



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών  
& Μηχανικών Υπολογιστών

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«ΘΕΜΑ»**

**«ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ  
ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ»**

**«Flexible Alternating Current Transmission Systems  
(FACTS)»**

*ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΜΠΑΛΗΣ*

*ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ*

*7395*

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡΟΣΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2024

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία:

#### ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. \_\_\_\_\_, Υπογραφή :

2. \_\_\_\_\_, Υπογραφή :

3. \_\_\_\_\_, Υπογραφή :

#### **Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή**

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Αλέξανδρου Μπαλή που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/ δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/ δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος. Στο εισαγωγικό κεφάλαιο αναφέρονται γενικοί ορισμοί για την ηλεκτρική ενέργεια και το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης τίθεται το ζήτημα της σωστής διαχείρισης αυτής αλλά και του υπάρχοντα ηλεκτρικού δικτύου λόγω των προβλημάτων που μπορούν να προκύψουν. Αναφέρονται επίσης τα μειονεκτήματα της κατασκευής νέων γραμμών αλλά και των παραδοσιακών μεθόδων αντιστάθμισης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς δηλαδή η ωμική αντίσταση, η αυτεπαγωγή, η εγκάρσια χωρητικότητα και αγωγιμότητα αλλά και το πως επηρεάζουν αυτά τη λειτουργία των γραμμών μεταφοράς.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των σχέσεων υπολογισμού των τάσεων και των ρευμάτων στα άκρα μιας γραμμής με χρήση των ισοδυνάμων κυκλωμάτων Π και Τ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ελεγκτών των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς χωρισμένοι σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούν.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

## **ABSTRACT**

The subject of this thesis is Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). In the introductory chapter, general definitions about electricity and electrical network are mentioned. There is also the question of the proper management of this and the existing electrical network due to the problems that may arise. The disadvantages of building new transmission lines as well as traditional compensating methods are also mentioned.

In the second chapter, the characteristics of transmission lines are presented, namely resistance, inductance, transversal capacitance and conductivity, as well as how these affect the operation of transmission lines.

In the third chapter, there is an analysis of the calculation relationships of voltages and currents at the ends of a line using the equivalent circuits P and T.

In the fourth chapter, the controllers of the Flexible Transmission Systems are presented, divided into two categories according to the power electronics they use.

The fifth and last chapter presents the conclusion of this thesis.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Διαχείριση Ισχύος Στα Ηλεκτρικά Δίκτυα.....	11
1.3 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	19
2.1 Γενικά.....	20
2.2 Ωμική Αντίσταση.....	21
2.3 Αυτεπαγωγή Κυλινδρικού Αγωγού.....	22
2.3.1 Εσωτερική Αυτεπαγωγή.....	23
2.3.2 Εξωτερική Αυτεπαγωγή.....	24
2.4 Αυτεπαγωγή Μονοφασικής Γραμμής Δυο Αγωγών.....	25
2.5 Αυτεπαγωγή Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς.....	26
2.5.1 Τριφασική Γραμμή Με Τριγωνική Συμμετρία.....	27
2.5.2 Ασύμμετρη Τριφασική Γραμμή.....	29
2.5.3 Ασύμμετρη Τριφασική Γραμμή Με Αντιμετάθεση Αγωγών.....	30
2.6 Χωρητικότητα Κυλινδρικού Αγωγού.....	31
2.7 Χωρητικότητα Μονοφασικής Γραμμής Δυο Αγωγών.....	33
2.8 Χωρητικότητα Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς.....	35
2.8.1 Χωρητικότητα Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς Με Τριγωνική Συμμετρία.....	36
2.8.2 Χωρητικότητα Ασύμμετρης Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς Με Αντιμετάθεση Φάσεων.....	37

2.9 Εγκάρσια Αγωγιμότητα.....	38
2.10 Συμπεράσματα.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	40
3.1 Γενικά.....	41
3.2 Μονοφασικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Π.....	41
3.3 Μονοφασικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Τ.....	43
3.4 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους.....	44
3.5 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους.....	45
3.6 Συμπεράσματα.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ.....	48
4.1 Γενικά.....	49
4.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα Από Θυρίστορ.....	50
4.2.1 Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (SVC).....	50
4.2.2 Αντισταθμιστής Σειράς Με Πυκνωτές Ελεγχόμενους Από Θυρίστορ (TCSC).....	56
4.2.3 Ρυθμιστής Γωνίας Φάσης Ελεγχόμενος Από Θυρίστορ (SPS ή TCPAR).....	61
4.3 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα Από Μετατροπείς Ισχύος.....	65
4.3.1 Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM).....	65
4.3.2 Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής Σειράς (SSSC).....	70
4.3.3 Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC).....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

-

# **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **1.1 Γενικά**

Ένα Σύστημα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC) είναι το σύνολο των συσκευών, μηχανισμών και υλικών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια αρχικά, παράγεται σε εργοστάσια ή σταθμούς παραγωγής στους οποίους είναι εγκατεστημένες γεννήτριες οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μετατροπής από άλλη μορφή ενέργειας.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με «έρευνα του 2021» [11] είναι τα ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, ο λιγνίτης, το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, όπου η καύση τους έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ατμού σε πολύ υψηλές πιέσεις για την κίνηση ατμοστροβίλων (Ατμοηλεκτρικά Εργοστάσια).

Στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια η ίδια η δυναμική ενέργεια του νερού περιστρέφει μεγάλες τουρμπίνες οι οποίες αποτελούν ενιαίο κομμάτι των δρομέων των γεννητριών, με αποτέλεσμα την μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.

Ο αέρας, ο ήλιος, η θάλασσα και τα πυρηνικά καύσιμα είναι άλλες μορφές ενέργειας. Στα Αιολικά Πάρκα, η κινητική και η δυναμική ενέργεια του ανέμου περιστρέφει τα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Στα Φωτοβολταϊκά Πάρκα, η ενέργεια της ακτινοβολίας του ήλιου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών κυψελών. Στα Θαλάσσια Πάρκα, ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω της κινητικής ενέργειας των κυμάτων (κυματική ενέργεια). Τέλος, στα πυρηνικά εργοστάσια, η σχάση υλικών όπως το ουράνιο και το πλουτώνιο προκαλεί θερμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται στην συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω ατμού που περιστρέφει ατμοστροβίλους.





***Εικόνα 1.1: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [12]***

Για τη μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας απαραίτητη είναι η ύπαρξη υποσταθμών και η διασύνδεσή τους με τα εργοστάσια παραγωγής αλλά και τους καταναλωτές. Οι υποσταθμοί είναι απαραίτητοι ώστε η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας να γίνεται σε υψηλότερες τάσεις ώστε να μειώνονται οι απώλειες. Κατά την διανομή της στους καταναλωτές, η τάση, μέσω των υποσταθμών, μειώνεται και πάλι στα απαιτούμενα επίπεδα των καταναλωτών.

Για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται επίσης αγωγοί, οι λεγόμενες γραμμές μεταφοράς μέσω των οποίων η ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής φτάνει αρχικά στους υποσταθμούς μέσης προς υψηλής τάσης και υψηλής προς μέσης τάσης και στη συνέχεια υποβιβάζεται για τη διανομή της στους καταναλωτές. Έτσι δημιουργείται το ηλεκτρικό δίκτυο.

Ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να επεκτείνεται σε τεράστιες αποστάσεις. Στη χώρα μας η μεγαλύτερη ενεργειακή παραγωγή γίνεται στα κέντρα της Δυτικής Μακεδονίας και της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας. Αυτά τα κέντρα είναι διασυνδεδεμένα με εναέριες, υπόγειες και υποθαλάσσιες (διασύνδεση ηπειρωτικής Ελλάδας με νησιά Αιγαίου και Ιονίου) γραμμές μεταφοράς ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται σε κάθε σημείο της χώρας.

Με την πάροδο των χρόνων και την ραγδαία αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, άρχισαν να δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε να γίνεται όλο και πιο ακριβή καθώς γινόταν όλο και πιο αναγκαία. Άλλο πρόβλημα ήταν ότι σε ταυτόχρονες μεταβολές μεγάλων φορτίων το δίκτυο δεν μπορούσε να ανταποκριθεί με αποτέλεσμα να συμβαίνουν διακοπές ρεύματος σε μικρές περιοχές ή ακόμα και ολικά blackout.



**Εικόνα 1.2: Το ενιαίο διασυνδεδεμένο σύγχρονο ηλεκτρικό δίκτυο Ευρώπης και Βόρειας Αφρικής [14]**

Έτσι αναπτύχθηκε η ανάγκη ενός «σύγχρονου δικτύου ευρείας κλίμακας» [13] (Εικόνα 1.2), όπου ηλεκτρικά δίκτυα διαφόρων χωρών διασυνδέθηκαν με σκοπό την εισαγωγή-εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη μία χώρα στην άλλη, μία λύση πιο οικονομική, αλλά και την πιο εύκολη ανατροφοδότηση (backup) ηλεκτρικής ενέργειας σε κρίσιμες στιγμές.

## **1.2 Διαχείριση Ισχύος Στα Ηλεκτρικά Δίκτυα**

Τα ηλεκτρικά δίκτυα, τη σήμερον ημέρα, αποτελούνται από χιλιάδες γεννήτριες και ζυγούς μεταφοράς. Επίσης, σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένοι εκατομμύρια καταναλωτές κι αυτό ενέχει κινδύνους διαταραχών στο σύστημα. Έτσι λοιπόν είναι πολύ σημαντική η σωστή διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται αλλά και η σωστή χρήση του υπάρχοντος δικτύου καθώς η δημιουργία νέων είναι πολυδάπανη, χρονοβόρα και ασύμφορη.

Για τη σωστή λοιπόν διαχείριση, είναι πολύ σημαντικός ο έλεγχος της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Για το λόγο αυτό θα πρέπει η τάση να παραμένει σταθερή και η ροή ισχύος να τηρεί συγκεκριμένα όρια ασφαλείας και ευστάθειας.

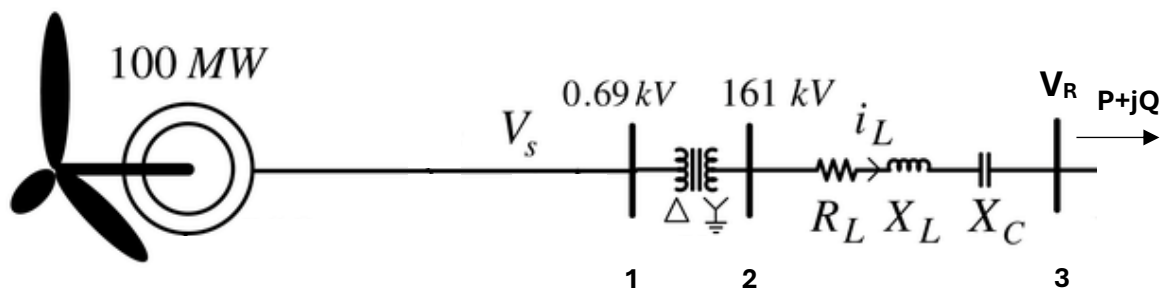
Περιπτώσεις που προκαλούν αστάθειες σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο είναι φαινόμενα όπως:

- *Διακυμάνσεις Τάσης ή Διακοπές Ισχύος* οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση του εξοπλισμού.
- *Βυθίσεις Τάσης* που προκύπτουν από την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων.
- *Υπερτάσεις/Υποτάσεις* με κίνδυνο την καταστροφή του εξοπλισμού.
- *Αρμονικές* οι οποίες προκαλούν παραμόρφωση της ημιτονοειδούς κυματομορφής και κατ' επέκταση θόρυβο και δημιουργία αέργου ισχύος.

- Φυσικά φαινόμενα όπως για παράδειγμα οι κεραυνοί με κίνδυνο την πρόκληση βραχυκυκλωμάτων.

Οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς παρουσιάζουν ωμική αντίσταση λόγω της ειδικής αντίστασης του υλικού, επαγωγική αντίδραση λόγω του φαινομένου της αυτεπαγωγής αλλά και χωρητικότητα (Κεφάλαιο 2). Έτσι, λόγω του νόμου του Ohm δημιουργείται πτώση τάσης κατά μήκος των αγωγών ( $V=IR$ ). Επομένως η τάση στο τέλος της γραμμής  $V_r$  είναι μικρότερη από την τάση στην αρχή της γραμμής  $V_s$  (**Εικόνα 1.3**). Η μείωση της τάσης όσο απομακρυνόμαστε από έναν σταθμό παραγωγής κατά μήκος μιας γραμμής ενέχει τον κίνδυνο η τάση στο φορτίο (το οποίο είναι συνδεδεμένο στην άφιξη της γραμμής), να είναι μικρότερη της ονομαστικής με αποτέλεσμα το φορτίο να μην λειτουργεί στις μέγιστες απαιτήσεις ή τη δημιουργία βλάβης του. Επειδή οι αποστάσεις ανάμεσα στους ζυγούς είναι αρκετά μεγάλες (εκατοντάδες μέτρα), μία καλή λύση είναι η τάση και η ισχύς να ελέγχονται σε κάθε ζυγό ώστε να αποφεύγονται αυτά τα προβλήματα.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται μία γραμμή μεταφοράς ανάμεσα στους ζυγούς 2 και 3. Μία γεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο ζυγό 1 και ένας μετασχηματιστής ανάμεσα στους ζυγούς 1 και 2 ο οποίος ανυψώνει την τάση  $V_s$  στην αναχώρηση της γραμμής. Στο ζυγό 3 είναι συνδεδεμένο φορτίο με ενεργό ισχύ  $P$  και άεργο ισχύ  $Q$ .



**Εικόνα 1.3: Μονογραμμικό διάγραμμα γραμμής μεταφοράς [15]**

Το ρεύμα  $I_L$  ανάμεσα στους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης (2 και 3) της γραμμής, από [9] δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_r}{\bar{Z}_L}$$

όπου  $Z_L$  είναι η εμπέδηση της γραμμής.

Η μιγαδική ισχύς δίνεται από [9] από τον τύπο:

$$\bar{S} = \bar{V}\bar{I}^* = P + jQ$$

όπου  $\bar{V}$  και  $\bar{I}^*$  είναι οι φάσορες τάσης και ρεύματος,  $P$  η ενεργός ισχύς και  $Q$  η άεργος ισχύς.

Η ενεργός και άεργος ισχύς είναι ανάλογες των μέτρων των τάσεων και αντιστρόφως ανάλογες της επαγωγικής αντίδρασης  $X_L$  της γραμμής. Οι προσεγγιστικοί τύποι που το αποδεικνύουν αυτό φαίνονται παρακάτω θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες και την χωρητικότητα της γραμμής. Έτσι από [9] έχουμε τις σχέσεις:

$$P_s = P_r = P = \frac{V_s V_r}{X_L} \sin(\delta) \quad (1)$$

$$Q_s = -Q_r = Q = \frac{V_r}{X_L} [V_s \cos(\delta) - V_r] \quad (2)$$

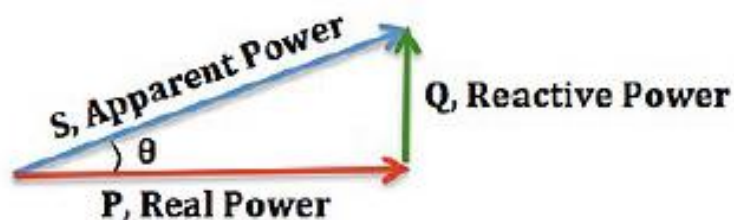
όπου  $P_s$  είναι η ενεργός ισχύς στην αναχώρηση,  $P_r$  η ενεργός ισχύς στην άφιξη,  $Q_s$  είναι η άεργος ισχύς στην αναχώρηση,  $Q_r$  η άεργος ισχύς στην άφιξη και  $\delta$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων αρχής και τέλους της γραμμής.

Ο συντελεστής ισχύος (power factor) υπολογίζεται από [21] από τον τύπο:

$$\text{pf} = \cos \theta = \frac{P}{|S|}$$

Όπου  $|S|$ , είναι το μέτρο της μιγαδικής ισχύος.

Αυτό αποδεικνύεται και γραφικά από το «τρίγωνο ισχύος» [21]



Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι πολύ σημαντικό να γίνεται όσο δυνατών μεγαλύτερη αξιοποίηση των υπάρχουσών γραμμών δηλαδή να μεταφέρεται η μέγιστη ισχύς δια μέσου αυτών διατηρώντας το δίκτυο σε μία ευστάθεια και τηρώντας τα όρια ασφαλείας και ανοχής των αγωγών και του συνολικού συστήματος. Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι μέγιστη μεταφορά ενεργού ροής ισχύος έχουμε όταν  $\delta=90^\circ$ . Οι ελεγκτές των FACTS έχουν σαν αρχή τον έλεγχο της ροής ισχύος μέσω μίας ή και περισσότερων από αυτές τις παραμέτρους.

### **1.3 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος**

Από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα που το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) επικράτησε έναντι των υπολοίπων, υπήρξε η ανάγκη για αντιστάθμιση της αέργου ροής ισχύος και βελτίωσης του συντελεστή ισχύος καθώς η χρήση των επαγωγικών φορτίων (κινητήρες) γινόταν όλο και μεγαλύτερη (αύξηση βιομηχανιών). Επίσης οι γραμμές μεταφοράς παρουσίαζαν επαγωγικό (λόγω του φαινομένου της αυτεπαγωγής) αλλά και χωρητικό χαρακτήρα (λόγω των πολύ υψηλών τάσεων μεταφοράς), παράμετροι που στη μεταφορά με DC δεν υπάρχουν.

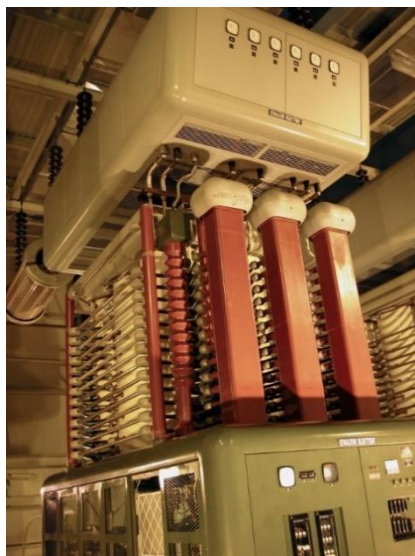
Η χρήση σύγχρονων γεννητριών στους σταθμούς παραγωγής με την εξέλιξη των ηλεκτρικών δικτύων αποδείχτηκε μη αποδοτική λύση για δίκτυα μεγάλου μήκους. Έπειτα, μέσω των παραδοσιακών μεθόδων αντιστάθμισης, σύμφωνα με τις οποίες συστοιχίες πυκνωτών ή πηνίων συνδεόντουσαν στα φορτία ώστε να απορροφούν ή να παρέχουν αντίστοιχα άεργο ισχύ από ή σε αυτά, ήταν μία λύση που επέτρεπε καλό έλεγχο μόνο σε αργές μεταβολές των φορτίων, διότι η διασύνδεση των συστοιχιών γινόταν με χρήση διακοπών, η οποία είναι μια ON/OFF διαδικασία και έχει σαν αποτέλεσμα είτε την καθόλου αντιστάθμιση είτε την αντιστάθμιση με αξιοποίηση ολόκληρης της χωρητικότητας των πυκνωτών.





**Εικόνα 1.4: «Διακόπτης ισχύος αέρα για τάσεις μικρότερες των 1000 V» [20]**

Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα με τη χρήση της «βαλβίδας τόξου υδραργύρου», «ενός ανορθωτή που μετέτρεπε το AC σε DC» [9], και σε συνδυασμό με το «High Voltage DC» [17] το οποίο εφαρμόζεται μέχρι σήμερα σε διασυνδέσεις μεγάλων αποστάσεων και δικτύων με διαφορετική συχνότητα, ο έλεγχος άρχισε να γίνεται πιο δυναμικός με αποκορύφωμα την ανακάλυψη των ημιαγωγικών στοιχείων όπως δίοδοι, θυρίστορ, τρανζίστορ κ.α. στα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα.





*Εικόνα 1.5: «Βαλβίδα τόξου υδραργύρου - Mercury-arc valve» [16]*

Επειδή τα ηλεκτρονικά ισχύος παλμοδοτούνται με συχνότητες πολύ μεγαλύτερες της συχνότητας του δικτύου, μπορούν να συνδέουν αυτές τις συστοιχίες πολύ πιο βαθμιαία και πολύ πιο άμεσα παρέχοντας με αυτό τον τρόπο πιο ευέλικτη λειτουργία στα μεταβατικά φαινόμενα και στις διαταραχές του δικτύου.

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (**FACTS**) είναι ελεγκτές οι οποίοι περιέχουν τέτοια ημιαγωγικά στοιχεία και διασυνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να ελέγχουν την άεργο ισχύ και τον συντελεστή ισχύος μέσω των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή τα μέτρα των τάσεων αναχώρησης και άφιξης, την εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς ή και την διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων στα άκρα της γραμμής (γωνία  $\delta$ ).



α)



β)

*Εικόνα 1.6: α) Θυρίστορ [18], β) τρανζίστορ [19]*

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει ανάλυση των χαρακτηριστικών και των βασικών μοντέλων ανάλυσης μιας γραμμής μεταφοράς καθώς και επεξήγηση των κατηγοριών και της λειτουργίας των συσκευών FACTS.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

-

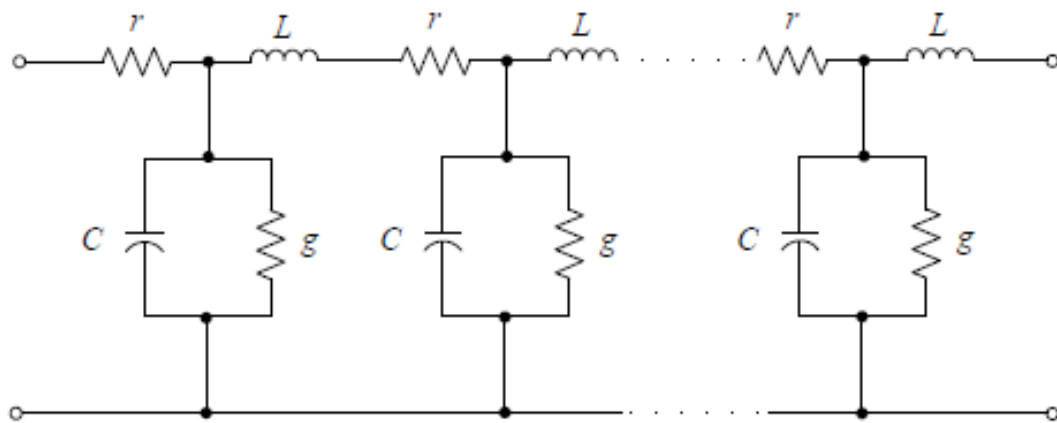
## **ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

## 2.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξηγηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς. Όπως προαναφέρθηκε, μια γραμμή μεταφοράς δεν είναι απλά ένας αγωγός μέσω του οποίου η ισχύς διατηρείται σταθερή για πάντα. Αρχικά, ένας αγωγός παρουσιάζει ωμική αντίσταση ( $R$ , σε  $\Omega/m$ ) στο ρεύμα που τον διαρρέει λόγω της ειδικής αντίστασης του υλικού κατασκευής του. Επίσης, παρουσιάζει αυτεπαγωγή ( $L$ , σε  $H/m$ ), δηλαδή όταν διαρρέεται από ρεύμα, δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει τάση στον ίδιο αντίθετη στη φορά του ρεύματος (κανόνας του Lenz). Στα τριφασικά συστήματα, τα οποία αποτελούνται από τουλάχιστον τρεις αγωγούς, το μαγνητικό πεδίο γύρω από κάθε φάση επάγει τάσεις και ρεύματα και στους διπλανούς αγωγούς κάτι το οποίο αλλάζει τη συμπεριφορά τους στο σύστημα.

Επιπλέον, δύο παράμετροι των γραμμών μεταφοράς που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο, είναι η εγκάρσια χωρητικότητα ( $C$ , σε  $F/m$ ) η οποία οφείλεται στις υψηλές τάσεις μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. 20kV, 150kV ή 400kV) και την πολύ μεγάλη διαφορά δυναμικού των αγωγών των φάσεων με τη γη. Ο τελευταίος παράγοντας είναι η εγκάρσια αγωγιμότητα ( $g$ , σε  $Mho/m$ ), η οποία είναι η διαφυγή ηλεκτρικού ρεύματος από τους αγωγούς προς τη γη λόγω διαρροής μέσω του αέρα. (Σχήμα 2.1)

Στις εναέριες γραμμές του δικτύου ηλεκτρισμού, ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται οι αγωγοί **ACSR** («**Aluminium Conductor Steel Reinforced**») [28], οι οποίοι χρησιμοποιούν ως υλικό το αλουμίνιο με πρόσμιξη αγωγών χάλυβα για περισσότερη μηχανική αντοχή.



Σχήμα 2.1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους [2]

## 2.2 Ωμική Αντίσταση

Η ωμική αντίσταση ενός αγωγού είναι ανάλογη με την πτώση τάσης κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς καθώς  $V=IR$  (νόμος του Ohm) και κατ' επέκταση καθορίζει την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην τάση αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Είναι επίσης ανάλογη του μήκους του  $l$ , της ειδικής του αντίστασης  $\rho_{\theta 1}$  και αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειάς του  $S$ . Ο τύπος υπολογισμού της από [2] είναι:

$$R_{\theta 1} = \rho_{\theta 1} \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (3)$$

Ενώ για διαφορετική θερμοκρασία από [2] δίνεται από τη σχέση:

$$R_{\theta 2} = R_{\theta 1} \cdot [1 + \alpha_{\theta 1} \cdot (\theta_2 - \theta_1)] \quad [\Omega] \quad (4)$$

όπου  $\theta_1$  η θερμοκρασία αναφοράς ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\theta_2$  η θερμοκρασία περιβάλλοντος και  $\alpha_{\theta 1}$  είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής της αντίστασης.

## 2.3 Αυτεπαγωγή Κυλινδρικού Αγωγού

*Η επαγωγική αντίδραση οφείλεται στην ύπαρξη αυτεπαγωγής στις γραμμές μεταφοράς AC, η οποία δημιουργείται λόγω των ρευμάτων που ρέουν στους αγωγούς. Η σχέση εξάρτησης της επαγωγικής αντίδρασης από την αυτεπαγωγή  $L$  είναι ανάλογη και είναι:*

$$X_L = 2\pi fL \quad (5)$$

όπου  $f$  η συχνότητα του δικτύου (50 ή 60 Hz).

Η αυτεπαγωγή  $L$  (σε  $H$ ) ενός αγωγού ορίζεται από τη σχέση μεταξύ της τάσης  $V$  (σε Volt) που επάγεται στον αγωγό και της χρονικής μεταβολής του ρεύματος που τον διαρρέει ( $\frac{dI}{dt}$ ):

$$V = -L \frac{dI}{dt} \quad (6)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η αυτεπαγωγή έχει αντίθετη φορά από την πολικότητα της τάσης.

Επίσης υπολογίζεται από [2] από τη σχέση:

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (7)$$

όπου  $\lambda$  ή  $\Phi$ , η πεπλεγμένη ή μαγνητική ροή (σε  $Wb-t$ ) και  $I$  το ρεύμα (σε  $A$ ).

Γενικά, για έναν κυλινδρικό αγωγό μήκους  $l$ , ακτίνας  $r$  και διαπερατότητα περιβάλλοντος  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , με  $\mu_0$  τη διαπερατότητα του κενού ( $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ ) και  $\mu_r$  τη σχετική διαπερατότητα του υλικού, η αυτεπαγωγή εξαρτάται από τη γεωμετρία του αγωγού και την κατανομή του ρεύματος.

Η αυτεπαγωγή ανά μονάδα μήκους  $L'$  προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{l}{r}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (8)$$

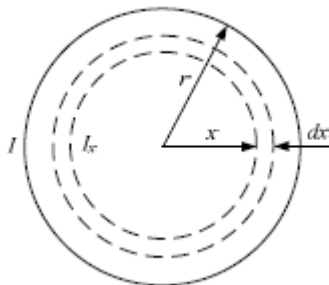
### 2.3.1 Εσωτερική Αυτεπαγωγή

Η εσωτερική αυτεπαγωγή σχετίζεται με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μέσα στον ίδιο τον αγωγό. Δημιουργείται λόγω του ότι το ρεύμα, όταν ρέει σε έναν αγωγό, δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο σε όλο τον όγκο του. Η μαγνητική ροή σε αυτή την περίπτωση δίνεται από [2] από τη σχέση:

$$\lambda_{int} = \frac{\mu_0 \cdot I}{8 \cdot \pi} \quad (9)$$

και σύμφωνα με τη σχέση (7), η εσωτερική αυτεπαγωγή  $L_{int}$  από [2] είναι:

$$L_{int} = \frac{\mu_0}{8 \cdot \pi} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (10)$$



Σχήμα 2.2: Μαγνητική ροή στο εσωτερικό ενός κυλινδρικού αγωγού ακτίνας  $r$  [2]

### 2.3.2 Εξωτερική Αυτεπαγωγή

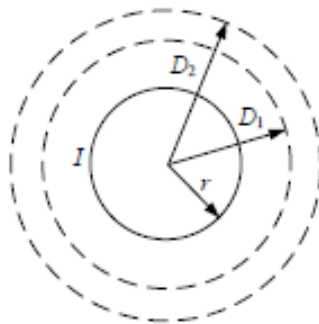
Η εξωτερική αυτεπαγωγή αφορά το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από τον αγωγό, εξωτερικά δηλαδή από την επιφάνειά του. Είναι στην ουσία το μαγνητικό πεδίο των ενδεχόμενων διπλανών αγωγών το οποίο επιδρά στην αυτεπαγωγή του ίδιου. Η μαγνητική ροή σε αυτή την περίπτωση δίνεται από [2] από τη σχέση:

$$\lambda_{ext} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (11)$$

και σύμφωνα με τη σχέση (7), η εξωτερική αυτεπαγωγή  $L_{ext}$  μεταξύ δύο εξωτερικών σημείων του αγωγού από [2] από τη σχέση:

$$L_{ext} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (12)$$

όπου  $D_1$  και  $D_2$  οι αποστάσεις των δύο εξωτερικών σημείων από το κέντρο του αγωγού αντίστοιχα. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.3: Μαγνητική ροή στο εξωτερικό ενός κυλινδρικού αγωγού ακτίνας  $r$  [2]



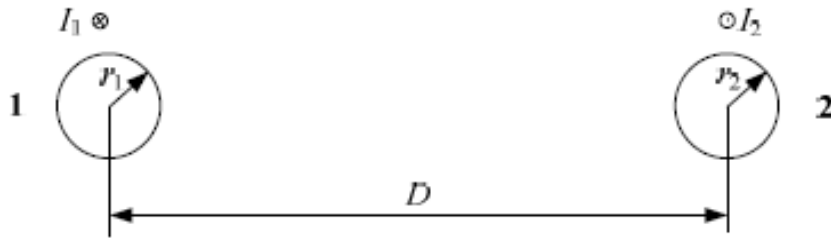
Επομένως, η συνολική αυτεπαγωγή ενός κυλινδρικού αγωγού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{total} = L_{int} + L_{ext} \quad (13)$$

και αντικαθιστώντας τις σχέσεις (10) & (12) σε αυτήν έχουμε:

$$L_{total} = \frac{\mu_0}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \quad [\text{H/m}] \quad (14)$$

## 2.4 Αυτεπαγωγή Μονοφασικής Γραμμής Δυο Αγωγών



Σχήμα 2.4: Μονοφασική γραμμή μεταφοράς με δύο αγωγούς [2]

Μια μονοφασική γραμμή αποτελείται από δύο αγωγούς (σχήμα 2.4), (φάση και ουδέτερος στη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος αντίστοιχα). «Ο αγωγός 1 μεταφέρει ρεύμα  $I_1$  ενώ ο αγωγός 2 μεταφέρει το ρεύμα  $I_2 = -I_1$  (δηλαδή τα δύο ρεύματα είναι ίσα με αντίθετη φορά). Τέλος,  $D$  είναι η απόσταση μεταξύ τους» [2].

Η συνολική αυτεπαγωγή του αγωγού 1, με χρήση των σχέσεων (10) και (12) από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{I_1} = L_{int} + L_{ext} = \left( \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D}{r_1} \right) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \ln \frac{1}{e^{-1/4}} + \ln \frac{D}{r_1} \right) \Rightarrow$$

$$L_1 = \frac{\lambda_1}{I_1} = \left( 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{r_1 \cdot e^{-1/4}} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{D} \right) \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (15)$$

όπου  $r_1$  η ακτίνα του.

Όμοια, η συνολική αυτεπαγωγή του αγωγού 2 από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$L_2 = \frac{\lambda_2}{I_2} = \left( 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{r_2 \cdot e^{-1/4}} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{D} \right) \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (16)$$

όπου  $r_2$  η ακτίνα του.

Εάν οι αγωγοί έχουν την ίδια ακτίνα, οι αυτεπαγωγές τους είναι ίσες (σχέσεις (15) και (16)). Στην περίπτωση αυτή η αυτεπαγωγή ανά αγωγό από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$L = \left( 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{D} \right) \frac{\text{H}}{\text{m}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \frac{\text{H}}{\text{m}} = 0,2 \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \frac{\text{mH}}{\text{km}} \Rightarrow$$

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad (17)$$

## 2.5 Αυτεπαγωγή Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς

Στα τριφασικά συστήματα μεταφοράς AC η αυτεπαγωγή και κατ' επέκταση η επαγωγική αντίδραση, των αγωγών της γραμμής εξαρτάται από την διάταξη των αγωγών. Αρχικά αναφέρονται οι γενικευμένοι τύποι υπολογισμού από τα συμμετρικά πολυφασικά συστήματα και στη συνέχεια ανάγονται στα τριφασικά σε τρεις

περιπτώσεις: τριγωνική συμμετρία αγωγών, ασυμμετρία αγωγών και αντιμετάθεση φάσεων στους ασύμμετρους αγωγούς.

Γενικά, η μαγνητική ροή του αγωγού  $i$  από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_i = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_i \cdot \ln \frac{1}{r_i \cdot e^{-1/4}} + \sum_{j=1}^n I_j \cdot \ln \frac{1}{D_{ij}} \right) \quad j \neq i \quad (18)$$

Και οι αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές από [2], δίνονται από τους τύπους:

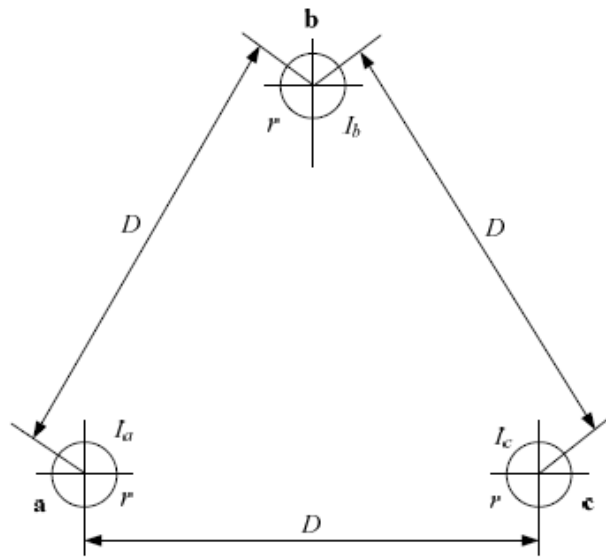
$$L_{ii} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{r_i \cdot e^{-1/4}} \quad (19)$$

$$L_{ij} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{1}{D_{ij}} \quad (20)$$

όπου « $L_{ii}$  είναι η αυτεπαγωγή του αγωγού  $i$ ,  $L_{ij}$  με  $j \neq i$  είναι η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των αγωγών  $i$  και  $j$ ,  $r_i$  είναι η ακτίνα του αγωγού  $i$  και  $D_{ij}$  είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των αγωγών  $i$  και  $j$ » [2].

### **2.5.1 Τριφασική Γραμμή Με Τριγωνική Συμμετρία**

Όταν σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα οι αποστάσεις ανάμεσα στους αγωγούς των φάσεων είναι ίσες, δηλαδή  $D_{ab} = D_{bc} = D_{ca} = D$  και οι ακτίνες τους είναι και αυτές ίσες ( $r_a = r_b = r_c = r$ ) (σχήμα 2.5), τότε οι αγωγοί ακολουθούν την τριγωνική συμμετρική διάταξη.



Σχήμα 2.5: Τριφασική γραμμή μεταφοράς με τριγωνική συμμετρία [2]

Η μαγνητική ροή του αγωγού της φάσης  $a$ , σύμφωνα με τη σχέση (18) από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_a \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} + I_b \cdot \ln \frac{1}{D} + I_c \cdot \ln \frac{1}{D} \right) \quad (21)$$

Επειδή  $I_b + I_c = -I_a$  καθώς το σύστημα είναι συμμετρικό δηλαδή  $I_a + I_b + I_c = 0$  [2], από [2] η σχέση (21) γίνεται:

$$\lambda_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_a \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} - I_a \cdot \ln \frac{1}{D} \right) \Rightarrow$$

$$\lambda_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot I_a \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \quad (22)$$

Η αυτεπαγωγή του αγωγού της φάσης  $a$  από [2] λόγω της σχέσης (7) δίνεται από τον τύπο:

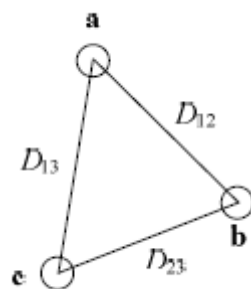
$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \quad \frac{\text{H}}{\text{m}} \quad (23)$$

Ομοίως και για τις άλλες δύο φάσεις. Επειδή όμως το σύστημα είναι συμμετρικό, οι αυτεπαγωγές των τριών φάσεων είναι ίδιες. Άρα η αυτεπαγωγή ανά φάση από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{D}{r \cdot e^{-1/4}} \quad \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad (24)$$

### 2.5.2 Ασύμμετρη Τριφασική Γραμμή

Όταν οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών των φάσεων δεν είναι ίσες το σύστημα λέγεται ασύμμετρο. Στο σχήμα 2.6 φαίνεται μία τέτοια γραμμή όπου οι τρεις αγωγοί έχουν την ίδια ακτίνα.



Σχήμα 2.6: Ασύμμετρη τριφασική γραμμή μεταφοράς [2]

Οι σχέσεις των μαγνητικών ροών των τριών αγωγών προκύπτουν από [2] από τον γενικευμένο τύπο (18) και είναι:

$$\lambda_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_a \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} + I_b \cdot \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \cdot \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad (25)$$

$$\lambda_b = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_a \cdot \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} + I_c \cdot \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \quad (26)$$

$$\lambda_c = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( I_a \cdot \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \cdot \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} \right) \quad (27)$$

Και οι αυτεπαγωγές των τριών φάσεων από [2] δίνονται από τους τύπους:

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} + a^2 \cdot \ln \frac{1}{D_{12}} + a \cdot \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad (28)$$

$$L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( a \cdot \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} + a^2 \cdot \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \quad (29)$$

$$L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( a^2 \cdot \ln \frac{1}{D_{13}} + a \cdot \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} \right) \quad (30)$$

όπου από [2]  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ .

### **2.5.3 Ασύμμετρη Τριφασική Γραμμή Με Αντιμετάθεση Αγωγών**

Στην προηγούμενη ενότητα παρατηρήσαμε ότι η ασυμμετρία σε ένα σύστημα μεταφοράς AC προκαλεί διαφορετικές αυτεπαγωγές και κατ' επέκταση επαγωγικές αντιδράσεις στους αγωγούς των φάσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια τα ρεύματα που ρέουν σε αυτούς να μην είναι ίσα. Έτσι δημιουργούνται ανισορροπίες τόσο στις τάσεις όσο και στις ροές ισχύος μιας γραμμής. Για να αντιμετωπιστεί κάτι τέτοιο, οι αγωγοί αντιμετατίθενται ανά τακτές αποστάσεις, **σχήμα 2.7**. Στην περίπτωση αυτή, «η αυτεπαγωγή ανά φάση υπολογίζεται από τη μέση τιμή των αυτεπαγωγών των τριών φάσεων» [2] και δίνεται από [2] από τον τύπο:

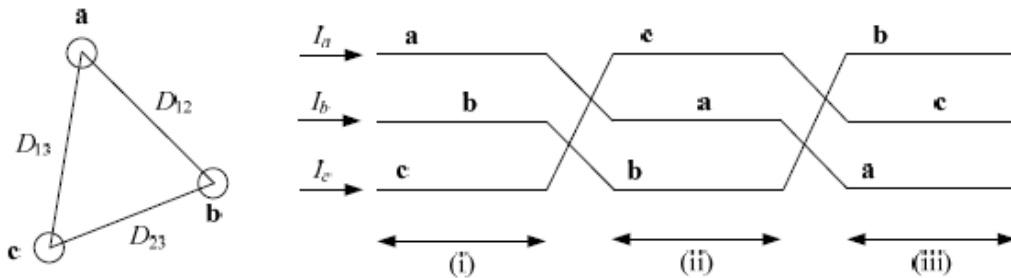
$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3} \quad (31)$$

$$\text{Επίσης από [2] έχουμε ότι: } a+a^2 = 1\angle 120^0 + 1\angle 240^0 = -1 \quad (32)$$

Και αντικαθιστώντας τις σχέσεις (28) έως (30) και (32) στην (31) από [2], η ανά φάση αυτεπαγωγή δίνεται από τον τύπο:

$$L = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3} \cdot \left( 3 \cdot \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \ln \frac{1}{r \cdot e^{-1/4}} - \ln \frac{1}{(D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13})^{1/3}} \right) \Rightarrow$$

$$L = 0,2 \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}}{r \cdot e^{-1/4}} \quad [mH/km] \quad (33)$$



Σχήμα 2.7: Αντιμετάθεση φάσεων ασύμμετρης τριφασικής γραμμής μεταφοράς [2]

## 2.6 Χωρητικότητα Κυλινδρικού Αγωγού

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η χωρητικότητα σχετίζεται άμεσα με την χωρητική αντίδραση. Η σχέση εξάρτησης της χωρητικής αντίδρασης ( $X_C$ ) από την χωρητικότητα  $C$  είναι αντιστρόφως ανάλογη και είναι:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad [\Omega] \quad (34)$$

Όταν σε έναν αγωγό εφαρμόζεται τάση  $V$  και φορτίο  $q$ , τότε γύρω από αυτόν δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , είναι ανάλογη της πυκνότητας της ηλεκτρικής ροής  $D$  και αντιστρόφως ανάλογη της διηλεκτρικής σταθεράς του κενού  $\epsilon_0$  και από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{D}{\epsilon_0} \quad (35)$$

Η πυκνότητα της ηλεκτρικής ροής  $D$  από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot x} \quad (36)$$

όπου  $x$  είναι η ακτίνα μιας αυθαίρετης επιφάνειας γύρω από τον αγωγό (σχήμα 2.8).

Η χωρητικότητα  $C$  (σε  $F/m$ ) είναι ανάλογη του φορτίου  $q$  και αντιστρόφως ανάλογη της τάσης  $V$  που εφαρμόζεται σε αυτόν δηλαδή από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$C = \frac{q}{V} \quad (37)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (34) στη (33), η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου από [2] γίνεται:

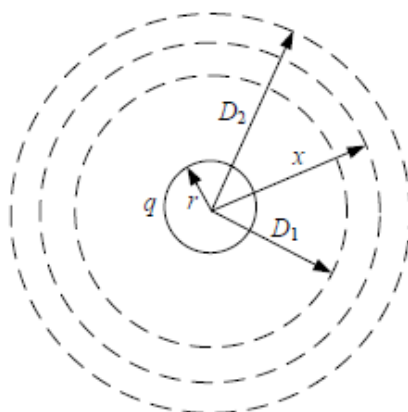
$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot x} \quad (38)$$



Στο σχήμα 2.8 φαίνεται ένας αγωγός κυλινδρικού σχήματος ακτίνας  $r$  και φορτίου  $q$  όπου  $D_1$  και  $D_2$  είναι «οι ακτινικές αποστάσεις δύο επιφανειών από το κέντρο του αγωγού» [2]. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ αυτών των επιφανειών από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E \cdot dx = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot x} \cdot dx = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \int_{D_1}^{D_2} \frac{dx}{x} \Rightarrow$$

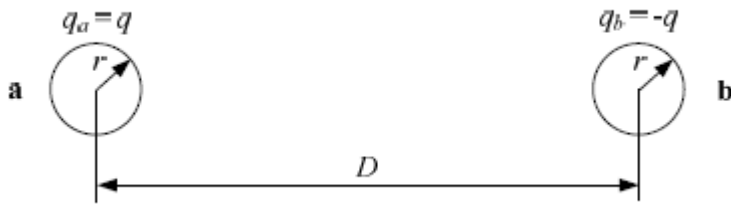
$$V_{12} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (39)$$



Σχήμα 2.8: Ηλεκτρικό πεδίο γύρω από έναν κυλινδρικό αγωγό [2]

## **2.7 Χωρητικότητα Μονοφασικής Γραμμής Δυο Αγωγών**

Για να γίνει ανάλυση μιας μονοφασικής γραμμής μεταφοράς, χρησιμοποιείται το παρακάτω σχήμα. «Δύο κυλινδρικοί αγωγοί  $a$  και  $b$  ίσης ακτίνας  $r$ , απέχουν μεταξύ τους απόσταση  $D$ . Ο αγωγός  $a$  έχει φορτίο  $q_a$  και ο αγωγός  $b$  έχει φορτίο  $q_b = -q_a$ » [2].



Σχήμα 2.9: Μονοφασική γραμμή μεταφοράς με δύο αγωγούς [2]

Σε αυτή την περίπτωση, για να υπολογίσουμε την χωρητικότητα μεταξύ των αγωγών  $a$  και  $b$ , πρέπει να υπολογίσουμε πρώτα την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους αγωγούς αυτούς. Αυτό θα γίνει υπολογίζοντας αρχικά τη διαφορά δυναμικού ως ξεχωριστές εξισώσεις των φορτίων και στη συνέχεια συνυπολογίζοντας και τα δύο φορτία.

Η διαφορά δυναμικού από τον αγωγό  $a$  προς τον αγωγό  $b$  θεωρώντας μόνο το φορτίο  $q_a$  του αγωγού  $a$ , από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$V_{ab(q_a)} = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{D}{r} \quad (40)$$

Η διαφορά δυναμικού από τον αγωγό  $b$  προς τον αγωγό  $a$  θεωρώντας μόνο το φορτίο  $q_b$  του αγωγού  $b$ , από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$V_{ba(q_b)} = \frac{q_b}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{D}{r} \quad \xrightarrow{V_{ab(q_b)} = -V_{ba(q_b)}} \quad V_{ab(q_b)} = \frac{q_b}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{D} \quad (41)$$

Έτσι, συναρτήσει και των δύο φορτίων, η συνολική διαφορά δυναμικού από [2], μέσω των σχέσεων (40) και (41), δίνεται από τον τύπο:

$$V_{ab} = V_{ab(q_a)} + V_{ab(q_b)} = \frac{q_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{D}{r} + \frac{q_b}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{r}{D}$$

$$q_b = -q_a = -q$$

$$\xrightarrow{\hspace{2cm}} \quad V_{ab} = \frac{q}{\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \ln \frac{D}{r} \quad (42)$$

Επομένως, από τις σχέσεις (37) και (42), η χωρητικότητα μεταξύ δύο φάσεων από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$C_{ab} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \frac{F}{m} \quad (43)$$

Ενώ η χωρητικότητα μεταξύ φάσης και ουδετέρου είναι η μισή και από [2] γίνεται:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \frac{F}{m} \quad (44)$$

## **2.8 Χωρητικότητα Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς**

Οι γραμμές μεταφοράς AC Μέσης και Υψηλής Τάσης είναι συμμετρικές διότι οι εταιρείες παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας φροντίζουν έτσι ώστε οι γεννήτριες παραγωγής και οι υποσταθμοί να είναι σε συμμετρία. Έτσι, οι αγωγοί είναι φορτισμένοι το ίδιο, κάτι που δεν ισχύει στη Χαμηλή Τάση λόγω της πλευράς των καταναλωτών που είναι ασύμμετροι.

Ο γενικευμένος τύπος υπολογισμού της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών  $i$  και  $j$  μίας συμμετρικής πολυφασικής γραμμής  $n$  αγωγών με τα αντίστοιχα φορτία, από [2] δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{D_{kj}}{D_{ki}} \quad (45)$$

### 2.8.1 Χωρητικότητα Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς Με Τριγωνική Συμμετρία

Έστω η συμμετρική τριφασική γραμμή μεταφοράς του *σχήματος* 2.5. Σε αυτήν, οι τρεις αγωγοί  $A$ ,  $B$  και  $C$  έχουν αντίστοιχα φορτία  $Q_A$ ,  $Q_B$ , και  $Q_C$  και απέχουν ίσες αποστάσεις.

Η διαφορά δυναμικού κάθε αγωγού με τον ουδέτερο από [27] δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} V_A &= \int_r^{\infty} \frac{Q_A}{2\pi x \epsilon_0} dx + \int_d^{\infty} \frac{Q_B}{2\pi x \epsilon_0} dx + \int_d^{\infty} \frac{Q_C}{2\pi x \epsilon_0} dx \\ &= \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \left[ Q_A \log_e \frac{1}{r} + Q_B \log_e \frac{1}{d} + Q_C \log_e \frac{1}{d} \right] \\ &= \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \left[ Q_A \log_e \frac{1}{r} + (Q_B + Q_C) \log_e \frac{1}{d} \right] \end{aligned}$$

Και επειδή το σύστημα είναι συμμετρικό δηλαδή από [27]

$$\begin{aligned} Q_A + Q_B + Q_C &= 0 \\ Q_B + Q_C &= -Q_A \end{aligned}$$

από [27] γίνεται:

$$V_A = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \left[ Q_A \log_e \frac{1}{r} - Q_A \log_e \frac{1}{d} \right] = \frac{Q_A}{2\pi \epsilon_0} \log_e \frac{d}{r} \text{ volts} \quad (46)$$

Έτσι, η χωρητικότητα μεταξύ κάθε αγωγού και του ουδετέρου λόγω της σχέσης (37) και από [27], δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} C_A &= \frac{Q_A}{V_A} = \frac{Q_A}{\frac{Q_A}{2\pi \epsilon_0} \log_e \frac{d}{r}} \text{ F/m} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\log_e \frac{d}{r}} \text{ F/m} \\ C_A &= \frac{2\pi \epsilon_0}{\log_e \frac{d}{r}} \text{ F/m} \quad (47) \end{aligned}$$

### 2.8.2 Χωρητικότητα Ασύμμετρης Τριφασικής Γραμμής Μεταφοράς Με Αντιμετάθεση Φάσεων

Έστω η τριφασική γραμμή μεταφοράς του *σχήματος 2.7* η οποία είναι ασύμμετρη διότι  $D_{12} \neq D_{23} \neq D_{13}$ .

Εφαρμόζοντας το γενικευμένο τύπο (45), η διαφορά δυναμικού  $V_{ab}$  μεταξύ των φάσεων a και b σε κάθε τμήμα αντιμετάθεσης από [2] δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

στο 1<sup>ο</sup> τμήμα αντιμετάθεσης:

$$V_{ab(I)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left( q_a \cdot \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \cdot \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \cdot \ln \frac{D_{23}}{D_{13}} \right) \quad (48)$$

στο 2<sup>ο</sup> τμήμα αντιμετάθεσης:

$$V_{ab(II)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left( q_a \cdot \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \cdot \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \cdot \ln \frac{D_{13}}{D_{12}} \right) \quad (49)$$

στο 3<sup>ο</sup> τμήμα αντιμετάθεσης:

$$V_{ab(III)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left( q_a \cdot \ln \frac{D_{13}}{r} + q_b \cdot \ln \frac{r}{D_{13}} + q_c \cdot \ln \frac{D_{12}}{D_{23}} \right) \quad (50)$$

Έτσι, με χρήση αυτών των εξισώσεων, η μέση τιμή της διαφοράς δυναμικού  $V_{ab}$  από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$V_{ab} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ab(I)} + V_{ab(II)} + V_{ab(III)}) \Rightarrow$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot \left( q_a \cdot \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}}{r} + q_b \cdot \ln \frac{r}{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}} \right) \quad (51)$$

Έτσι η χωρητικότητα ανά φάση προς ουδέτερο από [2] είναι:

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{13}}}{r}} \quad [F/m] \quad (52)$$

## **2.9 Εγκάρσια Αγωγιμότητα**

Η εγκάρσια αγωγιμότητα σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα μέτρο που περιγράφει τις απώλειες αγωγιμότητας μεταξύ των αγωγών της γραμμής και της γης, μέσω της διηλεκτρικής διόδου (μονωτικό υλικό) που υπάρχει μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, η εγκάρσια αγωγιμότητα αντιπροσωπεύει τις διαρροές που συμβαίνουν στη γραμμή και προκαλούνται κυρίως από απώλειες μέσω της μόνωσης ή της ατμόσφαιρας γύρω από τους αγωγούς. Αυτή η ροή ρεύματος δεν συμβάλλει στη μεταφορά ισχύος αλλά προκαλεί απώλειες.

## **2.10 Συμπεράσματα**

Στην πραγματικότητα, οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς δεν είναι συμπαγείς. Αποτελούνται από πολλούς κλώνους γι' αυτό και λέγονται πολύκλωνοι. Επίσης, για λόγους οικονομίας, οι περισσότερες γραμμές

μεταφοράς υψηλής τάσης κατασκευάζονται από δέσμες αγωγών, δηλαδή κάθε φάση αποτελείται από δύο ή περισσότερους αγωγούς. Επιπρόσθετο, ρόλο στον υπολογισμό της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας μιας γραμμής παίζουν τόσο η γη όσο και τα Σύρματα Γης τα οποία είναι σύρματα που τοποθετούνται επάνω από τους αγωγούς μεταφοράς (στην κορυφή των πυλώνων) και έχουν σκοπό τη προστασία από ατμοσφαιρικές επιδράσεις, όπως κεραυνοί και άλλα φαινόμενα.

Στα επόμενα κεφάλαια θα χρησιμοποιηθούν οι όροι της επαγωγικής και της χωρητικής αντίδρασης. Σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι τύποι υπολογισμού της επαγωγικής αντίδρασης ( $X_L$ ) και της χωρητικής αντίδρασης ( $X_C$ ) καθορίζουν τη συμπεριφορά της γραμμής. Αυτές οι αντιδράσεις σχετίζονται άμεσα με την αυτεπαγωγή και τη χωρητικότητα που υπάρχουν λόγω της γεωμετρίας της γραμμής και της κατασκευής της. Οι ελεγκτές των FACTS λειτουργούν με στόχο, μαζί με άλλες παραμέτρους, να εξομαλύνουν και να αντισταθμίζουν αυτά τα χαρακτηριστικά για τη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Στο 3ο κεφάλαιο θα εξηγηθούν τα μοντέλα των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

-

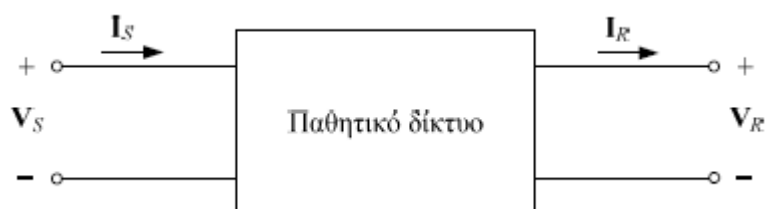
## **ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**



### 3.1 Γενικά

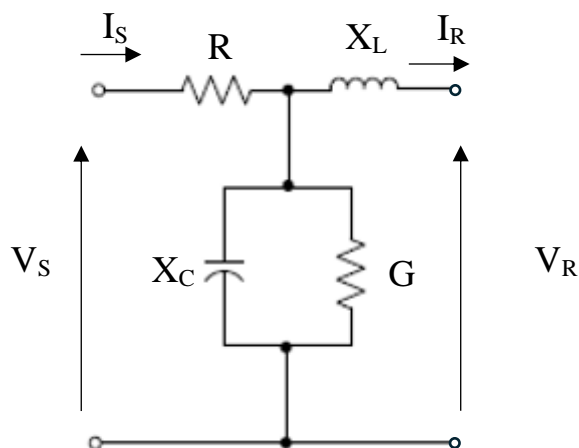
Οι ελεγκτές των FACTS πραγματοποιούν έλεγχο των τάσεων αναχώρησης και άφιξης και της εμπέδησης μιας γραμμής μεταφοράς. Ο έλεγχος αυτός γίνεται μέσω χρήσης ηλεκτρικών μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούν σχέσεις εξάρτησης αυτών των μεγεθών. Τα δύο μοντέλα που θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο είναι τα ισοδύναμα κυκλώματα Π και Τ.

### 3.2 Μονοφασικό Ισοδύναμο Κύκλωμα Π



Σχήμα 3.1: Δίθυρο κύκλωμα [2]

Στο σχήμα 3.1 φαίνεται ένα δίθυρο κύκλωμα το οποίο αποτελεί χονδρική αναπαράσταση ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος μιας γραμμής μεταφοράς (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς [2]

Λέγεται δίθυρο διότι αποτελείται από δύο πλευρές την αρχή ή αναχώρηση (δείκτης S από το Sending) και το τέλος ή άφιξη (δείκτης R από το Receive) της γραμμής. Ενδιάμεσα παρεμβάλλεται το παθητικό δίκτυο, δηλαδή το μέσο που μεταφέρει την ισχύ. Ένα παθητικό δίκτυο συμπεριλαμβάνει την εμπέδηση των αγωγών μιας γραμμής ( $Z=R+jX_L$  ανά φάση) αλλά και την εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα ( $Y=G+jX_C$  ανά φάση) (σχήμα 3.2). «Επίσης το δίθυρο κύκλωμα είναι συμμετρικό που σημαίνει ότι αν συνδέσουμε τα άκρα του ανάποδα, τα χαρακτηριστικά του δεν θα αλλάξουν» [2].

Αυτό το κύκλωμα με χρήση των παραμέτρων **ABCD** περιγράφεται από [2] από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (53)$$

ή ισοδύναμα:

$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R \quad \text{και} \quad I_S = C \cdot V_R + D \cdot I_R \quad (54)$$

,σε περίπτωση που είναι γνωστά η τάση  $V_R$  και το ρεύμα  $I_R$  στην άφιξη της γραμμής και άγνωστα η τάση  $V_S$  και το ρεύμα  $I_S$  στην αναχώρηση.

ή από [2] από τις εξισώσεις:

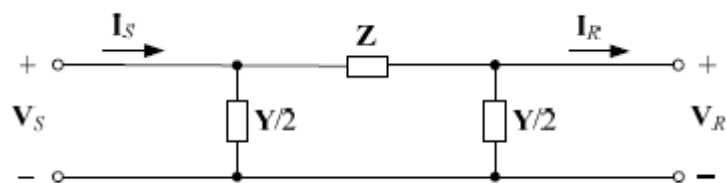
$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (55)$$

$$\text{δηλαδή:} \quad V_R = D \cdot V_S - B \cdot I_S \quad \text{και} \quad I_R = -C \cdot V_S + A \cdot I_S \quad (56)$$

,σε περίπτωση που είναι γνωστά η τάση  $V_S$  και το ρεύμα  $I_S$  στην αναχώρηση της γραμμής και άγνωστα η τάση  $V_R$  και το ρεύμα  $I_R$  στην άφιξη.

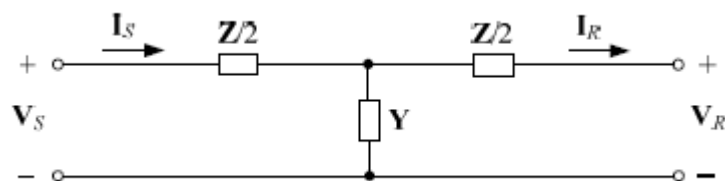
Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα  $\Pi$  και οι παράμετροι ή «γενικευμένες σταθερές» [2] **ABCD** προκύπτουν από [2] από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} A &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \\ B &= Z \\ C &= Y \cdot \left( 1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \\ D &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} = A \end{aligned} \quad (57-60)$$



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα  $\Pi$  [2]

### 3.3 Μονοφασικό Ισοδύναμο Κύκλωμα T



Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα T [2]

Στο σχήμα 3.4 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα T και οι παράμετροι **ABCD** δίνονται από [2] από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}
 A &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \\
 B &= Z \cdot \left( 1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \\
 C &= Y \\
 D &= 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} = A
 \end{aligned}
 \tag{61-64}$$

Έτσι με τη εισαγωγή αυτών στις σχέσεις (54) ή (56), υπολογίζουμε τη ζητούμενη τάση ή το ζητούμενο ρεύμα.

### **3.4 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μικρού Μήκους**

«Το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους έχει σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια για γραμμές μεταφοράς έως 80 km» [2]. Σε αυτές τις αποστάσεις η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα  $Y$  θεωρείται αμελητέα. Στο *σχήμα 3.5* φαίνεται ένα τέτοιο μοντέλο για γραμμή μήκους  $l$  (για μία φάση).

Η συνολική σύνθετη αντίσταση  $Z$  ανά φάση δίνεται από [2] από τον τύπο:

$$Z = z \cdot l = R + jX_L = r \cdot l + jx_L \cdot l = r \cdot l + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot l
 \tag{65}$$

όπου « $z$ ,  $r$  και  $x_L$  είναι οι ανά μονάδα μήκους εμπέδηση, ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση (σε  $\Omega/m$ ) αντίστοιχα,  $f$  η

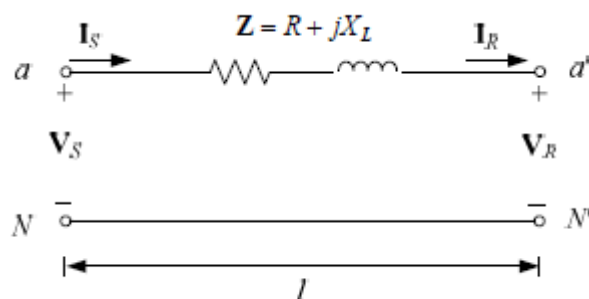
συχνότητα (σε  $Hz$ ) και  $L$  η ανά φάση και ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή της γραμμής (σε  $H/m$ )» [2].

Οι παράμετροι **ABCD** του μοντέλου μικρού μήκους προκύπτουν από αυτές είτε του ισοδύναμου κυκλώματος  $\Pi$  είτε του ισοδύναμου κυκλώματος  $T$ , θέτοντας  $\mathbf{Y}=\mathbf{0}$ . Έτσι από [2] δίνονται από τις εξισώσεις:

$$\mathbf{A}=1 \quad \mathbf{B}=\mathbf{Z} \quad \mathbf{C}=0 \quad \mathbf{D}=1 \quad (66)$$

Έτσι η σχέση τάσεων-ρευμάτων για γραμμές μικρού μήκους σύμφωνα με τη σχέση (53) από [2] δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_S \\ \mathbf{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \quad (67)$$



Σχήμα 3.5: Μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο μικρού μήκους τριφασικής γραμμής μεταφοράς [2]

### 3.5 Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς Μεσαίου Μήκους

«Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση γραμμών μεταφοράς με μήκος έως 240 km» [2]. Σε αυτές τις

αποστάσεις η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα  $Y$  είναι υπαρκτή λόγω του αρκετά μεγαλύτερου μήκους. Όπως και στις γραμμές μικρού μήκους, η ανά φάση εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς  $Z$  (σε  $\Omega$ ) υπολογίζεται από τη σχέση (65).

Η ανά φάση συνολική εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα  $Y$  της γραμμής (σε mho ή Siemens) υπολογίζεται από [2] από τη σχέση:

$$Y = y \cdot l = G + j \frac{1}{X_C} = g \cdot l + j \frac{1}{x_c} \cdot l = g \cdot l + j 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot l \quad (68)$$

όπου  $G$  είναι η εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα (σε mho),  $X_C$  η εγκάρσια χωρητική αντίδραση (σε  $\Omega$ ), ανά φάση, και  $y$ ,  $g$ ,  $x_c$  και  $C$  τα αντίστοιχα ανά μονάδα μήκους μεγέθη.

Η ανάλυση αυτού του μοντέλου, όπως και στο προηγούμενο, μπορεί να γίνει και με τα δύο ισοδύναμα κυκλώματα. Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα T (σχήμα 3.4), οι παράμετροι **ABCD** για μία γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους δίνονται από τις σχέσεις (61-64) και εισάγοντάς τες στη σχέση (53), η σχέση τάσεων-ρευμάτων από [2] δίνεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} & Z \cdot \left( 1 + \frac{Z \cdot Y}{4} \right) \\ Y & 1 + \frac{Z \cdot Y}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (69)$$

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα Π (σχήμα 3.3), οι παράμετροι **ABCD** για μία γραμμή μεταφοράς μεσαίου μήκους δίνονται από τις σχέσεις (57-60) και εισάγοντάς τες στη σχέση (53), η σχέση τάσεων-ρευμάτων από [2] δίνεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_S \\ \mathbf{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}{2} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Y} \cdot \left(1 + \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}{4}\right) & 1 + \frac{\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \quad (70)$$

### **3.6 Συμπεράσματα**

Αυτά είναι και τα μοντέλα που χρησιμοποιούν οι ελεγκτές των FACTS που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο καθώς μεταβάλλοντας μία παράμετρο όπως για παράδειγμα την επαγωγική αντίδραση μιας γραμμής μεταφοράς (όπως συμβαίνει με την αντιστάθμιση αέργου ισχύος), παρατηρούμε τις αλλαγές που συμβαίνουν στην τάση, στο ρεύμα, στην εγκάρσια χωρητικότητα και αγωγιμότητα και κατ' επέκταση στην ενεργό και την άεργο ισχύ του δικτύου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

-

## **ΕΛΕΓΚΤΕΣ ΕΥΕΛΙΚΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**



## 4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παρουσίαση και ανάλυση της λειτουργίας των ελεγκτών των FACTS. Ταξινομημένοι σε δύο κατηγορίες, οι ελεγκτές αυτοί είναι:

### Ελεγχόμενοι μέσω θυρίστορ

1. «Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (**Static Var Compensator-SVC**)» [9]
2. «Αντισταθμιστής Σειράς Με Πυκνωτές Ελεγχόμενους Από Θυρίστορ (**Thyristor Controlled Series Capacitor - TCSC**)» [9]
3. «Ρυθμιστής Γωνίας Φάσης Ελεγχόμενος Από Θυρίστορ (**Thyristor-Controlled Phase-Angle Regulator-TCPAR**)» [9]

### Ελεγχόμενοι μέσω μετατροπέων ισχύος

1. «Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής (**STATIC synchronous COMPensator – STATCOM**)» [9]
2. «Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής Σειράς (**Static Synchronous Series Compensator – SSSC**)» [9]
3. «Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (**Unified Power Flow Controller - UPFC**)» [9]

## **4.2 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Θυρίστορ**

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

Ο Στατικός Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος είναι μια συσκευή η οποία διασυνδέει εγκάρσιες συστοιχίες στο σύστημα μεταφοράς, με σκοπό, την αντιστάθμιση της αέργου ισχύος μέσω ρύθμισης είτε της τάσης αναχώρησης είτε της τάσης άφιξης της γραμμής (ανάλογα σε ποιο ζυγό είναι συνδεδεμένος).

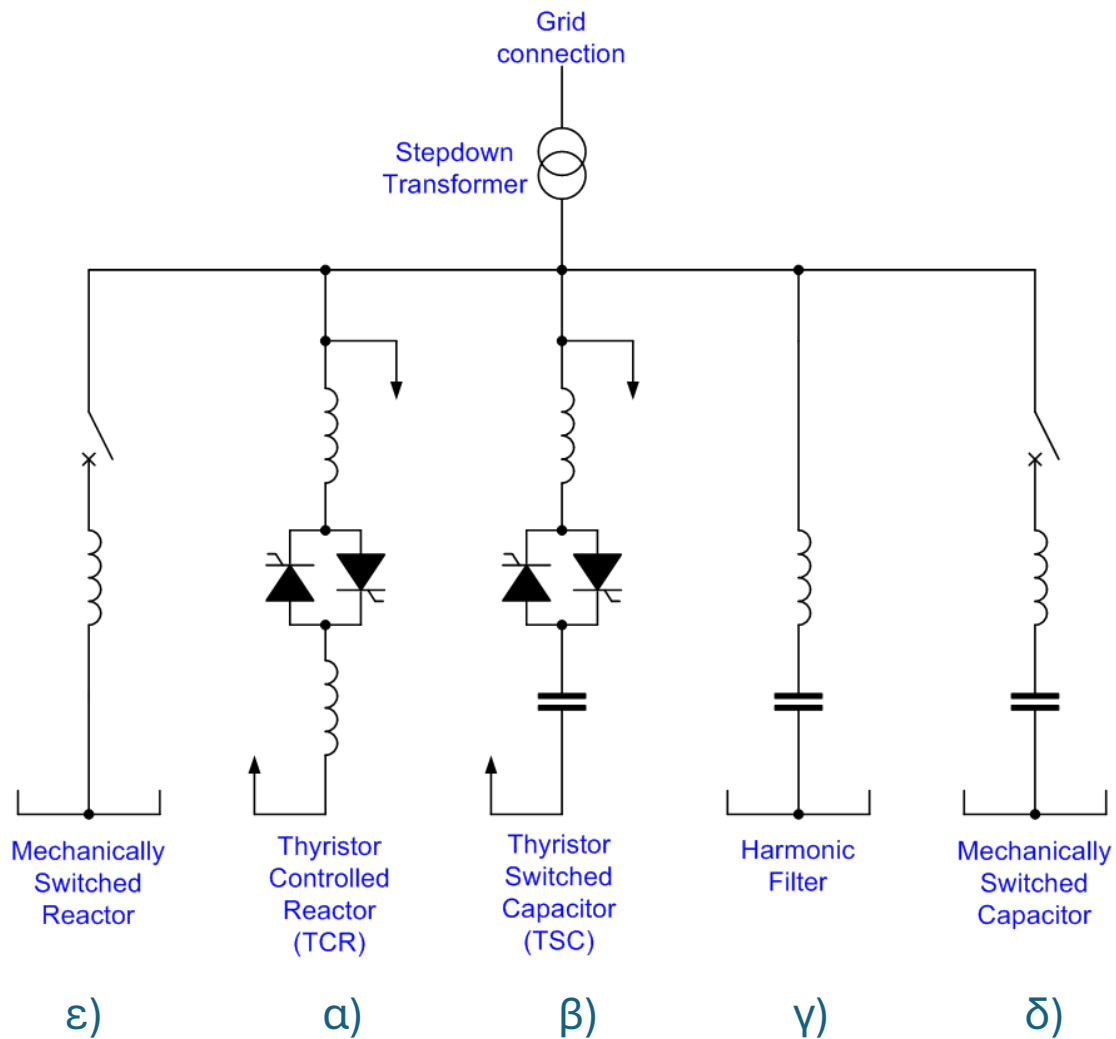
Ο SVC ρυθμίζει την ποσότητα αέργου ισχύος που είτε απορροφά είτε εγχέει στο ηλεκτρικό δίκτυο, μέσω γρήγορων εναλλαγών πυκνωτών και πηνίων. Αυτές οι εναλλαγές επιτυγχάνονται με τη χρήση των θυρίστορ, τα οποία επιτρέπουν τη γρήγορη ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των αντισταθμιστικών στοιχείων.

Πιο συγκεκριμένα, όταν η γραμμή μεταφοράς είναι φορτισμένη με επαγωγικά φορτία ή όταν η εμπέδηση της ίδιας της γραμμής παρουσιάζει επαγωγικό χαρακτήρα, το μέτρο της τάσης στην άφιξη είναι μικρότερο σε σχέση με το μέτρο της τάσης στην αναχώρηση. Για την μείωση αυτής της πτώσης τάσης και τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος, ο SVC χρησιμοποιεί πυκνωτές ελεγχόμενους από θυρίστορ (TSC) (Εικόνα 4.1β). Ο πυκνωτής είναι αυτός που παρέχει μέρος της αέργου ισχύος στο φορτίο απαλλάσσοντας έτσι το δίκτυο από αυτή τη διαδικασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος γραμμής (μείωση άεργης συνιστώσας), άρα τη μείωση της πτώσης τάσης και κατ' επέκταση τα μέτρα των τάσεων να τείνουν να εξισωθούν. Για να υπάρχει όσο γίνεται πιο δυναμικός έλεγχος αυτών των μεταβλητών, οι συστοιχίες των πυκνωτών συνδέονται διακοπτόμενα μέσω θυρίστορ. Επειδή ένα θυρίστορ άγει μόνο κατά τη μία φορά, στον SVC χρησιμοποιούνται ζεύγη θυρίστορ

συνδεδεμένα παράλληλα και αντίστροφα μεταξύ τους ώστε να αξιοποιούνται τόσο οι θετικές όσο και οι αρνητικές κορυφές των κυματομορφών τάσεως και ρεύματος. Τέλος στον TSC, σε σειρά με το ζευγάρι των θυρίστορ και τον πυκνωτή συνδέεται και ένα πηνίο το οποίο παρέχει προστασία από τα υψηλά ρεύματα που εμφανίζονται τις στιγμές που συνδέεται στο κύκλωμα η συστοιχία.

Από την άλλη, όταν η γραμμή μεταφοράς είναι φορτισμένη με χωρητικά φορτία ή όταν η εμπέδηση της ίδιας της γραμμής παρουσιάζει χωρητικό χαρακτήρα, το μέτρο της τάσης στην άφιξη είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το μέτρο της τάσης στην αναχώρηση. Για την μείωση του μέτρου της τάσης στην άφιξη της γραμμής, ο SVC χρησιμοποιεί πηνία ελεγχόμενα από θυρίστορ (TCR) (Εικόνα 4.1α). Σε αυτή την περίπτωση, το πηνίο, απορροφά ένα μέρος της αέργου ισχύος που ταλαντεύεται από το φορτίο προς το σύστημα κι έτσι έχουμε μείωση της αέργου ισχύος (βελτίωση συντελεστή ισχύος), και διόρθωση του μέτρου της τάσης. Στον TCR, το πηνίο χωρίζεται στα δύο και στη μέση συνδέονται σε σειρά τα ζεύγη των θυρίστορ. Αυτό γίνεται για την προστασία τους από υπερπηδήσεις οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν την καταστροφή τους. Ο TCR χρησιμοποιείται επίσης σε γραμμές μεταφοράς ελαφρώς ή καθόλου φορτισμένες.

Γενικά, ο TSC όταν λειτουργεί μόνος του, παρέχει μια όχι και τόσο ευέλικτη αντιστάθμιση της αέργου ισχύος γι' αυτό και είναι καλό να λειτουργεί σε συνδυασμό με τον TCR, ο οποίος ακόμα και όταν λειτουργεί ανεξάρτητα, επιτρέπει έναν πολύ πιο δυναμικό έλεγχο. Από την άλλη, ο TSC δεν παράγει αρμονικές.

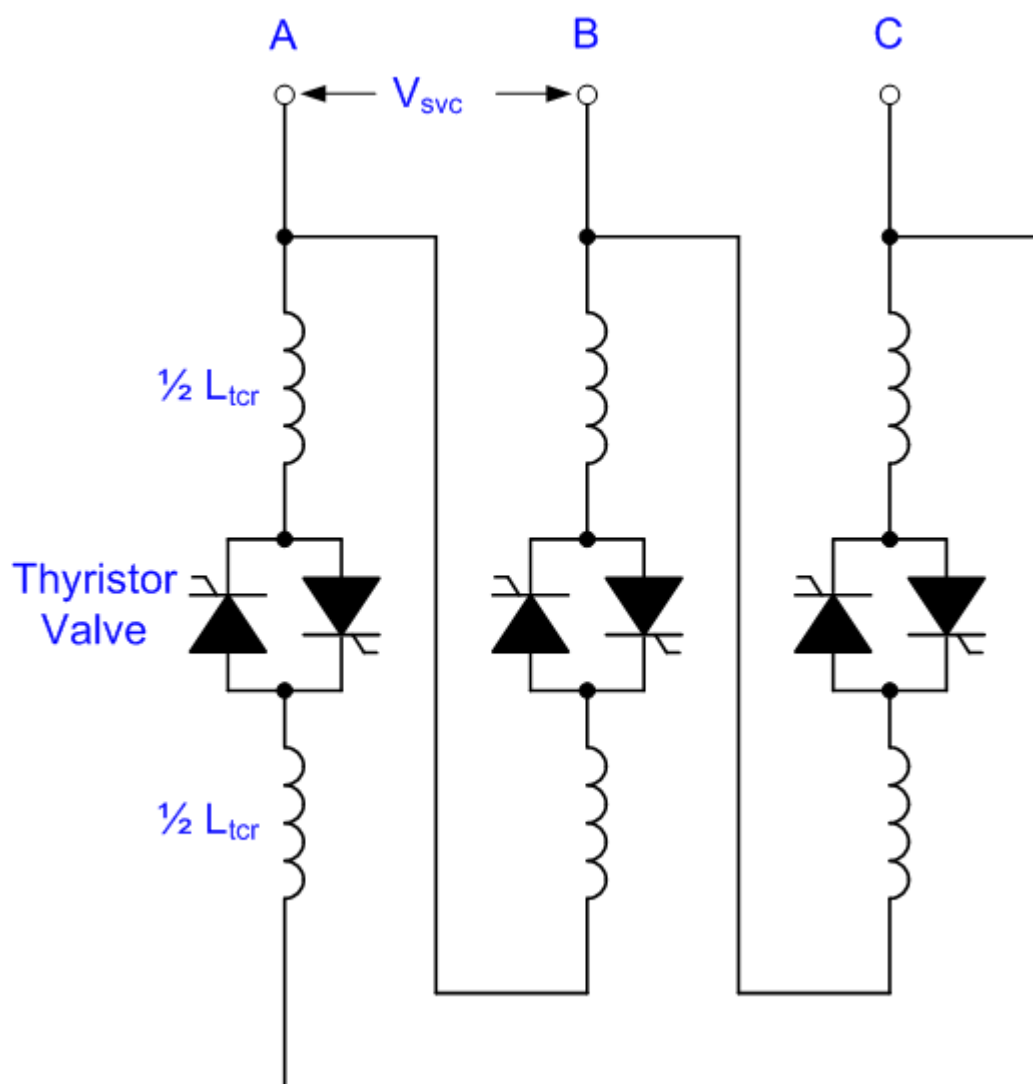


**Εικόνα 4.1: Ανά φάση κύκλωμα ενός SVC. α) «επαγωγή ελεγχόμενη από θυρίστορ» (TCR), β) «χωρητικότητα διακοπτόμενη από θυρίστορ» (TSC), γ) «αρμονικό φίλτρο», δ) «πυκνωτής μηχανικής μεταγωγής» και ε) «πηνίο μηχανικής μεταγωγής» [3]**

Μία τέτοια δομή περιέχει επίσης φίλτρα αρμονικών (*Εικόνα 4.1γ*), διότι οι μεταβολές των συστοιχιών μέσω της έναυσης και σβέσης των θυρίστορ παραμορφώνουν την κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος. Έτσι χαλάει η ευστάθεια του δικτύου και ο συντελεστής ισχύος ακόμα περισσότερο. Τα φίλτρα αρμονικών εξομαλύνουν τις κυματομορφές αυτές και λόγω του πυκνωτή που υπάρχει στη συστοιχία του φίλτρου, για να συμβεί αυτό, παρέχουν εν μέρει και άεργο ισχύ στο σύστημα. Τέλος ένας SVC μπορεί να περιέχει και μη μεταβλητές συστοιχίες (*Εικόνες 4.1δ και 4.1ε*) ο χειρισμός των οποίων

γίνεται μέσω μηχανικών διακοπών, για τις πιο σταθερές μεταβολές των φορτίων.

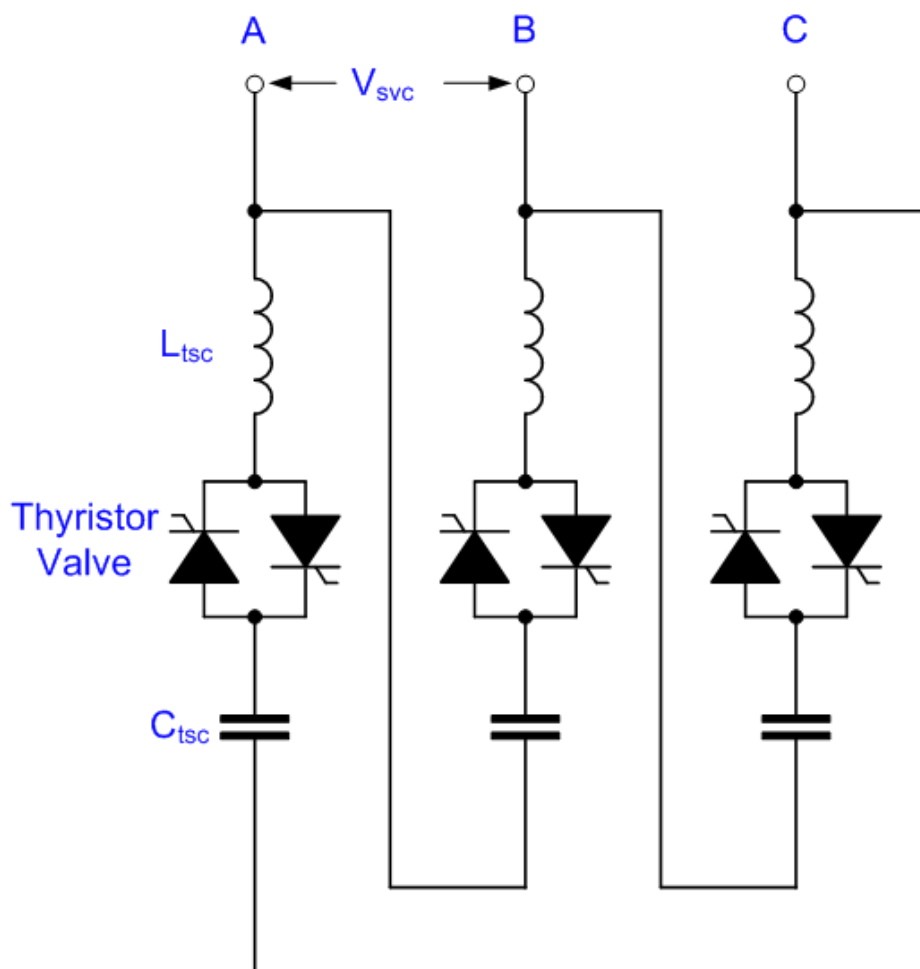
Ο SVC μπορεί να συνδεθεί είτε σε κάποιον από τους ζυγούς του συστήματος μεταφοράς, εξισώνοντας την τάση μεταφοράς, είτε κοντά σε βιομηχανίες που λειτουργούν με μεγάλα φορτία, βελτιώνοντας τον συντελεστή ισχύος τοπικά και με αυτό τον τρόπο την ποιότητα της ισχύος συνολικά.



**Εικόνα 4.2 :** Ο TCR σε συνδεσμολογία τριγώνου όπου A,B,C οι τρεις φάσεις του δικτύου [3]

Πολλές φορές, για οικονομικούς λόγους ανάμεσα στον ζυγό και τον SVC παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής. Αυτό γίνεται με σκοπό τη χρήση ενός μικρότερου SVC διότι οι τάσεις λειτουργίας είναι μικρότερες. Εξαιρεση αποτελούν βιομηχανικές εφαρμογές όπως τα «καμίνια ηλεκτρικού τόξου» [22] όπου εκεί ο SVC συνδέεται απευθείας στο ζυγό.

Στις Εικόνες 4.2 & 4.3 φαίνεται ο τρόπος διασύνδεσής τους στο τριφασικό σύστημα ισχύος.



Εικόνα 4.3 : Ο TSC σε συνδεσμολογία τριγώνου όπου A,B,C οι τρεις φάσεις του δικτύου [3]

Το κύριο πλεονέκτημα των SVCs συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους αντιστάθμισης είναι η γρηγορότερη απόκριση. Μάλιστα αρκετά συχνά ρυθμίζονται ώστε να λειτουργούν κοντά στο «σημείο-μηδέν» [3], στο οποίο ούτε δίνουν ούτε παίρνουν άεργο ισχύ. Έτσι μεγιστοποιείται η απόδοση στην διόρθωση της ισχύος. Είναι επίσης φθηνότεροι και πιο αξιόπιστοι σε σχέση με άλλα συστήματα.

Οι SVCs όμως έχουν και αρνητικά. Είναι πιο ακριβοί από την αντιστάθμιση μέσω μηχανικών διακοπών και τα θυρίστορ ως ημιαγωγικά στοιχεία ανεβάζουν πολύ υψηλές θερμοκρασίες επομένως θα πρέπει να ψύχονται πολύ καλά. Επίσης η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται όταν τοποθετούνται σε πολύ μεγάλα δίκτυα με σύνθετες ανάγκες σταθεροποίησης. Τέλος οι SVCs ρυθμίζουν μόνο την άεργο ισχύ και δεν έχουν άμεση επίδραση στη διαχείριση της ενεργού ισχύος. Έτσι, η δυνατότητά τους να βελτιώνουν συνολικά τη σταθερότητα του συστήματος είναι περιορισμένη αν δεν συνοδεύονται από άλλες συσκευές διαχείρισης ενεργού ισχύος.

#### **4.2.2 Αντισταθμιστής Σειράς Με Πυκνωτές Ελεγχόμενους Από Θυρίστορ (TCSC)**

Ο Αντισταθμιστής σειράς με πυκνωτές ελεγχόμενους από θυρίστορ είναι μία συσκευή η οποία έχει ως στόχο να μεταβάλλει τη συνολική επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς ( $X_L$ ) μεταξύ δυο ζυγών. Η λειτουργία του βασίζεται στην εν σειρά (με την εμπέδηση της γραμμής) σύνδεση ενός πυκνωτή, σταθερής χωρητικής αντίδρασης και ενός πηνίου διακπτόμενου από θυρίστορ, παράλληλα του πυκνωτή (κάτι αντίστοιχο με το TCR στον SVC).

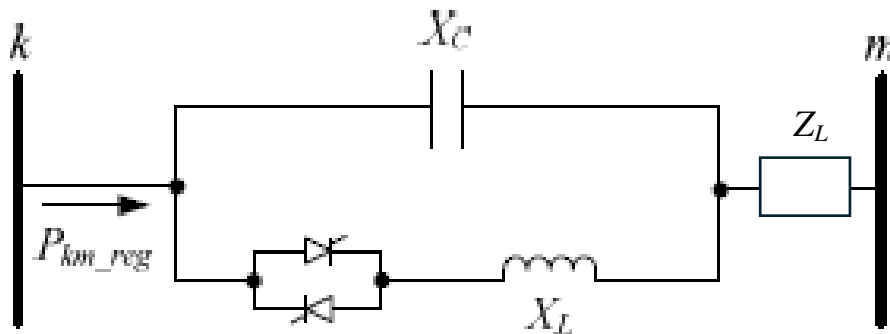
Επειδή η εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς δεν είναι κάτι σταθερό αλλά μεταβάλλεται με τις μεταβολές της τάσης του δικτύου αλλά και με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, ο TCSC θα πρέπει να παρέχει δυναμική λειτουργία ως προς τις απαιτήσεις του δικτύου. Στον TCSC χρησιμοποιούνται ζεύγη θυρίστορ συνδεδεμένα παράλληλα και αντίθετα μεταξύ τους για τον ίδιο λόγο όπως και στον SVC. Όταν τα θυρίστορ δεν άγουν, η επαγωγική αντίδραση του TCSC δεν παίζει κανένα ρόλο. Έτσι ο πυκνωτής παρέχει ολόκληρη τη χωρητικότητά του και ο συντελεστής ισχύος του TCSC είναι χωρητικός.

Όταν τα θυρίστορ άγουν, τότε ανάλογα με τη γωνία έναυσής τους το ρεύμα της γραμμής περνά διαμέσου και των δύο κλάδων του TCSC. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος  $X_C/X_L$  του TCSC είναι μεταβλητός και το ποσοστό αντιστάθμισης της εμπέδησης και κατ' επέκταση της αέργου ισχύος της γραμμής μεταβάλλεται.

Με λίγα λόγια, όταν η γραμμή εμφανίζει χωρητική συμπεριφορά, αυτός απορροφάει την περίσσεια άεργο ισχύ, ενώ όταν η γραμμή παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά, ο TCSC παρέχει άεργο ισχύ στη γραμμή.



Στην **Εικόνα 4.4** φαίνεται μία τέτοια δομή όπου  $k, m$  οι ζυγοί διασύνδεσης της γραμμής,  $X_C$  η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή,  $X_L$  η επαγωγική αντίδραση του πηνίου,  $k-m$  η γραμμή μεταφοράς και  $Z_L$  η εμπέδηση της γραμμής.



**Εικόνα 4.4 :** Το μοντέλο ενός TCSC [2]

Όταν συνδέεται ένας πυκνωτής σε μία γραμμή μεταφοράς (**Εικόνα 4.5**), οι σχέσεις (1) και (2) από [23] γίνονται ως εξής:

$$P = \frac{U_s \cdot U_R}{X_L - X_C} \sin \delta \quad (71)$$

$$Q = \frac{U_s \cdot \Delta U}{X_L - X_C} \cos \delta \quad (72)$$

όπου  $P$  η ενεργός ισχύς και  $Q$  η άεργος ισχύς της γραμμής.

Το ποσοστό αντιστάθμισης υπολογίζεται από τον λόγο  $k$  ο οποίος από [23] είναι:

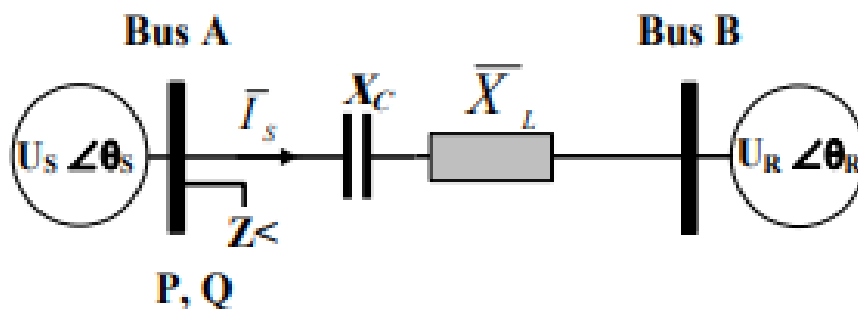
$$k = X_C / X_L \quad (73)$$

όπου  $X_C$  είναι η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή και  $X_L$  η επαγωγική αντίδραση της γραμμής.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (73) στις (71) και (72), η ενεργός και άεργος ισχύς από [23] δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$P = \frac{U_S \cdot U_R}{X_L \cdot (1 - k)} \sin \delta \quad (74)$$

$$Q = 2 \frac{U_S \cdot U_R}{X_L} \frac{k}{(1 - k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (75)$$

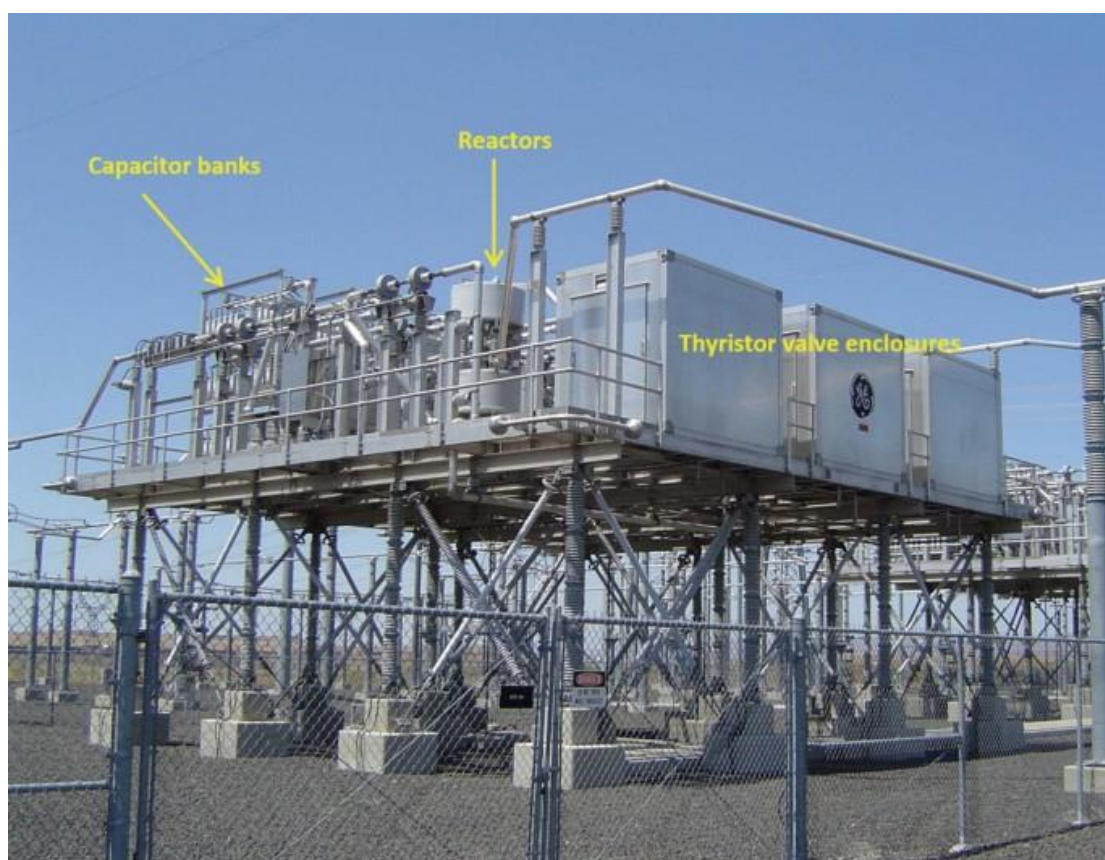


Εικόνα 4.5: Εν σειρά σύνδεση πυκνωτή [23]

Όπως και στον SVC, το πηνίο στον TCSC προστατεύει τα θυρίστορ από τις αιχμές ρεύματος που προκύπτουν από την φόρτιση και την εκφόρτιση του πυκνωτή.

#### Πλεονεκτήματα TCSC:

1. Βελτίωση της ροής ισχύος
2. Μείωση της αέργου ισχύος και βελτίωση συντελεστή ισχύος
3. Δυνατότητα για αξιοποίηση περισσότερης πραγματικής ισχύος
4. Βελτίωση σταθερότητας του δικτύου, μειώνοντας τις ταλαντώσεις ισχύος
5. Μείωση απωλειών λόγω μείωσης της άεργης συνιστώσας του ρεύματος γραμμής ( $P=I^2 \cdot R$ )
6. Ευκολότερος συγχρονισμός της συχνότητας του δικτύου



**Εικόνα 4.6: Ο TCSC στην πράξη [24]**

### Μειονεκτήματα TCSC:

- Υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης
- Σε δίκτυα με πολλές διακλαδώσεις, η αποδοτικότητά του είναι περιορισμένη καθώς απαιτείται πολύ ακριβής ρύθμιση του βαθμού αντιστάθμισης.
- Δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και αρμονικών
- Ευαίσθησία σε υπερτάσεις και σφάλματα: Ο TCSC σε ακραίες συνθήκες αστάθειας του δικτύου, δεν μπορεί να παρέχει υποστήριξη. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προσωρινή απώλεια ελέγχου της ισχύος.
- Θερμική καταπόνηση των θυρίστορ

Για να υπάρχει ισορροπία μεταξύ κόστους και απόδοσης αυτών των συσκευών, ένας TCSC θα πρέπει να διασυνδέεται κυρίως στις πιο φορτισμένες γραμμές μεταφοράς. Παρά τα μειονεκτήματα, τα οφέλη που προσφέρει ο TCSC συνήθως υπερκαλύπτουν αυτά τα ζητήματα, καθιστώντας το χρήσιμο εργαλείο στα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος.

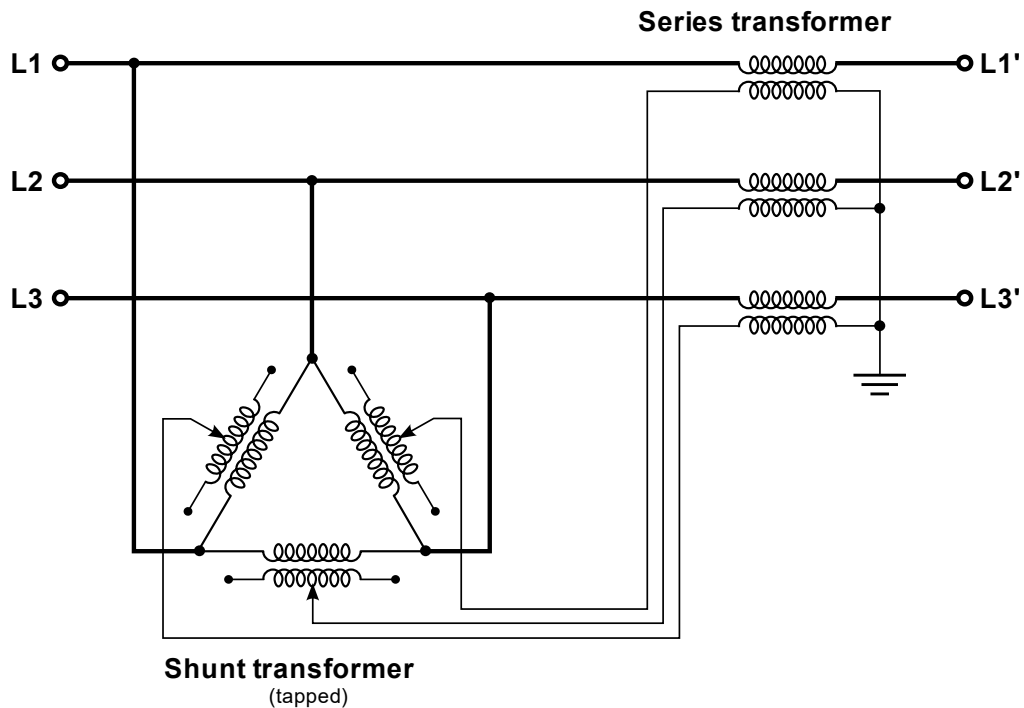
#### **4.2.3 Ρυθμιστής Γωνίας Φάσης Ελεγχόμενος Από Θυρίστορ (SPS ή TCPAR)**

Στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος όταν υπάρχει μεγάλη διαφορά φάσης μεταξύ των τάσεων δύο διασυνδεδεμένων ζυγών, δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα:

1. Η ροή ισχύος σε ένα δίκτυο έχει φορά από σημεία με μεγαλύτερη φασική γωνία τάσης προς σημεία με χαμηλότερη φασική γωνία τάσης. Εάν δεν γίνεται ρύθμιση αυτής της διαφοράς φάσης (γωνία  $\delta$ ), τότε οι γραμμές μεταφοράς με χαμηλότερη εμπέδηση θα έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ροών ισχύος από τις άλλες, με συνέπεια την καταπόνησή τους. Επίσης οι άλλες γραμμές δεν θα αξιοποιούνται στο μέγιστο.
2. Διαταραχές/αστάθειες τάσεων σε κάποιες γραμμές.
3. Γεννήτριες που συνδέονται σε διαφορετικούς ζυγούς μπορεί να βγουν εκτός συγχρονισμού και επειδή ο ρότορας περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τη σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου, υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής τους ή διακοπής της λειτουργίας τους από τα συστήματα προστασίας με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγής ισχύος.
4. Διακυμάνσεις της συχνότητας του δικτύου

Για τους λόγους αυτούς είναι πολύ σημαντική η τοποθέτηση μηχανισμών που επιτρέπουν τη μεταβολή της γωνίας των τάσεων σε ένα δίκτυο. Παλαιότερα αυτό γινόταν μέσω της δυνατότητας ρυθμίσεων που υπήρχε στις γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Όμως στα δίκτυα μεγάλου μήκους υπήρχαν δυσκολίες στη

διατήρηση της ευστάθειας. Στη συνέχεια ενσωματώθηκαν «Μετασχηματιστές Μετατόπισης Φάσης» (PST ή «Quadrature Boosters») [9] οι οποίοι έλεγχαν τόσο την γωνία φάσης όσο και το μέτρο της τάσης.

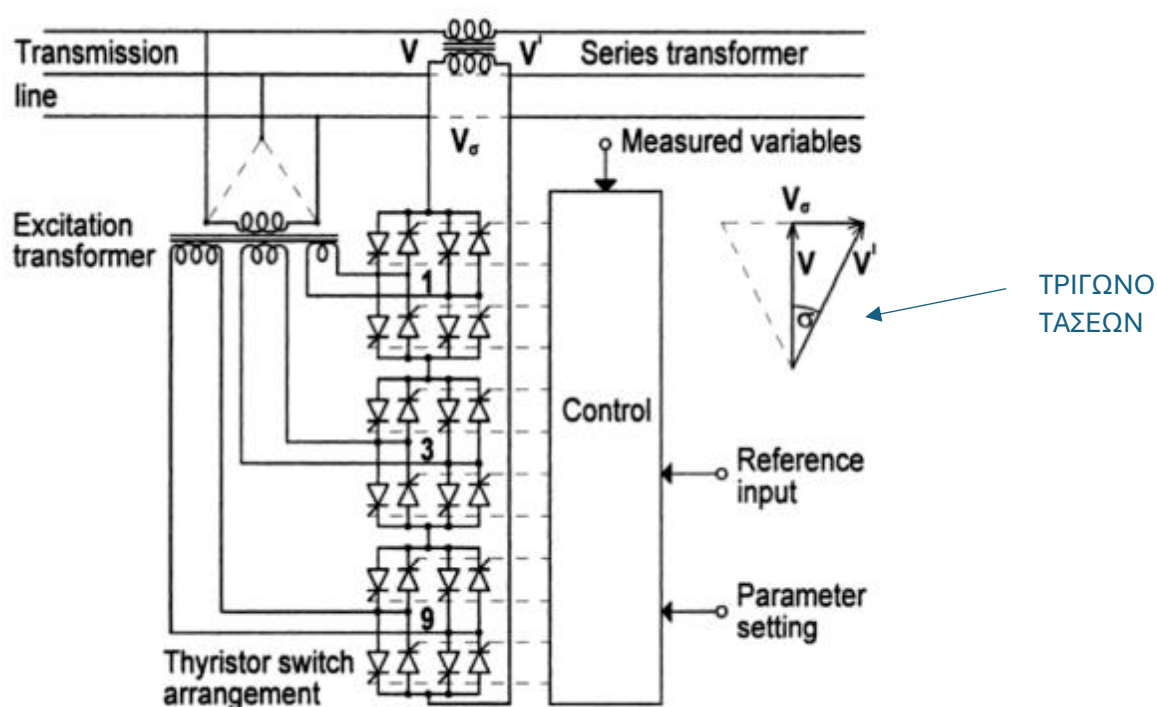


**Εικόνα 4.7: Το κύκλωμα ενός Μετασχηματιστή μετατόπισης φάσης [25]**

Αργότερα με την χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος, ο «Μετασχηματιστής Μετατόπισης Φάσης Ελεγχόμενος Από Θυρίστορ» (TCPST) [9] ήταν η πιο απλή συσκευή ελέγχου της φασικής γωνίας που θα αντικαθιστούσε τους Μετασχηματιστές Μετατόπισης Φάσης όμως ήταν πολύ πιο ακριβός. Έτσι η συσκευή που επικράτησε είναι ο Ρυθμιστής Γωνίας Φάσης Ελεγχόμενος Από Θυρίστορ (TCPAR) (Εικόνα 4.8), ο οποίος λειτουργεί ως εξής:

Αρχικά, ένας τριφασικός μετασχηματιστής διέγερσης (excitation transformer) μέσω του πρωτεύοντος τυλίγματος «βλέπει» την τάση στην αρχή της γραμμής ( $V$ ). Μέσω των τριών δευτερευόντων τυλιγμάτων (ένα για κάθε φάση), τα οποία δεν αποτελούνται από τον ίδιο αριθμό σπειρών, μεταφέρει το πλάτος και τη γωνία αυτής της τάσης στα θυρίστορ. Έπειτα τα θυρίστορ δημιουργούν μία τάση η οποία προηγείται κατά  $90^\circ$  της τάσης αναχώρησης ( $V$ ), η οποία στην εικόνα συμβολίζεται με  $V_\sigma$ . Αυτή η τάση που παράγεται ελεγχόμενα μέσω των κυκλωμάτων παλμοδότησης των θυρίστορ, μέσω ενός τριφασικού μετασχηματιστή σειράς (series transformer) προστίθεται με την τάση αναχώρησης ( $V$ ) (λόγω της εν σειρά σύνδεσης του πρωτεύοντος τυλίγματος).

Παρατηρώντας το τρίγωνο των τάσεων (Εικόνα 4.8), μεταβάλλοντας το πλάτος της  $V_\sigma$ , αλλάζει η γωνία ανάμεσα στην τάση αναχώρησης ( $V$ ) και στην τάση άφιξης της γραμμής μεταφοράς ( $V'$ ). Έτσι γίνεται απευθείας έλεγχος της ενεργού ισχύος καθώς λόγω της σχέσης (1) είναι ανάλογη με αυτή τη γωνία (γωνία  $\delta$ ).



Εικόνα 4.8: Το κύκλωμα ενός TCRF για τον έλεγχο της φασικής γωνίας [4]

Το πλάτος και η γωνία της τάσης ενίσχυσης ρυθμίζεται από τα θυρίστορ ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Στόχος του TCPAR είναι ο άμεσος έλεγχος της ροής της ισχύος. Έτσι επιτυγχάνονται τα εξής:

- Ταχύτερος έλεγχος έναντι των μηχανικών συστημάτων
- Άμεσος έλεγχος ενεργού ροής ισχύος λόγω ρύθμισης της ενεργού γωνίας
- Μείωση απωλειών
- Μείωση κινδύνου διακύμανσης τάσης ή και διακοπών

Από την άλλη αυτή η μέθοδος έχει και κάποια αρνητικά όπως δημιουργία αρμονικών, υψηλό κόστος εγκατάστασης και περιορισμένη διαχείριση ρεύματος από τα θυρίστορ. Επίσης, ένας TCPAR συνήθως εγχέει άεργο ισχύ στο σύστημα. Έτσι συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με παράλληλους αντισταθμιστές.



## **4.3 Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Ελεγχόμενα από Μετατροπείς Ισχύος**

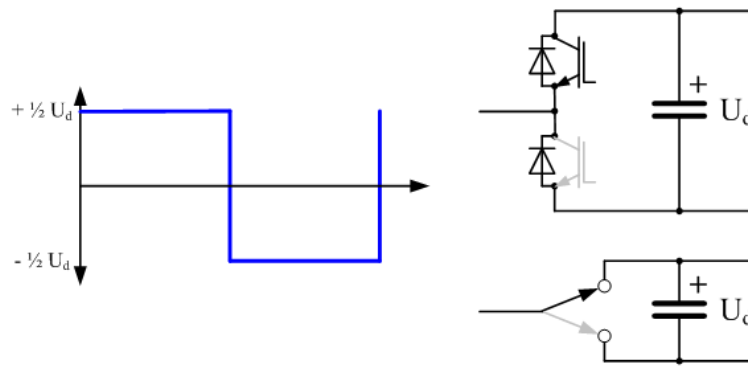
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ελεγκτές που αντί για θυρίστορ χρησιμοποιούν ημιαγωγικά στοιχεία με δυνατότητα εξαναγκασμένης σβέσης όπως τρανζίστορ, συνήθως τα IGBTs. Παρέχουν ακόμα καλύτερο και πιο δυναμικό έλεγχο των παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς που αναφέρθηκαν στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

### **4.3.1 Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής (STATCOM)**

Ο Ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής είναι μία συσκευή που πραγματοποιεί παράλληλη αντιστάθμιση όπως και ο SVC. Η διαφορά του από τον SVC είναι ότι χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα τάσης («*Synchronous Voltage Source*» [4] - SVS) ή αντιστροφέα (inverter) ο οποίος μετατρέπει την DC τάση των πυκνωτών σε AC. Αυτή την AC τάση την εισάγει παράλληλα στο δίκτυο, είτε σε έναν ζυγό είτε κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς έτσι ώστε να ρυθμίσει το πλάτος της τάσης στο σημείο εκείνο. Υπάρχουν τρία είδη μετατροπέων:

#### *i. Μετατροπέας δύο βαθμίδων:*

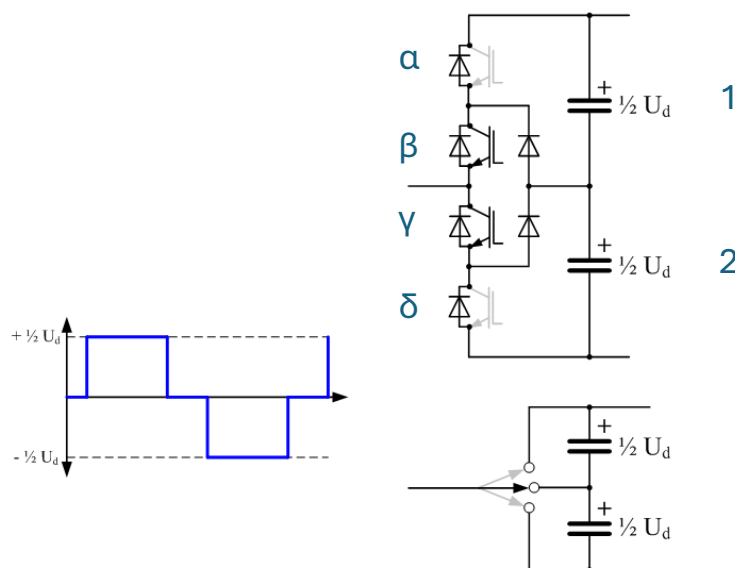
Σε αυτόν χρησιμοποιούνται δύο τρανζίστορ και παράλληλα σε αυτά ένας πυκνωτής. Τα τρανζίστορ παλμοδοτούνται εναλλάξ εντός μίας περιόδου του ημιτονοειδούς σήματος. Έτσι η αγωγή του κάθε τρανζίστορ δίνει στην έξοδο αντίθετη τάση λόγω της πολικότητας του πυκνωτή με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας τετραγωνικός παλμός. Ανάλογα με το χρόνο που διαρκεί ο κάθε παλμός των τρανζίστορ, μεταβάλλεται και το πλάτος του θετικού και του αρνητικού τμήματος του τετραγωνικού παλμού. Αυτός ο μετατροπέας, όμως, έχει το μεγάλο αρνητικό της δημιουργίας πολλών αρμονικών καθώς το τετραγωνικό σήμα έχει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την ημιτονοειδή κυματομορφή.



Εικόνα 4.9: Μετατροπές δύο βαθμίδων [6]

ii. Μετατροπές τριών βαθμίδων:

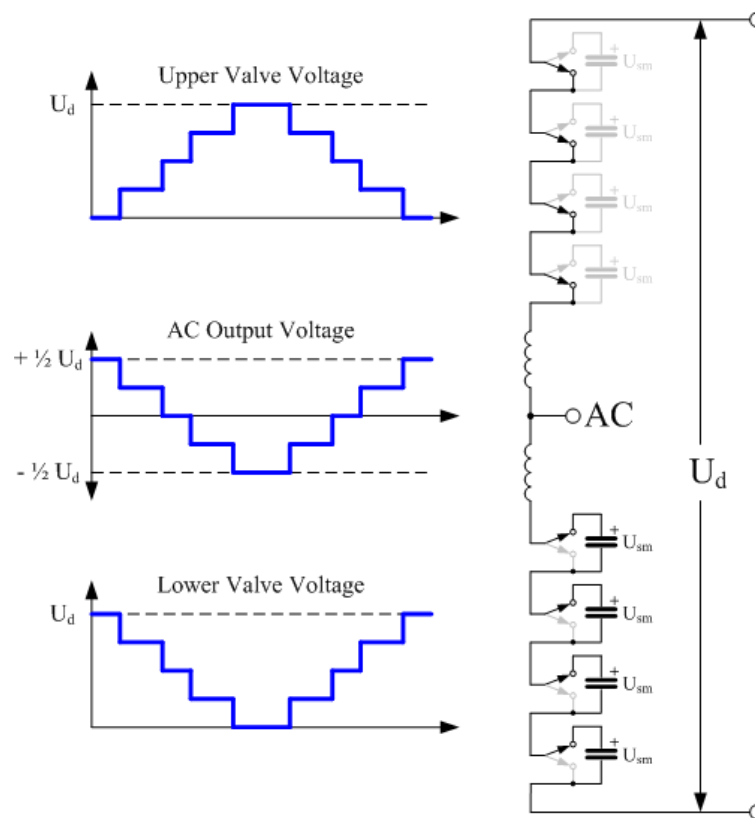
Σε αυτόν χρησιμοποιούνται τέσσερα τρανζίστορ και παράλληλα σε αυτά δύο πυκνωτές. Όταν παλμοδοτούνται ταυτόχρονα τα τρανζίστορ  $\alpha$  και  $\beta$  παράγεται ο θετικός παλμός από τον πυκνωτή 1, όταν παλμοδοτούνται τα τρανζίστορ  $\gamma$  και  $\delta$  παράγεται ο αρνητικός παλμός μέσω του πυκνωτή 2 και στις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές που άγουν τα δύο ενδιάμεσα τρανζίστορ ( $\beta$  και  $\gamma$ ) η τάση στην έξοδο είναι μηδέν. Έτσι παράγεται μία κυματομορφή που πλησιάζει περισσότερο το ημιτονοειδές σήμα συγκριτικά με τον μετατροπέα δύο βαθμίδων. Επομένως αυτός ο μετατροπέας παρουσιάζει λιγότερες αρμονικές σε σχέση με τον προηγούμενο.



**Εικόνα 4.10: Μετατροπείας τριών βαθμίδων [6]**

*iii. Μετατροπείας πολλαπλών βαθμίδων:*

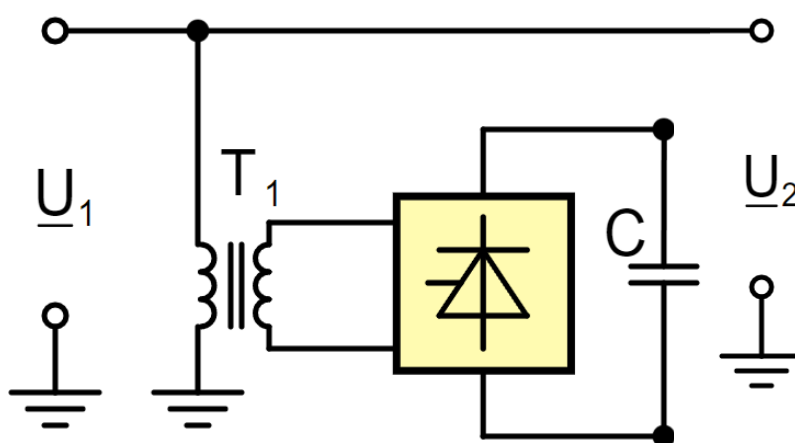
Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται 8 τρανζίστορ στα οποία εφαρμόζεται PWM σήμα δηλαδή παλμοδοτούνται με διαφορετικές χρονικές διάρκειες κι έτσι παράγεται στην έξοδο ένα σήμα το οποίο μοιάζει πολύ με την ημιτονοειδή κυματομορφή και συνεπώς έχει ακόμα λιγότερες αρμονικές.



**Εικόνα 4.11: Μετατροπείας πολλαπλών βαθμίδων [6]**

Έτσι λοιπόν ανάλογα με τον τύπο του μετατροπέα αλλά και την ταχύτητα παλμοδότησης των τρανζίστορ παράγεται διαφορετική τάση ως προς την κυματομορφή και το πλάτος της. Πιο συγκεκριμένα

όταν ο STATCOM παρέχει στο δίκτυο τάση μεγαλύτερου πλάτους από αυτή του συστήματος, τότε παρέχει άεργο ισχύ. Αντιθέτως, όταν η τάση στην έξοδό του έχει μικρότερο πλάτος από εκείνη του δικτύου, τότε απορροφά άεργο ισχύ. Αυτό εξηγείται και από τη σχέση (2) του Κεφαλαίου 1 διότι η άεργος ισχύς είναι ανάλογη των μέτρων των τάσεων αναχώρησης και άφιξης.



**Εικόνα 4.12: Ο STATCOM στο ανά μονάδα σύστημα [10]**

Ο STATCOM παρέχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι του SVC. Μπορεί να υποστηρίξει ένα σύστημα σε απότομες και μεγάλες βυθίσεις τάσεων. Επίσης, σε περίπτωση βλάβης μιας κοντινής γραμμής, επειδή τα φορτία εκείνης θα τραβήξουν ισχύ από άλλες γραμμές υπερφορτώνοντάς τες, το οποίο οδηγεί σε πτώσεις τάσης, ο STATCOM μπορεί να παρέχει άεργο ισχύ στο δίκτυο αυξάνοντας την τάση έως ότου η βλάβη αποκατασταθεί. Επίσης έχει πολύ καλύτερη ταχύτητα απόκρισης συγκριτικά με έναν SVC.

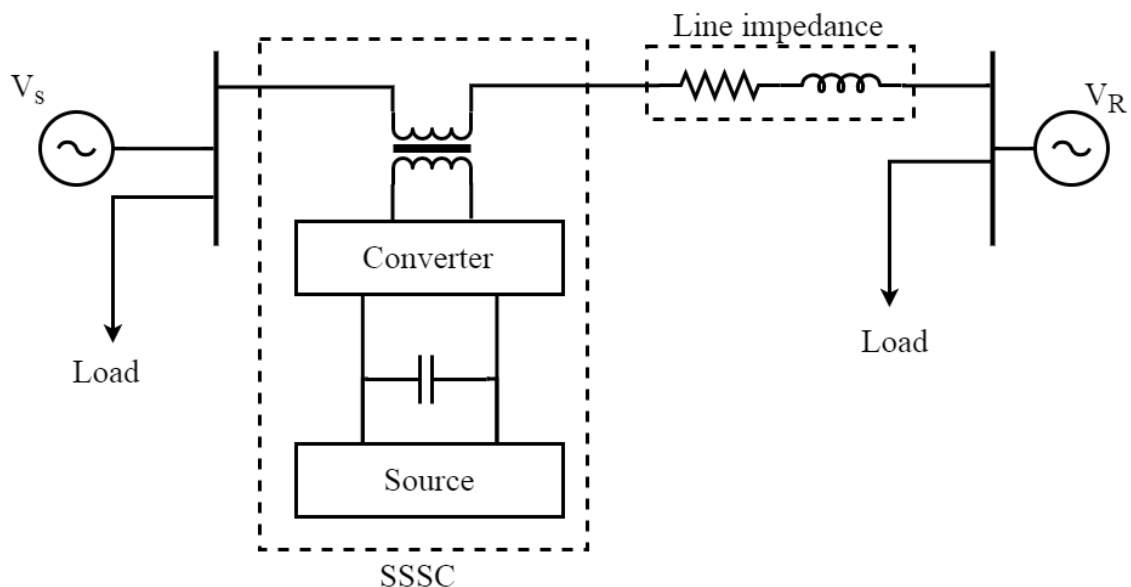
Ακόμα, ένας STATCOM μπορεί να εγκατασταθεί και σε υποσταθμούς, πραγματοποιώντας έλεγχο σε παραπάνω από μία γραμμές. Αυτή η δυνατότητα που παρέχει είναι πολύ καλή σε σχέση με τη διασύνδεση ελεγκτών σε κάθε γραμμή ξεχωριστά, κάτι το οποίο θα ανέβαζε πολύ το κόστος. Ανάλογα με τη διαθέσιμη λειτουργία ελέγχου, οι ελεγκτές STATCOM μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για πιο προηγμένες εφαρμογές, όπως ενεργό φιλτράρισμα, απόσβεση ταλάντωσης ισχύος (POD) ή ακόμα και περιορισμένες αλληλεπιδράσεις ενεργού ισχύος.



***Εικόνα 4.13: Ο STATCOM διασυνδεδεμένος σε έναν υποσταθμό [6]***

### 4.3.2 Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής Σειράς (SSSC)

Η ιδέα του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή σειράς είναι η εισαγωγή μιας AC τάσης σε σειρά με την εμπέδηση της γραμμής μεταφοράς. Αποτελείται από έναν μετατροπέα (SVS) αντίστοιχο αυτού που χρησιμοποιείται στους STATCOM και από έναν μετασχηματιστή του οποίου το πρωτεύον τύλιγμα συνδέεται σε σειρά με τη γραμμή (Εικόνα 4.14). Όπως και στον STATCOM, ο SVS περιέχει και μία πηγή (Source) η οποία παρέχει στον μετατροπέα την απαιτούμενη ενέργεια (λόγω των απωλειών του ίδιου), όταν στην γραμμή δεν υπάρχουν φορτία.



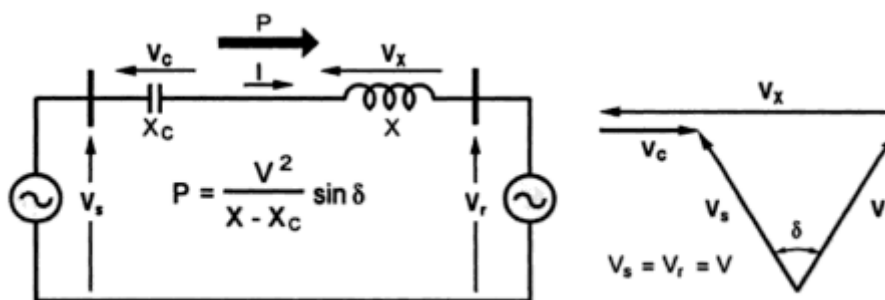
Εικόνα 4.14: Ο Ελεγχόμενος Σύγχρονος Αντισταθμιστής Σειράς [8]

Η λειτουργία του SSSC βασίζεται στο γεγονός ότι ο αντιστροφάας παράγει αυτή την AC τάση με μεταβλητό πλάτος και γωνία σε σχέση με το ρεύμα της γραμμής. Υπάρχουν δύο περιοχές λειτουργίας του SVS:

- a. Όταν η τάση του SVS προηγείται του ρεύματος γραμμής (έως και  $90^\circ$ ), ο αντισταθμιστής συμπεριφέρεται σαν ένα πηνίο,

συνδεδεμένο σε σειρά με την εμπέδηση της γραμμής. Επομένως απορροφάει άεργο ισχύ από τη γραμμή μεταφοράς και η συνολική τάση του δικτύου μειώνεται.

- b. Όταν η τάση του SVS έπεται του ρεύματος γραμμής (έως και  $90^\circ$ ), ο αντισταθμιστής συμπεριφέρεται σαν ένα πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά με την εμπέδηση της γραμμής. Σε αυτή την περίπτωση η τάση του SVS προστίθεται σε εκείνη κατά μήκος της γραμμής, άρα η συνολική τάση του δικτύου αυξάνεται. Επίσης, ο SVS παρέχει άεργο ισχύ στη γραμμή. Στις  $90^\circ$  η λειτουργία του SSSC είναι η ίδια με την αντιστάθμιση μέσω ενός πραγματικού πυκνωτή (*Εικόνα 4.16*).



**Εικόνα 4.15: Παραδοσιακή αντιστάθμιση με πυκνωτή σε σειρά [4]**

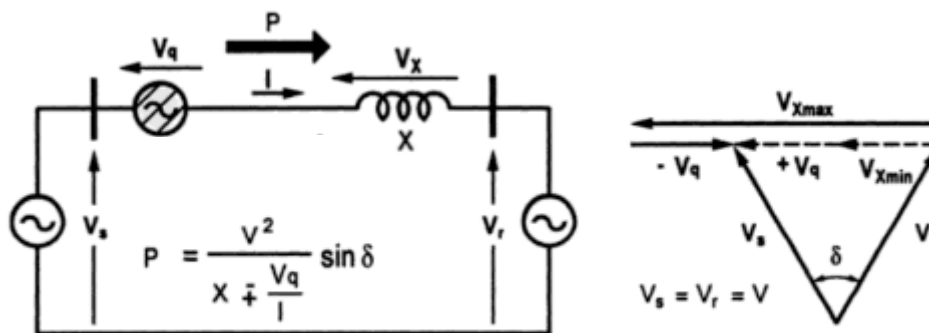
### Σύγκριση με αντιστάθμιση με χρήση πυκνωτή

Η τάση αντιστάθμισης  $V_c$  ενός αντίστοιχου πραγματικού πυκνωτή περιγράφεται από [4] από τη σχέση:

$$V_c = -jkXI$$

όπου  $I$  το ρεύμα γραμμής,  $X$  η εμπέδηση της γραμμής και  $k$  ο συντελεστής αντιστάθμισης (όπως και στον TCSC) και ορίζεται από τη

σχέση (5) όπου  $X_C$  είναι η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή, στην περίπτωση της σειριακής αντιστάθμισης με πυκνωτή (Εικόνα 4.5).

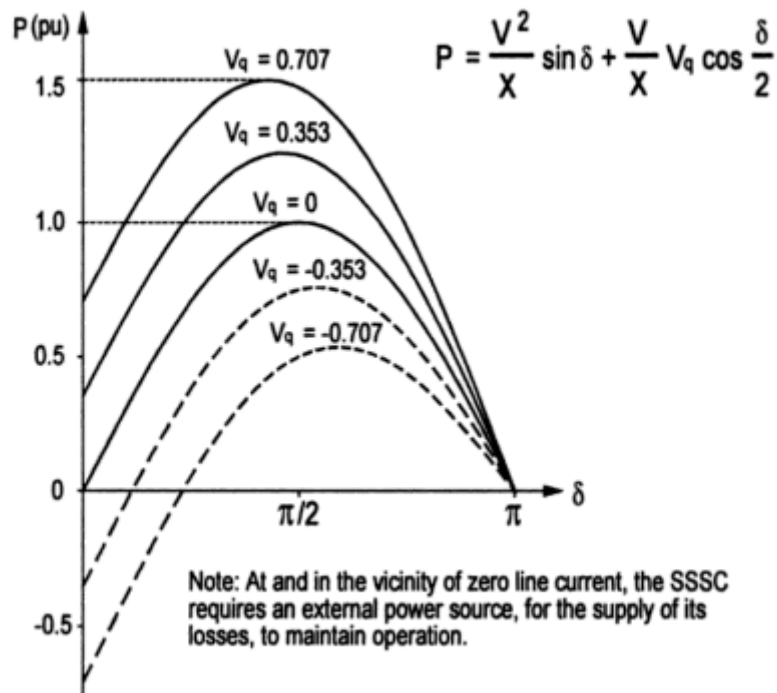


**Εικόνα 4.16: Σύγχρονη πηγή τάσης ( $V_q$ ) που προκύπτει από έναν Ελεγχόμενο Σύγχρονο Αντισταθμιστή Σειράς [4]**

Τα μειονεκτήματα της αντιστάθμισης μέσω πυκνωτή είναι ότι η τάση που παρέχει είναι σταθερή και ότι μπορεί να εφαρμοστεί μόνο χωρητική αντιστάθμιση. Αντιθέτως, με τον ελεγχόμενο σύγχρονο αντισταθμιστή σειράς παράγεται μία τάση μεταβλητή ως προς το πλάτος αλλά και τη γωνία με αποτέλεσμα ο SSSC να μπορεί να λειτουργήσει τόσο στην χωρητική όσο και στην επαγωγική περιοχή. Αυτοί είναι και οι λόγοι που ο SSSC παρέχει πιο δυναμική λειτουργία από έναν TCSC καθώς στον δεύτερο ο έλεγχος γίνεται κυρίως μέσω πυκνωτών και πηνίων και όχι μίας «σύγχρονης πηγής τάσης» [4] όπως στον πρώτο.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ενεργού ισχύος  $P$  και της γωνίας  $\delta$  ως προς την τάση που παράγει ένας ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής σειράς ( $V_q$ ). Παρατηρούμε ότι όσο η  $V_q$  μεγαλώνει, αυξάνεται και η ενεργός ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί. Επίσης, ο SSSC για  $0 \leq \delta \leq \pi/2$  αυξάνει το ποσό της μεταφερόμενης ισχύος κατά ποσοστά της μέγιστης ( $P_{max}$ ).





**Εικόνα 4.17: Γραφική παράσταση της ενεργού ισχύος  $P$  και της γωνίας  $\delta$  ως προς την τάση που παράγει το SSSC ( $V_q$ ) [4]**

### **Πλεονεκτήματα SSSC**

- Δυναμικός έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος
- Αύξηση ικανότητας μεταφοράς ισχύος χωρίς να χρειάζεται αναβάθμιση των υποδομών
- Ο SSSC έχει πολύ μεγαλύτερο εύρος ρύθμισης έναντι της αντιστάθμισης με πυκνωτή (TCSC).
- Βελτίωση συντελεστή ισχύος
- Μείωση απωλειών

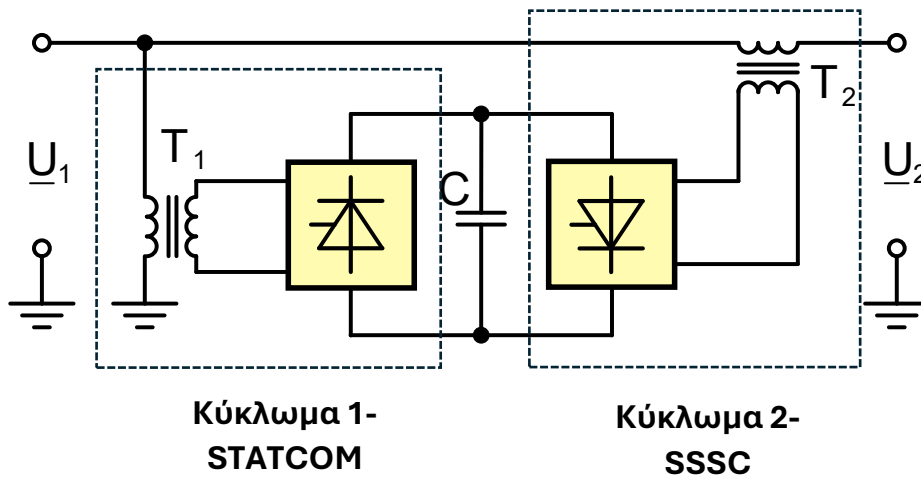
Ωστόσο τα τρανζίστορ είναι ευαίσθητα ημιαγωγικά στοιχεία και η χρήση τους χρειάζεται μεγάλη προσοχή. Επίσης η κατασκευή ενός SSSC είναι πιο περίπλοκη από αυτή των TCSC και πιο ακριβή λόγω των τρανζίστορ.

### **4.3.3 Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (UPFC)**

Ο ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος είναι μια συσκευή ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος που παρέχει τον πιο ποιοτικό έλεγχο ροής ισχύος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους ελεγκτές που αναφέρθηκαν. «Η ιδέα του περιγράφηκε το 1995 από τον L. Gyugyi» [10].

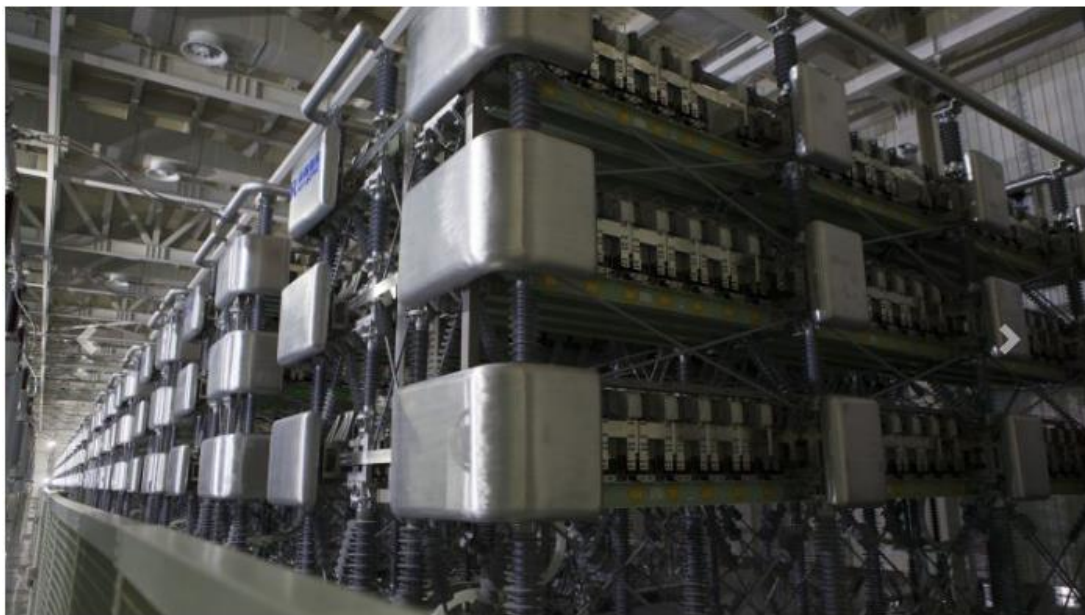
Είναι η πιο ολοκληρωμένη συσκευή ευέλικτων συστημάτων καθώς μπορεί να ρυθμίσει οποιαδήποτε παράμετρο του δικτύου επιθυμούμε επειδή στην πραγματικότητα συνδυάζει άλλες συσκευές: τον ρυθμιστή φασικής γωνίας (TCPAR), τον ελεγχόμενο σύγχρονο αντισταθμιστή (STATCOM) και τον ελεγχόμενο σύγχρονο αντισταθμιστή σειράς (SSSC). Εάν πάρουμε έναν TCPAR (Εικόνα 4.8) και διαχωρίσουμε τους μετασχηματιστές διέγερσης και σειράς ελέγχοντας το δευτερεύον τύλιγμα του πρώτου και το πρωτεύον τύλιγμα του δεύτερου από ξεχωριστούς μετατροπείς (SVSs), έχουμε και ξεχωριστό έλεγχο των μέτρων της τάσης και της εμπέδησης της γραμμής.

Στην Εικόνα 4.18 φαίνεται αυτή η υλοποίηση. Απομονώνοντας τα δύο κυκλώματα, μέσω των τρανζίστορ, μπορούμε να λειτουργήσουμε τη συσκευή είτε ως STATCOM, διότι μέσω του μετασχηματιστή T1 ελέγχουμε την παράλληλη πηγή τάσης, είτε ως SSSC, καθώς μέσω του μετασχηματιστή T2 ελέγχουμε την επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς. Διασυνδέοντας με DC τάση τα δύο κυκλώματα μετατροπής μπορούμε να ελέγξουμε είτε τα μέτρα των τάσεων αναχώρησης και άφιξης, είτε την επαγωγική αντίδραση είτε και την φασική γωνία. Έτσι ελέγχουμε είτε την ενεργό, είτε την άεργο, είτε και τις δύο ροές ισχύος.



**Εικόνα 4.18: Το κύκλωμα του UPFC [10]**

Ο UPFC είναι επίσης πολύ χρήσιμος στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διότι μέσω της κατάλληλης παραμέτρου ρυθμίζει πολύ πιο εύκολα διαταραχές ισχύος, τις ομαλές ή και τις απότομες πτώσεις τάσης και ελαχιστοποιεί τις απώλειες και τις ταλαντώσεις ισχύος. Στην ουσία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα όλων των προηγούμενων ελεγκτών.



**Εικόνα 4.19: Ο UPFC στην πραγματικότητα [26]**

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

-

**ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στις μέρες μας, η πολυπλοκότητα των δικτύων έχει αυξηθεί ραγδαία. Τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτουν πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις απ' ό,τι παλαιότερα και η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ολοένα και περισσότερο. Λόγω των έργων που πραγματοποιούνται στα συστήματα μεταφοράς εξαιτίας της βιομηχανικής ανάπτυξης, η συχνότητα εμφάνισης μεταβατικών φαινομένων έχει αυξηθεί, τεστάροντας τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι βοηθούν μέχρι ένα σημείο. Από κει και πέρα, οι ελεγκτές που αναλύθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία δίνουν τη δυνατότητα ευελιξίας στις μεταβατικές αυτές καταστάσεις σε μεγάλο βαθμό, με τη χρήση θυρίστορ και σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό μέσω της ενσωμάτωσης των μετατροπέων ισχύος.

## Βιβλιογραφία

1. Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία της Δώρα Σοφίας-Έλεγχος και ευστάθεια διασύνδεσης συστήματος με διεσπαρμένη παραγωγή και χρήση ευέλικτων συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος  
<http://hdl.handle.net/10889/10228>
2. «Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πάυλος Γεωργιάκης  
<https://www.ebooks4greeks.gr/synxrona-systhmata-metaforas-kai-dianomhs-hlektrikhs-energeias>
3. [https://en.wikipedia.org/wiki/Static VAR compensator](https://en.wikipedia.org/wiki/Static_VAR_compensator)
4. [https://www.google.gr/books/edition/Flexible Ac Transmission Systems FACTS/AqPr4JyDWg0C?hl=el&gbpv=1&dq=isbn:9780852967713&printsec=frontcover](https://www.google.gr/books/edition/Flexible_Ac_Transmission_Systems_FACTS/AqPr4JyDWg0C?hl=el&gbpv=1&dq=isbn:9780852967713&printsec=frontcover)
5. <http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=1493354&val=156&title=An%20Adaptive%20TRL%20Based%20Neurocontroller%20for%20Damping%20Power%20System%20Oscillations>
6. [https://en.wikipedia.org/wiki/Static synchronous compensator](https://en.wikipedia.org/wiki/Static_synchronous_compensator)
7. <https://www.semanticscholar.org/paper/Simulation-of-Static-Synchronous-Compensator-for-Kadandani-Maiwada/956e80772db63e2b95a3b6d730b2d04e9df7fb14>
8. [https://en.wikipedia.org/wiki/Static synchronous series compensator#cite\\_ref-IEEE Journals & Magazine\\_1-0](https://en.wikipedia.org/wiki/Static_synchronous_series_compensator#cite_ref-IEEE_Journals_&_Magazine_1-0)
9. [https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible AC transmission system](https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_AC_transmission_system)
10. [https://en.wikipedia.org/wiki/Unified power flow controller](https://en.wikipedia.org/wiki/Unified_power_flow_controller)
11. [https://en.wikipedia.org/wiki/Power station#Thermal power stations](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_station#Thermal_power_stations)
12. [https://en.wikipedia.org/wiki/Power station#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_station#History)
13. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wide area synchronous grid](https://en.wikipedia.org/wiki/Wide_area_synchronous_grid)

14. [https://www.researchgate.net/figure/Synchronous-areas-and-cross-border-interconnectors-in-the-European-transmission-grid-4\\_fig9\\_305827449](https://www.researchgate.net/figure/Synchronous-areas-and-cross-border-interconnectors-in-the-European-transmission-grid-4_fig9_305827449)
15. [https://www.researchgate.net/figure/One-line-diagram-of-the-studied-power-system-R-L-transmission-line-resistance-pu\\_fig2\\_263426552](https://www.researchgate.net/figure/One-line-diagram-of-the-studied-power-system-R-L-transmission-line-resistance-pu_fig2_263426552)
16. [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury-arc\\_valve](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury-arc_valve)
17. [https://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage\\_direct\\_current](https://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage_direct_current)
18. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thyristor>
19. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%B6%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81>
20. [https://en.wikipedia.org/wiki/Circuit\\_breaker#](https://en.wikipedia.org/wiki/Circuit_breaker#)
21. [https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_factor#](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_factor#)
22. [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_arc\\_furnace](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_arc_furnace)
23. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10420634>
24. [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-71926-9\\_9-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-319-71926-9_9-1)
25. [https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature\\_booster](https://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_booster)
26. <https://infra.global/projects/suzhou-southern-grid-500kv-unified-power-flow-controller-upfc/>
27. <https://www.eeeguide.com/capacitance-of-three-phase-overhead-line/>
28. [https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium-conductor\\_steel-reinforced\\_cable](https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium-conductor_steel-reinforced_cable)