

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γ. Ι. Γεωργαντζής

Δρ. Η-Μ Μηχανικός
ΔΕΗ/ΔΜΚΜ
Δυρραχίου 89 & Κηφισού, 104 43 Αθήνα
Τηλ.: +30-1-5192458, Fax: +30-1-5126999
e-mail: georgantzis@dmkm.dei.gr

Περίληψη - Η εργασία αναφέρεται στις εφαρμογές των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος στα μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα και συγκεκριμένα στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι των Διασυνδέσεων Συνεχούς Ρεύματος Υψηλής Τάσης (HVDC) και τα κύρια είδη των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (FACTS). Επίσης περιγράφονται τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, όπως π.χ. συμβατικό θυρίστορ, θυρίστορ GTO, IGBT, MCT και τέλος γίνεται αναφορά στη βασική δομή, στην ψύξη και στη μηχανική σχεδίαση των βαλβίδων θυρίστορ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ηλεκτρονικά ισχύος προσφέρουν πολλές λειτουργικές δυνατότητες στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Πιο συγκεκριμένα βελτιώνουν τον ρόλο και την αξία των ΣΗΕ με τις παρακάτω δυνατότητες:

- Μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ) σε συνεχές ρεύμα (ΣΡ), ΣΡ σε ΕΡ, ΕΡ σε ΕΡ,
- Δημιουργίας συνθηκών αποφυγής παραμορφώσεων, αρμονικών, βυθισμάτων τάσης και υπερτάσεων,
- Γρήγορου και συχνού ελέγχου ηλεκτρικών μεγεθών, όπως τάση, ρεύμα, σύνθετη αντίσταση, γωνία φάσης,
- Γρήγορης ζεύξης και απόζεύξης κυκλωμάτων.

Κύριες εφαρμογές στην Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελούν οι Διασυνδέσεις με ΣΡ Υψηλής Τάσης (High Voltage Direct Current, HVDC) και τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS).

Η τεχνολογία της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα μέσω των Διασυνδέσεων με ΣΡ αναπτύχθηκε πολύ γρήγορα τα τελευταία τριάντα χρόνια και συχνά πλέον αποτελεί μια επιτυχή εναλλακτική λύση απέναντι στη μεταφορά με εναλλασσόμενο ρεύμα [1,2]. Κύριες συνιστώσες μιας Διασύνδεσης ΣΡ αποτελούν οι Σταθμοί Μετατροπής, οι Γραμμές Μεταφοράς ΣΡ και οι Σταθμοί Ηλεκτροδίων.

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας (FACTS) αναπτύχθηκαν τα τελευταία χρόνια, συνεχίζουν να αναπτύσσονται με γρήγορους ρυθμούς και καθιστούν την λειτουργία των δικτύων περισσότερο αξιόπιστη, ελέγξιμη και αποτελεσματική. Η λειτουργία των ΣΗΕ χαρακτηρίζεται από θερμικούς, μηχανικούς και διηλεκτρικούς περιορισμούς και από άλλους, που οφείλονται στην έλλειψη γρήγορου ελέγχου των διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών παραμέτρων, όπως η τάση, η σύνθετη αντίσταση, η γωνία φάσης, το ρεύμα και η ενεργός και άεργος ισχύς. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί την κύρια ιδέα σχεδιασμού των συστημάτων FACTS, μια και ο εξοπλισμός ηλεκτρονικών ισχύος παρέχει γρήγορο έλεγχο μιας ή περισσοτέρων από τις παραπάνω παραμέτρους και κατα συνέπεια προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στο επίπεδο της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με τις αντίστοιχες συσκευές εξασφάλισης ισχύος των καταναλωτών (Custom Power), επιτυγχάνεται σταθερότητα στο μέτρο της τάσης και στην συχνότητα. Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας αποτελούνται από ένα σύνολο ελεγκτών θυρίστορ, με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγούμενα [3,4,5].

Οι βαλβίδες θυρίστορ αποτελούν το κύριο στοιχείο, όχι μόνο ενός Σταθμού Μετατροπής (ΣΜ) μιας Διασύνδεσης ΣΡ, αλλά και κάθε είδους Ευέλικτου Συστήματος Μεταφοράς Ενέργειας [6,7,8,9,10].

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω εφαρμογές κύρια είναι το Συμβατικό Θυρίστορ Ηλεκτρικά Διεγερόμενο (Electrically Triggered Thyristor, ETT), το Φωτοδιεγερόμενο Θυρίστορ (Light Triggered Thyristor, LTT), το Θυρίστορ GTO (Gate Turn-Off), το Insulated-Gate Bipolar Transistor

(IGBT) και το MOS Controlled Thyristor (MCT). Γενικά μπορεί να αναφερθεί ότι η σημερινή τεχνολογία έχει επιτύχει ονομαστικά μεγέθη τάσεων και ρευμάτων για μεν τα συνήθη thyristor 8 kV, 4000 A, για δε τα thyristor GTO 4.5 kV, 3000 A.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια σύντομη αναφορά στους τύπους Διασυνδέσεων με ΣΡ και στα διάφορα είδη ηλεκτών FACTS. Επίσης παρουσιάζονται τα μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και η δομή και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων thyristor.

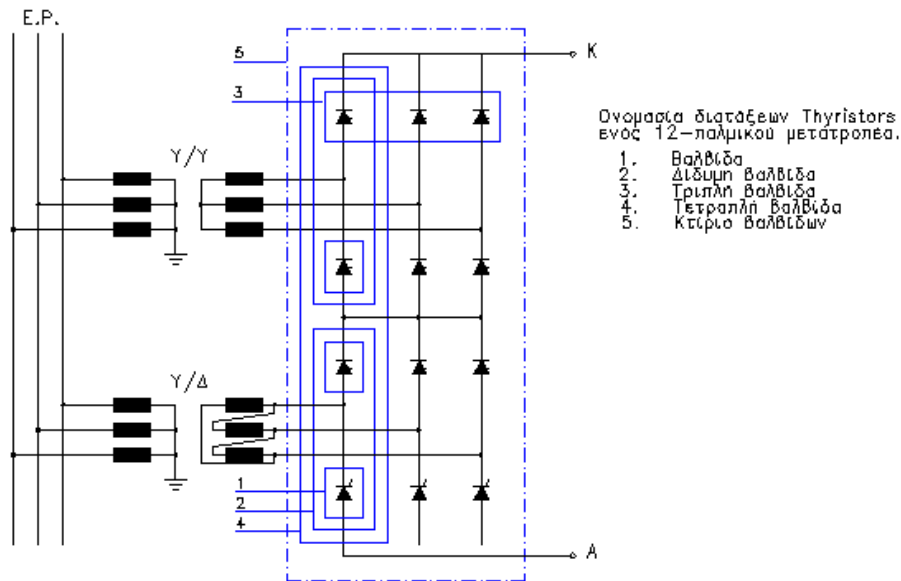
2. ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

2.1. Σταθμοί Μετατροπής ΕΡ/ΣΡ ή ΣΡ/ΕΡ

Μια Διασύνδεση ΣΡ έχει στα άκρα της Σταθμούς Μετατροπής που μεταξύ τους συνδέονται με εναέριες γραμμές ή καλώδια συνεχούς ρεύματος. Η βασική μονάδα κάθε ΣΜ είναι ο μετατροπέας (Converter), ο οποίος, όταν έχει σαν είσοδο το εναλλασσόμενο ρεύμα και έξοδο το ελεγχόμενο συνεχές ρεύμα λέγεται ανορθωτής (Rectifier), ενώ όταν λειτουργεί αντίστροφα, ονομάζεται αντιστροφέας (Inverter).

Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι τριφασικές γέφυρες 6 παλμών με thyristors, οι οποίες αποτελούνται από έξι ομάδες thyristors, που είναι διαταγμένες σε δύο σειρές συνδεδεμένες ανά δύο σε κάθε φάση του συστήματος Ε.Ρ. Το έβδομο thyristor (thyristor παράκαμψης), που βραχυκυκλώνει την πλευρά ΣΡ της γέφυρας, ενεργοποιείται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (σφάλματα κ.λ.π.), ενώ σε κανονική κατάσταση λειτουργίας είναι μπλοκαρισμένο. Για την αύξηση της ισχύος μετατροπής ενός μετατροπέα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν περισσότερες της μιας γέφυρες. Η χρησιμοποίηση δύο γεφυρών σε σειρά με χρήση μετασχηματιστών με διαφορετική συνδεσμολογία (αστέρας - αστέρας και αστέρας - τρίγωνο) παρουσιάζει πλεονεκτήματα και εμφανίζεται στο σχήμα 1. Η διάταξη αυτή δημιουργεί φασική διαφορά 30° μεταξύ των τροφοδοτούμενων εναλλασσόμενων τάσεων και το σύστημα ανόρθωσης 12 παλμών, που δημιουργείται, έχει μειωμένο συντελεστή παραμόρφωσης λόγω αρμονικών. Για τον πιο πάνω λόγο, αλλά και για λόγους αύξησης της αξιοπιστίας και της αντοχής του συστήματος σε περιπτώσεις ανωμαλιών, είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση μεγαλύτερου αριθμού γεφυρών σε σειρά, όπως η διάταξη τετραπλής γέφυρας. Στην πράξη συνήθως οι διατάξεις είναι διπλής ή το πολύ τετραπλής γέφυρας. Η διπλή γέφυρα ονομάζεται συνήθως 12-παλμικός μετατροπέας και αποτελεί τον ένα πόλο ενός ΣΜ. Τέσσερις 6-παλμικές γέφυρες με στροφή τάσεων 15° η μία προς την άλλη δημιουργούν ένα 24-παλμικό σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα απαιτεί και μετασχηματιστές μετάθεσης φάσεων, ενώ δεν αποφεύγονται τα πηνία εξομάλυνσης στις γραμμές ΣΡ, που θα χρειαζόνταν και για άλλους λόγους, οπότε τα συστήματα αυτά θεωρούνται αντιοικονομικά.

Η λειτουργία και κατ' επέκταση η συμπεριφορά των μετατροπέων ελέγχεται από τα συμβατικά thyristors, που στην ουσία είναι διακόπτες που μπορούν να ελέγχονται ως προς τη στιγμή που κλείνουν (έναυση των thyristors), όχι όμως και ως προς τη στιγμή που ανοίγουν (σβέση των thyristors). Η ελεγχόμενη παράμετρος σ' ένα μετατροπέα είναι η γωνία καθυστέρησης έναυσης α , που καθορίζει την χρονική καθυστέρηση με την οποία γίνεται η έναυση των thyristors. Η τιμή της παρέχεται από κατάλληλο σύστημα ελέγχου του μετατροπέα.



Σχήμα 1. 12-παλμικός μετατροπέας για εφαρμογές HVDC.

2.2. Τύποι Διασυνδέσεων ΣΡ

Οι βασικοί τύποι διασυνδέσεων ΣΡ είναι [2]:

- Η μονοπολική διασύνδεση με ένα αγωγό αρνητικής πολικότητας και επιστροφή μέσα από γη, θάλασσα ή μεταλλικό αγωγό.
- Η διπολική διασύνδεση με δύο αγωγούς, ένα θετικό και ένα αρνητικό. Κάθε ένας τερματικός ΣΜ αποτελείται από δύο 12-παλμικούς μετατροπέες ίδιας ονομαστικής τάσης τοποθετημένους σε σειρά. Τα ουδέτερα σημεία μεταξύ των δύο μετατροπέων είναι γειωμένα στο ένα ή και στα δύο άκρα, οπότε οι δύο πόλοι μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργούν και οι δύο με το ίδιο ονομαστικό ρεύμα χωρίς ρεύμα γης.
- Η ομοπολική διασύνδεση με δύο ή περισσότερους αγωγούς ίδιας πολικότητας, συνήθως αρνητικής και λειτουργία πάντα με επιστροφή ρεύματος γης.
- Οι Σταθμοί Μετατροπής ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, που είναι ειδικές περιπτώσεις διπολικών διασυνδέσεων, όταν οι αγωγοί ΣΡ έχουν μηδενικό μήκος.
- Οι διασυνδέσεις με πολλούς ΣΜ, που διακρίνονται σε ακτινωτές (radial), βροχοειδείς (meshed) και σειριακές (series). Στις δύο πρώτες περιπτώσεις οι 12-παλμικοί μετατροπέες συνδέονται παράλληλα στην ίδια ονομαστική τάση, ενώ στην τελευταία περίπτωση συνδέονται σε σειρά με το ίδιο ονομαστικό συνεχές ρεύμα.

3. ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας (FACTS) αναπτύχθηκαν σαν νέα τεχνολογία στα μέσα της δεκαετίας του 1980 από το Electric Power Research Institute (EPRI), ερευνητικό οργανισμό υποστήριξης του έργου αρκετών εταιριών ηλεκτρισμού των ΗΠΑ που εδρεύει στο Palo Alto της Καλιφόρνιας, με κύριο συντελεστή τον N.G. Hingorani.

Η ανάπτυξη των FACTS σχετίζεται με τις τεχνολογικές εξελίξεις στις Διασυνδέσεις ΣΡ Υψηλής Τάσης και στις βαλβίδες θυρίστορ. Τα FACTS αποτελούνται από ένα σύνολο ελεγκτών θυρίστορ, που μπορούν να εφαρμοστούν ατομικά, αλλά και σε συνδυασμό, με σκοπό τον έλεγχο των παραμέτρων που αναφέρθηκαν προηγούμενα [3, 5]. Γενικά σημειώνεται ότι ένας ελεγκτής σειράς παρέχει έλεγχο κύρια της ενεργούς και μερικώς της αέργου ισχύος, ενώ ένας παράλληλος ελεγκτής παρέχει έλεγχο της τάσης και της αέργου ισχύος.

Οι διάφοροι ελεγκτές διαχωρίζονται σε διαθέσιμους ή μη διαθέσιμους ακόμα εμπορικά και σε ελεγκτές που κατασκευάζονται για επίλυση ειδικών προβλημάτων του συστήματος μεταφοράς ΕΡ [4]. Οι βασικότεροι απ' αυτούς είναι:

- Ο Στατός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (Static Var Compensator, SVC).

- Η Απόσβεση Υποσύγχρονου Συντονισμού (SubSynchronous Resonance Damper, SSR Damper).
- Ο Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος με θυρίστορ (Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC).
- Ο Στατός Πυκνωτής (STATic CONDenser, STATCOM).
- Η Εξελιγμένη Ελεγχόμενη Αντιστάθμιση Σειράς (Advanced Controlled Series Capacitor, ACSC).
- Ο Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (Unified Power Flow Controller, UPFC).
- Ο Σύνδεσμος Συνεχούς Ρεύματος (HVDC Link).
- Η Δυναμική Πέδη Ελεγχόμενη με θυρίστορ (Thyristor Controlled Dynamic Brake, TCDB).
- Διάφοροι άλλοι ελεγκτές ειδικών εφαρμογών.

Στη συνέχεια περιγράφονται με συντομία τα δύο πιο σημαντικά είδη FACTS, ο Στατός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος και ο Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος με θυρίστορ.

Ο Στατός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC)

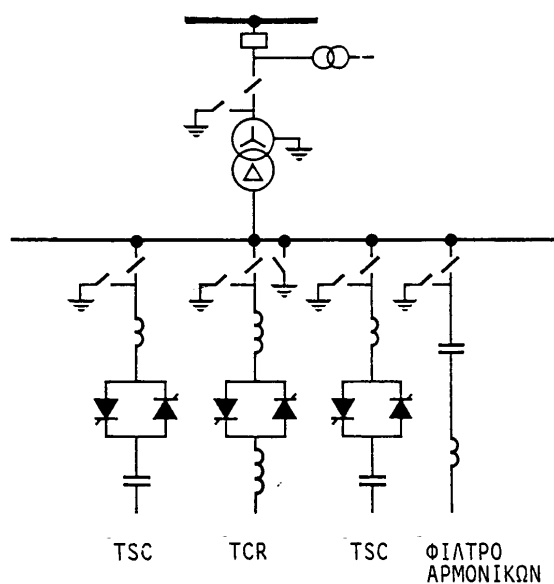
Οι αντισταθμιστές αυτοί παρέχουν υποστήριξη της τάσης κύρια για απρόοπτες κριτικές καταστάσεις, ενώ αλλού εφαρμόζονται για την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, την υποστήριξη της τάσης στη μόνιμη κατάσταση και τη σταθεροποίηση της τάσης σε μεταβαλλόμενα βιομηχανικά φορτία. Από το 1980 περισσότερο από 100 Στατοί Αντισταθμιστές Αέργου Ισχύος έχουν εγκατασταθεί σε δίκτυα μεταφοράς. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα ενός SVC, ο οποίος αποτελείται από κατάλληλους συνδυασμούς Πηνίων Ελεγχόμενων με θυρίστορ (Thyristor Controlled Reactor, TCR) για την παραγωγή επαγωγικής αέργου ισχύος, με τη σύγχρονη όμως παραγωγή αρμονικών ρευμάτων, και Πυκνωτών Διακοπτόμενων με Θυρίστορ (Thyristor Switched Capacitor, TSC) για την παραγωγή χωρητικής αέργου ισχύος. Μέρος της χωρητικής αέργου ισχύος παράγεται από τα μόνιμα συνδεδεμένα φίλτρα αρμονικών, τα οποία εγκαθίστανται για απορρόφηση των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται από τα TCR.

Ο Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος με Θυρίστορ (TCSC)

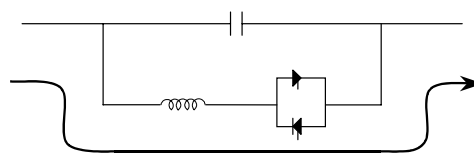
Ο έλεγχος της μεταφορόμενης ισχύος επιτυγχάνεται καλύτερα με τον έλεγχο της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς ή της γωνίας φάσης. Μια τυπική γραμμή έχει σύνθετη αντίσταση, της οποίας η κύρια συνιστώσα είναι η επαγωγική, ενώ η ωμική είναι μόνο της τάξης 5 - 10 %. Έτσι η σύνθετη αντίσταση στη μόνιμη κατάσταση μπορεί να ελεγχθεί από ένα πυκνωτή σειράς ελεγχόμενο με θυρίστορ ή ένα πηνίο σειράς ελεγχόμενο με θυρίστορ. Επειδή η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή εμφανίζεται αρνητική, η εγκατάσταση ενός μεταβλητού πυκνωτή σε σειρά με τη γραμμή σημαίνει μεταβλητή αρνητική αντίσταση σε σειρά με τη θετική σύνθετη αντίσταση της γραμμής. □τσι ο Πυκνωτής Σειράς Ελεγχόμενος με Θυρίστορ ελέγχει τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής από μια χαμηλή τιμή μέχρι τη φυσική τιμή της. Ο ελεγκτής αυτός FACTS βρίσκεται ήδη σε λειτουργία σε δύο συστήματα μεταφοράς. Η αντιστάθμιση αυτή έχει τεχνολογία παρόμοια με τα Πηνία Ελεγχόμενα με Θυρίστορ (TCR) της Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος (SVC), μόνο που ο εξοπλισμός στην περίπτωση αυτή είναι συνδεδεμένος σε σειρά στη γραμμή και τα σήματα ελέγχου πρέπει να τεθούν στο δυναμικό αυτό. Η τεχνολογία αυτή προσφέρει πολλαπλά οφέλη, όπως έλεγχο της τάσης άφιξης, απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, αύξηση της μεταφορόμενης ισχύος κ.λ.π.

Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι τρεις βασικές λειτουργικές δυνατότητες ενός TCSC. Σύμφωνα με την πρώτη δυνατότητα παράκαμψης του πυκνωτή, τα θυρίστορ βρίσκονται σε πλήρη αγωγή και το ρεύμα ρέει στο μεγαλύτερο μέρος του μέσω του πηνίου, παρουσιάζοντας συνολική σύνθετη αντίσταση που καθορίζεται από την επαγωγική αντίσταση του πηνίου. Σύμφωνα με τη δεύτερη δυνατότητα μπλοκαρίσματος των θυρίστορ, όλο το ρεύμα ρέει μέσω του πυκνωτού και η σύνθετη αντίσταση του τμήματος είναι ίση με την χωρητική αντίσταση του πυκνωτού. Η δυνατότητα αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε επίπεδο δοκιμών. Σύμφωνα με την τρίτη δυνατότητα, οι παλμοί έναυσης των θυρίστορ ελέγχονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η αγωγή των θυρίστορ να προκαλεί ένα εσωτερικό ελεγχόμενο επαγωγικό ρεύμα το οποίο ρέει μέσω του πυκνωτή και μεταβάλλει τη συνολική σύνθετη αντίσταση. Ο συνεχής αυτός τρόπος ελέγχου ονομάζεται "Vernier Control" και δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της χωρητικής αντίστασης για κάθε τμήμα ενός TCSC.

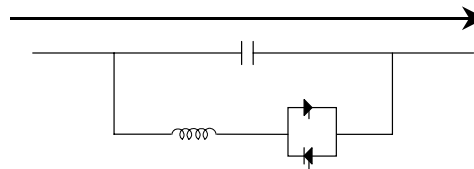
Η εγκατάσταση ενός TCSC στον υποσταθμό Slatt 500 kV του Oregon ολοκληρώθηκε τον Μάιο 1993 και αποτελείται από έξι όμοια τμήματα συνδεδεμένα σε σειρά. Κάθε τμήμα αποτελείται από ένα πυκνωτή χωρητικής αντίστασης -1.33Ω συνδεδεμένο παράλληλα αφενός με ένα varistor και αφετέρου με μία βαλβίδα θυρίστορ σε σειρά με ένα πηνίο επαγωγικής αντίστασης $+0.2 \Omega$. Ο συνεχής έλεγχος δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της χωρητικής αντίστασης για κάθε τμήμα από -1.33Ω έως -4Ω . Η συνολική εγκατάσταση έχει ονομαστικό ρεύμα γραμμής 2900 A, ονομαστική χωρητική αντίσταση πυκνωτών -8Ω και ονομαστική τριφασική ισχύ αντιστάθμισης 202 MVar. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικά θυρίστορ διαμέτρου 100 mm και μεγάλης αντοχής σε ρεύμα βραχυκυκλώματος (μεγαλύτερο από 60 kA κορυφής).



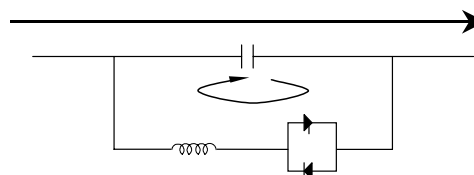
Σχήμα 2. Τυπικό μονογραμμικό διάγραμμα ενός SVC/TCSC.



α) Παράκαμψη του πυκνωτή



β) Μη αγωγή της βαλβίδας θυρίστορ



γ) Ελεγχόμενη αγωγή της βαλβίδας θυρίστορ

Σχήμα 3. Λειτουργικές δυνατότητες ενός

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ HVDC ΚΑΙ FACTS

4.1 Συμβατικό θυρίστορ

Η μεγάλη πρόοδος που έγινε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των Διασυνδέσεων ΣΡ και η μείωση των απωλειών ισχύος στους ΣΜ οφείλεται σε μεγάλο ποσοστό στην ραγδαία εξέλιξη του στοιχείου θυρίστορ. Τα τεχνικά του χαρακτηριστικά (π.χ. ονομαστικό ρεύμα, ανεκτή τάση ορθής φοράς) έχουν αυξηθεί περισσότερο από 10 φορές τα τελευταία 15 χρόνια.

Ο συνήθης τρόπος περιγραφής ενός θυρίστορ, όταν γίνεται αναφορά σε συστήματα HVDC ή FACTS, είναι η ονομαστική τάση, το ονομαστικό ρεύμα και η διάμετρος του δίσκου σιλικόνης (για παράδειγμα 4.5 kV, 2000 A, 100 mm). Η ονομαστική τάση είναι η επαναλαμβανόμενη τάση κορυφής του θυρίστορ για καταστάσεις μη αγωγής και για τάσεις κατά την ορθή φορά (repetitive peak off-state Voltage in the forward direction, V_{DRM}) και το ονομαστικό ρεύμα είναι η μέση τιμή του ρεύματος αγωγής (average on-state Current). Κάθε θυρίστορ συνοδεύεται από το κύκλωμα έναυσης και παρακολούθησης της κατάστασης, την διάταξη προστασίας και το πηνίο κορεσμού. Το ενεργό μέρος ενός θυρίστορ είναι ένας ημιαγωγίμος κυκλικός δίσκος σιλικόνης πάχους μισού μέχρι ενός χιλιοστού και έχει διάμετρο που φτάνει σήμερα μέχρι 150 mm. Ο δίσκος της σιλικόνης είναι τοποθετημένος σε μια ερμητικά σφραγισμένη κάψουλα που περιέχει μια στήλη από δίσκους κατάλληλων υλικών και από τις δύο πλευρές του δίσκου σιλικόνης.

Η έναυση του θυρίστορ γίνεται με οπτοηλεκτρονική μέθοδο. Η κεντρική μονάδα ελέγχου στέλνει μέσα από οπτικές ίνες φωτεινούς παλμούς στις ηλεκτρονικές μονάδες έναυσης των θυρίστορς. Εκεί οι φωτεινοί παλμοί μετατρέπονται σε ηλεκτρονικούς παλμούς που διεγείρουν την πύλη του θυρίστορ (Electrically Triggered Thyristor, ETT).

Η εξέλιξη της τεχνολογίας οδήγησε στο φωτοδιεγερόμενο θυρίστορ (Light Triggered Thyristor, LTT), στο οποίο η έναυση γίνεται από φωτεινούς παλμούς που οδηγούνται κατευθείαν στην φωτοευαίσθητη πύλη του θυρίστορ χωρίς την παρεμβολή ηλεκτρονικών μονάδων έναυσης. Πλεονέκτημα της νέας τεχνολογίας είναι η υψηλότερη αξιοπιστία, το μικρότερο μέγεθος τυποποιημένων στοιχείων και κατά συνέπεια η ελάττωση του συνολικού όγκου των βαλβίδων, η ευκολία συντήρησης και το χαμηλότερο κόστος τους.

Το 1982 ένα στοιχείο αποτελούμενο από έξι φωτοδιεγερόμενα θυρίστορς συνδεδεμένα σε σειρά ενσωματώθηκαν σε μία υδρόψυκτη ηλεκτρικά διεγερόμενη βαλβίδα (125 kV, 1200 A) στο δοκιμαστικό ΣΜ

Sakuma της Ιαπωνίας με επιτυχία. Η πρώτη βαλβίδα με φωτοδιεγειρόμενα θυρίστορ σε εμπορική εφαρμογή εγκαταστάθηκε τον Μάιο 1988 στο ΣΜ Konti-Skan I της Δανίας, αντικαθιστώντας μια παλιά βαλβίδα υδραργύρου. Η δοκιμαστική αυτή βαλβίδα είναι υδρόψυκτη με μόνωση αέρα και αποτελείται από 48 φωτοδιεγειρόμενα θυρίστορ εμβαδού καθόδου 45 cm^2 ανεκτής τάσης ορθής φοράς 7 kV συνδεδεμένα σε σειρά. Δύο διαφορετικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν για τη φωτοδιέγερση: α) Μια δίοδος φωτοεκπομπής (LED) κατάλληλης φωτεινής ισχύος που διεγείρει ένα μόνο θυρίστορ β) Μια δίοδος laser (LD) κατάλληλης φωτεινής ισχύος που διεγείρει μια ομάδα θυρίστορ με χρήση οπτικού μείκτη. Τα θυρίστορ είχαν αυτοπροστασία δηλαδή ενσωματωμένη δυνατότητα προστασίας από υπερεντάσεις.

4.2. Θυρίστορ GTO

Ενα νεώτερο ηλεκτρονικό στοιχείο ισχύος είναι το θυρίστορ Gate Turn-Off (GTO), στο οποίο ελέγχεται όχι μόνο η έναυση, αλλά και η σβέση, με σημερινά μεγέθη τάσεων και ρευμάτων 4.5 kV και 3000 A αντίστοιχα. Για το θυρίστορ GTO υπάρχει προσπάθεια τυποποίησης διαμέτρου, για μεν την βιομηχανία και την ηλεκτρική έλξη 4" και για δε τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας 6". Ήδη αρκετοί τύποι υπό εξέλιξη ελεγκτών FACTS χρησιμοποιούν θυρίστορ GTO και αναμένονται αρκετές εμπορικές εφαρμογές στα επόμενα χρόνια.

4.3. Άλλα νεώτερα στοιχεία

Ενα νέο σχετικά στοιχείο είναι το Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT), που έγινε εμπορικά διαθέσιμο το 1983 και αντικατέστησε το Power Bipolar Transistor. Η σημερινή τεχνολογία δίνει τάσεις και ρεύματα μεγαλύτερα από 2 kV και 100 A αντίστοιχα, αλλά δεν αναμένονται εφαρμογές στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στο άμεσο μέλλον. Ενα πρόσφατο και πολλά υποσχόμενο στοιχείο είναι το MOS Controlled Thyristor (MCT), που κατασκευάστηκε το 1991, με σημερινά μεγέθη τάσης και ρεύματος μεγαλύτερα από 900 V και 60 A αντίστοιχα χωρίς όμως να έχουν γίνει ακόμη εφαρμογές. Τέλος, τα Silicon Carbide-Based Power Switches ευρίσκονται σε ανάπτυξη με προοπτικές εφαρμογών στο απώτερο μέλλον.

5. ΒΑΛΒΙΔΕΣ ΘΥΡΙΣΤΟΡΣ

5.1. Βασική δομή βαλβίδων

Οι βαλβίδες θυρίστορ αποτελούν το κύριο στοιχείο ενός ΣΜ και μετασχηματίζουν την ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος σε ισχύ συνεχούς ρεύματος και αντίστροφα.

Το κτίριο βαλβίδων του 12-παλμικού μετατροπέα αποτελείται από τρεις τετραπλές βαλβίδες, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Κάθε τετραπλή βαλβίδα αποτελείται από μια διάταξη τεσσάρων κατακόρυφων βαλβίδων, που και αυτές με τη σειρά τους αποτελούνται από στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά. Κάθε συρταρωτό τυποποιημένο στοιχείο (module) αποτελείται από λίγες δεκάδες θυρίστορ συνδεδεμένα συνήθως σε σειρά. Η παράλληλη σύνδεση θυρίστορ αποφεύγεται, γιατί μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα, όταν υπάρξει διαφορά στις γωνίες καθυστέρησης έναυσης των παράλληλων κλάδων. Εξάλλου τα σημερινά θυρίστορ με ονομαστικό ρεύμα μέχρι 4 kA και ανεκτή τάση ορθής φοράς 8 kV μπορούν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να μην απαιτείται πια παράλληλη σύνδεση θυρίστορ. Κατά συνέπεια ο συνολικός αριθμός των θυρίστορ ενός 6-παλμικού και ενός 12-παλμικού μετατροπέα είναι 6.X.Y και 12.X.Y αντίστοιχα, όπου X ο αριθμός των θυρίστορ ανά στοιχείο και Y ο αριθμός των στοιχείων ανά βαλβίδα.

Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας μιας βαλβίδας ενός 6-παλμικού μετατροπέα:

- Η βαλβίδα άγει προς μια διεύθυνση, τη διεύθυνση ορθής φοράς για χρόνο ίσο με το ένα τρίτο της περιόδου. Το ρεύμα που διέρχεται από τη βαλβίδα σε κανονικές συνθήκες είναι ίσο με το ονομαστικό ρεύμα του μετατροπέα.
- Η βαλβίδα που δεν άγει πρέπει να αντέχει στα άκρα της μια τάση κατά την ορθή φορά που ονομάζεται ανεκτή τάση ορθής φοράς. Η μεταγωγή από την κατάσταση μη αγωγής στην κατάσταση αγωγής τη στιγμή εκείνη γίνεται με κατάλληλους παλμούς έναυσης στα θυρίστορ της βαλβίδας, που παραμένει έτσι σε κατάσταση αγωγής μέχρι το ρεύμα να μηδενιστεί. Δηλαδή η βαλβίδα δεν "σβήνει" μόνη της, αλλά περνάει στην κατάσταση μη αγωγής όταν η επόμενη βαλβίδα αρχίζει να άγει.

- Η βαλβίδα δεν άγει ποτέ κατά την αντίστροφη φορά και σχεδιάζεται για μια μέγιστη ανεκτή τάση αντιστρόφου φοράς που προσδιορίζεται από το επίπεδο προστασίας των αλεξικεραυνών της βαλβίδας.
- Η βαλβίδα σχεδιάζεται να αντέχει σε καταστάσεις υπερέντασης. Η μέγιστη υπερένταση παρουσιάζεται σε άμεσο βραχυκύκλωμα στα άκρα της βαλβίδας και το μέγεθος της καθορίζεται από τη σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστού μετατροπής.

Επίσης μια βαλβίδα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μεγάλη αξιοπιστία, μικρές απώλειες ισχύος, ελάχιστο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και βέλτιστο συνολικό κόστος.

Κανονισμοί που σχετίζονται με τις βαλβίδες θυρίστορ είναι οι IEC 117-6, 117-7, 146, 147-0, 147-1, 147-2, 148 και 700. Ο κανονισμός IEC 700 αφορά στις δοκιμές των βαλβίδων στο εργοστάσιο και επι τόπου του έργου, ενώ ο αντίστοιχος κανονισμός του IEEE είναι ο ANSI/IEEE Std. 857 [9, 10].

Η ελάττωση του αριθμού των θυρίστορ που συνδέονται σε σειρά ανά βαλβίδα, επιτυγχάνεται με την αύξηση της τάσης των θυρίστορ και την εξέλιξη του συστήματος προστασίας και συνεπάγεται τον περιορισμό του κόστους όχι μόνο των θυρίστορ, αλλά και των βοηθητικών συνιστωσών τους, όπως οι ψύκτρες, οι μονάδες ελέγχου, οι αγωγοί οπτικών ινών κ.λ.π. Το εμβαδόν της καθόδου του θυρίστορ καθορίζει το μέγεθος του ρεύματος που μπορεί να περάσει. Γενικά η εκλογή του θυρίστορ σε μια διασύνδεση με συνεχές ρεύμα βασίζεται περισσότερο στο μέγεθος του ρεύματος βραχυκυκλώσεως και στις χαμηλές απώλειες και λιγότερο στο ρεύμα κανονικής λειτουργίας.

Για Σταθμούς Μετατροπής ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ το ονομαστικό ρεύμα προσδιορίζεται από τη συνολική βέλτιστη λύση, δηλαδή εκλέγεται ένα σχετικά μεγάλο ονομαστικό συνεχές ρεύμα για να περιορίσει την τάση συνεχούς ρεύματος και κατά συνέπεια τον αριθμό των συνδεδεμένων σε σειρά θυρίστορ. Ο σχεδιασμός όμως περιορίζεται από τις δυνατότητες της ψύξης των θυρίστορ και το μέγεθος του ρεύματος βραχυκύκλωσης, που μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το ονομαστικό ρεύμα, ενώ η σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών μετατροπής παραμένει σταθερή.

Στο έργο SKAGERAK (250 MW, ± 250 kV, 1000A, διπολική διασύνδεση, 1976/1977) κάθε 12παλμικός μετατροπέας αποτελείται από 3 τετραπλές βαλβίδες, κάθε τετραπλή βαλβίδα από 4 βαλβίδες, κάθε βαλβίδα από 24 στοιχεία και κάθε στοιχείο από 6 θυρίστορ συνδεδεμένα σε σειρά. Δεν υπάρχουν παράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ. Συνολικός αριθμός θυρίστορ ανά βαλβίδα 144, ανά τετραπλή βαλβίδα 576 και ανά 12παλμικό μετατροπέα 1728. Οι βαλβίδες είναι αερόψυκτες με μόνωση αέρα.

Στο έργο DUERNROHR (550 MW, 145 kV, 3790 A, Σ.Μ. ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, 1983) κάθε 12παλμικός μετατροπέας αποτελείται από 3 τετραπλές βαλβίδες, κάθε τετραπλή βαλβίδα από 4 βαλβίδες, κάθε βαλβίδα από 4 στοιχεία και κάθε στοιχείο από 11 θυρίστορ συνδεδεμένα σε σειρά. Δεν υπάρχουν παράλληλα συνδεδεμένα θυρίστορ. Συνολικός αριθμός θυρίστορ ανά βαλβίδα 4, ανά τετραπλή βαλβίδα 176 και ανά 12παλμικό μετατροπέα 528. Οι βαλβίδες είναι αερόψυκτες με μόνωση αέρα.

Στο έργο CROSS CHANNEL 2 (2000 MW, ± 270 kV, 1852A, 2 διπολικές διασυνδέσεις, 1985/1986) χρησιμοποιήθηκαν βαλβίδες αερόψυκτες με μόνωση αέρα και στους δύο τερματικούς σταθμούς. Στο SELLINDGE (Αγγλία) κάθε πόλος περιλαμβάνει ένα 12παλμικό μετατροπέα, κάθε 12παλμικός μετατροπέας 3 τετραπλές βαλβίδες, κάθε βαλβίδα 125 στοιχεία και κάθε στοιχείο από 2 θυρίστορ σε παράλληλη σύνδεση. Συνολικός αριθμός θυρίστορ ανά βαλβίδα 250, ανά τετραπλή βαλβίδα 1000 και ανά 12παλμικό μετατροπέα 3000. Χρησιμοποιήθηκαν θυρίστορ με διάμετρο 56 mm και ανεκτή τάση αντιθέτου φοράς 4 kV. Στο LES MANDARINS (Γαλλία) κάθε πόλος περιλαμβάνει ένα 12παλμικό μετατροπέα, κάθε μία από τις 12 βαλβίδες περιλαμβάνει 12 στοιχεία και κάθε στοιχείο 8 ζεύγη θυρίστορ. Συνολικός αριθμός θυρίστορ ανά βαλβίδα 192, ανά τετραπλή βαλβίδα 768 και ανά 12παλμικό μετατροπέα 2304. Ο συνολικός αριθμός εγκατεστημένων θυρίστορ στους 4 πόλους είναι 9216 και χρησιμοποιήθηκαν θυρίστορ με διάμετρο 77 mm.

5.2. Ψύξη βαλβίδων

Η βασική χαρακτηριστική του θυρίστορ είναι η χαρακτηριστική τάσης / ρεύματος, σύμφωνα με την οποία αυτό αντέχει τάσεις αντιστρόφου φοράς τάξης μέχρι 8 kV χωρίς σημαντικά αντιστρόφα ρεύματα, ενώ κατά την ορθή φορά η πτώση τάσης στα άκρα του σε ονομαστικό ρεύμα είναι αρκετά μικρή. Η πτώση όμως αυτή της τάσης δημιουργεί απώλειες ισχύος και κατά συνέπεια θέρμανση των στοιχείων, έτσι ώστε να απαιτείται κύκλωμα ψύξης. Το κύκλωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιεί σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας τον αέρα, το νερό ή άλλο υγρό όπως π.χ. freon και η επιλογή του απαιτεί τεχνοοικονομικές θεωρήσεις. Γενικά υδρόψυκτες βαλβίδες θυρίστορ χρησιμοποιούνται για μεγάλα ρεύματα, ενώ για έργα μικρής ισχύος ή χωρίς μεγάλους περιορισμούς στις διαστάσεις του κτιρίου βαλβίδων η λύση αέρα είναι προσηγορύτερη. Στην

εκτίμηση κόστους για την επιλογή συγκεκριμένης λύσης πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο το κόστος των βαλβίδων θυρίστορ, του κτιρίου των βαλβίδων και του συγκροτήματος ψύξης, αλλά και οι απώλειες του ψυκτικού συγκροτήματος και ο απαιτούμενος χώρος εγκατάστασής του.

5.3. Μηχανική σχεδίαση βαλβίδων

Η διάταξη των βαλβίδων θυρίστορ μπορεί να πάρει διάφορες μορφές ανάλογα με τα δεδομένα του συγκεκριμένου έργου και τις τυχόν ειδικές απαιτήσεις.

Μέχρι την εποχή της σχεδίασης των βαλβίδων του έργου Ιταιρμ (1982), η μόνη υπάρχουσα διάταξη ήταν δίδυμες ή τετραπλές βαλβίδες με έδραση στο έδαφος. Ο λόγος ήταν ο περιορισμός των διαστάσεων του κτιρίου των βαλβίδων, ενώ δεν είχαν τεθεί ακόμα ρητές απαιτήσεις για αντισεισμικές κατασκευές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια τετραπλή βαλβίδα με έδραση στο έδαφος για το έργο Ιταιρμ έχει διαστάσεις ύψους 15 m, μήκους 4 m και πλάτους 3 m, ζυγίζει περίπου 35 tons και περιέχει 384 θυρίστορς. Τρεις τέτοιες βαλβίδες τοποθετούνται σε κάθε ένα από τα 16 κτίρια βαλβίδων με συνολικό αριθμό θυρίστορς 18432. Στα έργα της επέκτασης του Pacific Intertie και του Intermountain τέθηκαν για πρώτη φορά υψηλές αντισεισμικές απαιτήσεις που οδήγησαν σε νέες κατασκευές βαλβίδων. Για να γίνει αντισεισμική μια συνηθισμένη κατασκευή βαλβίδων ύψους 15 m περίπου, πρέπει να προστεθούν περισσότερα σώματα μονωτήρων και γενικά στηριγμάτων στη φέρουσα κατασκευή. Η λύση αυτή οδηγεί σε αύξηση του ύψους των βαλβίδων, πολύπλοκη διάταξη και δύσκολη πρόσβαση στις βαλβίδες για συντήρηση.

Δεύτερη λύση θα μπορούσε να θεωρηθεί η αντικατάσταση της τετραπλής βαλβίδας από δίδυμες ή τέσσερις απλές βαλβίδες με έδραση στο έδαφος, με μείωση του ύψους, αλλά σημαντική αύξηση της επιφάνειας του κτιρίου των βαλβίδων.

Τρίτη λύση είναι η ανάρτηση των βαλβίδων από την οροφή, ώστε αυτές να αιωρούνται ελεύθερα και προς οποιαδήποτε οριζόντια διεύθυνση κατά τη διάρκεια, αλλά και μετά από σεισμικές καταπονήσεις. Για την απόσβεση της κατακόρυφης συνιστώσας χρησιμοποιούνται ελατήρια στη θέση των στοιχείων ανάρτησης. Τα ελατήρια αυτά με τη σειρά τους συνδέονται με μονωτικές ράβδους πορσελάνης. Οι ράβδοι αυτοί προσαρτούνται στο πάνω μέρος των βαλβίδων, ενώ πρόσθετες τέτοιες ράβδοι εκτείνονται από το πάνω μέχρι το κάτω μέρος των βαλβίδων και από τις δύο πλευρές. Ροηφόροι ράβδοι συνδέουν κάθετα τους μονωτήρες αυτούς και αποτελούν τη βάση για τα στοιχεία θυρίστορ.

Η λύση αυτή σε σύγκριση με την συμβατική δεν απαιτεί μονωτήρες ή σιδηροκατασκευές μέσα στις βαλβίδες, ενώ περιορίζει τις διαστάσεις ύψους και μήκους μιας τετραπλής βαλβίδας μέχρι και 10%. Οι αναρτούμενες βαλβίδες απαιτούν ειδική ενίσχυση της οροφής που οπωσδήποτε αυξάνει το κόστος, αλλά δεν πρέπει να αγνοείται το γεγονός ότι η έδραση των βαλβίδων στο έδαφος συνεπάγεται ενισχυμένες θεμελιώσεις. Πρόσθετη απαίτηση των αναρτούμενων βαλβίδων είναι η πρόβλεψη επιπλέον μήκους των συνδέσεων των κυκλωμάτων ψύξης και έναυσης των θυρίστορ, καθώς και άλλων βοηθητικών κυκλωμάτων, ώστε οι βαλβίδες κατά τη διάρκεια ενός σεισμού να ταλαντώνονται ελεύθερα. Επίσης για την ασφαλή σχεδίαση των αιωρούμενων βαλβίδων πρέπει να ληφθεί υπόψη και το ανώτατο όριο των επιτρεπόμενων ταλαντώσεων μεταξύ του κτιρίου των βαλβίδων και των ίδιων των βαλβίδων.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία αυτή αναφέρεται με σύντομο τρόπο στις διάφορες εφαρμογές των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και συγκεκριμένα στις διασυνδέσεις μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων με συνεχές ρεύμα, δηλαδή στην τεχνολογία HVDC, καθώς και στα διάφορα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γνωστά διεθνώς ως FACTS.

Η συνεχής αυξανόμενη χρησιμοποίηση των Διασυνδέσεων ΣΡ έγινε δυνατή λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των θυρίστορς. Έτσι επιτυγχάνεται παράλληλη και ασύγχρονη διασύνδεση δύο ή περισσότερων ηλεκτρικών συστημάτων, όταν αυτά έχουν διαφορετικές συχνότητες ή διαφορετικές φιλοσοφίες ελέγχου συχνότητας και όταν είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση καλωδίων πολύ μεγάλου μήκους. Επίσης υπάρχουν και αρκετές άλλες περιπτώσεις όπου η τεχνολογία HVDC απλά πλεονεκτεί απέναντι στη μεταφορά με εναλλασσόμενο ρεύμα για οικονομικούς και λειτουργικούς λόγους.

Οι πρόσφατες εξελίξεις των γρήγορων ελεγκτών FACTS σχετίζονται με την ανάπτυξη των Διασυνδέσεων ΣΡ και των βαλβίδων θυρίστορ. Οι ελεγκτές αυτοί διευρύνουν τον αριθμό των διαθέσιμων τρόπων επίλυσης

των παραδοσιακών προβλημάτων, τα οποία συχνά περιορίζουν τον συντελεστή χρησιμοποίησης του δικτύου και προσφέρουν νέες δυνατότητες στις προοπτικές των μελετητών σε σχέση με τις συμβατικές λύσεις.

Μπορεί γενικά να λεχθεί ότι οι διάφορες εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν μια νέα δυναμική, που προσφέρει στις Επιχειρήσεις Ηλεκτρισμού τη δυνατότητα ανταγωνιστικού περιβάλλοντος.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kimbark E.W. – “Direct current transmission”, Vol. I, Wiley Interscience, New York, 1971.
2. Γεωργαντζής Γ.Ι. - "Τύποι διασυνδέσεων με συνεχές ρεύμα για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας", Διήμερο ΤΕΕ "Ηλεκτρονικά Ισχύος - Παραγωγή, Εφαρμογές, Εκπαίδευση", Αθήνα, Φεβρουάριος 1989.
3. Hingorani N.G. - "Power Electronic Equipment: HVDC and FACTS", Panel 2 "More Effective Networks", Paper 02, CIGRE 35th Session, Paris, France, 28 August - 1 September 1994.
4. IEEE Task Force – “Proposed terms and definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS)”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997, pp. 1848-1853.
5. Γεωργαντζής Γ. Ι. - "Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ενέργειας (FACTS) στα Ηλεκτρικά Δίκτυα", Δελτίο Π.Σ.Δ.Μ.-Η., Τεύχος 271, σελ. 52-58, Φεβρουάριος 1995.
6. Krishnayya P.C.S. - "Important Characteristics of Thyristors of Valves for HVDC Transmission and Static Var Compensators", paper 14-10, CIGRE 1984 Session, Paris, France, 29 August - 6 September 1984.
7. CIGRE WG14.01 Task Force 1 - "Voltage and Current Stresses on HVDC Valves, Electra, No 125, July 1989, pp 57-89.
8. CIGRE WG14.01 Task Force 1 - "A Review of Test Procedures for HVDC Thyristors Valves", paper 14-106, CIGRE 1990 Session, Paris, France, 26 August - 1 September 1990.
9. IEC - "Testing of semiconductor valves for high-voltage d.c. power transmission", Publication 700, 1981.
10. IEEE - "Guide for Test procedures for HVDC Thyristors Valves", ANSI/IEEE Std. 857, 1990.