



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Έλεγχος και Ευστάθεια Σ.Η.Ε

Ενότητα 6: Αποδοτικότερα δίκτυα μεταφοράς και ευέλικτα συστήματα διανομής

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και τεχνολογίας Υπολογιστών



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

- Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:
- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

- Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Άδειες χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης creative commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκεινται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Εισαγωγή

Στα περισσότερα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ η μεταφερόμενη ισχύς από τις γραμμές περιορίζεται από τη μεταβατική ευστάθεια και την ευστάθεια τάσης.

Αυτή η ισχύς όμως, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος, μπορεί να φτάνει π.χ. τα 1000-2000 MW για ασφαλή λειτουργία μιας γραμμής 500 KV, ενώ το θερμικό της όριο είναι 3000 MW.

Επομένως αποτελεί μια συνεχή πρόκληση η αύξηση αυτού του ορίου για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των γραμμών, χωρίς βέβαια να διακινδυνεύεται η ασφάλεια και ευστάθεια του ΣΗΕ.



FACTS(1)

Στα πλαίσια της αποδοτικότερης αξιοποίησης των δικτύων μεταφοράς αναπτύχθηκε περί το 1986 η ιδέα των **Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς EP** (Flexible AC Transmission Systems (FACTS)), που αξιοποιώντας την κατάλληλη τεχνολογία ελαχιστοποιούν τη διαφορά μεταξύ του θερμικού ορίου και του ορίου ευστάθειας.



FACTS(2)

Η τεχνολογία που αξιοποιούν τα FACTS βασίζεται στη χρήση:

- Αξιόπιστων, μεγάλης ταχύτητας ηλεκτρονικών διακοπών ισχύος.
- Προκεχωρημένης θεωρίας ελέγχου και σύγχρονους επεξεργαστές.
- Τεχνολογία οπτικών ινών, που επέτρεψε την αποστολή και λήψη σημάτων σε επίπεδα υψηλών τάσεων.



FACTS(3)

Σύμφωνα λοιπόν με τα προηγούμενα ορίζουμε ως **Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς EP (FACTS)**, αυτά που ενσωματώνουν στη δομή τους ελεγκτές βασισμένους σε ηλεκτρονικά ισχύος αλλά και άλλους στατικούς ελεγκτές, με στόχο την αύξηση της δυνατότητας ασφαλούς μεταφοράς ισχύος και βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου.



FACTS(4)

Τα FACTS είναι δυνατόν να επιτυγχάνουν:

- Την πλήρη αξιοποίηση του συστήματος μεταφοράς με ασφαλή φόρτιση των γραμμών κοντά στο θερμικό τους όριο.
- Πλήρη έλεγχο της ροής πραγματικής και άεργου ισχύος ώστε να ρέει στους προδιαγεγραμμένους δρόμους μεταφοράς, χωρίς βρογχοειδής ή παράλληλες ροές ισχύος.
- Μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος μεταξύ των διασυνδεδεμένων περιοχών ελέγχου, ώστε η θερμή εφεδρεία να μπορεί να ελαττωθεί στο 15% ή λιγότερο, από 18% που είναι σήμερα.
- Περιορισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης και σφαλμάτων συσκευών με αποτέλεσμα την αποτροπή αλυσιδωτών αποσυνδέσεων τμημάτων δικτύου και συσκευών.
- Απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος, που καταπονούν ή και καταστρέφουν τον εξοπλισμό και περιορίζουν την επιτρεπόμενη μεταφορά ισχύος.



FACTS(5)

Το 2000 εισήχθη από το συγγραφέα αυτού του βιβλίου η έννοια του **Ευέλικτου Συστήματος Διανομής** (Flexible Distribution System (FDS)) για να περιγράψει τα συστήματα διανομής, που χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς ελεγκτές καθιστούν τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας πιο αξιόπιστη, περισσότερο ελέγξιμη και πιο αποδοτική.



FACTS(6)

Αλλά ποιοι λόγοι επέβαλαν την ανάπτυξη ενός εκσυγχρονισμένου συστήματος διανομής;

α) Τα νέα αυτοματοποιημένα συστήματα παραγωγής και επεξεργασίας της πληροφορίας στις βιομηχανίες (π.χ. ηλεκτρονικά ισχύος για τον έλεγχο στροφών, ρομπότ, αυτόματες γραμμές παραγωγής, προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές, ηλεκτρονικοί υπολογιστές κ.λ.π.) είναι πολύ ευαίσθητα στις πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (μικρότερης του 1 sec) διακοπές παροχής ισχύος, διακυμάνσεις της τάσης ή της συχνότητας.



FACTS(7)

β) Την ανάγκη για:

1) Εκτεταμένη αξιοποίηση των διαθέσιμων τοπικών πηγών ενέργειας, μεταξύ των οποίων και οι ανανεώσιμες, αξιοποιούμενες από ανεμογεννήτριες , ηλιακά κάτοπτρα και κύτταρα και μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

2) Η σύνδεση φορτίων απομακρυσμένων από δίκτυα μεταφοράς, που όμως δεν είναι αρκετά μεγάλα για να δικαιολογήσουν οικονομικά την κατασκευή συνηθισμένων γραμμών μεταφοράς και διανομής.

3) Η τροφοδοσία μικρών νησιώτικων φορτίων.

4) Η τροφοδοσία μικρών αγροτικών φορτίων από μικρές απομακρυσμένες γεννήτριες.

γ) Την πρόκληση από την εξελισσόμενη απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη νέα εποχή των αναβαθμισμένων υπηρεσιών.



Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα FACTS(1)

- Η σύνδεση πυκνωτών εν σειρά σε γραμμές μεταφοράς μειώνει την εν σειρά επαγωγική αντίσταση της γραμμής βηματικά. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από τη γραμμή στη μόνιμη κατάσταση, άρα αυξάνεται και το όριο μεταβατικής ευστάθειας και μειώνεται η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής.



Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα FACTS(2)

- Μια συνεχή μεταβολή (αύξηση ή μείωση) της εν σειρά επαγωγικής αντίστασης της γραμμής επιτυγχάνεται με τους πυκνωτές εν σειρά ελεγχόμενους με θυρίστορ (TCSC), με αποτέλεσμα τη μείωση ή αύξηση της φόρτισης κυματικής αντίστασης (SIL). Μπορεί, επομένως, ο TCSC να τροφοδοτεί (κατά την υπερφόρτιση) ή να απορροφά (κατά την υποφόρτιση) άεργο ισχύ, να βοηθά στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος, να ελέγχει τη μεταβατική ευστάθεια, να περιορίζει τους υποσύγχρονους συντονισμούς και εφ' όσον εξασφαλιστούν οι δυνατότητες υπερφόρτισής του να διαχειρίζεται την υπερφόρτιση της γραμμής και να περιορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης.



Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα FACTS(3)

- Ο στατικός σύγχρονος σειριακός αντισταθμιστής (SSSC) που συνδυάζει και βελτιώνει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων ελεγκτών δεν έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

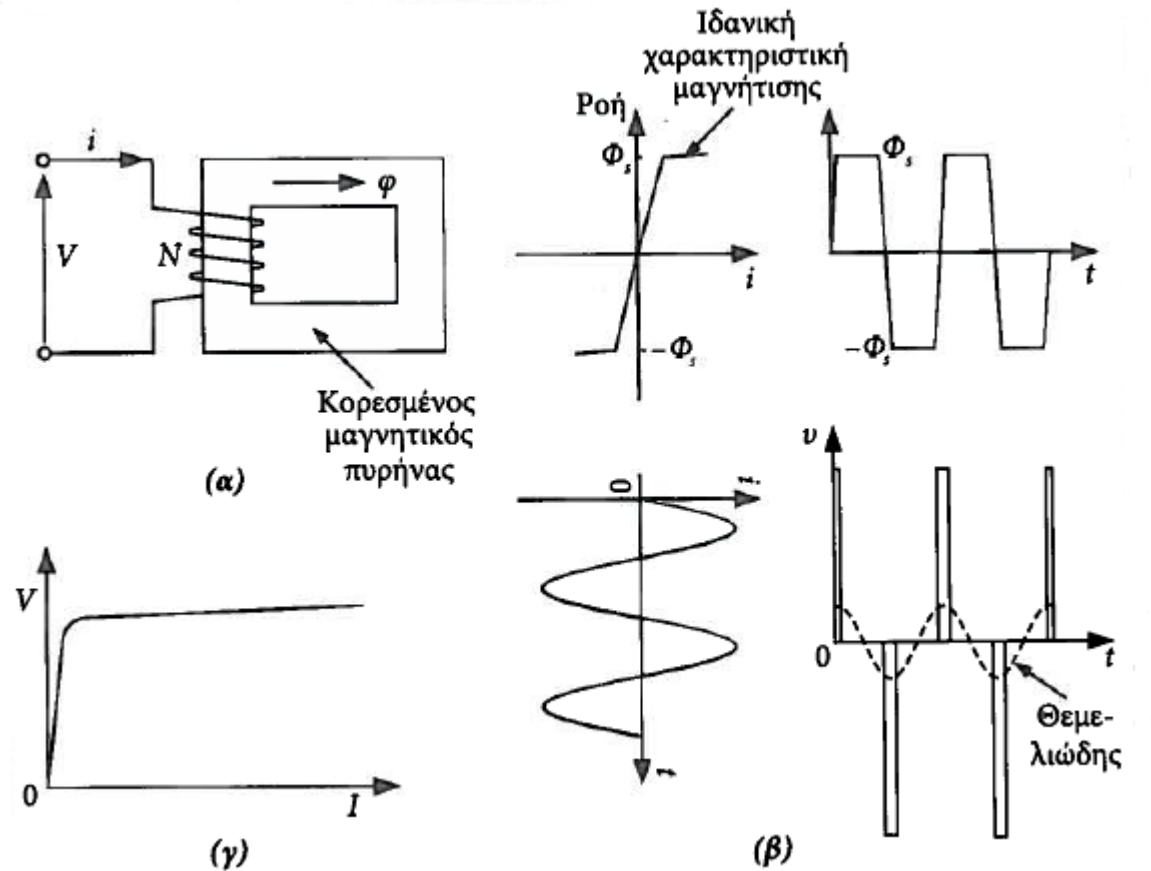


Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα FACTS(4)

- Ο **SVC** μπορεί να διατηρεί την τάση εντός των προδιαγραφών στη μόνιμη και δυναμική κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ και μπορεί μερικώς να συμβάλει στον έλεγχο της ευστάθειας, αλλά δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή πραγματικής ισχύος. Η άεργος ισχύς που αποδίδει είναι ίση με το τετράγωνο της τάσης διηρημένη με τη συνολική μιγαδική αντίσταση του **SVC**, για αυτό μειώνεται δραστικά κατά τη βύθιση της τάσης, τότε δηλαδή που ιδιαίτερα τη χρειαζόμαστε.
- Ο **στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM)**, που είναι η εξελιγμένη μορφή του **SVC**, παρέχει στο μεγαλύτερο μέρος των χαρακτηριστικών του, άεργο ισχύ που είναι ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα. Έτσι όταν βυθίζεται η τάση του, εκμεταλλευόμενος τη δυνατότητα υπερρεύματος που έχει, μπορεί να τροφοδοτεί σημαντικό ποσό άεργου ισχύος. Επί πλέον, όταν διαθέτει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με πραγματική ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα. Θα περιγράψουμε στη συνέχεια τρεις ακόμα ελεγκτές.



Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής(1)



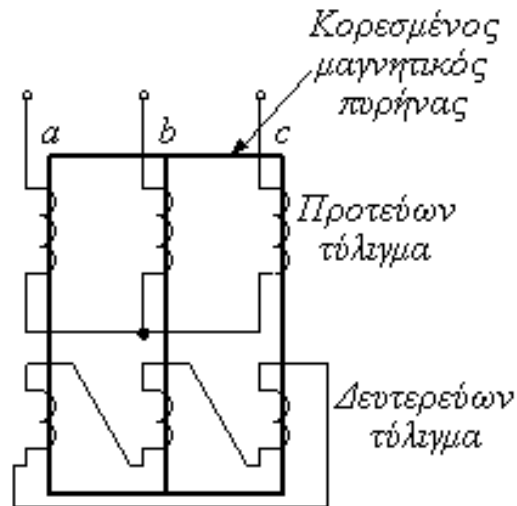
Σχηματική εξήγηση της αρχής λειτουργίας του
αντισταθμιστή κορεσμένης επαγωγής





Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής(2)

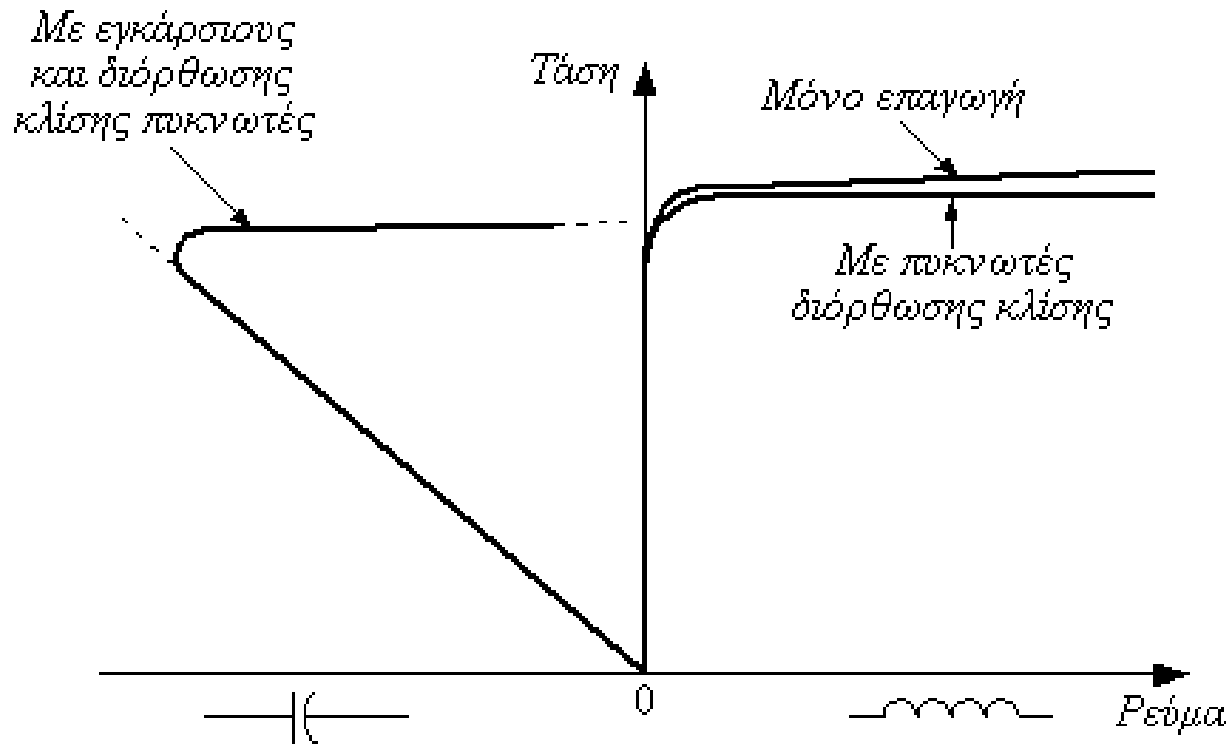
- Επειδή η τάση έχει πολλές αρμονικές, για την αποκοπή του μεγαλύτερου μέρους των αρμονικών που είναι πολλαπλάσιες της τρίτης, χρησιμοποιείται ένα δευτερεύον τύλιγμα συνδεδεμένο σε τρίγωνο.



- Ο αντισταθμιστής που προκύπτει δεν έχει αρμονικές μικρότερες της 5^{ης} και 7^{ης}, αλλά και αυτές οι αρμονικές μπορούν να αποκοπούν εισάγοντας μιας κατάλληλης τιμής επαγωγή στο δευτερεύον τύλιγμα.
- Η κλίση των χαρακτηριστικών του τάσης/ρεύματος είναι μεταξύ 5% και 15%, αλλά μπορεί να γίνει μικρότερη ή και αρνητική με τη σύνδεση ενός πυκνωτή εν σειρά με την κορεσμένη επαγωγή.

Αντισταθμιστής κορεσμένης επαγωγής(3)

- Με τη σύνδεση και εγκάρσιων πυκνωτών (που μπορούν να σχεδιαστούν και ως φίλτρα αν χρειάζεται), επεκτείνουμε τα χαρακτηριστικά του και στη χωρητική περιοχή

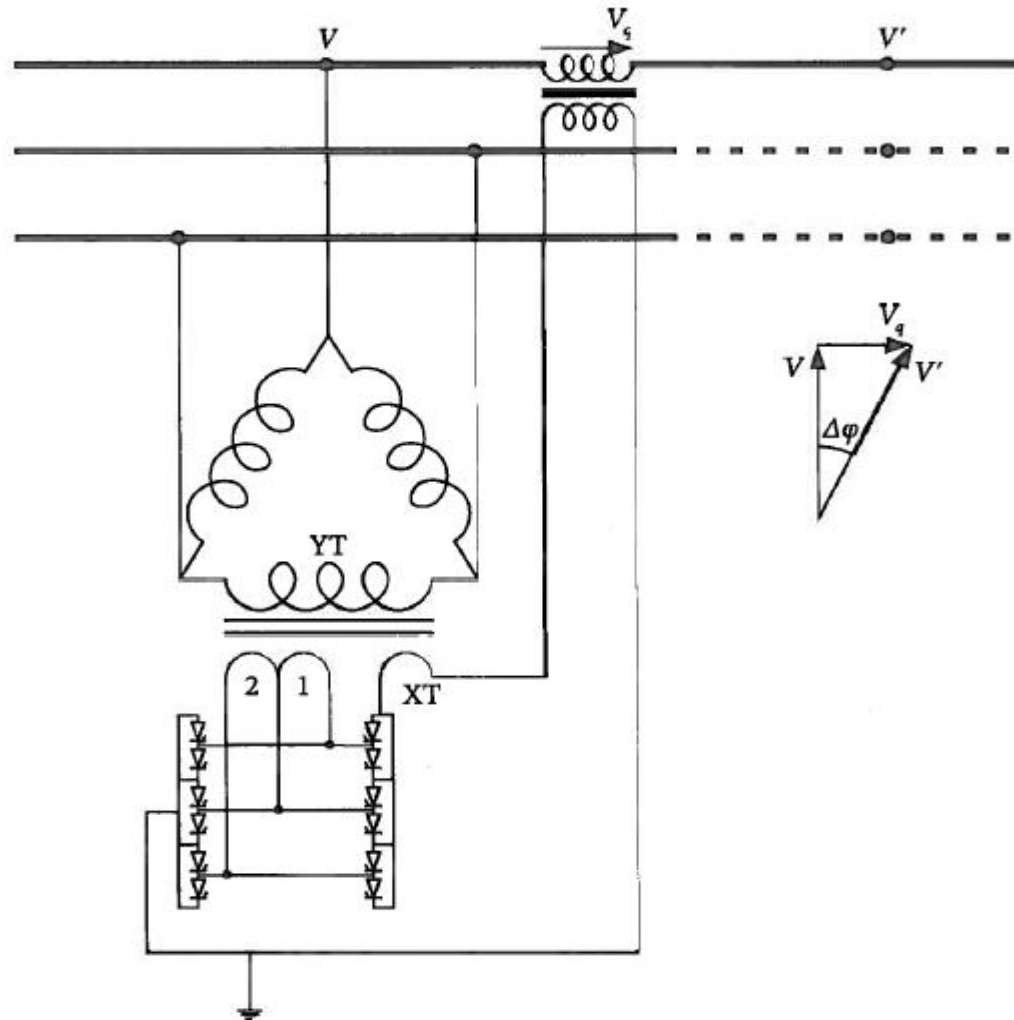


Ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας(1)

- Ο ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής φασικής γωνίας (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR)) βρίσκεται υπό θεωρητική και πειραματική διερεύνηση, για αυτό έχουν προταθεί και διαφορετικές μορφές του.
- Ο τρόπος δράσης του στηρίζεται στη γρήγορη εισαγωγή μιας τάσης εν σειρά με την τάση στο ένα άκρο της γραμμής, ώστε να ελέγχουμε τη ροή ισχύος στη γραμμή.
- Παρόλο που έχουν προταθεί και κυκλώματα με ρύθμιση και του μέτρου και της φασικής γωνίας της εισαγόμενης τάσης, τα κυκλώματα με ρύθμιση μόνο του μέτρου και φασική γωνία 90° έχουν επικρατήσει λόγω της απλότητάς τους.



Ελεγχόμενος με θυρίστορ ρυθμιστής



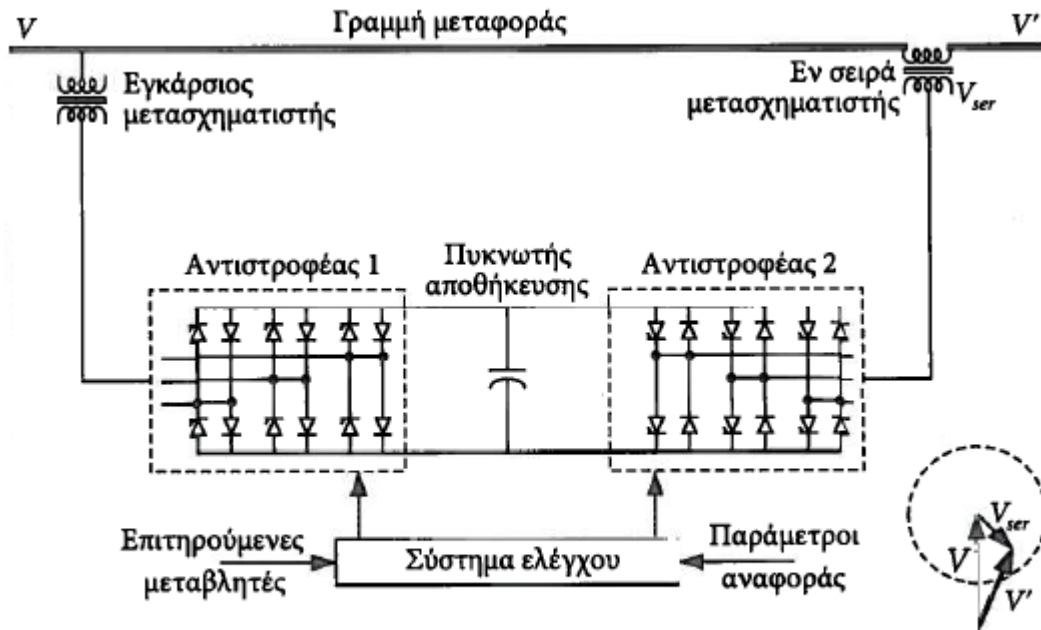
- Επειδή ο TCPAR δεν παράγει άεργο ισχύ, όλη η άεργος ισχύς που εισάγεται στη γραμμή ως αποτέλεσμα της φασικής στροφής της τάσης απορροφάται από το ζυγό.

Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος(1)

- Η πλέον σύνθετη και εξελιγμένη μορφή ελεγκτού για FACTS είναι ο **ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (Unified Power Flow Controller (UPFC))**, που συγκεντρώνει αθροιστικά όλες τις λειτουργικές δυνατότητες όλων των άλλων ελεγκτών (για αυτό ονομάστηκε «ενοποιημένος»).
- Αποτελείται από δύο αντιστροφείς πηγής τάσης, που συνδέονται στη γραμμή μέσω μετασχηματιστών ο ένας εγκάρσια και ο άλλος εν σειρά, ενώ στα σημεία της μεταξύ τους σύνδεσης υπάρχει ένας πυκνωτής.
- Μπορεί να εισάγει εγκάρσια και εν σειρά τάση στη γραμμή, ώστε να ελέγχει τη ροή ισχύος της. Δρα ως ιδανικός μετατροπέας ισχύος EP σε EP, στον οποίο η πραγματική ισχύς μπορεί να ρέει ελεύθερα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.



Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος(2)



Ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος (UPFC).

- Η τάση V_{ser} που εισάγει ο εν σειρά αντιστροφέας ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο και ως προς το μέτρο και ως προς τη φασική γωνία. Έτσι είναι δυνατός ο έλεγχος και των τριών παραμέτρων που καθορίζουν τη ροή ισχύος στη γραμμή, δηλαδή του μέτρου και της γωνίας της τάσης γραμμής καθώς και της σύνθετης αντίστασής της.



Διαταραχές που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος(1)

- Οι στατικοί ηλεκτρονικοί ελεγκτές εισήχθησαν στα συστήματα διανομής για να μπορούν οι ηλεκτρικές εταιρείες να προσφέρουν αναβαθμισμένης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ, σύμφωνα με τις σημερινές απαιτήσεις των ευαίσθητων φορτίων.
- Αναβάθμιση σημαίνει εξουδετέρωση (κατά το δυνατόν) όλων των προβλημάτων, που σχετίζονται με την αξιοπιστία της τροφοδοσίας και την ποιότητα της κυματομορφής της τάσης.
- Η αξιοπιστία της τροφοδοσίας σχετίζεται με τις διακοπές της, μικρής ή μεγάλης διάρκειας, ενώ διαταραχές της τάσης είναι όλες οι παραμορφώσεις της κυματομορφής της.
- Η είσοδος στις βιομηχανίες και τις υπηρεσίες της ευαίσθητης στις διαταραχές της τάσης σύγχρονης τεχνολογίας, τροποποίησε την άποψη για γα το πώς ορίζεται η ποιότητα της τροφοδοτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η άποψη ότι, όταν το άθροισμα όλων των χρονικών διαστημάτων των διακοπών τροφοδοσίας σε ένα έτος δεν ξεπερνά τις λίγες ώρες, αυτό προσδιορίζει μια πολύ αξιόπιστη τροφοδοσία δεν είναι παραδεκτή πλέον.
- Ο αριθμός των διακοπών και των βυθίσεων τάσης μαζί με τη διάρκειά τους και το μέγεθος των βυθίσεων έχουν μεγάλη σημασία.

Διαταραχές που επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος(2)

Τύπος διαταραχής	Πιθανές αιτίες πρόκλησης	Επιπτώσεις
Βύθισμα τάσης (Voltage dip or sag)	 <ul style="list-style-type: none"> Επιτυχή εκκαθάριση βραχυκυκλωμάτων, που προεκλήθησαν από κεραυνούς, υπερπήδηση μονωτήρων κ.λ.π. Εκκίνηση μεγάλων κινητήρων 	<ul style="list-style-type: none"> Διακοπή λειτουργίας εξοπλισμού, ιδιαίτερα ηλεκτρονικών συσκευών
Υπέρταση (Overvoltage or swell)	 <ul style="list-style-type: none"> Βραχυκύκλωμα σε άλλη φάση Πτώση κεραυνού στο δίκτυο Λανθασμένη ρύθμιση σε υποσταθμό (διατηρούμενη υπέρταση) 	<ul style="list-style-type: none"> Πιθανή ζημιά εξοπλισμού με ανεπαρκείς ανοχές σχεδίασης
Παραμόρφωση αρμονικών (Harmonics distorsion)	 <ul style="list-style-type: none"> Μη γραμμικά φορτία Συντονισμοί Κορεσμός μετασχηματιστή 	<ul style="list-style-type: none"> Επιπρόσθετη θέρμανση μηχανών Διαταραχή στη λειτουργία ηλεκτρονικού εξοπλισμού
Αναλαμπές ή διακυμάνσεις (Flicker or fluctuations)	 <ul style="list-style-type: none"> Εκκίνηση μεγάλων κινητήρων Κάμινοι ηλεκτρικού τόξου Επαναλαμβανόμενα μεγάλα φορτία (π.χ. συγκόλληση ηλεκτρικού τόξου) 	<ul style="list-style-type: none"> Εξασθένιση εξοπλισμού Δυσλειτουργίες
Μεταβατικές υπερτάσεις (Transient overvoltages or impulse)	 <ul style="list-style-type: none"> Πτώση κεραυνού Διακοπτική λειτουργία 	<ul style="list-style-type: none"> Διάσπαση μόνωσης Μείωση χρόνου ζωής μετασχηματιστών, κινητήρων, κ.λ.π.
Διακοπή (Interruption or outage)	 <ul style="list-style-type: none"> Κοντινά βραχυκυκλώματα Εσφαλμένη διακοπτική λειτουργία Αυτόματη απόρριψη φορτίων 	<ul style="list-style-type: none"> Διακοπή λειτουργίας εξοπλισμού
Ανισορροπία φάσης (Phase unbalance)	 <ul style="list-style-type: none"> Μονοφασικά φορτία 	<ul style="list-style-type: none"> Υπερθέρμανση μηχανών
Μεταβολή συχνότητας (Frequency variation)	 <ul style="list-style-type: none"> Υπερφόρτιση ή υποφόρτιση του ΣΗΕ 	<ul style="list-style-type: none"> Επίδραση στη λειτουργία όλων των συσκευών, που επηρεάζονται από τη συχνότητα.



Εξοπλισμός για τη δημιουργία ευέλικτων συστημάτων διανομής(1)

- Αρκετά χρόνια πριν, αλλά και σήμερα, καταναλωτές με ευαίσθητα φορτία εγκαθιστούν τοπικό εξοπλισμό για την αντιμετώπιση των διαταραχών της τάσης.
- Αυτές όμως οι λύσεις έχουν υψηλό κόστος αγοράς (μερικές εκατοντάδες δολάρια/KW), είναι αναποτελεσματικές και έχουν υψηλές απώλειες (σε μερικές περιπτώσεις φτάνουν το 20%).
- Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων γίνεται με λογικό κόστος από τον εξοπλισμό για τη δημιουργία των ευέλικτων συστημάτων διανομής (FDS), που είναι μια κεντρική λύση.
- Το μέγεθος ισχύος που διαχειρίζονται τους επιτρέπει τη χρήση σχεδόν όλων των διαθέσιμων διακοπτικών ηλεκτρονικών στοιχείων, άρα έχουν δυνατότητες για βέλτιστη σχεδίαση (σε απόδοση και κόστος), ενώ η ανάγκη για κάλυψη του πραγματικού φορτίου για μικρό χρονικό διάστημα τους επιβάλλει τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (πυκνωτές, μπαταρίες, υπεραγωγία πηνία και σφονδύλους υπεραγωγίσιμης έδρασης).
- Το κόστος αυτού του εξοπλισμού πρέπει να κατανεμηθεί μεταξύ των ηλεκτρικών εταιριών και των καταναλωτών (ανάλογα με τις ανάγκες τους), αλλά η χρήση του είναι απαραίτητη.

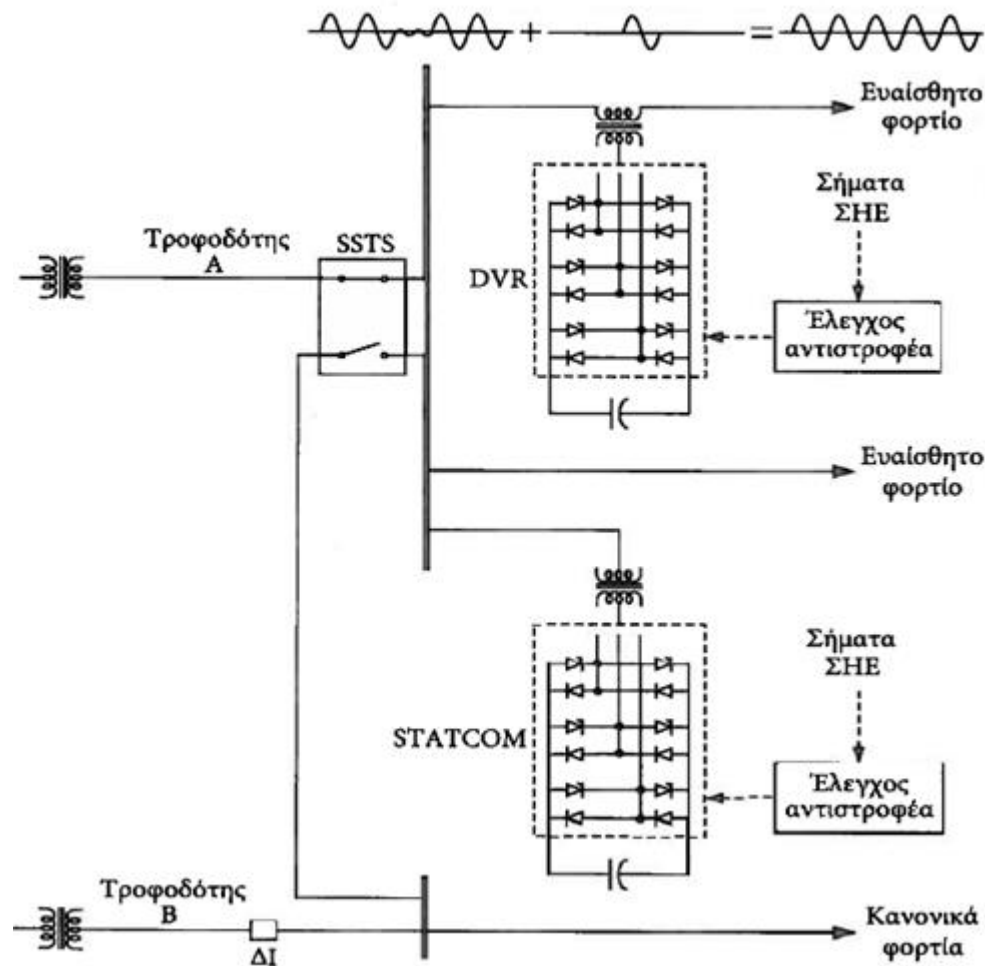


Εξοπλισμός για τη δημιουργία ευέλικτων συστημάτων διανομής(2)

- Σκοπός των ελεγκτών είναι να εξασφαλίσουν ότι ευαίσθητα φορτία θα αντιλαμβάνονται διακοπές ή διαταραχές της τάσης για χρονικό διάστημα μικρότερο π.χ. του ενός κύκλου (πολύ μικρότεροι χρόνοι επιτυγχάνονται με ορισμένους ελεγκτές).
- Οι διαταραχές αυτές είναι συχνές στα φορτία, επειδή οποιοδήποτε βραχυκύκλωμα και λειτουργία των διακοπών με επανακλείσιμο γίνονται αντιληπτά σε μεγάλη έκταση στο σύστημα διανομής.



Εξοπλισμός για τη δημιουργία ευέλικτων συστημάτων διανομής(3)



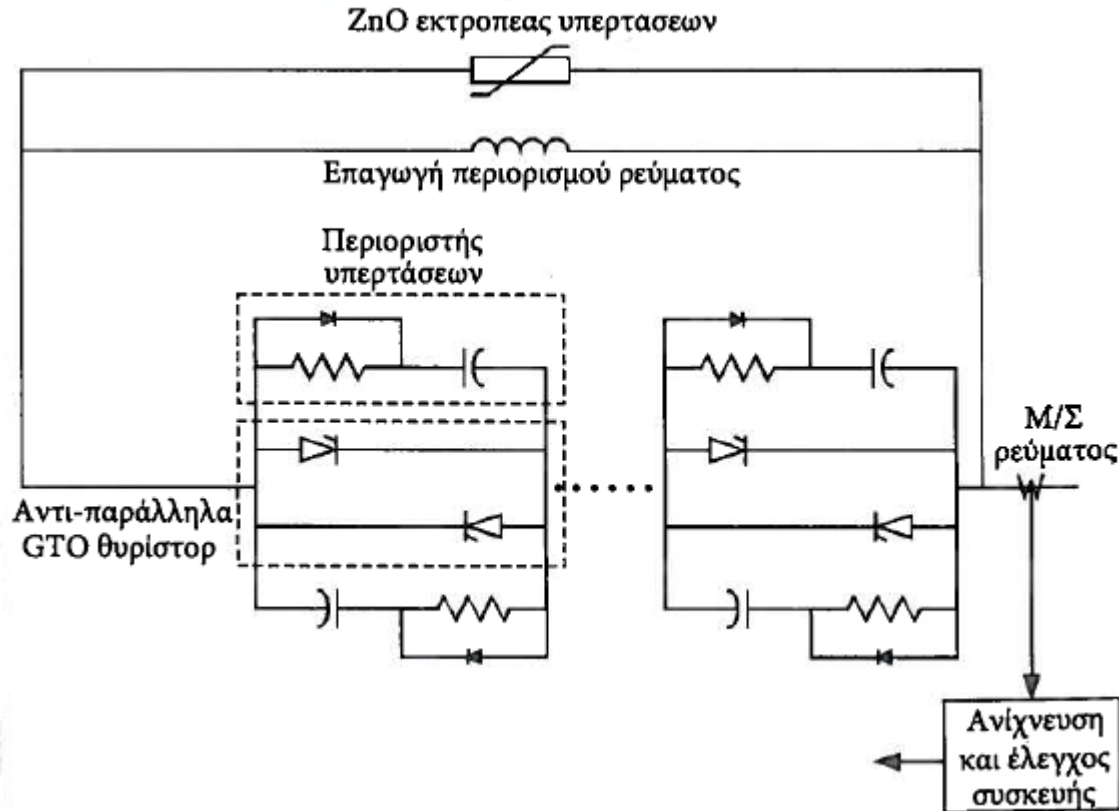
Τοποθέτηση ελεγκτών για τη διασφάλιση ευαίσθητων φορτίων από διακοπές της τάσης.

Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης(1)

- Για τον περιορισμό των προβλημάτων που προκαλούν τα βραχυκυκλώματα αναπτύχθηκε ένας αριθμός ελεγκτών με διακοπτικά στοιχεία ισχύος στερεάς κατάστασης.
- Μεταξύ αυτών είναι ο περιοριστής ρεύματος βραχυκύκλωσης, που ελαττώνει το μέγεθος του ρεύματος βραχυκύκλωσης (κοντά στο μέγιστο ρεύμα φορτίου) και επομένως προστατεύει τις βραχυκυκλωμένες συσκευές, αλλά περιορίζει και το βύθισμα τάσης στο υπόλοιπο δίκτυο διανομής.
- Επίσης αναπτύχθηκαν ταχύτατοι διακόπτες ισχύος στερεάς κατάστασης και διακόπτες μεταφοράς στερεάς κατάστασης (με χρόνο λειτουργίας ≈ 10 ms) για την ταχύτατη μεταφορά του φορτίου από το βραχυκυκλωμένο τροφοδότη σε άλλον ανεξάρτητο, υγιή τροφοδότη.



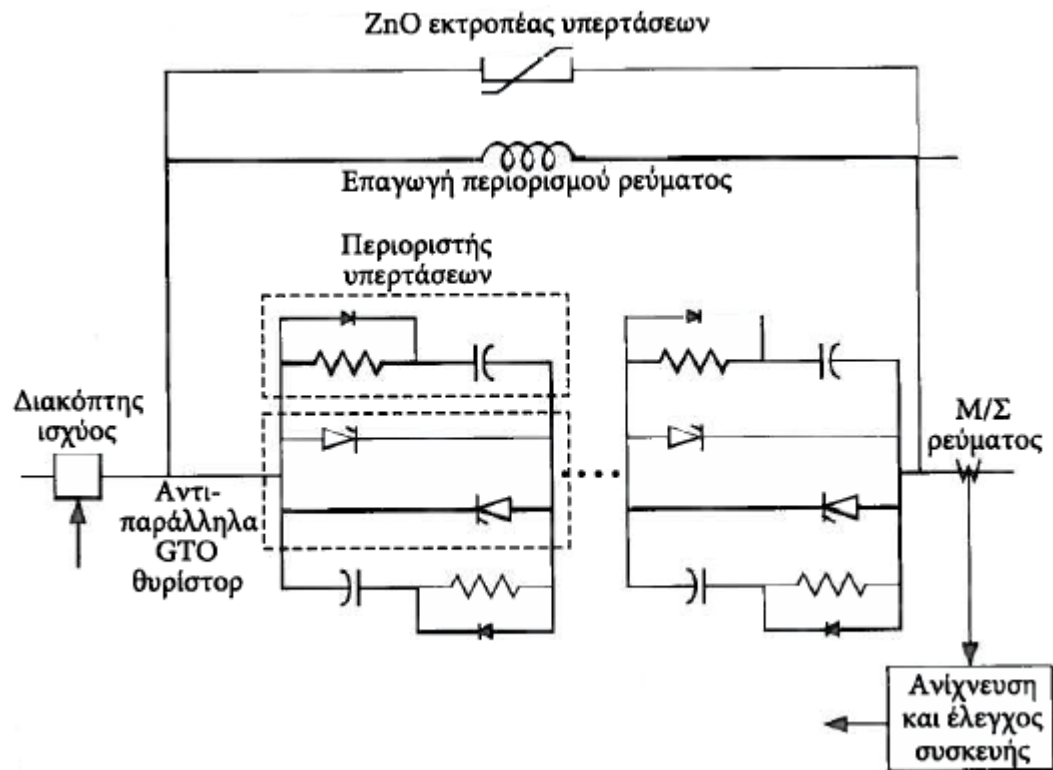
Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης(2)



Περιοριστής ρεύματος στερεάς κατάστασης (SSCL) με GTO θυρίστορ.

- Ο ανιχνευτής βραχυκυκλωμάτων παρακολουθεί το στιγμιαίο μέτρο του ρεύματος και το ρυθμό αύξησής του ($\frac{di}{dt}$), ώστε η ανίχνευση του βραχυκυκλώματος να επιτυγχάνεται πριν το ρεύμα βραχυκύκλωσης φτάσει σε μεγάλη τιμή και να διακρίνεται από τα ρεύματα εισροής (inrush).

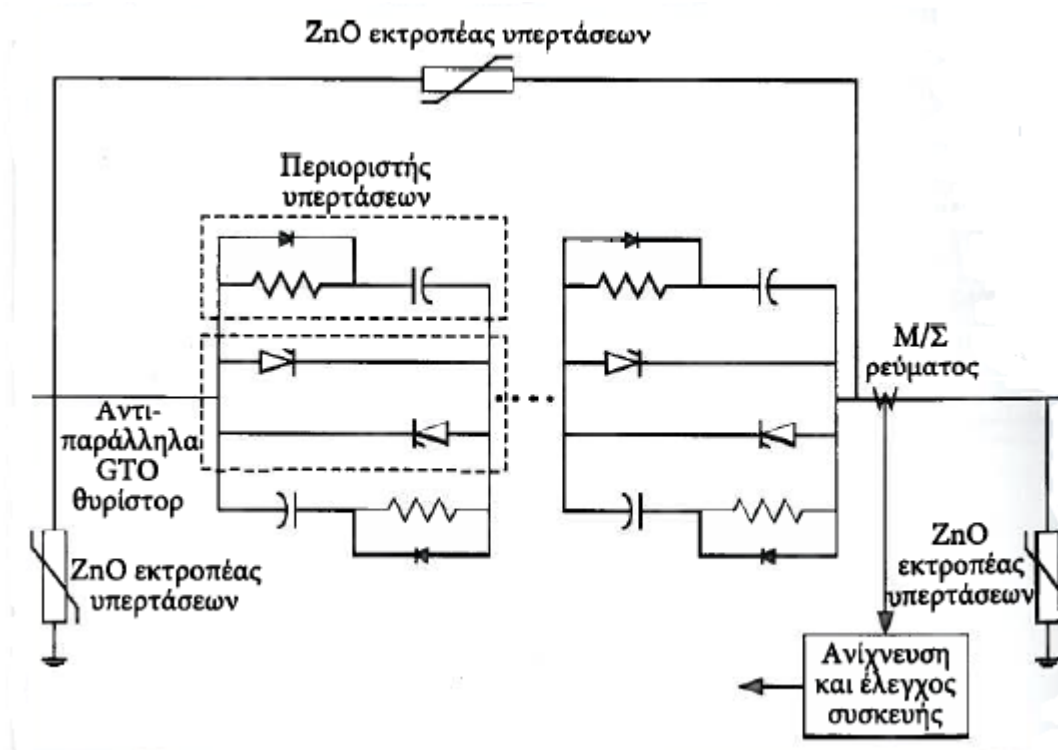
Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης(3)



Διακόπτης με περιορισμό ρεύματος στερεάς κατάστασης.



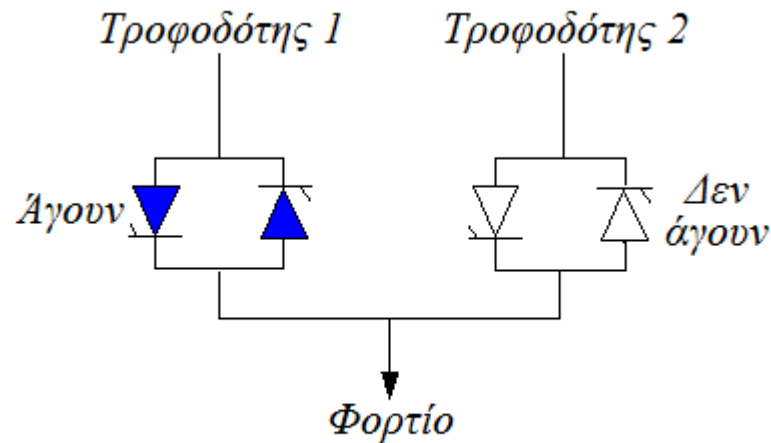
Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης(4)



Διακόπτης στερεάς κατάστασης.



Διακοπτικός εξοπλισμός στερεάς κατάστασης(5)



Διακόπτης μεταφοράς στερεάς κατάστασης με θυρίστορ.

- Ο χρόνος λειτουργίας του πληροί τις προδιαγραφές IEEE 446 ή ITIC (Information Technology Industry Council) και με τη χρήση του ευαίσθητα φορτία, όπως υπολογιστές και ηλεκτρονικά κινητήρια συστήματα, ξεπερνούν τις διακοπές ισχύος χωρίς δυσλειτουργίες.



Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(1)

- Οι βασικοί εγκάρσιοι ρυθμιστές που χρησιμοποιούνται στα ευέλικτα συστήματα διανομής είναι ο **στατικός αντισταθμιστής var (SVC)** και ο **στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM)**.
- Στην ουσία ο **SVC** είναι μια μεταβλητή μιγαδική αντίσταση, που υλοποιείται με τον έλεγχο του ρεύματος στους πυκνωτές και στα πηνία μέσω των θυρίστορ.
- Ο **SVC** περιλαμβάνει μερικές ογκώδεις συσκευές (μετασχηματιστή, πυκνωτές, επαγωγές, βαλβίδες θυρίστορ και πεδία ζεύξης) και καταλαμβάνει σημαντικό χώρο.
- Ένας μικρού μεγέθους (250-1750 Kvar), με δυνατότητα τοποθέτησης σε ένα στύλο διανομής και σύνδεσης στο δίκτυο χωρίς μετασχηματιστή, χαμηλού κόστους SVC κατασκευάζεται στις ΗΠΑ.
- Αντισταθμίζει διαταραχές τάσης (όχι διακοπές), που διαρκούν λίγους κύκλους και διορθώνει το συντελεστή ισχύος σε μεγάλου μήκους, υπερφορτωμένες γραμμές διανομής, που υπάρχουν σε πολλές επαρχιακές περιοχές.

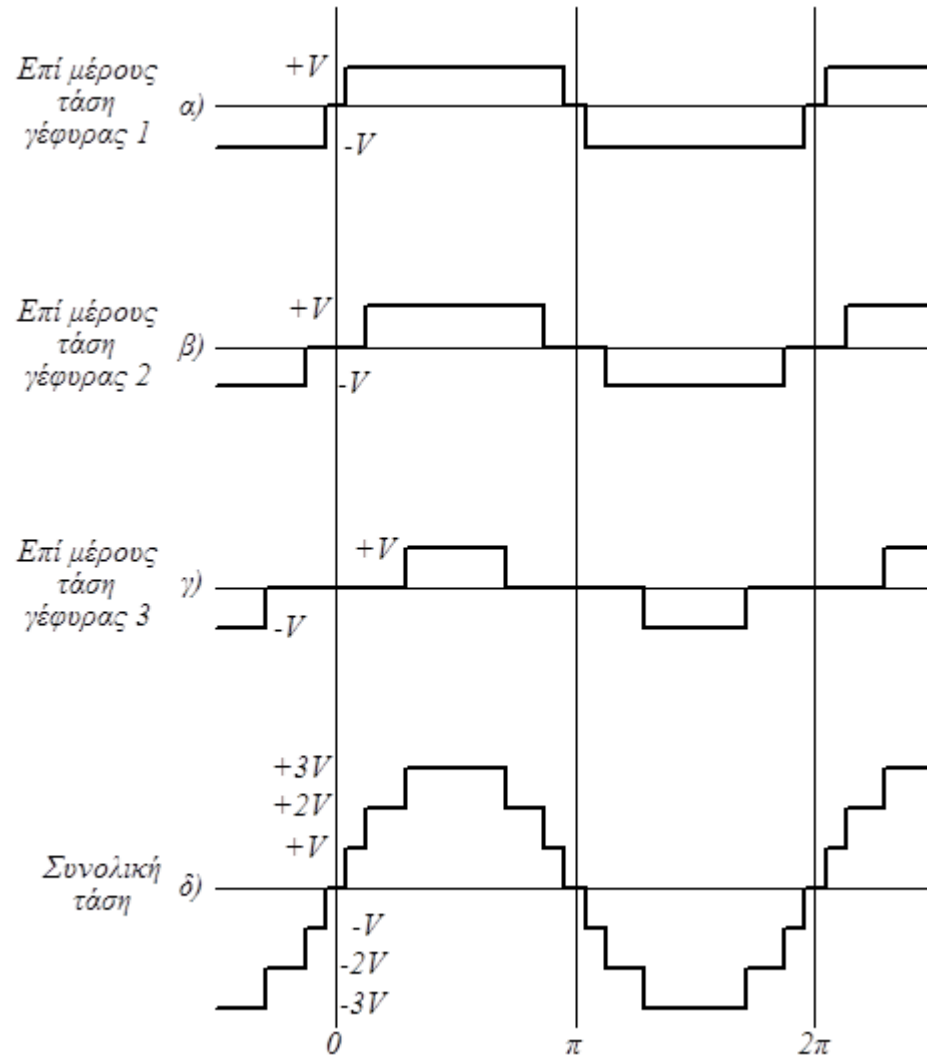


Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(2)

- Ο **STATCOM** ανταλλάσσει άεργο ισχύ με το ΣΗΕ μεταβάλλοντας το μέτρο της τάσης ΕΡ, που παράγει στην έξοδό του μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης και ενός πυκνωτή.
- Η τάση αυτή είναι συμφασική με την τάση του ΣΗΕ και εισάγεται σε αυτό μέσω μιας μικρής επαγωγής (που μπορεί να παρέχεται από ένα μετασχηματιστή σύνδεσης).
- Αν το μέτρο της τάσης του είναι μεγαλύτερο από το μέτρο της τάσης του ΣΗΕ, τότε μέσω της επαγωγής σύζευξης τροφοδοτεί ρεύμα στο ΣΗΕ και παράγει άεργο ισχύ, ενώ όταν η τάση είναι μικρότερη απορροφά άεργο ισχύ.
- Σε σύγκριση με το **SVC** καταλαμβάνει μικρότερο χώρο, είναι ταχύτερος, μπορεί να απαλείφει τις αρμονικές και να παρέχει αντιστάθμιση σε χαμηλές τάσεις δικτύου.



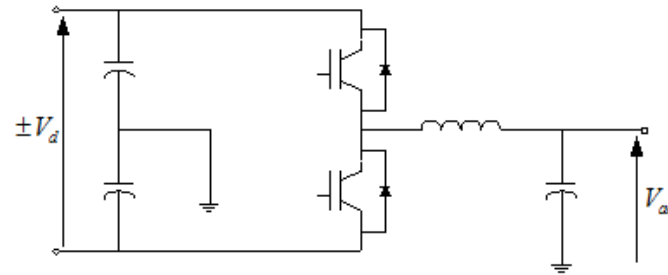
Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(3)



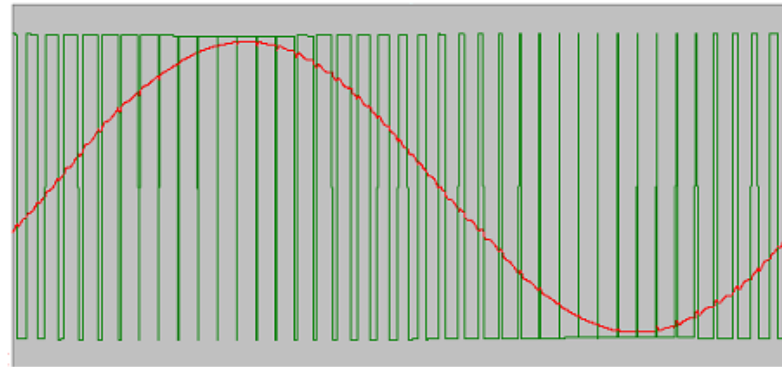
Δημιουργία τάσης εξόδου αντιστροφέα πηγής τάσης 7 επιπέδων.



Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(4)



(α)



(β)

α) Μια φάση ενός VSC που χρησιμοποιεί PWM

β) Τάση εξόδου και η θεμελιώδης συχνότητά της για το κύκλωμα του Σχ.9.13α.



Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(5)

- Με τη μέθοδο **PWM** είναι δυνατόν να παράγουμε οποιαδήποτε φασική γωνία και μέτρο της τάσης (εντός κάποιων ορίων) σχεδόν στιγμιαία.
- Συνεπώς υπάρχει δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της πραγματικής και αέργου ισχύος του αντιστροφέα.
- Η επίτευξη των πολυσύνθετων χαρακτηριστικών ενός **STATCOM** (αλλά και των υπολοίπων ελεγκτών στα **FACTS** και τα **FDS**) έγινε δυνατή με την ανάπτυξη προκεχωρημένων ψηφιακών συστημάτων ελέγχου, που χρησιμοποιούν ταχύτατους μικροεπεξεργαστές, ψηφιακή επεξεργασία σημάτων, συσκευές **VLSI** και μεταφορά πληροφορίας με οπτικές ίνες.



Εγκάρσιοι και σειριακοί αντισταθμιστές(6)

- Συνδεδεμένος εν σειρά ο **DVR** αντισταθμίζει όλες τις διαταραχές της τάσης ανταλλάσσοντας πραγματική και άεργο ισχύ με τον τροφοδότη.
- Υπάρχουν διαθέσιμοι **DVR** από 2-10 MVA για χαμηλή και μέση τάση και εγκατάσταση εσωτερική, εξωτερική ή και μεταφερόμενη.
- Ο πρώτος **DVR** εγκαταστάθηκε το 1996 και ακολούθησαν άλλοι πέντε μέχρι το 1997, με αποθηκευμένη ενέργεια σε πυκνωτές ή μπαταρίες από 0.6 έως 20 MWs.



Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές(1)

- Η ανάπτυξη και διάδοση ελεγκτών για **FACTS** και **FDS** εξαρτάται άμεσα από την ανάπτυξη ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων ισχύος με δυνατότητες ελέγχου του χρόνου έναυσης και σβέσης τους με συχνότητα στην περιοχή μερικών KHz, αύξησης της ισχύος που μπορούν να χειριστούν, αύξησης της θερμοκρασίας λειτουργίας τους και μείωση των απωλειών τους.
- Η βελτίωση αυτών των χαρακτηριστικών ελαττώνει, επίσης, το κόστος των ελεγκτών, που σήμερα είναι λιγότερο του 20% του κόστους των ελεγκτών του 1960.
- Η σημερινή τάση είναι να εφαρμοστεί η μέθοδος **PWM** σε όλους τους αντιστροφείς πηγής τάσης (**VSI**), επειδή τους απαλλάσσει από μεγάλο μέρος των αρμονικών και ελαχιστοποιεί τον όγκο και το κόστος του αντιστροφέα.



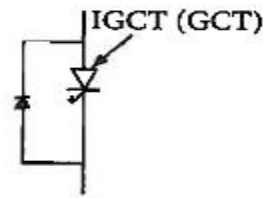
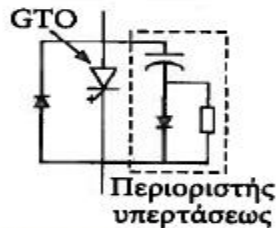
Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές(2)

- Σήμερα μόνο τα *διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT))* εργάζονται πρακτικά στην περιοχή των 5 KHz. Τα **IGBT** είναι συσκευές **MOS**, που χρειάζονται λίγη ισχύ για τον έλεγχό τους, αλλά έχουν μικρή διακοπτική ικανότητα ανά στοιχείο, περίπου 9 MVA (3 KV, 3 KA).
- Για μεγαλύτερους **VSI** (ελεγκτές για **FACTS**) χρησιμοποιούνται τα **GTO** θυρίστορ με ονομαστική τάση τα 6 KV και ονομαστικό ρεύμα τα 6 KA, αλλά πρακτική συχνότητα λειτουργίας τα 0.5 KHz και μεγάλες απώλειες λειτουργίας λόγω του κυκλώματος περιορισμού των υπερτάσεων στα άκρα τους (**Snubber**).



Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές(3)

- Το μειονέκτημα αυτό ήρθαν να καλύψουν τα *θυρίστορ με δυνατότητα μεταγωγής ολοκληρωμένης πύλης (Intergrated - Gate Commutated Thyristor (IGCT ή GCT))*, που δεν χρησιμοποιούν *Snubber* και έχουν πρακτική συχνότητα λειτουργίας 1 KHz.
- Σε αυτά κατά τη σβέση όλο το ρεύμα μεταγεται στην πύλη ελέγχου, για αυτό δεν δημιουργούν υπερτάσεις και δεν χρειάζονται τα αντίστοιχα κυκλώματα, οπότε οι απώλειές τους περιορίζονται στο 40% των απωλειών των **GTO** θυρίστορ, παρόλο που έχουν τις ίδιες δυνατότητες χειρισμού ισχύος (6KV, 6KA).



6 kV, 6 kA



6 kV, 6 kA

Ισοδύναμα κυκλώματα και εξωτερική μορφή του GTO θυρίστορ και του IGCT.

Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές(4)

- Πρόσφατα ανακοινώθηκε η κατασκευή **θυρίστορ με ενσωματωμένα στην πύλη τρανζίστορ για σβέση (MOS turn-Off Thyristor (MOT))**, που η σβέση τους πραγματοποιείται με σήμα τάσης, ενώ η έναυση με τον παραδοσιακό τρόπο εισαγωγής ρεύματος στην πύλη.
- Για μικρότερες τάσεις παρουσιάστηκε στην αγορά διακοπτικό στοιχείο με περίπου όμοια χαρακτηριστικά με τα **IGBT**, αλλά με σήμα τάσης για έναυση και σβέση. Ονομάζεται **MOS ελεγχόμενο θυρίστορ (MOS Controlled Thyristor (MCT))**.



Μελλοντικές τάσεις και προοπτικές(5)

- Τα σημερινά ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία ισχύος χρησιμοποιούν πυρίτιο (Si). Έντονη όμως έρευνα διεξάγεται για την κατασκευή τους από άλλα υλικά, όπως ανθρακούχο πυρίτιο (SiC), αζωτούχο γάλλιο (GaN) και λεπτά φύλλα αδάμαντος ώστε να αυξηθεί η ισχύς που μπορούν να χειριστούν και η συχνότητα λειτουργίας τους.
- Σημαντική προσπάθεια καταβάλλεται στην κατασκευή ενιαίων συνόλων ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων. Στο σύνολο θα περιλαμβάνεται το κύκλωμα οδηγού της πύλης, ο έλεγχος, η προστασία και οι ψύκτρες.
- Σημαντική βελτίωση στην αποτελεσματικότητα των ελεγκτών στα **FACTS** και τα **FDS** θα προκύψει από την ανάπτυξη και βελτίωση των νέων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως είναι τα υπεραγωγίμα πηνία, οι σφόνδυλοι υπεραγωγίμης έδρασης, οι εξελιγμένες μπαταρίες και οι πυκνωτές με μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας και ισχύος.



Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα είναι από το βιβλίο «Έλεγχος και Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Α. Βοβός, Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

