαστικών οίκων και σε σύνολο 568 πλαισίων. Όσο αφορά τη κατηγοριοποίηση των πλαισίων βάσει της τιμής της τάσης στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος, τα συμπεράσματα της έρευνας είναι περισσότερο ενδεικτικά για τις τάσεις που ακολουθεί η βιομηχανίας των Φ/Β πλαισίων. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εξεταζόμενων πλαισίων παρουσιάζει τιμή τάσης V_{MP} [15-19)V όπως επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα του σχήματος 3



Σχ.3.1 Κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων βάσει της μέγιστης αποδιδόμενης

Σχ.3.2 Κατηγοριοποίηση των Φ/Β πλαισίων στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης

Μια επίσης ενδιαφέρουσα κατανομή είναι αυτή της κατηγοριοποίησης των τάσεων V_{MP} ανά περιοχή P_{MP} . Τα αποτελέσματα αυτής της κατανομής παρουσιάζονται στον Πίνακα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1
Εύρος V_{MP} ανά περιοχή P_{MP}

| Κατηγορίες P_{MP} (W) | Επικρατέστερες τιμές τάσης V_{MP} (V) |
|-------------------------|---|
| [20-40) | 16-18 |
| [40-60) | 16-18 |
| [160-180) | 33-37 |

3.3.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα καθορίζει την μέγιστη παραγόμενη ισχύ ενώ η εν σειρά και παράλληλα σύνδεση τους καθορίζει την τιμή της τάσης και του ρεύματος που μπορεί να δώσει το πλαίσιο. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα θετικά και αρνητικά των σημαντικότερων εφαρμοζόμενων τεχνολογιών οικιακών Φ/Β συστημάτων ενός ή και περισσότερων Φ/Β πλαισίων.

1. Centralized Τεχνολογία

Η centralized τεχνολογία είναι από τις παλαιότερες που εφαρμόστηκαν και αποσκοπεί στην παραγωγή μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία μεταφέρονται στο δίκτυο μέσω ενός μόνου αντιστροφέα. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από ένα πλέγμα Φ/Β πλαισίων, τα οποία χωρίζονται σε εν σειρά ομάδες εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή τιμή συνεχούς τάσης, ενώ η απαιτούμενη τιμή εντάσεως επιτυγχάνεται με την παράλληλη σύνδεση των παραπάνω ομάδων. Χαρακτηριστικό αυτής της τεχνοτροπίας, αποτελεί η χρήση ενός μόνου ελέγχου ανίχνευσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (M.P.P.T. ελεγκτής) και η χρήση διόδων ισχύος ώστε να αποφευχθεί η λειτουργία ορισμένων εν σειρά ομάδων ως φορτία λόγω σκίασης.

Θετικά:

Παραγωγή μεγάλων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας από ένα μόνο Φ/Β σύστημα (έως και 10KV).

Η εν σειρά διασύνδεση των πλαισίων εξασφαλίζει αρκετά υψηλή τιμή συνεχούς τάσης στην είσοδο του μετατροπέα αποφεύγοντας κατά αυτόν τον τρόπο την ενίσχυση αυτής (είτε με μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή είτε με M/Σ) προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενη τάσης κατάλληλης τιμής στην έξοδο του μετατροπέα.

Αρνητικά:

Παρατηρούνται αρκετά μεγάλες τιμές τάσης διασύνδεσης μεταξύ Φ/Β πλέγματος και αντιστροφέα με αποτέλεσμα:

- Αυξημένος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.
- Υψηλό κόστος καλωδίωσης και συστήματος προστασίας.
- Ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού για την εγκατάσταση του συστήματος.
- Κίνδυνος φαινομένων hotspot στα Φ/Β πλαίσια κατά την διάρκεια μερικής σκίασης.
- Απώλειες εξαιτίας των διόδων ισχύος που χρησιμοποιούνται για την παράλληλη σύνδεση των εν σειρά ομάδων.

Η εφαρμογή κεντρικού M.P.P.T. ελέγχου δεν επιτρέπει σε όλα τα πλαίσια να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ισχύος, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης.

Ο σχεδιασμός τους δεν αφήνει περιθώρια τεχνικών προσαρμογών και επέκτασης.

Δεν είναι εύκολη η εγκατάσταση τους σε αστικές περιοχές εξαιτίας της μεγάλης απαιτούμενης επιφάνειας.

- Υψηλό κόστος κατασκευής.
- Σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης συγκρινόμενη με άλλες τεχνοτροπίες.

2. String Τεχνολογία

Η string τεχνολογία, που αντικατέστησε την centralized, τυγχάνει μεγάλης αποδοχής σε πρωτοπόρες χώρες στο χώρο των φωτοβολταϊκών, όπως η Γερμανία. Σε αντίθεση με πριν, κάθε μονάδα αποτελείται από μία ομάδα εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β πλαισίων καταλήγοντας σε έναν αντιστροφέα. Βέβαια η τεχνοτροπία αυτή οδηγεί στην παραγωγή μικρότερων ποσών ενέργειας. Θετικά:

Η εν σειρά διασύνδεση των πλαισίων δεν καθιστά απαραίτητη την ενίσχυση της τάσης εισόδου του μετατροπέα.

- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής ανά μονάδα.
- Ο χώρος που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας μονάδας είναι αρκετά μικρότερος.
- Ο M.P.P.T. έλεγχος είναι αποδοτικότερος σε σχέση με αυτόν της centralized τεχνολογία, μιας και εφαρμόζεται σε μικρότερο αριθμό πλαισίων.
- Δεν είναι απαραίτητη η εφαρμογή διόδων ισχύος.
- Δυνατότητα επέκτασης της εγκατάστασης με χρήση περισσοτέρων μονάδων.
- Υψηλότερος βαθμός απόδοσης σε σχέση με την centralized τεχνολογία.

Αρνητικά:

- Παραμένουν τα προβλήματα που επιφέρουν οι υψηλές τάσεις στα σημεία διασύνδεσης, καθώς επίσης και ο κίνδυνος εμφάνισης φαινομένου hotspot.
- Ανάλογα με το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται, η ισχύς που μπορεί να παραχθεί κυμαίνεται μεταξύ των 0.5 και 1kW.
- Παρά την μείωση της απαιτούμενης επιφάνειας, η εφαρμογή τους σε αστικές περιοχές παραμένει δύσκολη.

3. Multistring Τεχνολογία

Η τεχνολογία multistring αποτελεί μια επέκταση της string τεχνολογίας που κερδίζει συνεχώς έδαφος στην παγκόσμια αγορά των Φ/Β συστημάτων. Η τεχνοτροπία αυτή παρέχει τη δυνατότητα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογης τάξης με αυτή της centralized τεχνολογία, αλλά χωρίς τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την τελευταία. Στην πραγματικότητα χρησιμοποιούνται πολλές αλυσίδες εν σειρά συνδεδεμένων Φ/Β πλαισίων οι οποίες συνδέονται σε έναν κεντρικό αντιστροφέα μέσω ανεξάρτητων μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή.

Θετικά:

Η παραπάνω ιδιαιτερότητα καθιστά πιο εύκολη την επέκταση του συστήματος απλά συνδέοντας στον αντιστροφέα περισσότερες αλυσίδες πλαισίων με τους μετατροπέες τους.

- Παραγωγή ανάλογων ποσών ηλεκτρικής ενέργειας με αυτά της centralized τεχνολογίας χωρίς όμως τα προβλήματα της τελευταίας.

Αρνητικά:

- Η ύπαρξη ενός επιπλέον μετατροπέα αυξάνει οδηγεί σε αύξηση του κόστους.
- Διατηρεί τα μειονεκτήματα της string τεχνολογίας.

AC- PV Module Τεχνολογία

Η τεχνολογία των AC-PV Module, είναι και η νεότερη στο χώρο των οικιακών Φ/Β εφαρμογών. Πρόκειται για φωτοβολταϊκές διατάξεις μικρής ισχύος, στις οποίες ενσωματώνεται ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας συνεχούς τάσης σε μονοφασική εναλλασσόμενη και οι οποίες συνδέονται απ' ευθείας στο δίκτυο χαμηλής τάσης των αστικών περιοχών, όπως φαίνεται στο Σχ.3.5. Η απουσία διασυνδέσεων τύπου πλέγματος ή/και αλυσίδας μεταξύ Φ/Β πλαισίων, καθώς και η δυνατότητα καλύτερου ελέγχου κάθε αυτόνομης διάταξης (Φ/Β πλαίσιο και αντιστροφέας), οδηγούν σε

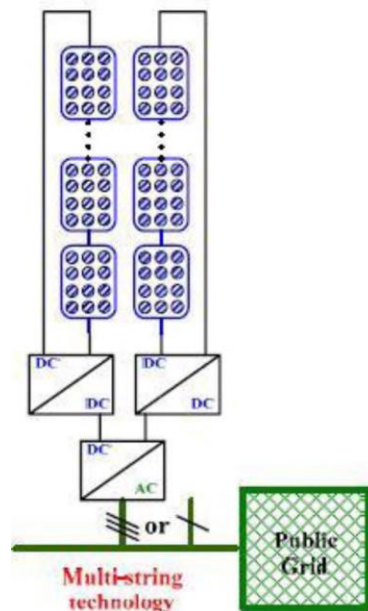
μεγαλύτερη αποδοτικότητα του όλου συστήματος. Ο αντιστροφέας μπορεί να είναι ενσωματωμένος είτε στο πίσω μέρος των πλαισίων, είτε στο μηχανισμό στήριξης του. Σε σχέση με τις παραπάνω τεχνολογίες τα AC-Module έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

Θετικά:

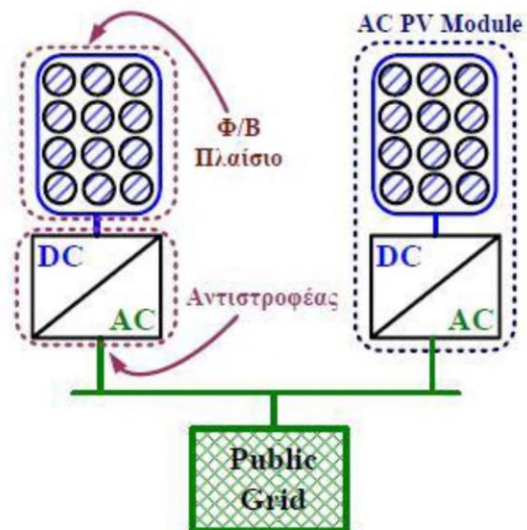
- Η αντιστοιχία ενός αντιστροφέα ανά πλαίσιο επιτρέπει τον βέλτιστο M.P.P.T. έλεγχο.
- Οι τάσεις στα σημεία διασύνδεσης είναι αρκετά χαμηλές.
- Μικρό κόστος κατασκευής.
- Δεν απαιτείτε εξειδικευμένο προσωπικό για την εγκατάσταση του συστήματος.
- Οι απαιτήσεις επιφανείας ανά μονάδα είναι ελάχιστες, κάτι που τα καθιστά κατάλληλα ακόμα και για αστικές εφαρμογές.
- Παρουσιάζει καλύτερο βαθμό απόδοσης σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες..

Αρνητικά:

- Η αποδιδόμενη ισχύς ανά Φ/Β μονάδα δεν ξεπερνάει τα 350W στις μέρες μας.
- Η ανύψωση της τάσης του Φ/Β πλαισίου.



Σχ.3.4 Φ/Β συστήματα multistring τεχνολογίας



Σχ.3.5 Φ/Β συστήματα AC PV Module τεχνολογίας

3.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ

Η μονάδα που μετατρέπει την συνεχή τάση του/των Φ/Β πλαισίων σε μονοφασική εναλλασσόμενη έτσι ώστε να είναι εφικτή η διασύνδεση του Φ/Β συστήματος και του ηλεκτρικού δικτύου χαμηλής τάσης των αστικών περιοχών, είναι ένας ελεγχόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας. Η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας μετατροπέα, επηρεάζει την αποδοτικότητα του όλου συστήματος αλλά και το συνολικό του κόστος. Ανάλογα με τον αριθμό των βαθμίδων από τις οποίες απαρτίζεται ο αντιστροφέας μπορεί να γίνει η εξής κατηγοριοποίηση:

Μετατροπείς μιας βαθμίδος

Σε αυτές τις διατάξεις ο μετατροπέας είναι ένας κλασσικός αντιστροφέας που μετατρέπει την συνεχή τάση του Φ/Β πλαισίου σε εναλλασσόμενη. Ο παραπάνω μετατροπέας μπορεί να είναι ένας αντιστροφέας είτε μισής (half-bridge), είτε πλήρους (full-bridge) γέφυρας, του οποίου η τάση κατά κανόνα φιλτράρεται και στην συνέχεια ανυψώνεται με μετασχηματιστή σιδήρου, ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η χρήση Μ/Σ σιδήρου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου και του βάρους του μετατροπέα με άμεση συνέπεια να οδηγούμαστε σε περιορισμό της πυκνότητας ισχύος. Επιπλέον από τη στιγμή που οι απώλειες σιδήρου του μετασχηματιστή εξαρτώνται αποκλειστικά από την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης (η οποία είναι σταθερή και ίση με την τάση του ηλεκτρικού δικτύου) ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα μειώνεται σημαντικά για συνθήκες μειωμένης ηλιακής ακτινοβολίας. Για την εξάλειψη αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία μετατροπείς μιας βαθμίδας οι οποίοι χρησιμοποιώντας είτε υψίσυχο Μ/Σ είτε λύσεις χωρίς Μ/Σ (συνεπώς και χωρίς γαλβανική απομόνωση) επιτυγχάνουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος.

Ο έλεγχος των μετατροπέων αυτής της κατηγορίας είναι σχετικά πολύπλοκος μιας και μόνο ένας ελεγκτής αναλαμβάνει τόσο τον έλεγχο του μετατροπέα όσο και τους ελέγχους ανίχνευσης του σημείου μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (M.P.P.T. έλεγχος) και ανίχνευσης του φαινομένου νησίδιας. Από την άλλη πλευρά ο μικρός αριθμός των ηλεκτρικών στοιχείων που απαιτούνται για την κατασκευή τους, μειώνει το κόστος τους και αυξάνει την αξιοπιστία τους. Ένα επιπλέον σημείο που χρειάζεται ιδιαίτερη μνεία είναι η έντονη κυμάτωση που παρουσιάζουν οι μετατροπείς αυτής της κατηγορίας. Για την ορθότερη εφαρμογή ενός M.P.P.T. ελέγχου σε ένα Φ/Β σύστημα θα πρέπει η κυμάτωση του ρεύματος εισόδου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

Η ουσιαστική μείωση της κυμάτωσης του ρεύματος εισόδου απαιτεί την χρήση ηλεκτρολυτικών πυκνωτών μεγάλης χωρητικότητας αυξάνοντας έτσι το κόστος και μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του όλου συστήματος. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να περιοριστεί με χρήση ενεργών φίλτρων που αναλαμβάνουν εξολοκλήρου να απαλείψουν την αρμονική των 100Hz του ανορθωμένου ημιτονικού ρεύματος.

Μετατροπείς δύο βαθμίδων

Εδώ ο μετατροπέας αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο είναι ένας μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή (boost, buck-boost, forward, push-pull), ο οποίος ανυψώνει την τάση σε σταθερή πρακτικά τιμή, ώστε στην επόμενη βαθμίδα, δηλαδή στον αντιστροφέα, να επιτευχθεί, με την βοήθεια ενός κατωδιαβατού φίλτρου, η ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος προκειμένου να υλοποιηθεί η διασύνδεση με το δίκτυο. Αυτό υλοποιείται ελέγχοντας τον αντιστροφέα με παλμούς PWM. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα ο μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε συνεχή να δίνει στην

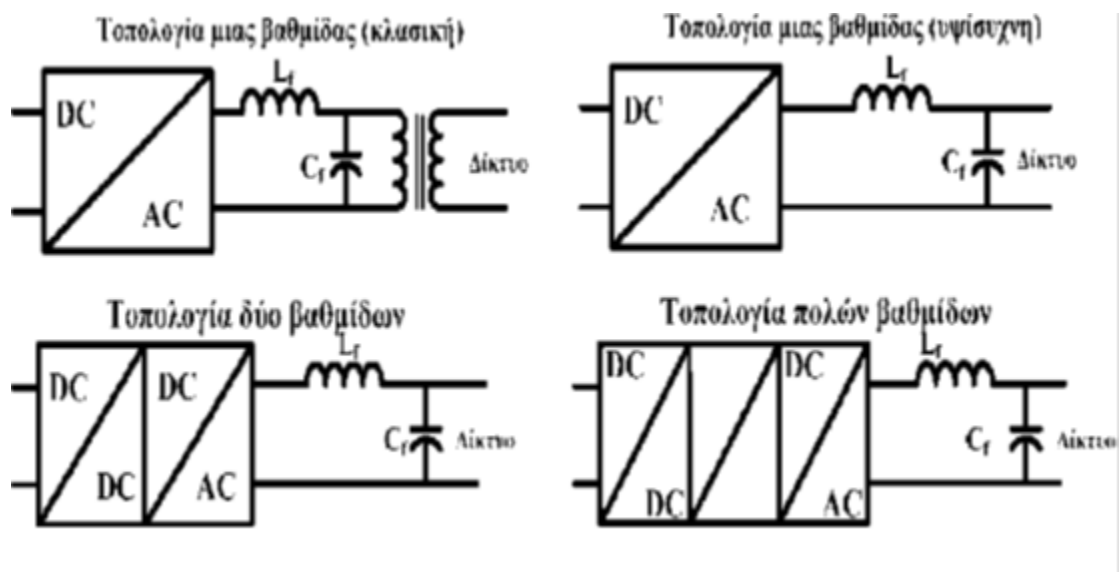
έξοδό του ανορθωμένο ημιτονικό ρεύμα και έπειτα ο αντιστροφέας, που οδηγείται από τετραγωνικούς παλμούς, να χρησιμοποιείται προκειμένου να δημιουργηθεί η εναλλασσόμενη συνιστώσα.

Σε αντίθεση με τους κλασικούς μετατροπείς μιας βαθμίδας, στην κατηγορία αυτή η χρήση υψίσυχνου πηνίου ή μετασχηματιστή αντί του Μ/Σ σιδήρου, έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου και του βάρους της διάταξης. Δυστυχώς όμως, η ενέργεια που παράγεται από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια μετασχηματίζεται δύο φορές (τόσο στο στάδιο ανύψωσης της τάσης, όσο και στο στάδιο προσαρμογής της παραγόμενης ενέργειας στις προδιαγραφές του ηλεκτρικού δικτύου).

Επιπρόσθετα η ύπαρξη επιπλέον ημιαγωγικών στοιχείων αυξάνει τόσο τις διακοπτικές όσο και τις απώλειες αγωγής με άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Τέλος, ο συνολικός έλεγχος του μετατροπέα κατανέμεται σε δύο ελεγκτές διευκολύνοντας κατά αυτόν το τρόπο το σχεδιασμό του κυκλώματος ελέγχου. Βέβαια η συνεργασία διαφορετικών βρόχων ελέγχου απαιτεί και γρήγορη απόκριση αυτών σε μεταβατικές καταστάσεις, αυξάνοντας έτσι το κόστος. Βέβαια στους μετατροπείς δύο βαθμίδων η εξάλειψη της κυμάτωση του ρεύματος εισόδου επιτυγχάνεται με χρήση πυκνωτών μικρότερης χωρητικότητας, επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του όλου συστήματος ενώ παράλληλα μειώνεται το κόστος αυτού.

Μετατροπείς πολλαπλών βαθμίδων

Στην τελευταία κατηγορία χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος εν σειρά συνδεδεμένων μετατροπέων συνεχούς τάσης σε συνεχή και ένας αντιστροφέα για την σύνδεση του Φ/Β συστήματος στο δίκτυο. Η χρήση πολλών βαθμίδων μετατροπής έχει όμως ορισμένα αρνητικά αποτελέσματα όπως το μεγάλο κόστος κατασκευής, το μικρό βαθμό απόδοσης λόγω των απωλειών στις ενδιάμεσες βαθμίδες και την επισφαλή απόκριση του όλου συστήματος σε μεταβατικές καταστάσεις λόγω των ανεξάρτητων βρόχων ελέγχου του κάθε μετατροπέα. Πλεονεκτήματα των μετατροπέων αυτών είναι η εξαφάνιση της χαμηλόσυχνης ταλάντωσης του ρεύματος εισόδου του μετατροπέα με αποτέλεσμα την επίτευξη βέλτιστης ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος. Στο Σχ.3.6 παρουσιάζονται σχεδιαγράμματα των παραπάνω κατηγοριών.



Σχήμα 3.6: Τοπολογία αντιστροφέων

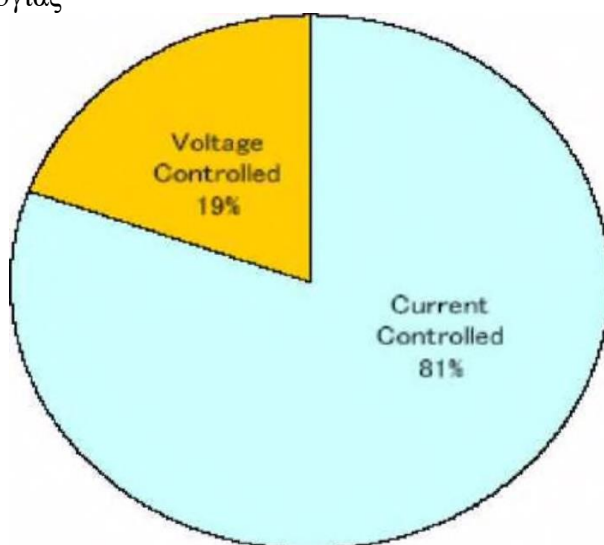
3.4.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

Μολονότι η τάση και το ρεύμα που μπορεί να δώσει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνεχή μεγέθη, σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές, που διατηρούν περίπου σταθερή τάση στην περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτογεννητριών μεταβάλλεται μη γραμμικά συναρτήσει της εντάσεως που παρέχουν στο εξωτερικό κύκλωμα, στην περίπτωση που η ακτινοβολία ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος μεταβληθεί. Εξαιτίας λοιπόν αυτής της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζουν οι φωτογεννήτριες, απαιτείται δραστικός έλεγχος των μετατροπέων ώστε στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας να αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς. Ο έλεγχος αυτός είναι γνωστός ως ανίχνευση του σημείου λειτουργίας μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (διεθνή ορολογία M.P.P.T.).

Για την άρτια λειτουργία ενός διασυνδεδεμένου με το δίκτυο Φ/Β συστήματος θα πρέπει το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα να μπορεί να αντεπεξέρχεται σε μεταβατικές καταστάσεις, όπως αυτή του φαινομένου «νησίδας» (islanding). Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα στην περίπτωση μιας ενδεχόμενης διακοπής του ηλεκτρικού δικτύου και μπορεί να επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα τόσο στον ίδιο τον μετατροπέα όσο και στους συντηρητές του ηλεκτρικού δικτύου.

Για τον έλεγχο των αντιστροφών που χρησιμοποιούνται σε φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν παρουσιασθεί πολλές τεχνικές παλμοδότησης στη διεθνή βιβλιογραφία. Όλες όμως μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο Σχ.9. Σε αυτές που αναγκάζουν τον μετατροπέα να συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος και σε αυτές που τον οδηγούν να συμπεριφερθεί ως πηγή τάσης. Όταν ένας αντιστροφέας συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος, κύριο ζητούμενο είναι να εξασφαλιστεί στην έξοδο του, ρεύμα ημιτονοειδούς μορφής, συχνότητας 50Hz και συμφασικό με την τάση του δικτύου. Αντίθετα στη δεύτερη κατηγορία, επιδιώκεται η επίτευξη ημιτονοειδούς μορφής τάσης στην έξοδο του μετατροπέα, συχνότητας 50Hz. Επίσης, η τάση στην έξοδο του μετατροπέα θα πρέπει να προπορεύεται της βασική αρμονική του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δικτύου προκειμένου να έχουμε μεταφορά ενεργού ισχύος προς το τελευταίο.

Ο λόγος για τον οποίο οι τεχνικές παλμοδότησης της πρώτης κατηγορίας απολαμβάνουν μεγαλύτερης απήχησης από ότι της δεύτερης είναι ότι στην περίπτωση δημιουργίας



Σχ.3.7. Ομαδοποίηση των τεχνικών παλμοδότησης σε παγκόσμια κλίμακα

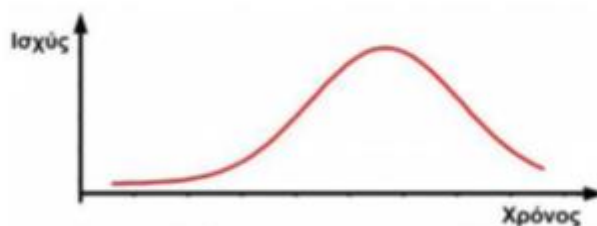
βραχυκυκλώματος, ο έλεγχος ρεύματος περιορίζει τη μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, ενώ αντίθετα στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται έλεγχος τάσης η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης λαμβάνει ανεξέλεγκτα μεγάλη τιμή.

3.5 ΣΦΑΙΡΙΚΟΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β συστήματος δεν παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια μιας ωρολογιακής ημέρας, αλλά αντιθέτως ποικίλει ανάλογα με τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο σχήμα 10 φαίνεται η μεταβολή της ωφέλιμης ηλιακής ακτινοβολίας, κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου. Βάσει αυτής της παρατήρησης γίνεται κατανοητό πως η μέγιστη τιμή της απόδοσης ενός μετατροπέα δεν επαρκεί για τον προσδιορισμό της αποδοτικότητάς του. Ως μέτρο σύγκρισης της αποδοτικότητας ενός αντιστροφέα, που προορίζεται για Φ/Β συστήματα, έχει θεσπιστεί ο ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης η E_u ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$h_{Eu}=0.03h_{5\%}+0.13h_{20\%}+0.10h_{50\%}+0.2h_{100\%}$$

Σύμφωνα με αυτόν, η αποδοτικότητα ενός μετατροπέα υπολογίζεται από το άθροισμα των επιμέρους βαθμών απόδοσης του μετατροπέα (για διαφορετικά ποσοστά της μέγιστης δυνατής παραγόμενης ισχύος) πολλαπλασιάζοντας έκαστο με έναν συντελεστή βαρύτητας.



Σχ.3.8 Τυπική εικοσιτετράωρη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας

3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΤΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΑ

Σε αυτήν την ενότητα αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο η ενσωμάτωση των αντιστροφέων στα Φ/Β πλαίσια επιδρά στην παραγωγή της θερμότητας.

Η θερμοκρασία ενός Φ/Β πλαισίου εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένο το πλαίσιο (περιβάλλουσα θερμοκρασία, συνθήκες ηλιοφάνειας, υγρασία και αιολικό δυναμικό) καθώς επίσης και από τις θερμικές ιδιότητες του πλαισίου.

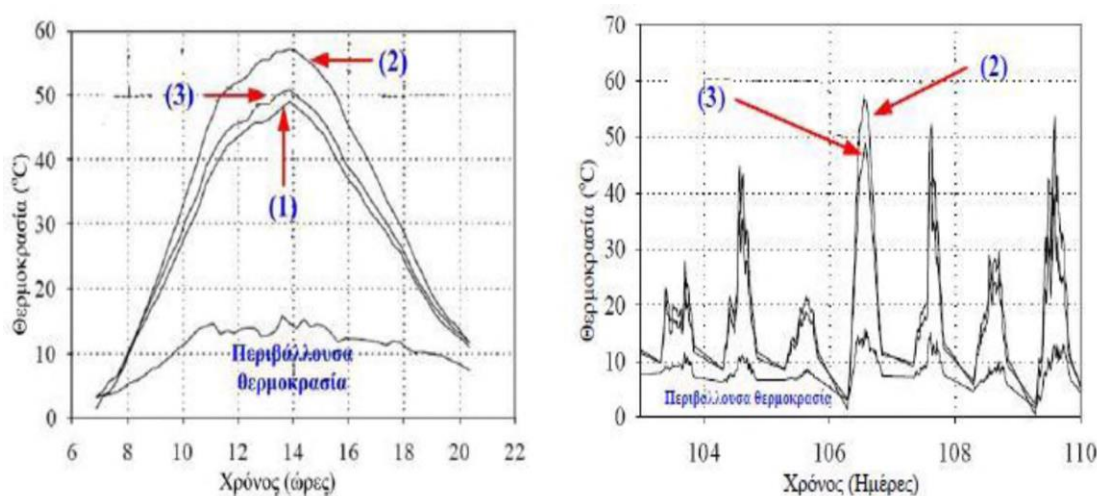
Οι θερμικές ιδιότητες του τελευταίου εξαρτώνται δραστικά από τον τρόπο με τον οποίο εδράζεται σε αυτό ο αντιστροφέας. Αναλυτικότερα η ενσωμάτωση του μετατροπέα στην κάτω επιφάνεια της Φ/Β γεννήτριας μειώνει τη ροή του αέρα συντελώντας έτσι στην μείωση παραγωγής της θερμότητας. Οι δυνατοί τρόποι στήριξης του αντιστροφέα στον σκελετό του πλαισίου είναι οι ακόλουθοι:

- Ο μετατροπέας τοποθετείται σε απόσταση 10 εκατοστών από το σκελετό της Φ/Β γεννήτριας με αποτέλεσμα να παρέχεται απρόσκοπτη ροή του αέρα στην πίσω επιφάνεια του πλαισίου.

- Ο σκελετός του πλαισίου μονώνεται και επάνω του πακτώνετε ένα μεταλλικό κουτί μέσα στο οποίο βρίσκεται ο αντιστροφέας.

- Ο αντιστροφέας συνδέεται στο πλαίσιο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση αλλά επιπρόσθετα σε δύο πλευρές του μεταλλικού περιβλήματος κατασκευάζονται ειδικές σχισμές εξαερισμού οι οποίες επιτρέπουν περιορισμένη ροή αέρα

Για μια ηλιόλουστη ημέρα του Μαΐου παρατίθενται στο Σχ.3.9 οι μετρούμενες θερμοκρασίες στην κάτω επιφάνεια ενός πλαισίου συναρτήσεως του χρόνου, για τους τρεις προαναφερθέντες τρόπους στήριξης των αντιστροφέων. Φαίνεται ξεκάθαρα πως ο πρώτος και τρίτος τρόπος έδρασης επηρεάζουν λιγότερο την θερμοκρασία της κάτω επιφάνειας του πλαισίου σε αντίθεση με τον δεύτερο τρόπο στήριξης ο οποίος οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας αυτού. Επιπρόσθετα η μικρή διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πρώτου και τρίτου τρόπου στήριξης αποδεικνύει πόσο αποτελεσματικές για την ψύξη της Φ/Β γεννήτριας είναι οι σχισμές στις πλευρές του μεταλλικού κουτιού.



Σχ.3.9(Αριστερά) Θερμοκρασία του Φ/Β πλαισίου συναρτήσεως του χρόνου (σε ώρες) κατά τη διάρκεια μιας ηλιόλουστης ημέρας για τρεις διαφορετικούς τρόπους ενσωμάτωσης του μετατροπέα σε αυτό

Σχ.3.10(Δεξιά) Θερμοκρασία του αντιστροφέα συναρτήσεως του χρόνου (σε ημέρες) για τρεις διαφορετικούς τρόπους ενσωμάτωσης του μετατροπέα σε Φ/Β πλαίσια

Αντίστοιχα στο Σχ.3.10 παρατίθενται οι μετρούμενες θερμοκρασίες των μετατροπέων για το δεύτερο και τρίτο τρόπο έδρασης και για χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας του Απριλίου. Μελετώντας αυτό το σχήμα, παρατηρούμε πως για την περίπτωση της άμεσης σύνδεσης του μετατροπέα στο σκελετό του πλαισίου η θερμοκρασία του αντιστροφέα αγγίζει τους 60 °C ακόμα και για αυτόν το σχετικά ελαφρώς ζεστό μήνα. Τα παραπάνω συμπεράσματα αναδεικνύουν πως ο πρώτος και τρίτος τρόπος στήριξης αποτελούν τη βέλτιστη λύση για την απαγωγή της θερμοκρασίας αυξάνοντας έτσι και τη διάρκεια ζωής των μετατροπέων. Τέλος ο τρίτος τρόπος έδρασης του μετατροπέα δείχνει να αποτελεί το και τη βέλτιστη αισθητικά λύση για οικιακές και κτιριακές εφαρμογές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

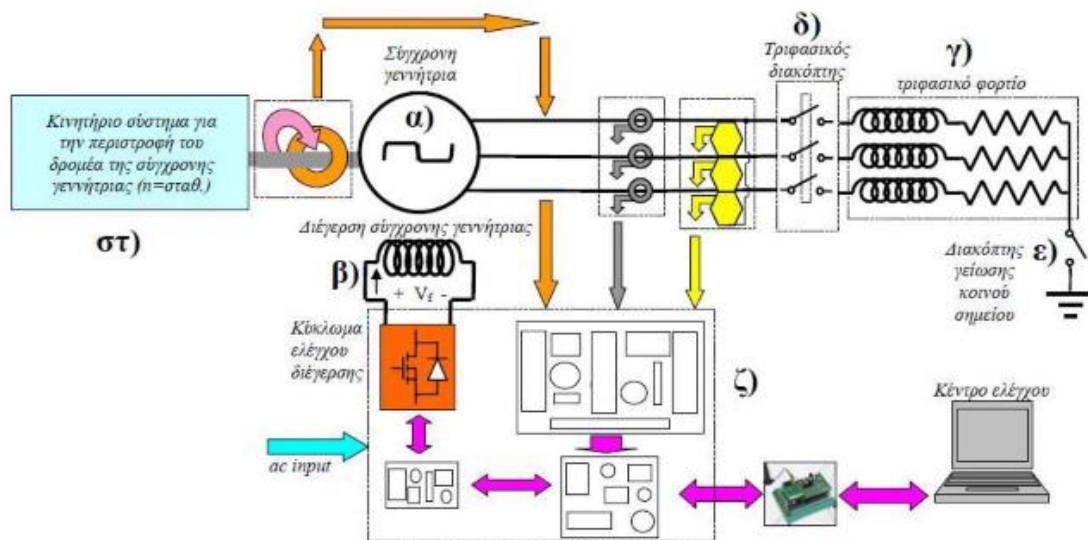
4.1 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Το πρόβλημα της δυναμικής ευστάθειας των ενεργειακών συστημάτων έχει τραβήξει την προσοχή των ερευνητών τα τελευταία χρόνια. Οι κύριοι λόγοι γι' αυτό είναι ο αυξανόμενος αριθμός των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων που εγκαθίστανται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η χρήση συστημάτων διέγερσης υψηλών ταχυτήτων απόκρισης. Η επίδραση τέτοιων συστημάτων ταχείας απόκρισης στη δυναμική ευστάθεια, συνίσταται στην εφαρμογή αρνητικής απόσβεσης στο υπό έλεγχο σύστημα και κατά συνέπεια στην εμφάνιση ασθενών ταλαντώσεων από αυτό. Η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος διέγερσης θα πρέπει να εξασφαλίζει ικανοποιητική συμπεριφορά σε μια ευρεία περιοχή λειτουργικών συνθηκών, καθώς επίσης και σε μια ευρεία περιοχή συνθηκών σφαλμάτων. Η ανασκόπηση στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζει ποικίλες μεθόδους για την αντιμετώπιση του προβλήματος του σχεδιασμού κατάλληλου ελεγκτή διέγερσης. Πρακτικοί μέθοδοι μη γραμμικού ελέγχου περιλαμβάνουν ένα ανάστροφο μοντέλο ανοιχτού βρόγχου για τη δυναμική του (μη γραμμικού) ενεργειακού συστήματος και τη χρήση βρόχων ανάδρασης προκειμένου να αναστέλλονται αυτές οι μη γραμμικότητες. Η προσέγγιση ενός μη γραμμικού συστήματος με ένα γραμμικοποιημένο μοντέλο, οδηγεί στην εφαρμογή μεθόδων προσαρμοστικού ελέγχου, όπου χρησιμοποιούνται μετρήσεις των μεταβλητών εισόδου του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, είτε για την άμεση εξαγωγή του μοντέλου του συστήματος και εν συνεχεία για το σχεδιασμό ενός ελεγκτή βασισμένου στο μοντέλο αυτό (έμμεσος προσαρμοστικός έλεγχος), είτε στην άμεση προσαρμογή των μεταβλητών εξόδου του ελεγκτή (άμμεσος προσαρμοστικός έλεγχος). Κατά το παρελθόν, έχουν παρουσιασθεί τέτοιες μελέτες αναφορικά με εφαρμογές αλγεβρικών μεθόδων και μεθόδων βέλτιστου ελέγχου στη σχεδίαση ελεγκτών διέγερσης. Από την άλλη πλευρά, έχουν εμφανισθεί και εφαρμοσθεί μέθοδοι "ευφυούς" ελέγχου κάνοντας χρήση τεχνικών που βασίζονται στην ασαφή λογική, τα νευρωνικά δίκτυα και τους γενετικούς αλγόριθμους. Οι τεχνικές αυτές βρίσκουν έδαφος -και αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά περιπτώσεις όπου κάποιες από τις σχέσεις που περιγράφουν το υπό έλεγχο σύστημα μπορούν να αναπαρασταθούν με ασαφή σύνολα και ασαφείς σχεσιακές εξισώσεις, ή ακόμη δεν μπορούν να περιγραφούν πλήρως αλλά να μοντελοποιηθούν με ένα κατάλληλα σχεδιασμένο νευρωνικό δίκτυο που να "συλλαμβάνει" τις μη γραμμικότητες που ισχύουν. Ουσιαστικά, οι ασαφείς ελεγκτές αποτελούν μορφή γνωσιολογικών βάσεων δεδομένων οι οποίες περιλαμβάνουν ασαφείς συναρτήσεις συμμετοχής των εμπλεκόμενων μεταβλητών, προκειμένου να "ενσωματωθεί" η ανθρώπινη τεχνογνωσία στη βάση αυτή. Κατά το παρελθόν, έχουν παρουσιασθεί μελέτες αναφορικά με εφαρμογές τέτοιων τεχνικών και μεθόδων στον έλεγχο διέγερσης σύγχρονων γεννητριών. Μία επιπλέον κατηγορία μεθόδων και τεχνικών ελέγχου αποτελούν τα έμπειρα συστήματα και οι ευρετικές τεχνικές. Σε συνδυασμό με την εξέλιξη που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στη μικροηλεκτρονική και τις αυξημένες δυνατότητες που προσφέρουν σε επίπεδο υπολογιστικής ισχύος οι σύγχρονοι μικροεπεξεργαστές, έχει δημιουργηθεί μεγάλο πεδίο εφαρμογών και για τη σχεδίαση συστημάτων ελέγχου διέγερσης. Συνεπώς, με αφορμή τα παραπάνω, η παρούσα εργασία αναπτύσσει και προτείνει μία τέτοια τεχνική. Επιπλέον, το

ολοκληρωμένο κύκλωμα, έτσι όπως διαμορφώνεται, επιτρέπει και την εφαρμογή όλων των προαναφερθέντων ευφώνων τεχνικών, αφού η μόνη προσαρμογή που πρέπει να υλοποιηθεί κατά περίπτωση, αφορά την αντίστοιχη τροποποίηση του λογισμικού του μικροεπεξεργαστή που διαθέτει. Σκοπός λοιπόν της εργασίας αυτής είναι, η παρουσίαση και η περιγραφή ενός τέτοιου ολοκληρωμένου πρακτικού συστήματος ελέγχου διέγερσης σύγχρονων γεννητριών για λειτουργία σε απομακρυσμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο.

4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΠΛΗΡΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο Σχ.4.1, φαίνεται η βασική δομή του πλήρους ηλεκτροκινητήριου συστήματος που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε με σκοπό να υλοποιηθεί ένα πρακτικό σύστημα ελέγχου της διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας για λειτουργία σε απομακρυσμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Με γνώμονα την τελική επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, αρχικά πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση ενός εργαστηριακού συστήματος που εξομοιώνει πλήρως τη λειτουργική συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος και δίνει τη δυνατότητα μελέτης και διερεύνησης του πλήρους συστήματος σε εργαστηριακό περιβάλλον και υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Το πλήρες σύστημα αποτελείται από επτά διαφορετικά τμήματα:



Σχ.4.1. Βασική δομή πλήρους ηλεκτροκινητήριου συστήματος

α) σύγχρονη γεννήτρια, β) διέγερση σύγχρονης γεννήτριας, γ) τριφασικό φορτίο (συμμετρικό ή ασύμμετρο), δ) τριφασικός διακόπτης, ε) μονοφασικός διακόπτης (για τη γείωση του κοινού σημείου του τριφασικού φορτίου), στ) κινητήριο σύστημα για την περιστροφή της σύγχρονης γεννήτριας, ζ) σύστημα ελέγχου διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας και επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου.

Από όλα τα παραπάνω, είναι εμφανές, ότι το αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης εργασίας είναι το τμήμα (ζ) ενώ όλα τα υπόλοιπα τμήματα είναι απαραίτητα για τον έλεγχο και την πιστοποίηση της ομαλής λειτουργία του πλήρους συστήματος. Τα

επιμέρους κυκλώματα τα οποία συνθέτουν το ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας και επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου φαίνονται στο Σχ.4.2 και είναι τα ακόλουθα:

- *Κύκλωμα ισχύος*: περιλαμβάνει το πλήρες κύκλωμα ισχύος της διάταξης ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας.

- *Κύκλωμα μέτρησης ρευμάτων*: περιλαμβάνει το πλήρες κύκλωμα για τη μέτρηση των τριών ρευμάτων στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας.

- *Κύκλωμα μέτρησης τάσεων*: περιλαμβάνει το απαραίτητο κύκλωμα για τη μέτρηση των τριών πολικών ή των τριών φασικών τάσεων, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας, στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας.

- *Κύκλωμα μέτρησης στροφών*: περιλαμβάνει το κύκλωμα που απαιτείται για τη μέτρηση των στροφών στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας και για τον προσδιορισμό της συχνότητας των τάσεων εξόδου.

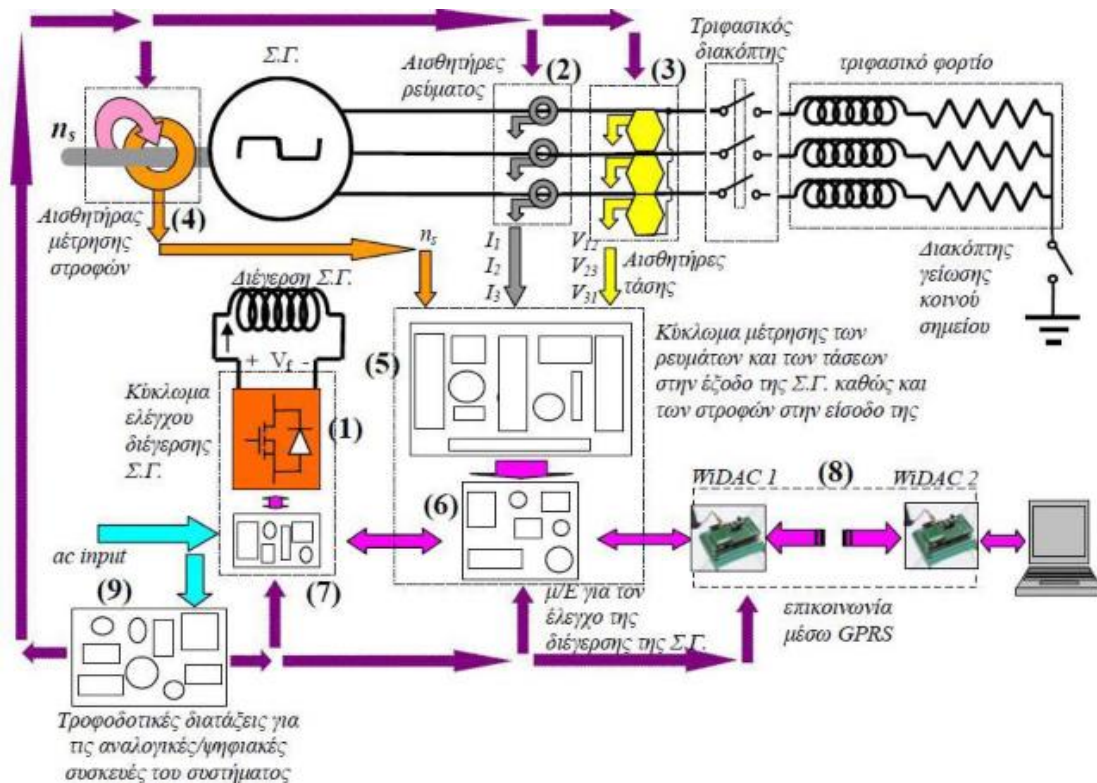
- *Κύκλωμα διαμόρφωσης*: περιλαμβάνει το απαραίτητο κύκλωμα που χρειάζεται για τη κατάλληλη διαμόρφωση όλων των μετρούμενων μεγεθών με στόχο τη άμεση και ασφαλή μεταφορά των μετρήσεων στις αντίστοιχες αναλογικές εισόδους του κύριου μικροεπεξεργαστή του συστήματος.

- *Κύκλωμα κύριου μικροεπεξεργαστή*: περιλαμβάνει το αναγκαίο κύκλωμα για την - σωστή λειτουργία του κύριου μικροεπεξεργαστή του συστήματος καθώς και όλων των διατάξεων διασύνδεσης με όλα τα επιμέρους κυκλώματα του συστήματος.

- *Κύκλωμα ενίσχυσης παλμών*: περιλαμβάνει το απαραίτητο κύκλωμα που χρειάζεται για την κατάλληλη ενίσχυση και διαμόρφωση των παλμών εξόδου του μικροεπεξεργαστή για την ασφαλή οδήγηση των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος ισχύος καθώς και όλων των προστασιών και διατάξεων μέτρησης που είναι απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία του κυκλώματος ισχύος.

- *Κύκλωμα απομακρυσμένης λειτουργίας*: περιλαμβάνει το κύκλωμα που απαιτείται για την ασφαλή μεταφορά και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του απομακρυσμένου συστήματος και του σημείου ελέγχου του, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση.

- *Κύκλωμα τροφοδοτικών*: περιλαμβάνει το κύκλωμα όλων των απαραίτητων βοηθητικών τροφοδοτικών διατάξεων που απαιτούνται για τη λειτουργία όλων των αναλογικών και ψηφιακών συσκευών του συστήματος.



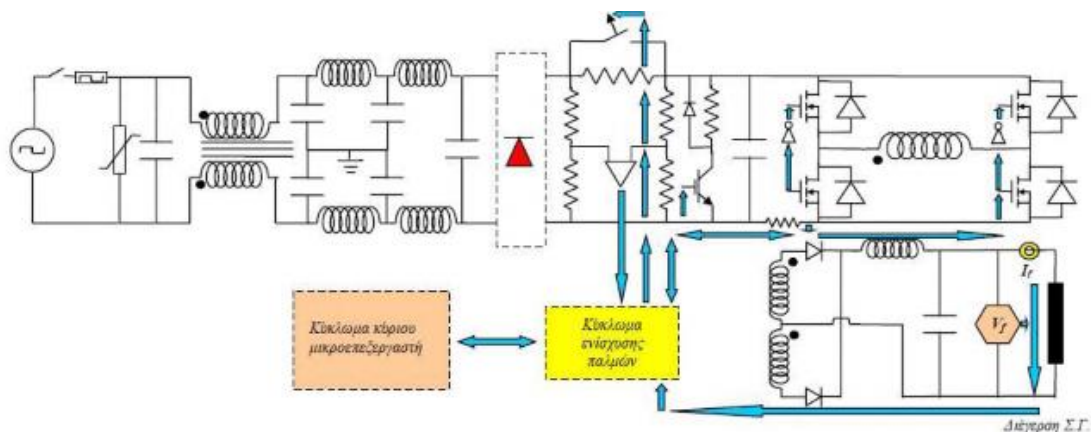
Σχ. 4.2 Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας

Αναλυτικότερα, σε καθένα από τα επιμέρους κυκλώματα, τα οποία συνθέτουν το ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου διέγερσης σύγχρονης γεννήτριας και επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου, εμπεριέχεται το κατάλληλο υλικό για να εκτελούνται οι ακόλουθες λειτουργίες και περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

4.2.1 Κύκλωμα Ισχύος

Το κύκλωμα αυτό (Σχ.4.3) συνιστά το πλήρες κύκλωμα ισχύος της διάταξης ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Η τροφοδοσία του παρέχεται από την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου (230Volt/50Hz), ενώ στην έξοδό του παράγεται μία συνεχή τάση, ανάλογη με τα χαρακτηριστικά της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας (15Volt/10A για τη συγκεκριμένη εφαρμογή). Σύμφωνα πάντα με το πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα του Σχ.4.3, ακολουθεί η ανάλυσή του: στην είσοδο του μετατροπέα τοποθετούνται τα απαραίτητα φίλτρα εισόδου (για ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές) καθώς και οι απαραίτητες προστασίες τόσο από υπέρρευμα όσο και από υπερτάσεις στην είσοδο του. Κατόπιν, συνδέεται μία μη ελεγχόμενη γέφυρα πλήρους ανόρθωσης και ο πυκνωτής εισόδου, η φόρτιση του οποίου γίνεται με τη βοήθεια μίας αντίστασης φόρτισης για τον περιορισμό της μέγιστης τιμής του ρεύματος εκκίνησης. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή συγκρίνεται με την τάση τροφοδοσίας και εφόσον διαπιστωθεί πλήρη φόρτιση του πυκνωτή η αντίσταση φόρτισης βραχυκυκλώνεται. Στη συνέχεια, ακολουθεί το κύκλωμα ενεργητικής εκφόρτισης του πυκνωτή εισόδου με τη βοήθεια ενός ελεγχόμενου ημιαγωγικού στοιχείου (τύπου IGBT) καθώς και μίας αντίστασης ισχύος το οποίο λειτουργεί, τόσο κατά το τερματισμό της λειτουργίας του κυκλώματος, όσο και όταν εμφανιστεί υψηλή τάση λειτουργίας στα άκρα του πυκνωτή εισόδου. Επίσης, σ' αυτή την περιοχή του κυκλώματος εμπεριέχονται οι απαραίτητες προστασίες από

υπέρταση και από υπέρρευμα. Στη συνέχεια, συνδέεται το κύκλωμα του μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση. Ο μετατροπέας αυτός, είναι υπεύθυνος για την διαμόρφωση της κατάλληλης τάσης στην έξοδο του κυκλώματος ισχύος. Παρόλο, που στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες τεχνικές και τοπολογίες για την υλοποίηση αυτής της διάταξης, στη συγκεκριμένη σχεδίαση επιλέχθηκε η τοπολογία ενός μετατροπέα συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση τύπου γέφυρας με μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα ενώ η τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε είναι η τεχνική διαμόρφωσης του εύρους των παλμών με μονοπολική τάση εξόδου. Η επιλογή τόσο της τοπολογίας του μετατροπέα, όσο και της τεχνικής ελέγχου έγινε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί μία τοπολογία που να μπορεί πολύ εύκολα να διαμορφωθεί είτε για τον έλεγχο της διέγερσης γεννητριών πολύ μεγαλύτερης ισχύος (με τις λιγότερες δυνατές αλλαγές), είτε ακόμα για τη δυνατότητα τροφοδότησης του κυκλώματος ελέγχου της διέγερσης από πηγές συνεχούς τάσης (συσσωρευτές). Ιδιαίτερη βαρύτητα, κατά τη σχεδίαση, δόθηκε και στο να επιτευχθεί όσο το δυνατό υψηλότερη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας της διάταξης με σκοπό να ελαττωθεί ο όγκος και το μέγεθος της συσκευής και να αυξηθεί η πυκνότητα ισχύος και γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου.



Σχ.4.3 Πλήρες κυκλωματικό διάγραμμα του κυκλώματος ισχύος.

Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του κυκλώματος ισχύος της γέφυρας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση είναι τύπου MOSFET. Στην έξοδο της γέφυρας, μετά τις απαραίτητες διόδους ανόρθωσης και τα φίλτρα εξομάλυνσης υπάρχουν τα απαραίτητα κυκλώματα για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου καθώς και οι απαραίτητες προστασίες. Το συγκεκριμένο κύκλωμα διαμέσου του κυκλώματος ενίσχυσης παλμών επικοινωνεί με το κύκλωμα του κύριου μικροεπεξεργαστή για την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του.

4.2.2 Κύκλωμα μέτρησης ρευμάτων

Το κύκλωμα αυτό αποτελεί τη διάταξη που έχει υλοποιηθεί για τη μέτρηση των τριών φασικών ρευμάτων στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας. Για τη μέτρηση των τριών ρευμάτων επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τρεις αισθητήρες ρεύματος που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο Hall (LA25-NP/SP2 της εταιρίας LEM). Αυτό σημαίνει, ότι ο κάθε αισθητήρας, άρα και το κύκλωμα μέτρησης, δίνει στην έξοδό του ένα αναλογικό σήμα ηλεκτρικά απομονωμένο σε σχέση με την είσοδό του (ρεύμα ισχύος) και ανάλογο με την τιμή του ρεύματος που διαρρέει εκείνη τη στιγμή τη κάθε φάση. Στο σήμα εξόδου του κάθε αισθητήρα δεν εισάγονται χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ πραγματικού ρεύματος και σήματος εξόδου, δίνεται η δυνατότητα μέτρησης τόσο συνεχών συνιστωσών όσο και μεταβατικών φαινομένων (απόκριση σε συχνότητες από 0Hz έως 150kHz), ενώ η ακρίβειά του όλου κυκλώματος πλησιάζει το $\pm 1\%$. Η επιλογή τριών αισθητηρίων ρεύματος έγινε για να προβλεφθεί η δυνατότητα σωστής μέτρησης ακόμα και κατά την περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης της γεννήτριας με το κοινό σημείο του φορτίου γειωμένο. Οι απαραίτητες βοηθητικές τροφοδοσίες ($\pm 12\text{V}$) που χρειάζονται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχονται από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών, ενώ τα τρία σήματα εξόδου του συγκεκριμένου κυκλώματος οδηγούνται στο κύκλωμα διαμόρφωσης.

4.2.3 Κύκλωμα μέτρησης τάσεων

Το κύκλωμα αυτό αποτελεί τη διάταξη που έχει υλοποιηθεί για τη μέτρηση των τριών τάσεων στην έξοδο της γεννήτριας. Παρέχεται η δυνατότητα επιλογής μέτρησης, είτε των τριών φασικών τάσεων, είτε των τριών πολικών τάσεων, μέσου κατάλληλου υλικού η οποία όμως επιλέγεται κατά την αρχή λειτουργίας του πλήρες συστήματος. Για τη μέτρηση της κάθε τάσης χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο Hall (LV25-P/SP2 της εταιρίας LEM) οι οποίοι μπορούν να μετρήσουν μέχρι 1500V μέγιστη τιμή, δίνουν απόκριση σε συχνότητες από 0Hz έως 40kHz, η ακρίβειά τους πλησιάζει το $\pm 0,8\%$ ενώ η ακρίβεια του όλου κυκλώματος προσεγγίζει το $\pm 2,0\%$. Και εδώ η επιλογή τριών αισθητηρίων έγινε με σκοπό να προβλεφθεί η δυνατότητα σωστής μέτρησης κατά την περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης της γεννήτριας. Οι απαραίτητες βοηθητικές τροφοδοσίες ($\pm 12\text{V}$) που χρειάζονται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχονται από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών, ενώ τα τρία σήματα εξόδου του συγκεκριμένου κυκλώματος οδηγούνται στο κύκλωμα διαμόρφωσης.

4.2.4 Κύκλωμα μέτρησης στροφών

Η μέτρηση των στροφών στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της συχνότητας της τάσης στην έξοδο της. Για τη μέτρηση των στροφών στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε ένας αισθητήρας στροφών ο οποίος δίνει στην έξοδό του ψηφιακό σήμα για την ένδειξη των στροφών. Ο αισθητήρας προσαρμόστηκε με κατάλληλη διάταξη στον άξονα της μηχανής ενώ η απαραίτητη βοηθητική τροφοδοσία (5V) που χρειάζεται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχεται και εδώ από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών, ενώ το σήμα εξόδου του συγκεκριμένου κυκλώματος οδηγείται στο κύκλωμα διαμόρφωσης.

4.2.5 Κύκλωμα διαμόρφωσης

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες διατάξεις που χρειάζονται για την κατάλληλη διαμόρφωση όλων των μετρούμενων μεγεθών (ρεύματα, τάσεις, στροφές) με στόχο τη άμεση και ασφαλή μεταφορά των μετρήσεων από όλα τα αισθητήρια της διάταξης στις αντίστοιχες αναλογικές εισόδους του κύριου μικροεπεξεργαστή του συστήματος. Επίσης, σ' αυτό το κύκλωμα εμπεριέχονται και όλα τα απαραίτητα κυκλώματα προστασίας που αντιλαμβάνονται μη ασφαλή λειτουργία στην έξοδο της γεννήτριας και δημιουργούν τις κατάλληλες εισόδους σε συγκεκριμένους ακροδέκτες (pins) του κύριου μικροεπεξεργαστή (interrupts) με σκοπό την προστασία της διάταξης από καταστροφή. Οι απαραίτητες βοηθητικές τροφοδοσίες (± 12 , 5Volt) που χρειάζονται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχονται από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών.

4.2.6 Κύκλωμα κύριου μικροεπεξεργαστή

Στο κύκλωμα αυτό εμπεριέχονται όλες οι αναγκαίες διατάξεις για την ομαλή λειτουργία του κύριου μικροεπεξεργαστή του συστήματος. Ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο PIC18F8621 της εταιρίας Microchip, ενώ για τις ανάγκες της συγκεκριμένης διάταξης αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής που είναι υπεύθυνο για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Αυτός ο μικροεπεξεργαστής δέχεται όλες τις μετρήσεις των μεγεθών από το κύκλωμα διαμόρφωσης, επίσης τις απαιτήσεις για την επιθυμητή λειτουργία μέσω του κυκλώματος απομακρυσμένης λειτουργίας, εκτελεί όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς και παράγει τους κατάλληλους παλμούς τύπου μονοπολικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών για την οδήγηση των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος ισχύος της διάταξης ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Επίσης, μέσω αυτού του μικροεπεξεργαστή γίνεται η διακίνηση των πληροφοριών μεταξύ τοπικού και απομακρυσμένου σημείου ελέγχου. Οι απαραίτητες βοηθητικές τροφοδοσίες ($\pm 12,5$ Volt) που χρειάζονται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχονται από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών.

4.2.7 Κύκλωμα ενίσχυσης παλμών

Στο κύκλωμα αυτό εμπεριέχονται οι απαραίτητες διατάξεις που χρειάζονται για την ενίσχυση και διαμόρφωση των παλμών εξόδου του μικροεπεξεργαστή για τη λειτουργία του κυκλώματος ισχύος. Οι παλμοί χρειάζονται την κατάλληλη ενίσχυση για να μπορέσουν να οδηγήσουν τα ημιαγωγικά στοιχεία του μετατροπέα τύπου γέφυρας. Επίσης, σ' αυτό το κύκλωμα παράγεται και η απαραίτητη καθυστέρηση μεταξύ των παλμών του πάνω και του κάτω ημιαγωγικού στοιχείου σε κάθε κλάδο της γέφυρας έτσι ώστε να αποφευχθεί βραχυκύκλωμα μεταξύ δύο ημιαγωγικών στοιχείων λόγω του φαινομένου Miller. Τα κύρια ολοκληρωμένα αυτού του κυκλώματος είναι τα IR2213 της εταιρίας IR, με τη βοήθεια των οποίων μπορεί να δημιουργηθεί μία απομονωμένη τροφοδοσία για την οδήγηση των "πάνω" ημιαγωγικών στοιχείων κάθε σκέλους ελαχιστοποιώντας τις απαιτήσεις σε απομονωμένες βοηθητικές τροφοδοσίες. Ακόμα, σ' αυτό το κύκλωμα εμπεριέχονται, τόσο το κύκλωμα ενίσχυσης των παλμών για το ημιαγωγικό στοιχείο της ενεργητικής εκφόρτισης του πυκνωτή εισόδου, όσο και όλες οι απαραίτητες προστασίες (από υπερτάσεις και υπερρεύματα στην είσοδο και στην έξοδο) της διάταξης ελέγχου της

διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας. Όλες οι απαραίτητες βοηθητικές τροφοδοσίες ($\pm 12,5\text{Volt}$) που χρειάζονται για την λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος παρέχονται από το κύκλωμα των βοηθητικών τροφοδοτικών.

4.2.8 Κύκλωμα απομακρυσμένης λειτουργίας

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει τις διατάξεις που απαιτούνται για την ασφαλή μεταφορά και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ απομακρυσμένου συστήματος και το κεντρικό σημείο ελέγχου του συστήματος, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση με το προς έλεγχο σύστημα. Για την υλοποίηση αυτής της δυνατότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή WiDAC, της εταιρίας Lamda Electronics Inc., με τη βοήθεια της οποίας γίνεται η ανταλλαγή πληροφοριών. Οι πληροφορίες κωδικοποιούνται και μεταφέρονται με τη χρήση ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ του απομακρυσμένου σημείου που βρίσκεται η σύγχρονη γεννήτρια και του σημείου ελέγχου της ολοκληρωμένης διάταξης. Παρέχεται η δυνατότητα της μεταφοράς δώδεκα ψηφιακών σημάτων τα οποία ανά τετράδες μπορούν να οριστούν είτε ως είσοδοι είτε ως έξοδοι για τη λειτουργία του απομακρυσμένου ελέγχου.

4.2.9 Κύκλωμα τροφοδοτικών

Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει όλες τις αναγκαίες διατάξεις για την υλοποίηση των απαραίτητων βοηθητικών τροφοδοτικών διατάξεων που απαιτούνται για τη λειτουργία όλων των αναλογικών και ψηφιακών συσκευών του συστήματος. Η τροφοδοσία του κυκλώματος αυτού είναι η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου, ενώ στην έξοδο του παράγονται όλες οι βοηθητικές και πλήρως σταθεροποιημένες τάσεις, ηλεκτρικά απομονωμένες από την είσοδο, που απαιτούνται για τη τροφοδοσία όλων των κυκλωμάτων του συστήματος. Η τοπολογία που επιλέχθηκε για την υλοποίηση αυτού του κυκλώματος είναι η τοπολογία flyback με μετασχηματιστή με τρία δευτερεύοντα κυκλώματα ενώ τα χαρακτηριστικά των τάσεων εξόδου αυτού του κυκλώματος είναι $12\text{Volt}/1\text{A}$, $-12\text{Volt}/0,5\text{A}$ και $5\text{Volt}/1\text{A}$.

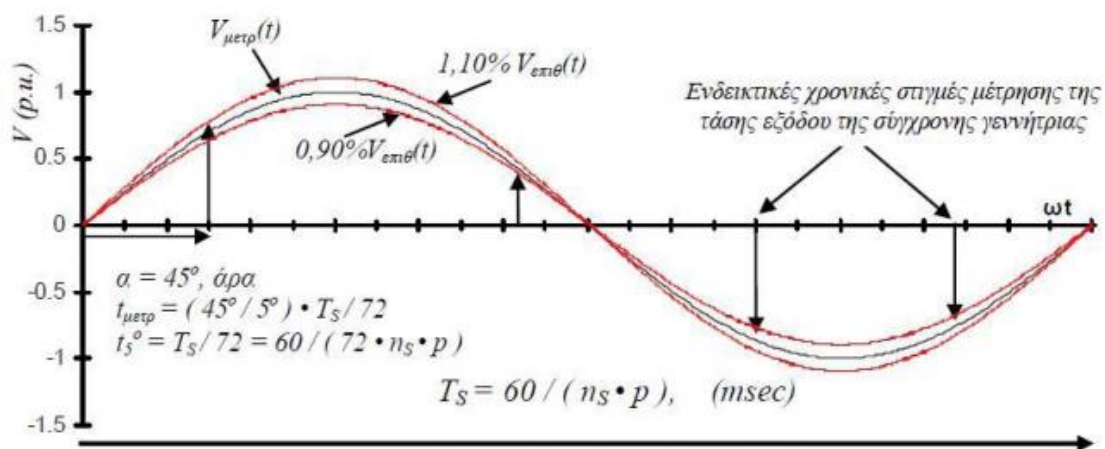
4.3 ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Το κατά κύριο λόγο υπεύθυνο τμήμα, για την ορθή λειτουργία του πρακτικού συστήματος ελέγχου της διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας για λειτουργία σε απομακρυσμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο, που παρουσιάζεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας, είναι αυτό του λογισμικού που αναπτύχθηκε. Η άμεση και σίγουρη ανίχνευση σφάλματος στην τάση εξόδου της γεννήτριας, ο τρόπος υπολογισμού του επιθυμητού ρεύματος διέγερσης μέσω μη γραμμικών εξισώσεων για τη διόρθωση της τάσης εξόδου της γεννήτριας, ο χρόνος καθώς και ο τρόπος απόκρισης του συστήματος, ο τρόπος ελέγχου του κυκλώματος ισχύος, ο τρόπος και ο χρόνος επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου, είναι κάποια από τα βασικά σημεία στη λειτουργία της διάταξης, που θα πρέπει να αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά από τον αλγόριθμο που υλοποιείται από το συγκεκριμένο λογισμικό, με σκοπό την ορθή λειτουργία του πλήρες συστήματος. Στη συνέχεια, αναλύονται εκτενέστερα κάποιες από τις απαιτήσεις που πρέπει να παρέχει το συγκεκριμένο λογισμικό.

4.3.1 Φιλοσοφία της τεχνικής μέτρησης της τάσης στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας

Ένα σημαντικό πρόβλημα για την αξιόπιστη λειτουργία και τον έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος είναι η ασφαλής και η γρήγορη μέτρηση της τάσης εξόδου της γεννήτριας. Επειδή, η μέτρηση και η εύρεση της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας είναι μία διαδικασία αρκετά αργή (απαιτούνται μετρήσεις για χρονικό διάστημα τουλάχιστον δύο με τριών περιόδων για τον ασφαλή υπολογισμό της) καθώς επίσης εμπεριέχει τον κίνδυνο και να αγνοηθούν διαταραχές - μικρής χρονικής διάρκειας- στην τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας καθώς και να υπάρχει μεγάλη χρονική καθυστέρηση στον έλεγχο της τάσης εξόδου (λόγω καθυστερημένης ανίχνευσης του σφάλματος, μια και η ανίχνευσή του θα επιτυγχάνεται με τη σύγκριση μεταξύ της επιθυμητής τιμής και της μετρούμενης ενεργού τιμής της τάσης). Για να εξαιρεθεί το πρόβλημα της μη έγκαιρης ανίχνευσης «σφάλματος» καθώς και την πραγματοποίησης της όσο το δυνατό γρηγορότερης απόκρισης του κυκλώματος ελέγχου και της ρύθμισης της τάσης εξόδου της γεννήτριας μέσα στα όρια των επιθυμητών τιμών, στη συγκεκριμένη περίπτωση για την μέτρηση της τάσης εξόδου χρησιμοποιείται η ακόλουθη λογική η οποία απεικονίζεται στο Σχ. 4.4 και σύμφωνα με την οποία: Με τη βοήθεια του κυκλώματος μέτρησης των στροφών μετράμε τις στροφές στον άξονα της σύγχρονης γεννήτριας. Οι στροφές και ο αριθμός πόλων της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζουν την συχνότητα της παραγόμενης τάσης στην έξοδο της γεννήτριας. Επίσης, είναι γνωστό ότι η κυματομορφή των τάσεων στην έξοδο της γεννήτριας είναι ημιτονοειδής. Επίσης γνωρίζουμε ότι οι στροφές, ως μηχανικό μέγεθος, είναι ένα μέγεθος που δε μεταβάλλεται γρήγορα, επομένως χωρίς σφάλμα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συχνότητα που υπολογίζεται με βάση τη μέτρηση του αριθμού των στροφών στον άξονα θα είναι και η συχνότητα της παραγόμενης τάσης στην έξοδο της γεννήτριας για τα επόμενα 30msec, χρόνος αρκετά μεγαλύτερος από τη περίοδο της. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι ημιτονοειδής, δημιουργείται ένας πίνακας με τις τιμές του ημίτονου για γωνίες από 0 έως 360 μοίρες, με βήμα 5 μοίρες, δηλαδή 72 μετρήσεις. Με δεδομένη την επιθυμητή τιμή της ενεργού τάσης στα άκρα της γεννήτριας μπορούμε να γνωρίζουμε την ακριβή στιγμιαία τιμή της τάσης και αν έχουμε απόκλιση ή όχι.

Γνωρίζοντας τη συχνότητα στην έξοδο της γεννήτριας μπορούμε να γνωρίζουμε και ποιο είναι το αντίστοιχο χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί σε μεταβολή της γωνίας της τάσης κατά 5 μοίρες άρα και το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών του πίνακα. Επίσης, αυτό το χρονικό διάστημα μας δείχνει και το χρονικό βήμα με το οποίο θα πρέπει να πραγματοποιείται η εκάστοτε μέτρηση της τάσης στην έξοδο. Με τη βοήθεια του κυκλώματος μέτρησης τάσεων ανιχνεύουμε, κάθε φορά, το σημείο μηδενισμού της τάσης εξόδου δηλαδή τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στις 0 μοίρες και πραγματοποιείται η κατάλληλη αρχικοποίηση για τη ασφαλή λειτουργία του κυκλώματος μέτρησης της τάσης εξόδου. Η εκάστοτε μετρούμενη τιμή της τάσης είναι μέσα σε παραδεκτά όρια εφόσον βρίσκεται μέσα στο διάστημα που ορίζεται από τα επιθυμητά όρια διακύμανσης (π.χ. $\pm 10\%$) της επιθυμητής τιμής για τη συγκεκριμένη γωνία.



Σχ.4.4 Τεχνική μέτρησης για την ανίχνευση σφάλματος στην τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας

4.3.2 Φιλοσοφία της τεχνικής ελέγχου του κυκλώματος ισχύος

Η τεχνική ελέγχου του κυκλώματος ισχύος της διάταξης ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας είναι η διαμόρφωση εύρους των παλμών με μονοπολική τάση εξόδου. Στην συγκεκριμένη τεχνική οι δύο ημιαγωγικοί διακόπτες του κάθε σκέλους της γέφυρας (Σχ. 4.5) ελέγχονται ανεξάρτητα από τους διακόπτες του άλλου σκέλους με αποτέλεσμα να παράγεται μία καλύτερη κυματομορφή της τάσης εξόδου σε μία καλύτερη απόκριση συχνότητας, επειδή διπλασιάζεται η συχνότητα της κυματομορφής της τάσης εξόδου και υποδιπλασιάζεται η κυμάτωσή της. Αυτό οδηγεί και σε ελαχιστοποίηση των φίλτρων εξομάλυνσης που απαιτούνται. Τα σήματα μετάβασης των ημιαγωγικών στοιχείων του κάθε σκέλους καθορίζονται από τη σύγκριση μιας τριγωνικής κυματομορφής (V_{tri}) με δύο τάσεις ελέγχου την $U_{control}$ για τους ημιαγωγικούς διακόπτες του σκέλους A και της $-U_{control}$ για τους ημιαγωγικούς διακόπτες του σκέλους B. Η λογική της παλμοδότησης είναι η εξής: για όσο χρονικό διάστημα η τιμή της τάσης ελέγχου είναι μεγαλύτερη από την τιμή της τάσης του τριγώνου παλμοδοτούμε τον πάνω διακόπτη του αντίστοιχου σκέλους, ενώ για όσο χρονικό διάστημα η τιμή της τάσης ελέγχου είναι μικρότερη από την τιμή της τάσης του τριγώνου παλμοδοτούμε τον κάτω διακόπτη του αντίστοιχου σκέλους.

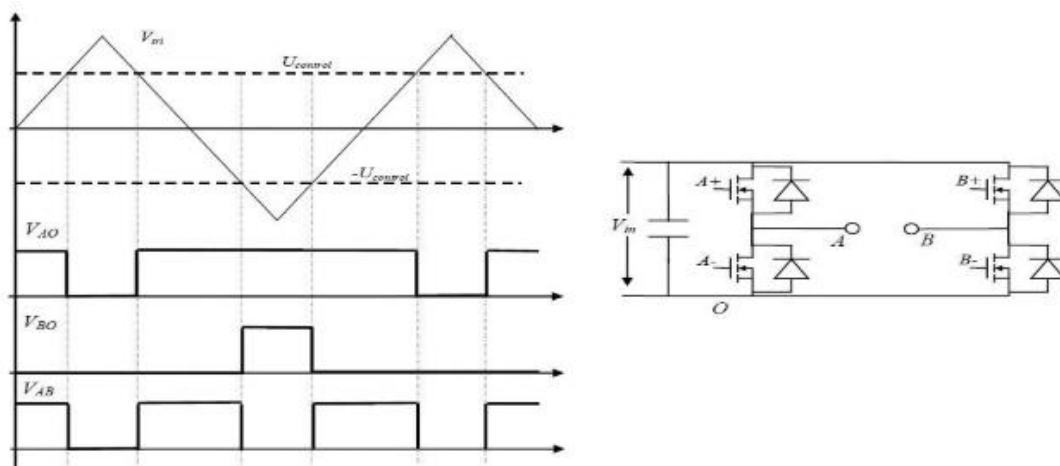
Αποδεικνύεται ότι, αν δ_1 είναι ο λόγος κατάτμησης των ημιαγωγικών στοιχείων του σκέλους A και δ_2 ο αντίστοιχος λόγος κατάτμησης των ημιαγωγικών στοιχείων του σκέλους B ισχύει ότι:

$$\delta_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{U_{control}}{V_{tri,max}} + 1 \right)$$

$$\delta_2 = 1 - \delta_1$$

$$V_0 = (2\delta_1 - 1)V_{in} = \frac{V_{in}}{V_{tri,max}} U_{control}$$

Επομένως από τις παραπάνω εξισώσεις παρατηρούμε ότι σ' ένα μετατροπέα τοπολογίας πλήρους γέφυρας που ελέγχεται με την τεχνική της διαμόρφωσης εύρους των παλμών (PWM) με μονοπολική τάση εξόδου η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_0 μεταβάλλεται γραμμικά με μεταβολή της τάσης ελέγχου $U_{control}$. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή υπάρχει και μετασχηματιστής με λόγο μετασχηματισμού (n_1/n_2), θα πρέπει ο λόγος να ληφθεί υπόψη στην εξίσωση που μας δίνει την τάση στη διέγερση της σύγχρονης γεννήτριας. Όλη η παραπάνω ανάλυση ισχύει με την προϋπόθεση ότι θεωρούμε ότι είμαστε σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και ότι όλα τα στοιχεία του μετατροπέα είναι ιδανικά. Επίσης, δεν έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα που εισάγεται στη παραπάνω λειτουργία εξαιτίας του «νεκρού χρόνου» δηλαδή, της χρονικής καθυστέρησης που χρειάζεται να υπάρχει μεταξύ της χρονικής στιγμής της σβέσης ενός ημιαγωγικού στοιχείου κάποιου σκέλους μέχρι της χρονικής στιγμής της έναυσης του άλλου ημιαγωγικού στοιχείου του ίδιου σκέλους, για να αποφευχθεί πιθανό βραχυκύκλωμα στην συνεχή τάση εισόδου



Σχ.4.5 Τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών με μονοπολική τάση εξόδου.

4.3.3 Φιλοσοφία υπολογισμού του επιθυμητού ρεύματος διέγερσης

Το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται σε μια σύγχρονη γεννήτρια για δεδομένη τάση εξόδου, είναι δυνατό να υπολογιστεί αλγεβρικά, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα, τη χαρακτηριστική εν κενώ της γεννήτριας καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της. Έχοντας εισάγει στο λογισμικό του μικροεπεξεργαστή, υπό μορφή πίνακα, τη χαρακτηριστική εν κενώ της σύγχρονης γεννήτριας, μετρώντας το

ρεύμα εξόδου και γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της μηχανής υπολογίζεται ανά πάσα στιγμή το ρεύμα διέγερσης και επομένως και η επιθυμητή τιμή της τάσης ελέγχου $V_{control}$ για το κύκλωμα ισχύος, από την εξίσωση:

$$V_{control} = \frac{V_{tri,max}}{V_{in}} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot V_F^{calc} \cdot a$$

Όπου, n_1 / n_2 ο λόγος σπειρών του μετασχηματιστή, V_{max} η μέγιστη τιμή της κυματομορφής του τριγώνου ελέγχου, V_{in} η τάση στην είσοδο του μετατροπέα τύπου γέφυρας του κυκλώματος ισχύος της διάταξης ελέγχου της διέγερσης της σύγχρονης γεννήτριας, V_F^{calc} η υπολογισθείσα για τη συγκεκριμένη λειτουργία επιθυμητή τάση διέγερσης και a , ένας συντελεστής (μεγαλύτερος της μονάδας) που εμπεριέχεται στην εξίσωση για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες καθώς και η μη γραμμικότητα εξαιτίας της χρονικής καθυστέρησης.

4.3.4 Επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου

Ο τρόπος επικοινωνίας του απομακρυσμένου συστήματος με το κέντρο ελέγχου είναι βασικός όσον αφορά τη δυνατότητα για έλεγχο από απόσταση καθώς και για την «εκπαίδευση» του συστήματος με σκοπό την ταχύτερη απόκρισή του, σε ενδεχόμενες μεταβολές. Η επικοινωνία γίνεται με δώδεκα ψηφιακά σήματα, από τα οποία οχτώ είναι σήματα εισόδου για το απομακρυσμένο σύστημα και τα υπόλοιπα, σήματα εξόδου γι' αυτό. Κατά την αρχική επικοινωνία μεταφέρονται από το κέντρο ελέγχου δεδομένα που καθορίζουν την έναρξη της λειτουργίας του συστήματος, το καθορισμό μέτρησης είτε των φασικών είτε των πολικών τάσεων εξόδου της γεννήτριας για την δημιουργία των κατάλληλων πινάκων από τον μικροεπεξεργαστή του συστήματος και την ενεργοποίηση του κατάλληλου υλικού, καθώς και δεδομένα (έξι ψηφιακά σήματα) που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, σε ενδεχόμενο σφάλμα. Από το κέντρο ελέγχου δίνονται πληροφορίες για το όριο διακύμανσης της τάσης εξόδου ($\pm\eta\%$) με ένα 4-bit σήμα καθώς και πληροφορίες για τον αριθμό των «βημάτων» (k), 2-bit, που θα γίνουν στον έλεγχο της διέγερσης κατά την εμφάνιση διαταραχής στη τάση εξόδου μεγαλύτερη από αυτή που προσδιορίζεται από το όριο (η). Επίσης, από το απομακρυσμένο σύστημα προς το κέντρο ελέγχου μεταφέρονται δεδομένα που αφορούν τη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος (ON-OFF), την ύπαρξη σφάλματος καθώς και δεδομένα που αφορούν τον τρόπο φόρτισης της γεννήτριας (συμμετρική, ασύμμετρη). Επιπλέον, σε περίπτωση κανονικής λειτουργίας του συστήματος δεδομένα από το απομακρυσμένο σύστημα μεταφέρονται προς το κέντρο ελέγχου με σειριακή μορφή ανά 30 δευτερόλεπτα και αφορούν τις ενεργές τιμές των τάσεων εξόδου της γεννήτριας (φασικές ή πολικές ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας), τις ενεργές τιμές των ρευμάτων φορτίου, τη διαφορά φάσης, τη συχνότητα της τάσης εξόδου, τη τάση διέγερσης καθώς και το ρεύμα διέγερσης. Σε περίπτωση διαταραχής, στέλνονται τα δεδομένα που οδήγησαν στην «ανίχνευση» της συγκεκριμένης διαταραχής καθώς και τα δεδομένα αμέσως μετά τη νέα ισορροπία του συστήματος. Σ' αυτή την περίπτωση, αποστέλλονται επίσης και δεδομένα που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διαταραχή, όπως η μεταβολή της τάσης εξόδου που οδήγησε στη διόρθωση του συστήματος καθώς και ο χρόνος απόκρισης του συστήματος. Τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται, μέσω ασύρματης επικοινωνίας σε ένα τερματικό, που βρίσκεται στο κέντρο ελέγχου, με σκοπό να δημιουργηθεί μία πλήρης βάση δεδομένων για τη λειτουργία του συστήματος σε κανονική κατάσταση λειτουργίας καθώς και για τον τρόπο απόκρισής του σε

προηγούμενες διαταραχές και στη συνέχεια να επεξεργαστούν κατάλληλα και να οδηγηθούμε στην εύρεση νέων, συνεχώς βελτιωμένων τιμών για τις παραμέτρους η και k , για να είναι δυνατή η όσο το δυνατόν ταχύτερη απόκριση του συστήματος σε μελλοντικές μεταβολές του φορτίου.

4.3.5 Πλήρες διάγραμμα ροής της τεχνικής ελέγχου

Το απλοποιημένο συνολικό διάγραμμα ροής της τεχνικής ελέγχου που αναπτύχθηκε με σκοπό να υλοποιηθεί ένα πρακτικό σύστημα ελέγχου της διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας για λειτουργία σε απομακρυσμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο, φαίνεται στο παράρτημα. Το σύνολο των απαιτήσεων που συζητήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ικανοποιούνται πλήρως, όπως, η άμεση και σίγουρη ανίχνευση σφάλματος στην τάση εξόδου της γεννήτριας, ο τρόπος υπολογισμού του επιθυμητού ρεύματος διέγερσης για τη διόρθωση της τάσης εξόδου της γεννήτριας, ο χρόνος καθώς και ο τρόπος απόκρισης του συστήματος, ο τρόπος ελέγχου του κυκλώματος ισχύος, ο τρόπος και ο χρόνος επικοινωνίας με το κέντρο ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

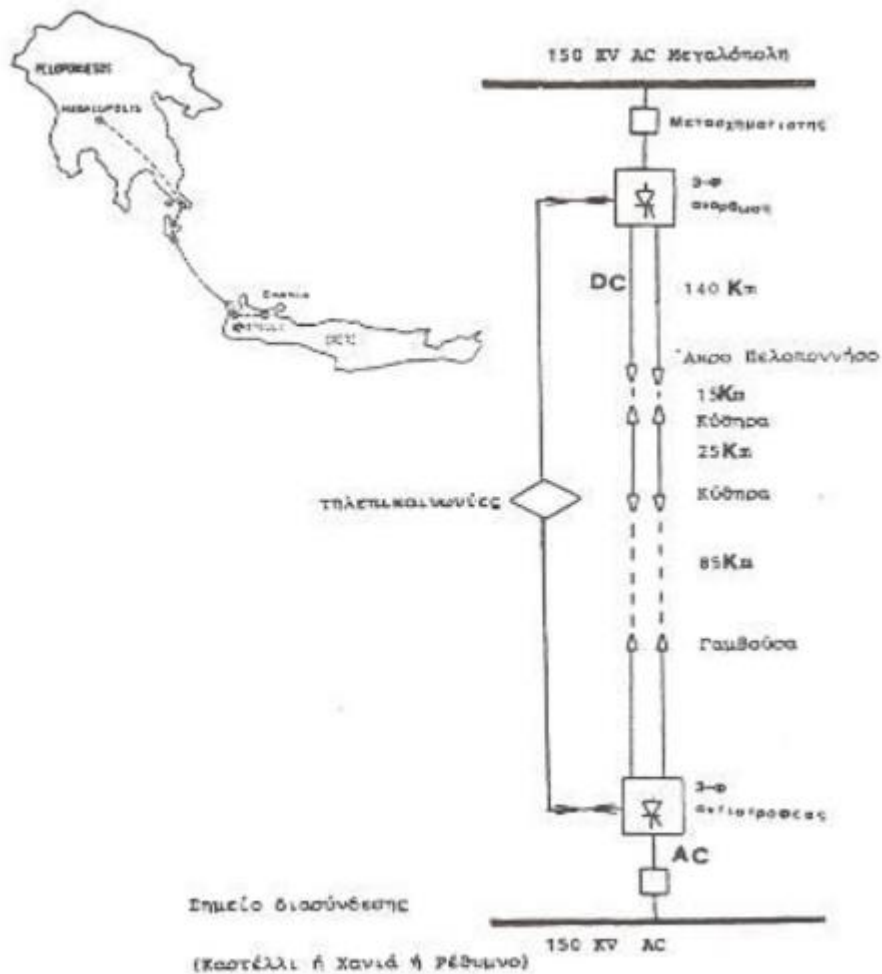
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1 Γενικά

Σήμερα για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ευρέως το σύστημα της υψηλής εναλλασσόμενης τάσης (High Voltage Alternating Current, HVAC). Πάραυτα σε πολλές εφαρμογές χρησιμοποιείται και το σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (High Voltage Direct Current, HVDC). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η μεταφορά ενέργειας με συνεχές ρεύμα (HVDC) είναι μοναδική επιλογή σε σχέση με τη μεταφορά με εναλλασσόμενο (HVAC), όπως διασύνδεση συστημάτων διαφορετικών συχνοτήτων, διαφορετικές φιλοσοφίες ελέγχου ή χρήση καλωδίου μεγάλου μήκους και περιπτώσεις όπου το συνεχές πλεονεκτεί απέναντι στο εναλλασσόμενο, όπως διατήρηση ευστάθειας, γρήγορος ηλεκτρονικός έλεγχος, μη αύξηση της στάθμης βραχυκύκλωσης, απόσβεση ταλαντώσεων κλπ. Για παράδειγμα για την υποβρύχια διασύνδεση του σταθμού παραγωγής της Μεγαλόπολης Πελοποννήσου με τα Χανιά Κρήτης η μοναδική επιλογή για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύστημα HVDC. Στην περίπτωση αυτή η μεταφορά ενέργειας με σύστημα HVAC δεν είναι δυνατή διότι χρειάζονται αντισταθμιστές ισχύος κάθε 30 χιλιόμετρα πράγμα το οποίο είναι αδύνατο να γίνει. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η προς μελέτη διασύνδεση μεταξύ Μεγαλόπολης και Χανίων.

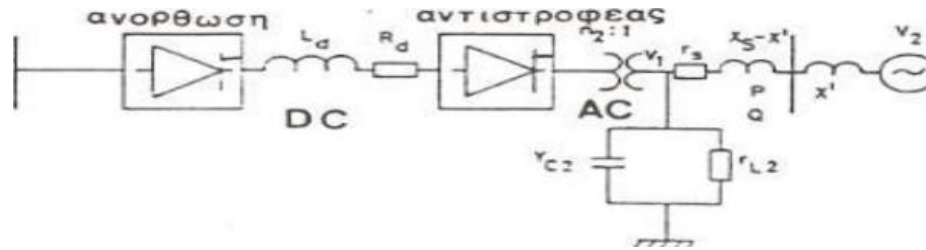
Τα κύρια πλεονεκτήματα, τα οποία αναφέρονται σήμερα, για τη μεταφορά HVDC σε σχέση με την HVAC είναι τα ακόλουθα :

- α) Η μεταφορά HVDC παρουσιάζει λιγότερες απώλειες γραμμής αλλά το κόστος και οι απώλειες στο σταθμό παραγωγής και στο φορτίο είναι μεγαλύτερες.
- β) Για μεγάλες αποστάσεις η μεταφορά HVAC μέσω καλωδίων πολλές φορές δεν είναι δυνατή. Η μεταφορά HVDC δεν έχει τέτοιους περιορισμούς.
- γ) Με κατάλληλο έλεγχο ένα σύστημα ζεύξης DC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ευστάθειας ενός συστήματος AC.
- δ) Η μεταφορά HVDC δεν χρειάζεται αντιστάθμιση ισχύος.



Σχ. 5.1: Η προς μελέτη διασύνδεση μεταξύ Μεγαλόπολης και Χανίων

Βέβαια το μειονέκτημα της μεταφοράς HVDC είναι ότι χρειάζονται δύο μετατροπείς ισχύος, μια ανορθωτική διάταξη στο σταθμό παραγωγής όπου η εναλλασσόμενη τάση των γεννητριών μετατρέπεται σε συνεχές και ένα αντιστροφέα στο φορτίο όπου η DC τάση μεταφοράς μετατρέπεται σε τριφασική εναλλασσόμενη τάση. Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ένα σύστημα μεταφοράς HVDC όπου μπορούμε να δούμε τους δύο προαναφερθέντες μετατροπείς ισχύος.

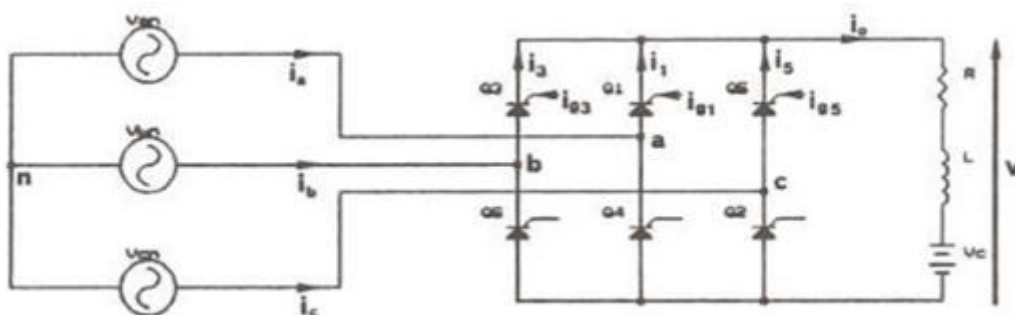


Σχημα 5.2 Σύστημα μεταφοράς HVDC

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι η ανορθωτική διάταξη βρίσκεται πλησίον του σταθμού παραγωγής ο δε αντιστροφέας πλησίον του φορτίου. Στο επόμενο τμήμα θα εξετάσουμε την ανορθωτική διάταξη η οποία χρησιμοποιείται στα συστήματα μεταφοράς HVDC.

5.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ AC ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ DC

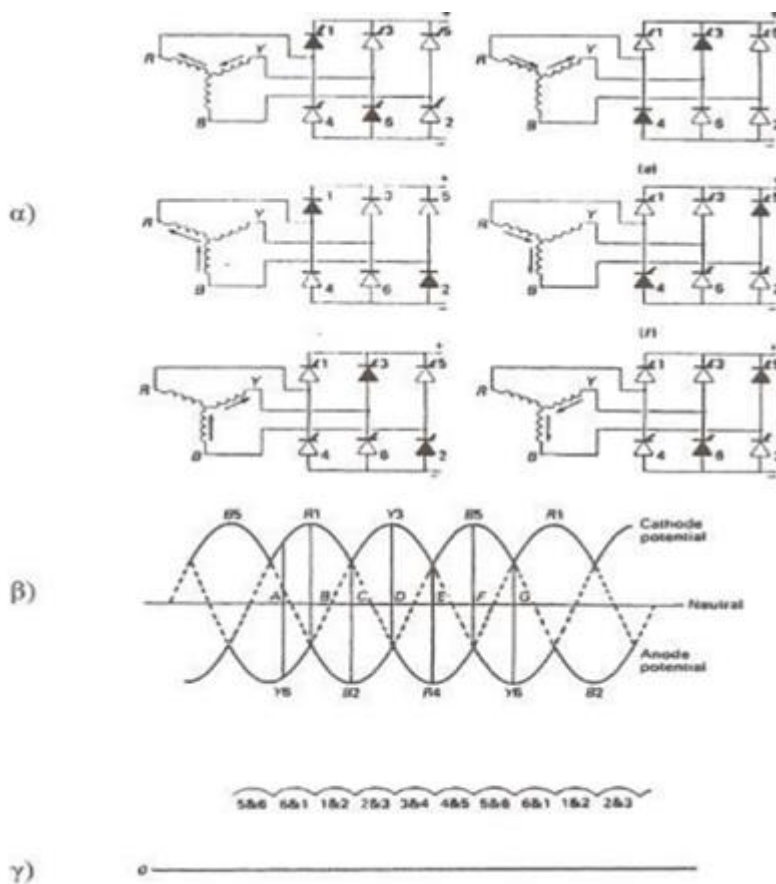
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για να έχουμε μεταφορά HVDC στους σταθμούς παραγωγής χρειάζονται τριφασικές ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις οι οποίες να μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση των γεννητριών σε συνεχή. Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η τριφασική αυτή ανορθωτική διάταξη η οποία χρησιμοποιεί έξι thyristor και ένα μετασχηματιστή στην είσοδο της ο οποίος δεν παρουσιάζεται στο σχήμα αυτό. Ο ένας λόγος που χρειάζεται ο μετασχηματιστής είναι για την προσαρμογή τάσης μεταξύ της εναλλασσόμενης τάσης παραγωγής και της HVDC τάσης μεταφοράς. Ο άλλος λόγος είναι για την ύπαρξη γαλβανικής ή ωμικής απομόνωσης μεταξύ της τροφοδοσίας από το σταθμό παραγωγής και της εξόδου της ανορθωτικής διάταξης.



Σχ. 5.3: Τριφασική ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη

5.2.1 Ιδανική λειτουργία της Ανορθωτικής Διάταξης

Κάτω από ιδανικές συνθήκες η λειτουργία της ανορθωτικής διάταξης του σχήματος 5.3 έχει ως εξής. Πάντοτε άγει ένα από τα θυρίστορ της επάνω ομάδας (1,3,5) και ένα από τα θυρίστορ της κάτω ομάδας (4,6,2). Όταν άγουν τα θυρίστορ 1,6 τότε η τάση V_{ty} του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή εφαρμόζεται στην έξοδο της ανόρθωσης. Όταν άγει το ζεύγος των θυρίστορ 1,2 τότε η τάση V_{rb} εφαρμόζεται στην έξοδο της ανόρθωσης. Τα θυρίστορ 1, 3 και 5 ονομάζονται θετική ομάδα της ανόρθωσης, επειδή άγουν κατά την θετική ημιπερίοδο των τάσεων τροφοδοσίας. Ομοίως τα θυρίστορ 4, 6 και 2 ονομάζονται αρνητική ομάδα επειδή άγουν κατά την αρνητική ημιπερίοδο των τάσεων τροφοδοσίας. Η τριφασική ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη του σχήματος 5.3 ονομάζεται και ανορθωτική διάταξη έξι παλμών διότι η DC τάση εξόδου της περιέχει και μια κυμάτωση η οποία αποτελείται από έξι παλμούς για ένα κύκλο λειτουργίας. Στο σχήμα 5.4α παρουσιάζεται η ακολουθία αγωγής των θυρίστορ της ανορθωτικής διάταξης. Στο σχήμα 5.4β παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων των \pm ακροδεκτών με αναφορά τον ουδέτερο του μετασχηματιστή. Στο σχήμα 5.4γ παρουσιάζεται η κυματομορφή της τάσης εξόδου της ανόρθωσης για γωνία έναυσης των θυρίστορ $\alpha=0^\circ$.



Σχ. 5.4: α) ακολουθία αγωγής των θυρίστορ β) κυματομορφές των τάσεων \pm των ακροδεκτών γ) κυματομορφή της τάσης εξόδου της ανόρθωσης

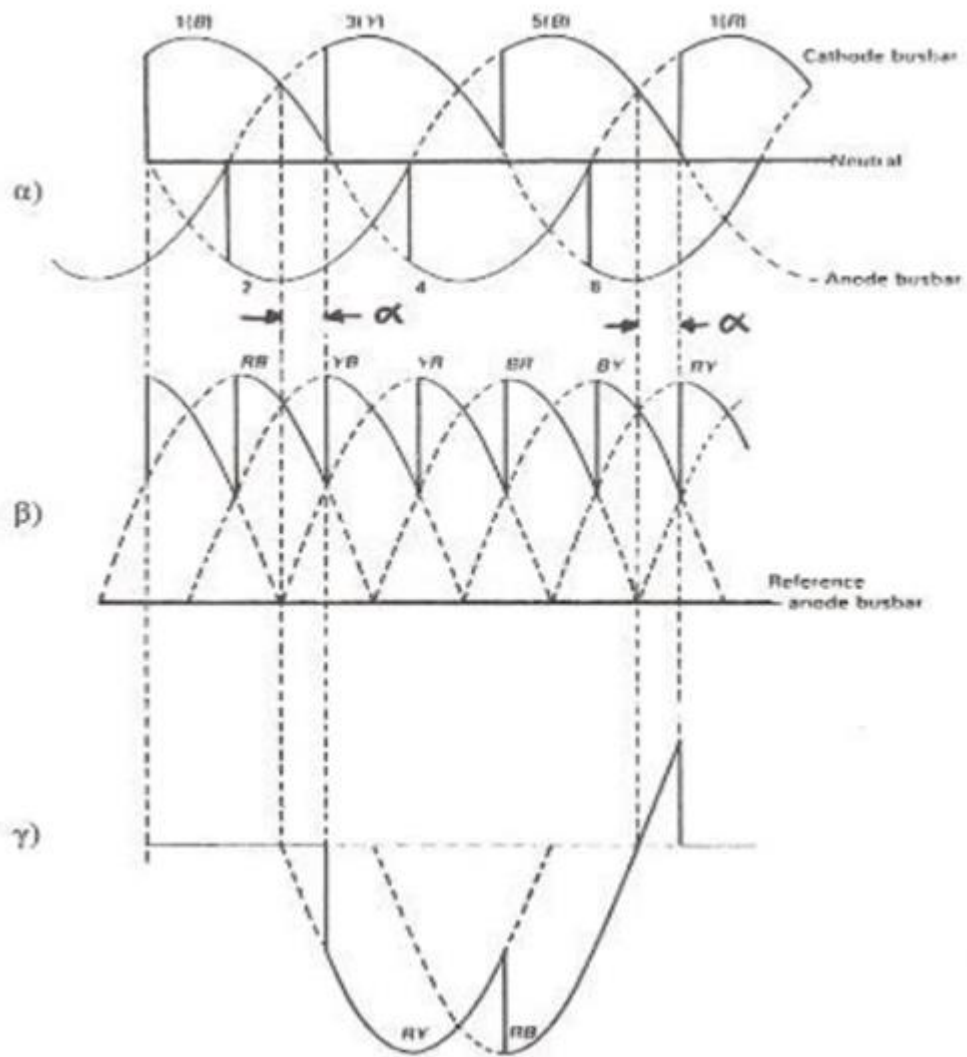
Για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$ έχουμε και την μεγαλύτερη τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης και τα θυρίστορ είναι σα να λειτουργούν ως απλές δίοδοι. Η γωνία έναυσης των θυρίστορ μετριέται με αφετηρία τη διασταύρωση δύο τάσεων.

Αυξομειώνοντας την γωνία έναυσης των θυρίστορ έχουμε αυξομείωση της τάσης εξόδου της ανορθωτικής διάταξης και κατά συνέπεια τον έλεγχο της. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της ανορθωτικής διάταξης για μια γωνία έναυσης α . Στα σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της ανορθωτικής διάταξης για $\alpha=90^\circ$ και $\alpha=180^\circ$ αντίστοιχα.

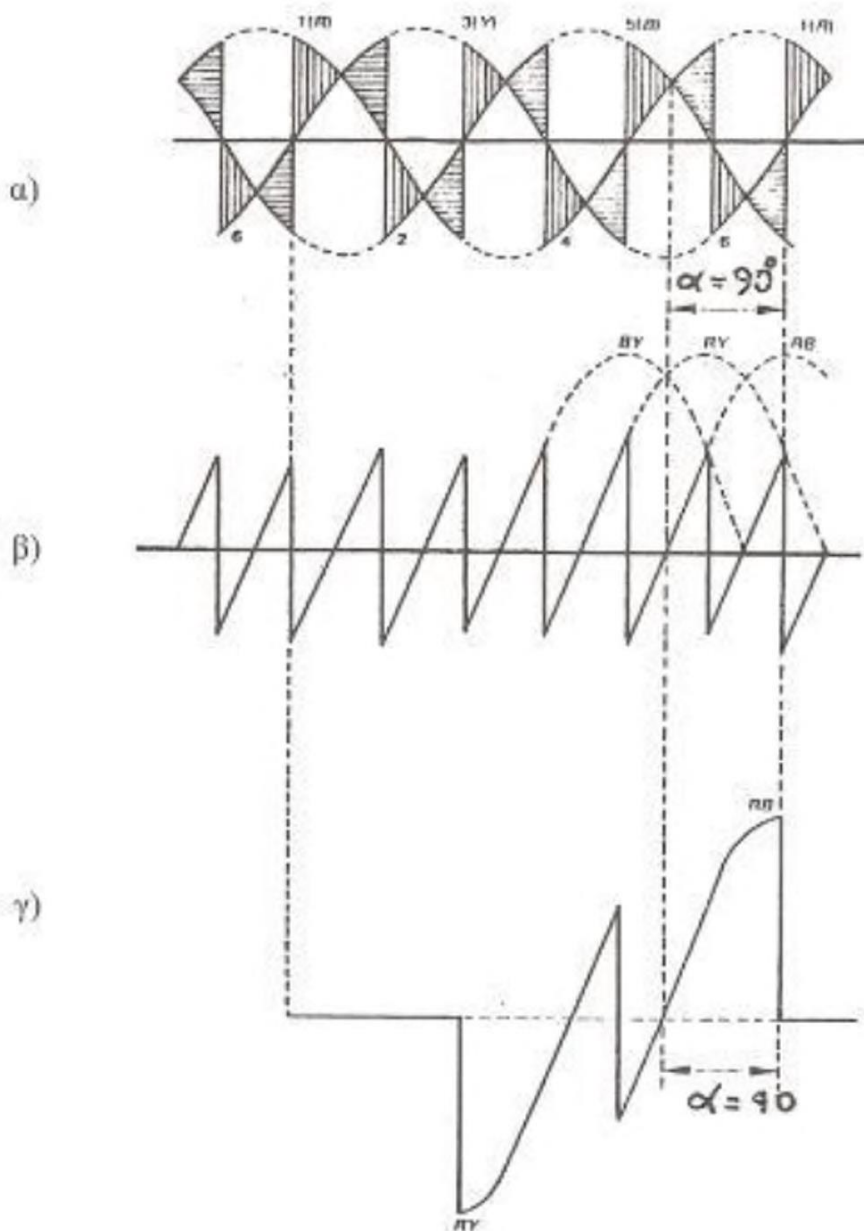
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_d της ανορθωτικής διάταξης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \cos \alpha$$

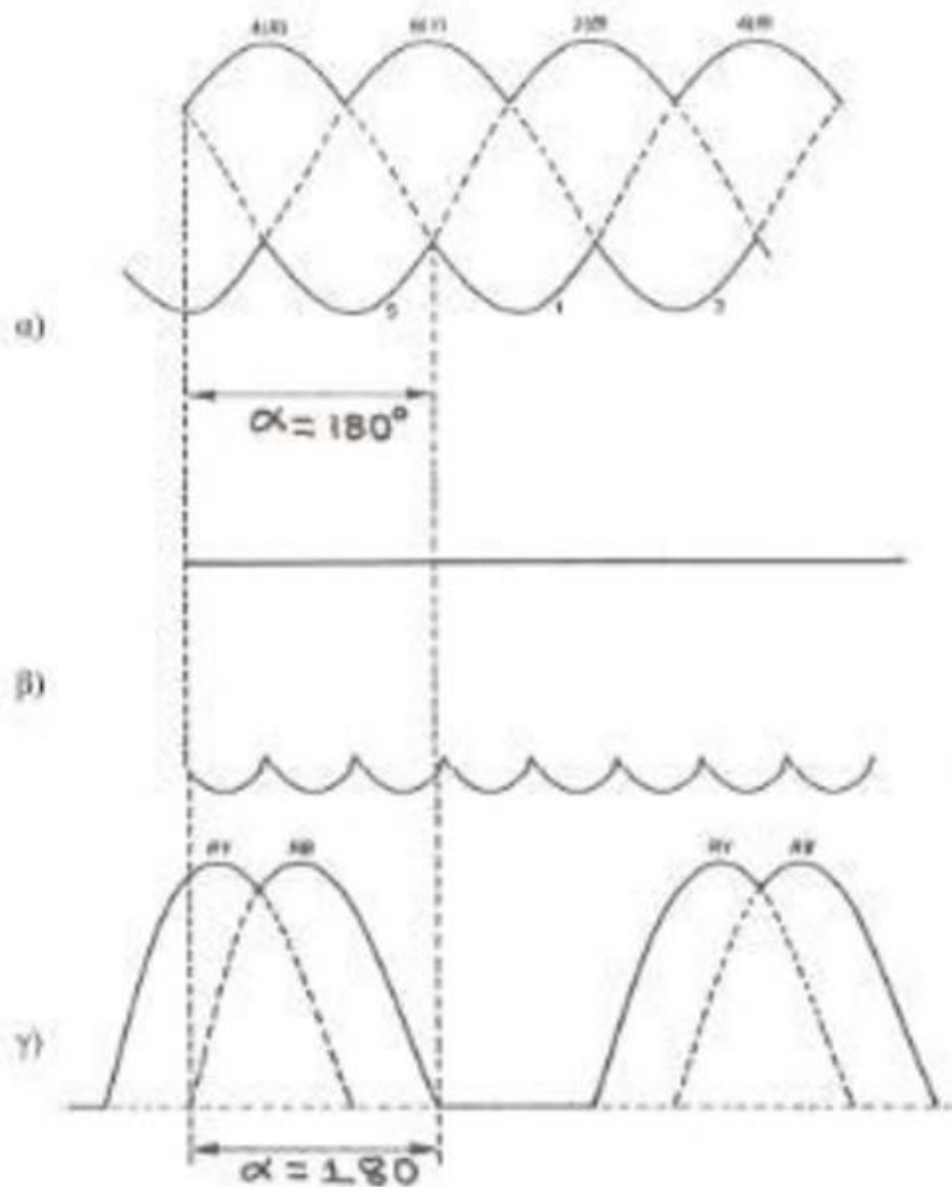
Όπου V_s = ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.



Σχ. 5.5: Κυματομορφές της ανόρθωτικής διάταξης για τυχαία γωνία έναυσης α .
 α) Κυματομορφές των τάσεων των +- ακροδεκτών με αναφορά τον ουδέτερο του μετασχηματιστή.
 β) τάση εξόδου της ανόρθωσης
 γ) κυματομορφή της τάσης στα άκρα του θυρίστορ 1



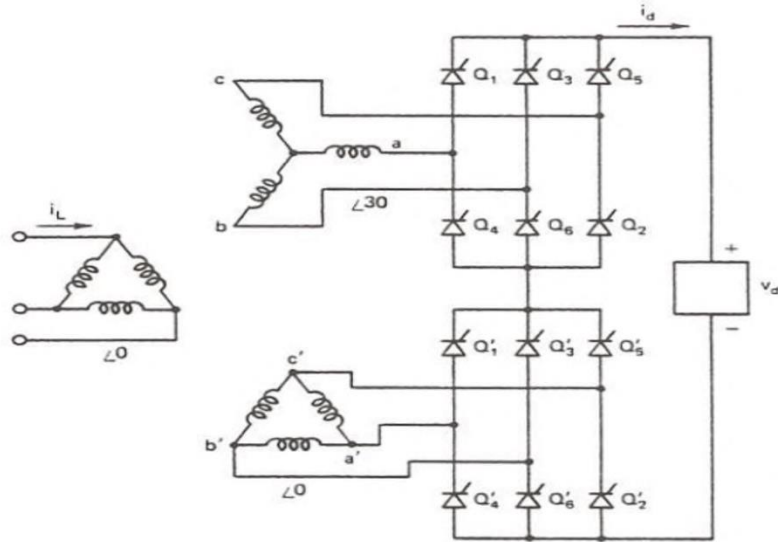
Σχ. 5.6: Κυματομορφές της ανορθωτικής διάταξης για γωνία έναυσης $\alpha=90^\circ$.
 α) Κυματομορφές των τάσεων των +- ακροδεκτών με αναφορά τον ουδέτερο του μετασχηματιστή.
 β) τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης
 γ) κυματομορφή της τάσης στα άκρα του θυρίστορ 1



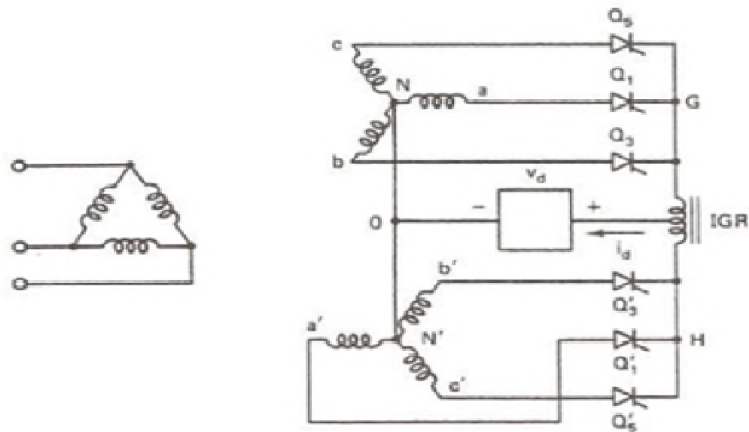
Σχ. 5.7: Κυματομορφές της ανορθωτικής διάταξης για γωνία έναυσης $\alpha=180$.
 α) Κυματομορφές των τάσεων των +- ακροδεκτών με αναφορά τον ουδέτερο του μετασχηματιστή.
 β) τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης
 γ) κυματομορφή της τάσης στα άκρα του θυρίστορ 1

Ο μετατροπέας του σχήματος 5.3 χρησιμοποιείται για ισχύς μέχρι 1MW. Για μεγαλύτερες ισχύς είναι απαραίτητη η σε σειρά ή εν παραλλήλω σύνδεση περισσοτέρων μετατροπέων. Για παράδειγμα για μεγαλύτερη τάση εξόδου θα μπορούσαμε να συνδέσουμε τις εισόδους δύο εξαπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων εν παραλλήλω τις δε εξόδους σε σειρά έτσι ώστε να πετύχουμε μεγαλύτερες τάσεις

στην έξοδο της ανόρθωσης και κατά συνέπεια μεγαλύτερες ισχύεις. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα 5.8. Εάν θέλουμε να αυξήσουμε τη δυνατότητα του ρεύματος εξόδου της ανορθωτικής διάταξης τότε θα μπορούσαμε να συνδέσουμε δύο εξαπαλμικές ανορθώσεις εν παραλλήλω παραλληλίζοντας τις εξόδους των μέσω ενός στραγγαλιστικού πηνίου όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9.



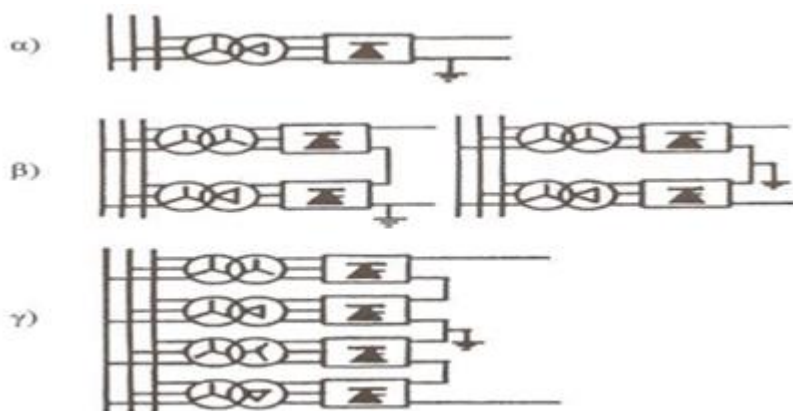
Σχ. 5.8: Συνδεσμολογία σειράς δύο εξαπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων



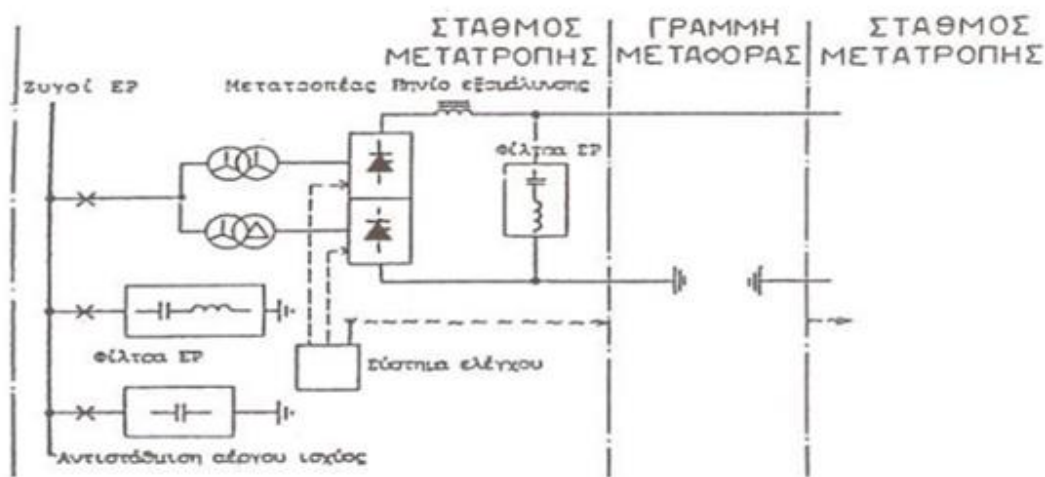
Σχ. 5.9: Παράλληλη συνδεσμολογία δύο εξαπαλμικών ανορθωτικών διατάξεων

5.3 ΤΡΟΠΟΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Για την αύξηση της ικανότητας ενός συγκροτήματος μετατροπής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες της μιας γέφυρες. Στο σχήμα 5.10 παρουσιάζονται οι συνηθέστεροι τρόποι διασύνδεσης γεφυρών. Η χρησιμοποίηση δύο γεφυρών σε σειρά, όπως στο σχήμα 5.10β με χρήση μετασχηματιστών με διαφορετική συνδεσμολογία (αστέρας - αστέρας και αστέρας - τρίγωνο) έχει μεγάλο πλεονέκτημα, γιατί η διάταξη αυτή δημιουργεί, λόγω της στροφής των τάσεων στο δευτερεύον του ενός μετασχηματιστή ως προς τον άλλο κατά 30° , ένα σύστημα ανόρθωσης 12παλμών. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση του συντελεστή παραμόρφωσης λόγω αρμονικών. Για τον πιο πάνω λόγω αλλά και για λόγους αύξησης της αξιοπιστίας και της αντοχής του συστήματος σε περιπτώσεις ανωμαλιών είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου αριθμού γεφυρών σε σειρά. Μια διάταξη τετραπλής γέφυρας φαίνεται στο σχήμα 5.10(γ). Παρόλα αυτά το πλήθος των γεφυρών σε σειρά δεν είναι δυνατόν να αυξηθεί πολύ δεδομένου ότι κάθε γέφυρα απαιτεί ιδιαίτερο βοηθητικό εξοπλισμό (μετασχηματιστή, φίλτρα κ.λπ.) με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος. Έτσι στην πράξη συνήθως περιοριζόμαστε σε διατάξεις διπλής ή το πολύ τετραπλής γέφυρας. Η διπλή γέφυρα ονομάζεται συνήθως 12παλμικός μετατροπέας, αποτελεί τον ένα πόλο ενός Σταθμού Μετατροπής (Σ.Μ.) και συνιστά την τρέχουσα τεχνολογία. Τέσσερις 6παλμικές γέφυρες με στροφή τάσεων 15° η μία από την άλλη δημιουργούν ένα 24παλμικό σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα, ωστόσο, απαιτεί μετασχηματιστές μετάθεσης φάσεων, ενώ δεν αποφεύγονται τα πηνία εξομάλυνσης στις γραμμές ΣΡ, που θα απαιτούντο και για άλλους λόγους. Έτσι τα συστήματα αυτά είναι αντιοικονομικά. Τα άλλα βασικά στοιχεία με τα οποία είναι εξοπλισμένος κάθε μετατροπέας (σχήμα 5.11) είναι οι διακόπτες, οι μετασχηματιστές μετατροπών, τα φίλτρα Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ) και Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ) και τα συστήματα ελέγχου προστασίας. Οι διακόπτες τοποθετούνται στην πλευρά ΕΡ των μετατροπών και χρειάζονται για να εκκαθαρίζουν σφάλματα στους μετασχηματιστές, ή να θέτουν την όλη διασύνδεση εκτός λειτουργίας. Τα αρμονικά φίλτρα ΕΡ, που συνδέονται επίσης στην πλευρά ΕΡ, έχουν σκοπό να περιορίζουν τις αρμονικές και να τροφοδοτούν με άεργο ισχύ τους μετατροπείς, ενώ τα φίλτρα ΣΡ περιορίζουν τις αρμονικές που παράγουν οι μετατροπείς στην πλευρά ΣΡ. Τέλος, τονίζεται ότι μια διασύνδεση με συνεχές ρεύμα έχει στα άκρα της Σταθμούς Μετατροπής που συνδέονται με εναέριες γραμμές ή καλώδια συνεχούς ρεύματος.



Σχ. 5.10: Διατάξεις μετατροπών απλής, διπλής και τετραπλής γέφυρας

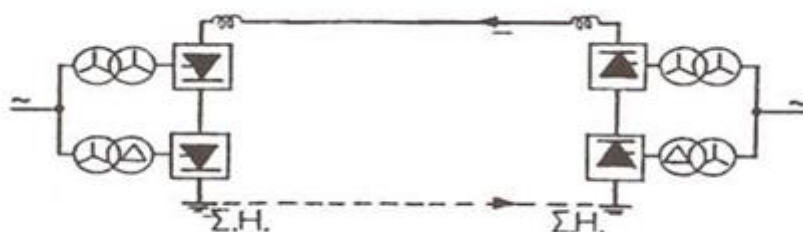


Σχ. 5.11: Κύρια στοιχεία ενός τυπικού σταθμού μετατροπής

5.3.1 Μονοπολική διασύνδεση

Η μονοπολική διασύνδεση έχει ένα αγωγό συνήθως αρνητικής πολικότητας και επιστροφή μέσα από τη γη, τη θάλασσα ή μεταλλικό αγωγό. Η μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή μέσα από τη γη (σχήμα 5.12) αποτελεί το πρώτο στάδιο για την ανάπτυξη μιας διπολικής διασύνδεσης, και συχνά περιορίζει το κόστος, όταν η μεταφορά της ενέργειας με συνεχές ρεύμα γίνεται με καλώδιο, λύση που είναι γενικά ακριβή. Η συνδεσμολογία αυτή απαιτεί ένα ή περισσότερα πηνία εξομάλυνσης στην πλευρά υψηλής τάσης ή χαμηλής τάσης, φίλτρα συνεχούς ρεύματος - αν υπάρχουν εναέριες γραμμές - και γραμμές ηλεκτροδίων με δύο Σταθμούς Ηλεκτροδίων (Σ.Η.) στα άκρα. Σημειώνεται ότι οι Σταθμοί Ηλεκτροδίων βρίσκονται σε συνεχή λειτουργία και κατά συνέπεια πρέπει να εξετάζονται παράγοντες όπως διαβρώσεις, ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις, περιβαλλοντολογικά θέματα κ.λπ.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα έργα Gotland II και Gotland III (Sweden), Kontiskan I (Denmark-Sweden), Fenoskan (Finland-Sweden) κ.λπ.



Σχ. 5.12: Μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή μέσα από τη γή

Η μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή μέσα από αγωγό (σχήμα 5.13) συνήθως κατασκευάζεται σαν πρώτο στάδιο μιας διπολικής διασύνδεσης, όταν το συνεχές ρεύμα επιστροφής μέσα από τη γη δεν είναι επιθυμητό για το ενδιάμεσο αυτό διάστημα, ή όταν το μήκος μεταφοράς είναι τέτοιο, ώστε οι γραμμές και οι σταθμοί ηλεκτροδίων να συνιστούν αντισυμβατική λύση ή όταν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι πολύ μεγάλη ώστε η κατασκευή ηλεκτροδίων να είναι ανέφικτη. Στον τύπο αυτό της διασύνδεσης γίνεται χρήση δύο αγωγών ΣΡ, ένας υψηλής τάσης και ένας χαμηλής τάσης. Ο αγωγός χαμηλής τάσης συνδέεται στον μεν ένα Σ.Μ. στο δίκτυο γείωσης ή σε ηλεκτρόδιο και στον δε άλλο Σ.Μ. στο δίκτυο γείωσης μέσω αλεξικέραυνου ή πυκνωτή. Απαιτούνται επίσης ένα ή περισσότερα πηνία εξομάλυνσης στην πλευρά υψηλής ή χαμηλής τάσης και φίλτρα ΣΡ όταν υπάρχουν εναέριες γραμμές ΣΡ. Αν πρόκειται για το πρώτο στάδιο διπολικής διασύνδεσης, συνήθως οι απαιτήσεις μόνωσης του αγωγού επιστροφής καθορίζονται για την υψηλή συνεχή τάση. Στην κατηγορία αυτή θα μπορούσε να ενταχθεί το έργο Kingsnorth (England) όπου μεταξύ Beddington και Willesden υπάρχει μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή μέσα από αγωγό ισχύος 320 MW. Επίσης πολλές διπολικές διασυνδέσεις έχουν τη δυνατότητα μονοπολικής λειτουργίας είτε με επιστροφή μέσα από γη, είτε με επιστροφή μέσα από αγωγό, όπως π.χ. τα έργα Pacific Intertie (USA), Vancouver Island (Canada) κ.λπ.

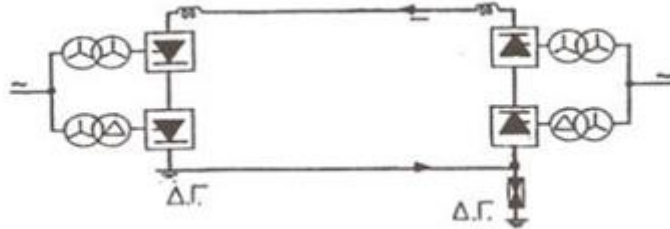
Διπολική διασύνδεση

Η διπολική διασύνδεση έχει δύο αγωγούς, ένα θετικό και ένα αρνητικό. Κάθε τερματικός Σ.Μ. αποτελείται από 12παλμικούς μετατροπείς ίδιας ονομαστικής τάσης τοποθετημένους σε σειρά. Τα ουδέτερα σημεία μεταξύ των δύο μετατροπέων είναι γειωμένα στο ένα ή και στα δύο άκρα. Στη δεύτερη περίπτωση οι δύο πόλοι μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργούν και οι δύο με το ίδιο ονομαστικό ρεύμα χωρίς ρεύμα γης. Σε περίπτωση βλάβης του ενός αγωγού, ο άλλος μπορεί να μεταφέρει το μισό ονομαστικό φορτίο μέσω της επιστροφής από τη γη. Η ονομαστική τάση μιας διπολικής διασύνδεσης γράφεται π.χ. ± 100 KV και αναφέρεται «συν και πλην 100 KV». Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα έργα Skagerrak, Cross Channel 2, Nelson River Bipole 2 κ.λπ.

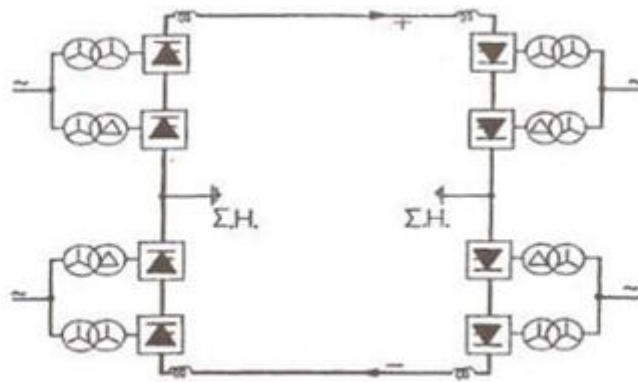
Παρακάτω περιγράφονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας των διπολικών διασυνδέσεων:

Η έξοδος του ενός πόλου λόγω βλάβης ή συντήρησης δεν εμποδίζει τη λειτουργία του άλλου πόλου με επιστροφή μέσα από τη γη (σχήμα 5.14). Όταν η επιστροφή μέσα από τη γη για μεγάλο χρονικό διάστημα δεν είναι επιθυμητή και ο αγωγός του πόλου που έχει βγει εκτός λειτουργίας έχει κάποια ικανή στάθμη μόνωσης, τότε η διπολική διασύνδεση μπορεί να λειτουργήσει μονοπολικά με επιστροφή μέσα από τον αγωγό αυτόν (σχήμα 5.15). Για τον λόγο αυτό ο αγωγός συνδέεται παράλληλα με την επιστροφή μέσα από τη γη και μετά η τελευταία διακόπτεται. Για να μπορεί να γίνει η ενέργεια αυτή χωρίς διακοπή λειτουργίας, απαιτείται στο ένα άκρο της διασύνδεσης ένας διακόπτης μεταγωγής επιστροφής μέσα από αγωγό (Metallic Return Transfer Breaker, MRTB). Τέτοιος διακόπτης δεν απαιτείται όταν είναι επιτρεπτή η μικρή διακοπή της ροής ισχύος. Γενικά η στάθμη μόνωσης στο σημείο του διακόπτη είναι λίγο μεγαλύτερη από το απέναντι σημείο της διασύνδεσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ικανότητα του διακόπτη αυτού είναι υπολογίσιμη λόγω της αποθήκευσης ενέργειας

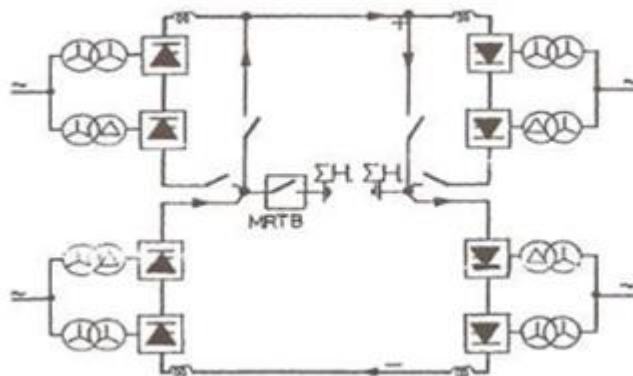
στο βρόχο επιστροφής μέσα από τη γη. Για παράδειγμα οι απαιτήσεις του διακόπτη MRTB του έργου Pacific Intertie είναι της τάξης 8.5 MJ.



Σχ. 5.13: Μονοπολική διασύνδεση με επιστροφή μέσα από αγωγό



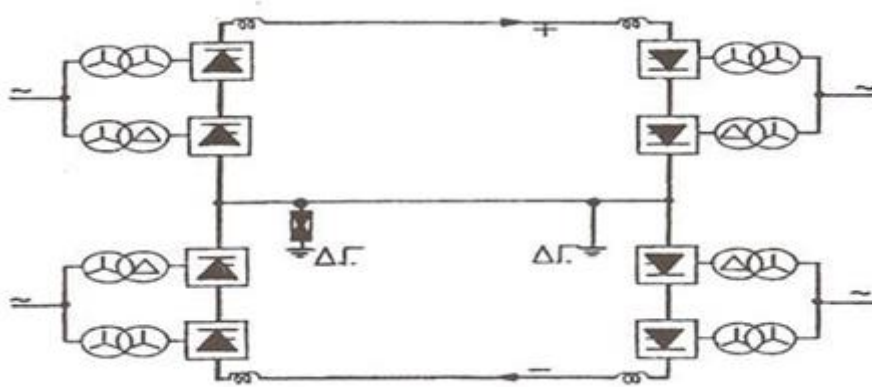
Σχ. 5.14: Διπολική διασύνδεση



Σχ. 5.15: Μονοπολική λειτουργία, διπολικής διασύνδεσης με επιστροφή μέσα από αγωγό

Κατά τη διάρκεια συντήρησης του ενός ή και των δύο Σ.Η., είναι δυνατή η διπολική λειτουργία συνδέοντας το ουδέτερο σημείο του 12παλμικού μετατροπέα στο δίκτυο γείωσης του Σ.Μ. Σημειώνεται ότι το ρεύμα ασυμμετρίας μεταξύ των δύο πόλων εισέρχεται στο δίκτυο γείωσης του Σ.Μ. και γι' αυτό πρέπει να παραμένει σε χαμηλή τιμή. Έξοδος της μιας γραμμής ή του ενός πόλου προϋποθέτει αυτόματο μπλοκάρισμα και των δύο πόλων.

Αν μια βλάβη σε κάποιο σύστημα εμποδίζει τον ένα πόλο να λειτουργήσει με ονομαστικό φορτίο, τότε οι δύο πόλοι μπορούν να λειτουργήσουν με διαφορετικά ρεύματα. Η διαφορά των ρευμάτων διοχετεύεται στους Σ.Η.. Σε περίπτωση μερικής βλάβης της μόνωσης των γραμμών ΣΡ, οι Σ.Μ. μπορούν να λειτουργήσουν μόνιμα με μικρότερη ονομαστική συνεχή τάση. Αν μια γραμμή ΣΡ βγει εκτός λειτουργίας, μπορούν να προβλεφθούν αποζεύκτες, έτσι ώστε με κατάλληλους χειρισμούς οι δύο πόλοι μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα με επιστροφή μέσα από τη γη. Η λειτουργία αυτή προϋποθέτει κατάλληλη διαβάθμιση μόνωσης των άκρων των πόλων και ικανότητα της εναπομένουσας γραμμής ΣΡ και της γραμμής ηλεκτροδίου να φέρουν το διπλάσιο ονομαστικό ρεύμα. Αν η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι πολύ μεγάλη έτσι ώστε η κατασκευή των Σ.Η. να είναι ασύμφορη ή η απόσταση μεταξύ των δύο Σ.Μ. είναι πολύ μικρή, τότε η διπολική διασύνδεση μπορεί να κατασκευασθεί με ένα τρίτο αγωγό γης (σχήμα 5.16), που φορτίζεται με τη διαφορά των ρευμάτων των δύο πόλων. Ο τρίτος αυτός αγωγός έχει χαμηλότερη στάθμη μόνωσης και χρησιμοποιείται σαν αγωγός προστασίας στις εναέριες γραμμές ΣΡ. Στον ένα Σ.Μ. τα σημεία χαμηλής τάσης των δύο πόλων συνδέονται απευθείας στο δίκτυο γείωσης του σταθμού, ενώ στον άλλο Σ.Μ. συνδέονται μέσω αλεξικέραυνου. Αν ο ένας πόλος βγει εκτός λειτουργίας, είναι δυνατή η μονοπολική λειτουργία με επιστροφή μέσα από τον τρίτο αυτό αγωγό.



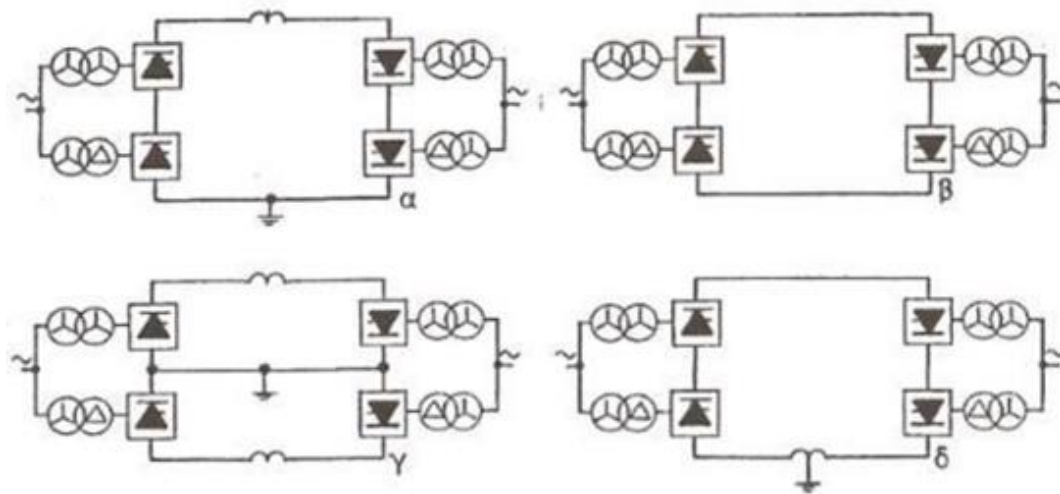
Σχ. 5.16: Διπολική διασύνδεση με τρίτο αγωγό

5.3.2 Ομοπολική διασύνδεση

Η ομοπολική διασύνδεση έχει δύο ή περισσότερους αγωγούς ίδιας πολικότητας, συνήθως αρνητικής, και λειτουργεί πάντα με επιστροφή γης. Σε περίπτωση βλάβης του ενός αγωγού, ο αντίστοιχος μετατροπέας μπορεί να συνδεθεί στον άλλο αγωγό και έτσι μπορεί να μεταφερθεί περισσότερη από τη μισή ισχύ με αυξημένες όμως απώλειες γραμμής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στις διπολικές διασυνδέσεις η περίπτωση αυτή είναι πολύπλοκη και συνήθως δεν εφαρμόζεται για λόγους διαβάθμισης της μόνωσης. Έτσι η ομοπολική διασύνδεση προτιμάται από τη διπολική σε περιπτώσεις όπου το συνεχές ρεύμα επιστροφής γης δεν δημιουργεί προβλήματα. Άλλα πλεονεκτήματα της είναι οι μειωμένες απώλειες ισχύος λόγω του φαινομένου Corona και οι λιγότερες ραδιοτηλεφωνικές παρεμβολές των εναέριων γραμμών λόγω αρνητικής πολικότητας.

5.3.3. Σταθμοί μετατροπής EP /ΣΡ /EP

Οι σταθμοί αυτοί είναι ειδικές περιπτώσεις των διπολικών διασυνδέσεων, όταν οι αγωγοί συνεχούς ρεύματος έχουν μηδενικό μήκος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα έργα Sakuma (Japan), Eel River (Canada), David Hamil (USA), Shin- Shinano (Japan), Hokkaido-Honshu (Japan), Acaray (Paraguay), USSR-Finland, Duernrohr (Austria), Eddy Country (USA), Chateaguay (Canada), Highgate (USA), Oklaunion (USA), Blackwater (USA), Miles City (USA), Madawaska (Canada), Sidney (USA). Τα θυρίστορ και για τους δύο μετατροπείς τοποθετούνται συνήθως σε ένα κοινό κτίριο θυρίστορ. Ο υπόλοιπος εξοπλισμός όπως τα συστήματα βοηθητικής ισχύος, ελέγχου, ψύξης κ.λπ. μπορεί και αυτός να διευθετηθεί σε διάταξη κοινή. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτούνται φίλτρα συνεχούς ρεύματος. Για οικονομικούς λόγους προτιμούνται μονάδες 12-παλμικών μετατροπέων. Αύξηση της αξιοπιστίας της ασύγχρονης αυτής διασύνδεσης επιτυγχάνεται με παράλληλη σύνδεση δύο ή περισσότερων Σ.Μ. EP/ΣΡ/EP, όπως το έργο USSR-Finland, που αποτελείται από τρεις ίδιες μονάδες ισχύος 355 MW, ± 8 KV DC και 2100 A και Eel River με δύο ίδιες μονάδες ισχύος 160 MW + ή - 80 KV DC και 2000 A. Οι τιμές της συνεχούς τάσης και του συνεχούς ρεύματος για δεδομένη ισχύ βελτιστοποιούνται σύμφωνα με την τρέχουσα τεχνολογία, έτσι ώστε το συνολικό κόστος να είναι ελάχιστο. Γενικά η τιμή της συνεχούς τάσης είναι χαμηλότερη και του συνεχούς ρεύματος υψηλότερη, απ' ότι στις διασυνδέσεις που έχουν εναέριες γραμμές και καλώδια συνεχούς ρεύματος. Στο σχήμα 5.17 παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις Σ.Μ. EP/ΣΡ/EP, που διαφοροποιούνται κύρια από τη θέση του πηνίου εξομάλυνσης.



Σχ. 5.17: Παραδείγματα σταθμών μετατροπής EP/ΣΡ/EP

5.3.4. Διασυνδέσεις με πολλούς σταθμούς μετατροπής

Οι διασυνδέσεις με πολλούς σταθμούς μετατροπής (Multi Terminal Direct Current, MTDC) έχουν αρχίσει ήδη να έχουν πρακτικό ενδιαφέρον. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν η διασύνδεση της νήσου Κορσικής στην Γραμμή με συνεχές ρεύμα Ιταλίας-Σαρδηνίας και το έργο Quebec-New England φάση III, με πέντε τερματικούς σταθμούς μετατροπής, συνεχή τάση 450 KV και συνεχές ρεύμα 2200 A (σχήμα 5.18). Η φάση I περιλαμβάνει τους Σ.Μ. Des Cantons και Comerford, η φάση II τους Σ.Μ. Radisson και Sandy Pond (1990) και η φάση III το Σ.Μ. Nicolet (1992). Το συνολικό σχήμα θα μπορεί να λειτουργήσει σε μια υβριδική διάταξη π.χ. μονοπολική λειτουργία με επιστροφή μέσα από αγωγό για το τμήμα Radisson-Nicolet και διπολική λειτουργία μεταξύ Nicolet και Sandy Pond.

Οι διασυνδέσεις με πολλούς Σ.Μ. έχουν τρεις (Σχήμα 5.18) πιθανές διαφορετικές εφαρμογές:

- Μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από περισσότερους του ενός Σταθμούς Παραγωγής σε περισσότερα του ενός ηλεκτρικά συστήματα ΕΡ. Πρόκειται για ροή ενέργειας μόνο κατά μια φορά.
- Διασυνδέσεις ανεξάρτητων ηλεκτρικών συστημάτων ΕΡ για ανταλλαγές ενέργειας. Πρόκειται για ροή ενέργειας και κατά τις δύο διευθύνσεις.
- Ενίσχυση ηλεκτρικού συστήματος ΕΡ με μεταφορά ενέργειας από ένα Σταθμό Παραγωγής σε διαφορετικούς ζυγούς αυτού.

Πρόκειται, όπως και στην πρώτη περίπτωση, για ροή ενέργειας μόνο κατά μια φορά.

Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζονται οι πιθανές διατάξεις διασυνδέσεων με πολλούς Σ.Μ. Αυτές αναλύονται παρακάτω στις βασικές τους κατηγορίες:

α) Ακτινωτές διασυνδέσεις με πολλούς Σ.Μ. (radial systems),

όπου κάθε γραμμή ΣΡ συνδέεται σε ένα Σ.Μ. και οι διασυνδέσεις όλων των γραμμών ΣΡ έχουν τέτοια διάταξη ώστε για κάποια απόσταση η ροή ενέργειας γίνεται μέσα από μια κοινή γραμμή ΣΡ (σε ακραία περίπτωση η απόσταση αυτή μηδενίζεται). Όλοι οι Σ.Μ. είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, δηλαδή η συνεχής τάση είναι ίση με όλα τα σημεία του συστήματος (αν θεωρηθεί η πτώση τάσης κατά μήκος των γραμμών ΣΡ αμελητέα). Κανένα μέρος του συστήματος ΣΡ δεν μπορεί να αποσυνδεθεί χωρίς να επηρεασθεί η ροή ενέργειας μεταξύ των συστημάτων ΕΡ.

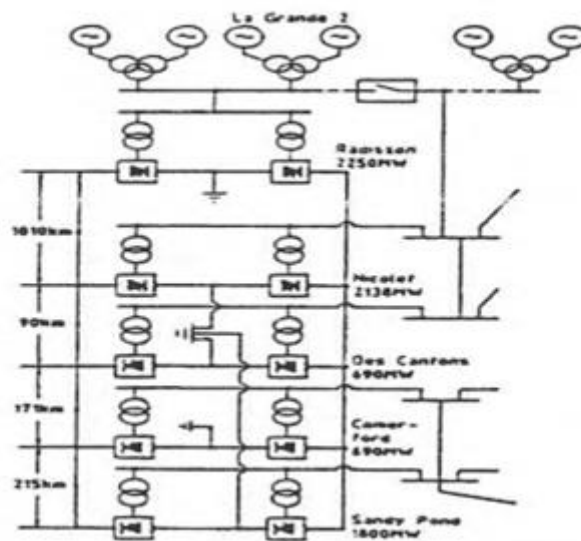
β) Βροχοειδείς διασυνδέσεις με πολλούς Σ.Μ. (Meshed or ring systems),

όπου περισσότερες από μια γραμμές ΣΡ συνδέονται σε ένα Σ.Μ. Σαν απλούστερος τύπος της περίπτωσης αυτής αναφέρεται η διασύνδεση από σημείο σε σημείο με δύο παράλληλα συνδεδεμένες γραμμές ΣΡ. Στις βροχοειδείς διασυνδέσεις όλοι οι Σ.Μ. συνδέονται παράλληλα και κατά συνέπεια η ονομαστική συνεχής τάση είναι ίση σε όλα τα σημεία του συστήματος. Οποιοδήποτε μέρος του συστήματος ΣΡ μπορεί να αποσυνδεθεί χωρίς να επηρεασθεί η ροή ενέργειας μεταξύ των συστημάτων ΕΡ, αν

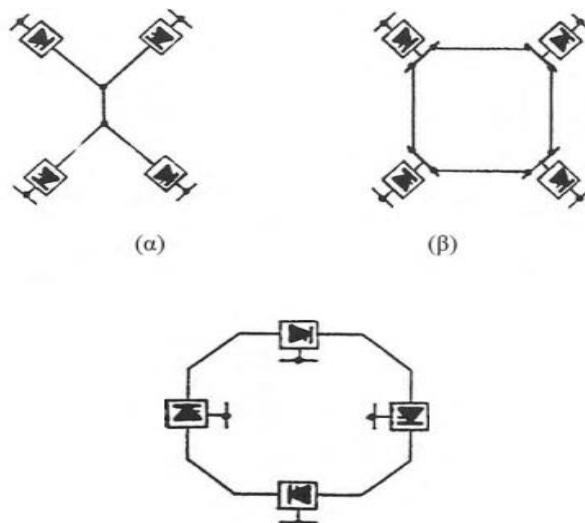
υποθέσουμε ότι οι υπόλοιπες γραμμές ΣΡ μπορούν να παραλάβουν το επιπλέον φορτίο.

γ) Σειριακές διατάξεις με πολλούς Σ.Μ. (series connections),

όπου όλοι οι Σ.Μ. συνδέονται σε σειρά μέσω μιας κοινής βροχοειδούς γραμμής ΣΡ. Σε κάθε σημείο της γραμμής ΣΡ όπως και σε κάθε Σ.Μ., η τιμή του συνεχούς ρεύματος είναι η ίδια, ενώ η τιμή της συνεχούς τάσης ως προς γη είναι διαφορετική. Κανένα μέρος της γραμμής ΣΡ δεν μπορεί να αποσυνδεθεί χωρίς να διακοπεί η ροή ενέργειας μεταξύ των συστημάτων ΕΡ. Για τις περιπτώσεις α) και β) 12-παλμικοί μετατροπείς συνδέονται παράλληλα με ίδια ονομαστική τάση, ενώ για την περίπτωση γ) 12-παλμικοί μετατροπείς συνδέονται σε σειρά με ίδιο ονομαστικό συνεχές ρεύμα.



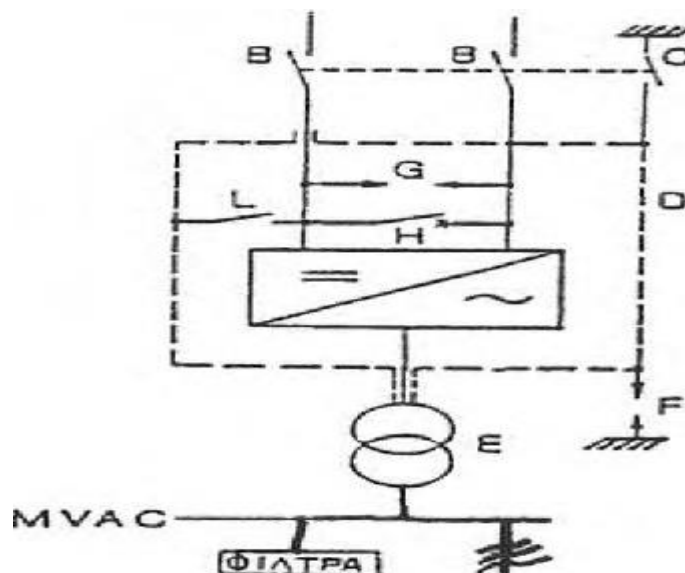
Σχ. 5.18: Το έργο Quebec-New England

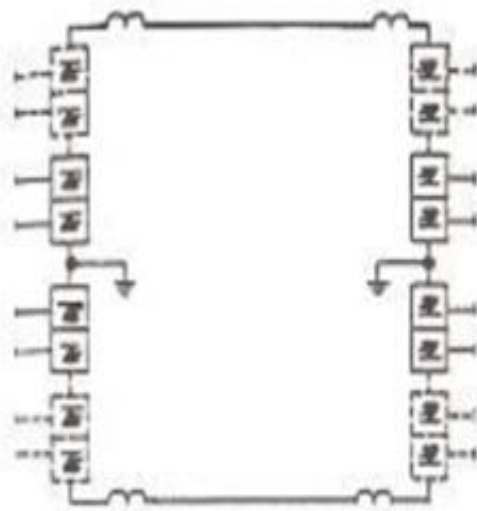


Σχ.5.19 Πιθανές διατάξεις διασυνδέσεων με πολλούς Σ.Μ.. α) Ακτινωτές, β) Βροχοειδείς, γ) Σειριακές.

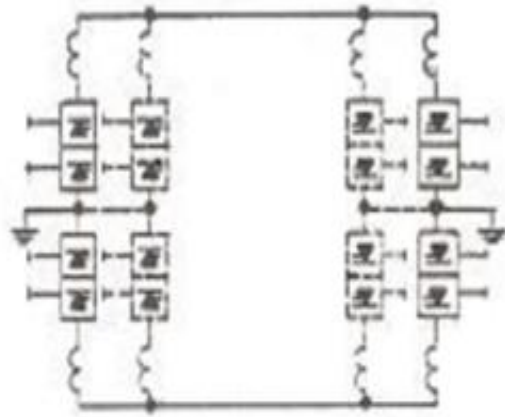
5.3.5 Μικρές ενδιάμεσες λήψεις

Στις περιπτώσεις όπου μια γραμμή ΣΡ διέρχεται από περιοχές σχετικά απομονωμένες ή με μικρές δυνατότητες διασύνδεσης του ηλεκτρικού δικτύου τους με μεγαλύτερα δίκτυα, η ενδιάμεση λήψη ισχύος θα μπορούσε να έχει μεγάλα οικονομικά πλεονεκτήματα. Όταν πρόκειται για σχετικά μεγάλα φορτία οι διασυνδέσεις με πολλούς Σ.Μ., που προαναφέρθηκαν, αποτελούν τη λύση στο παραπάνω πρόβλημα, όταν όμως το φορτίο είναι μικρό, δηλαδή της τάξης του 1% της μεταφερόμενης ισχύος, τότε μικρές ενδιάμεσες λήψεις (Small Taps) με ειδικά σχεδιασμένες συμπαγείς διατάξεις υπερτερούν. Πρόκειται κύρια για μελλοντικές διατάξεις που θα τροφοδοτούν απομονωμένα φορτία είτε εντελώς παθητικά, είτε με μια μικρή τοπική παραγωγή. Η λειτουργία των σχημάτων αυτών πρέπει να έχει μηδαμινές επιπτώσεις στην αξιοπιστία της κύριας διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος, το δε σύστημα ελέγχου πρέπει να είναι αυστηρά τοπικό και να επηρεάζει όσο το δυνατόν λιγότερο το κύριο σύστημα ελέγχου. Οι σειριακές διατάξεις των μικρών ενδιάμεσων λήψεων φαίνεται να έχουν ενδιαφέρον από τεχνική και οικονομική άποψη με αρκετά πλεονεκτήματα και κύριο μειονέκτημα το γεγονός ότι μείωση του συνεχούς ρεύματος κάτω από μια ελάχιστη τιμή δεν επιτρέπει τη λήψη ονομαστικού φορτίου. Μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν μετατροπείς φυσικής μετάβασης ή και εξαναγκασμένης μετάβασης, σειριακής λήψης. Η έναρξη της λήψης ισχύος γίνεται με το κλείσιμο των αποζευκτών Β και το άνοιγμα του αποζεύκτη Α. Παράκαμψη της διάταξης, λόγω σφάλματος, γίνεται με το κλείσιμο του διακόπτη Η. Η προστασία από υπερτάσεις επιτυγχάνεται με τα αλεξικέραυνα F και G και η γείωση με τους γειωτές C και L. Η μεταλλική κατασκευή D συναρμολογείται και δοκιμάζεται εξ ολοκλήρου στο εργοστάσιο και περιλαμβάνει τον αντιστροφέα με τα βοηθητικά συστήματα. Τέλος, στο σχήμα 5.21 παρουσιάζονται διάφορες δυνατότητες επέκτασης διασύνδεσης με συνεχές ρεύμα.

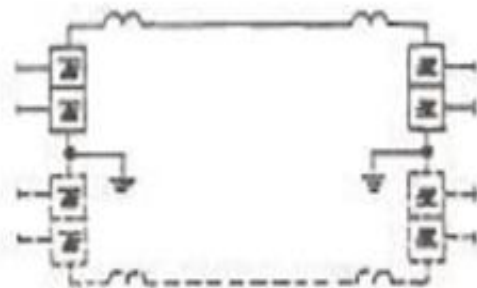




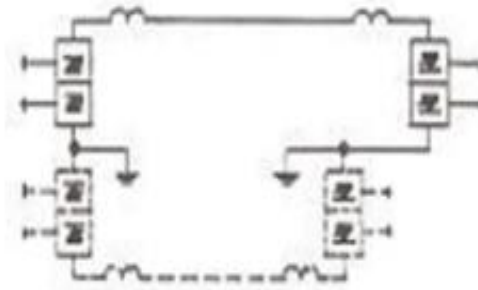
α) επέκταση σε σειρά



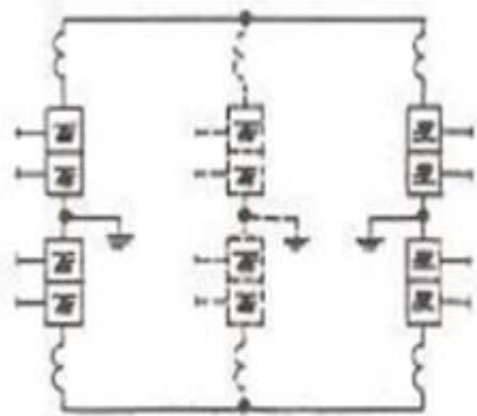
β) παράλληλη επέκταση



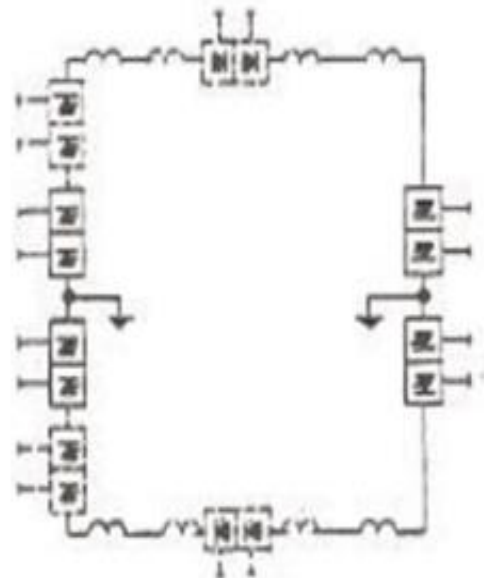
γ) μονοπολική σε δικαδική επέκταση



δ) μονοπολική σε δικαδική επέκταση με πόλους του ενός άκρου σε διαφορετικό σημείο



ε) επέκταση με πολλούς Ι.Μ. παράλληλα

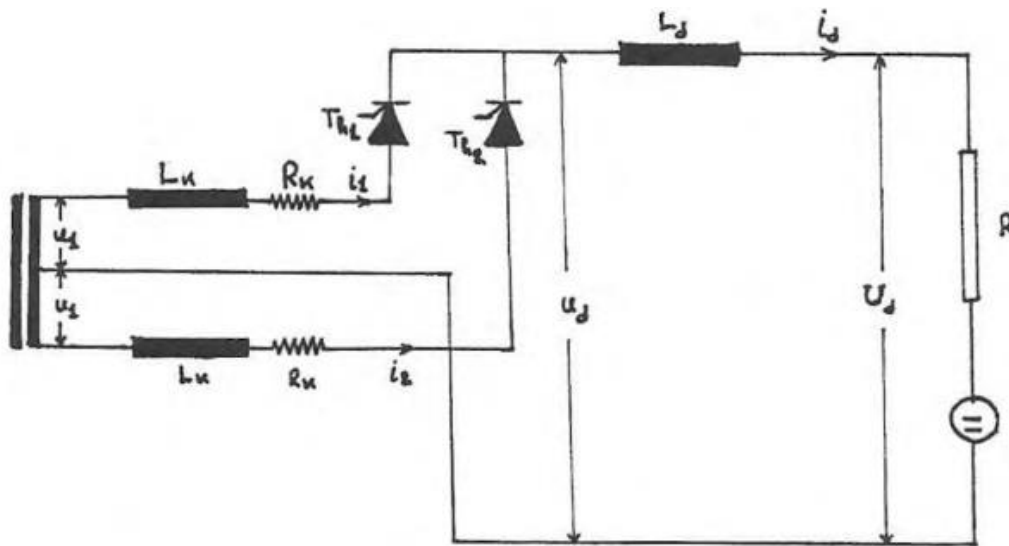


στ) επέκταση με πολλούς Ι.Μ. σε σειρά

Σχ. 5.21: Δυνατές επεκτάσεις διασυνδέσεων με συνεχές ρεύμα

5.4 ΜΗ ΙΔΑΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ (ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ)

Στην προηγούμενη θεώρηση του τμήματος 5.21 η μεταβολή του ρεύματος I κατά τη μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστορ στο άλλο εκφράστηκε σαν απόλυτα απότομη. Αυτό μπορεί να συμβαίνει όταν η εσωτερική φαινόμενη αντίσταση της πηγής είναι μηδέν. Όμως στην πραγματικότητα υπάρχουν ωμικές και επαγωγικές αντιστάσεις της πηγής οι οποίες διαφοροποιούν τις μέχρι τώρα παρατηρήσεις μας σχετικά με τη μετάβαση του ρεύματος. Πρέπει λοιπόν να αναλύσουμε αυτό το φαινόμενο που καθορίζει την πραγματική λειτουργία του μετατροπέα. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θεωρούμε την ωμική αντίσταση της πηγής R_K αμελητέα και κύρια αιτία του φαινομένου της μετάβασης, παίρνουμε την επαγωγική αντίσταση της πηγής L_K . Λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της μετάβασης τα κυκλώματα των μετατροπέων τροποποιούνται όπως φαίνεται στο σχήμα 5.22.



Σχήμα 5.22. Κύκλωμα μονοφασικού μετατροπέα λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της μετάβασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) The IEEE Power Electronics: “The second Electronics Revolution”, IEEE Power Engineering Review, May 1991, Vol. 11, pp. 46-47.
- 2) Σαφάκας, Α.: “Ηλεκτρονικά Ισχύος - Γενική θεώρηση της υφιστάμενης κατάστασης, τάσεις και προοπτικές”, Διήμερο ΤΕΕ με τίτλο «Τεχνολογία και βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος - Βιομηχανικά ηλεκτρονικά», 28-29 Σεπτεμβρίου 2000, Αθήνα, Πρακτικά Δημέρου.
- 3) Lorenz, L.: “Power Electronics in the Technological Change”, Infineon Technologies, Εισήγηση στο Διήμερο του ΤΕΕ με τίτλο «Τεχνολογία και βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος -Βιομηχανικά ηλεκτρονικά», 28-29 Σεπτεμβρίου 2000, Αθήνα, Πρακτικά Δημέρου.
- 4) Σαφάκας, Α.: “Εξελίξεις στα Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Διήμερο «Ηλεκτρονικά Ισχύος - Παραγωγή, εφαρμογή, εκπαίδευση», ΤΕΕ, 23-24/2/1989, Τεχνικά Χρονικά - 1η Έκτακτη Έκδοση, 1992, σελ. 16-20.
- 5) A publication of the National Manufacturing Center of Excellence: “Emitter TurnOff Device: Improving Power Application Performance”, June 2002, www.empf.com.
- 6) Dr. Alex Q. Huang: “Emitter Turn-Off (ETO) Thyristor Development”, FY 2001 Energy Storage Systems Program Power, 20/10/2003.
- 7) Σαμουρέλης, Α.: “Μελέτη Κατασκευαστικών και Λειτουργικών Χαρακτηριστικών Νέων Ηλεκτρονικών Στοιχείων Ισχύος”, Διπλωματική Εργασία Νο 213, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2004.
- 8) Πολίτης Γεώργιος, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ Γ' ΕΠΙΛ. Τομέας: Ηλεκτρολογίας, Ηλεκτρονικής και Αυτοματισμού Ειδικότητα: Τεχνικός Αυτοματισμού
- 9) Carol Er., Klaka Sven, Linder St.: “Integrated Gate - Commutated Thyristors”, ABB Semiconductors AG, 5600 Lenburg, Switzerland, SHORT FORM CATALOGUE 2003.
- 10) Σαφάκας, Α.: “Ηλεκτρονικά Ισχύος: Τέσσερες Δεκαετίες Εξελίξεων”, Μηνιαία Τεχνική Επιθεώρηση, Τεύχος 5ο, Μάρτιος 1996, σελ. 46-47.
- 11) Van Wyk, J.: “Present and Future Trends in Power electronics Converters”, 6th European Conference on Electronics and Applications, Spain, Proceedings, Vol. 0 - key- notes papers, pp.0.001-0.016.
- 12) Majumber, G.: “Future of power Semiconductors”, Mitsubishi Electric Corporation, Japan, 2004 IEEE 35th Annual Power electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, June 20-25, 2004.
- 13) Mohan/Undeland/Robbins: “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ”, Α. Τζιόλα Εκδόσεις, Θεσσαλονίκη, 1996.
- 14) Yuxin Li: “Innovative GTO Thyristor Based Switches Through Unity Gain TurnOff”, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, 22/09/2000, Blacksburg, Virginia, U.S.A.
- 15) ABB Review: “Innovation - the DNA of business”, ABB, 4/2005.
- 16) A. Ch. Kyritsis, J. C. Kobougias, D. S. Klimis, E. C. Tatakis, “Comparison between AC PV Modules Topologies for Decentralised Grid Connected Applications”, CIGRE Symposium on Power Systems with dispersed generation, Athens, Greece, 13 - 16 April, 2005, paper on CD.
- 17) “A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules”, Soeren Baekhoej Kjaer, Member, IEEE, John K. Pedersen, Senior Member, IEEE,

and Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No 5, September/October 2005.

18) Nikolaos P. Papanikolaou, Emmanuel C. Tatakis, Anastasios Ciritsis, Dimitrios Klimis, "Simplified high frequency converters in decentralized grid-connected PV systems: a novel low-cost solution", 10th European Conference on Power Electronics and Applications, (EPE'03), Toulouse (France), paper on CD, Nr. 200.

19) Shimizu T. , Wada K. , Nakamura N. , "A flyback-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current regulation on the DC input for an AC photovoltaic module system", in Proc IEEE PESC'02, Cairns (Australia), 2327 June, 2002, Vol. 3, pp. 1483-1488.

20) Nagao M. , Harada K. , "Power flow of photovoltaic system using buck-boost pwm power inverters", in Proc. PEDS'97, Singapore, 26-29 May, 1996, Vol. 1, pp. 144-149.

21) "RELIABILITY TESTING OF AC-MODULE INVERTERS", C.W.G. Verhoeve, C.F.A. Frumau, E. de Held and W.C. Sinke, Netherlands Energy Research Foundation ECN.