

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΑΝΩΤΑΤΗ  
ΣΧΟΛΗ  
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

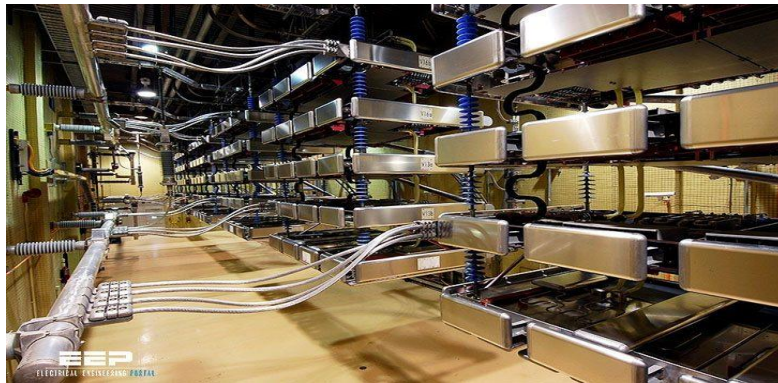
— ΑΣΠΑΙΤΕ —

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος σε Ηλεκτροκίνηση/  
Ηλεκτρικά Οχήματα, Επαγωγική Θέρμανση, UPS, Α.Π.Ε. και  
HVDC.

Applications of power electronics in motor drives, electrical vehicles, induction  
furnace, UPS, RES and HVDC.



Γεωργακόπουλος  
Δημήτριος (Α.Μ.880)

Παναγούλια Γεωργία  
(Α.Μ.933)

Τμήμα: Εκπαιδευτικών Ηλεκτρολογίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρίτσας Λεωνίδας

Ημερομηνία: 3/3/2020

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	6
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.....	8
1.1. Δίοδος.....	8
1.2. BJT – Διπολικό τρανζίστορ .....	9
1.3. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του BJT.....	11
1.4. MOSFET - Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου .....	12
1.5. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του MOSFET .....	13
1.6. IGBT - Διπολικό Τρανζίστορ μονωμένης πύλης .....	15
1.7. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του IGBT .....	16
1.8. GTO – Θυρίστορ με αποκοπή από την Πύλη .....	17
1.9. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του GTO.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ....	21
2.1. Η ηλεκτρική ενέργεια στην ηλεκτροκίνηση .....	21
2.2. Ηλεκτρονικά ισχύος στα ηλεκτροκίνητα οχήματα .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ UPS .....	30
3.1. Κύριοι ρόλοι του UPS .....	30
3.2. Τύποι UPS .....	31
3.3. UPS εκτός σύνδεσης.....	31
3.4. Συνδεδεμένο UPS .....	32
3.5. Γραμμικό διαδραστικό UPS.....	33
3.6. Εφαρμογές UPS .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ.....	35
4.1. Επαγωγική θέρμανση και συμβατικός έλεγχος .....	35
4.2. Συμβατικός έλεγχος ηλεκτρικής ισχύος .....	36
4.3. Παραδοσιακή δομή επαγωγικών θερμαντήρων.....	37
4.4. Νέες μέθοδοι ελέγχου επαγωγικής ισχύος με μικροελεγκτή .....	38
4.5. Αυτόματος συντονισμός συχνότητας.....	40
4.6. Έλεγχος ισχύος .....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗVDC .....	45
5.1. Εισαγωγή .....	45

5.2.	Μοντελοποίηση της δυναμικής του HVDC .....	51
5.3.	Η κατάσταση του HVDC σήμερα .....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΠΕ .....		53
6.1.	Γενική εισαγωγή .....	53
6.2.	Εφαρμογή ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα ΑΠΕ .....	53
6.2.1.	Μετατροπέας DC-DC Boost .....	55
6.2.2.	Μετατροπέας Buck-Boost DC-DC .....	55
6.2.3.	Μετατροπέας DC-DC Cuk .....	56
6.2.4.	Μετατροπέας DC-DC SEPIC .....	57
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (AC και DC).....		59
1.	Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	59
2.	Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού δικτύου.....	61
3.	Φορτία .....	61
4.	Κανονικές/Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας .....	62
5.	Ροή Ισχύος και Ενέργειας.....	62
6.	Αλληλεπίδραση Φορτίου – Συχνότητας και ο Αυτόματος Έλεγχος της.....	63
7.	Ευστάθεια Λειτουργίας Συστήματος.....	63
8.	Ανωμαλίες (Faults) λειτουργίας του συστήματος.....	63
9.	Σύστημα και μέσα προστασίας .....	65
10.	Μικροδίκτυα AC .....	65
10.1.	Ορισμός AC μικροδικτύου .....	65
10.2.	Πλεονεκτήματα των AC μικροδικτύων.....	66
10.3.	Προκλήσεις που αντιμετωπίζονται όταν πρόκειται για AC μικροδίκτυα .....	66
11.	Μικροδίκτυα DC .....	67
11.1.	Ορισμός μικροδικτύου DC.....	67
11.2.	Διανομή LVDC (χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος) .....	67
11.3.	Αιτίες για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων .....	69
12.	Δίκτυα συνεχούς ρεύματος.....	72
13.	Εφαρμογές στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος.....	73
14.	Συστήματα High voltage direct current (HVDC) .....	73
15.	Συστήματα Low voltage direct current (LVDC).....	76
16.	Ροή ισχύος σε DC δίκτυα.....	78

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 80

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε το αντικείμενο μελέτης μας για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα και θεωρούμε ότι λόγω της σπουδαιότητας του θέματος θα αποτελέσει πολύ σημαντικό εφαλτήριο για την μετέπειτα πορεία μας στον κλάδο. Πιο συγκεκριμένα, θέμα της παρούσας εργασίας αποτελούν τα ηλεκτρονικά ισχύος και η παρουσία τους σε διάφορες εφαρμογές. Εξετάζονται εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση, στην επαγωγική θέρμανση και στα HVDC. Η εργασία δομείται σε πέντε συνολικά κεφάλαια, εκ των οποίων στο πρώτο γίνεται αναφορά στις αρχές λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρονικών ισχύος, στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται τα ηλεκτρονικά ισχύος και η ηλεκτροκίνηση, στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα UPS, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα ηλεκτρονικά ισχύος και η επαγωγική θέρμανση, ενώ στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο συσχετισμός των ηλεκτρονικών ισχύος με τα HVDC. Όπως προκύπτει από την εργασία στο εγγύς μέλλον, η ηλεκτρική ενέργεια θα παρέχεται και θα διαχειρίζεται τα ηλεκτρονικά ισχύος και θα καταναλώνεται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. αυτό όχι μόνο θα εντείνει τον ρόλο της ηλεκτρονικής τεχνολογίας ισχύος στις διαδικασίες μετατροπής ισχύος, αλλά και θα υποδηλώνει ότι τα συστήματα ισχύος υφίστανται μια μεταβολή του παραδείγματος (paradigm shift), από την κεντρική κατανομή έως την κατανεμημένη παραγωγή.

*Λέξεις-κλειδιά:* ηλεκτρονικά ισχύος, ηλεκτρική ενέργεια, UPS, ηλεκτροκίνηση, επαγωγική θέρμανση, HVDC

## **ABSTRACT**

This dissertation has been the subject of our study for quite some time and we believe that due to the importance of the subject it will be a very important springboard for our subsequent course in the industry. More specifically, the subject of this work is electronic power and their presence in various applications. Applications are considered in electric propulsion, induction heating and HVDC. The thesis is therefore structured in five chapters, the first of which refers to the principles of operation of power electronics devices and systems. The second chapter examines power electronics and electrification whereas the third chapter discusses the use of power electronics in UPS. In the fourth chapter the role of power electronics in induction heating is analyzed, while in the fifth and last chapter the relation of the power electronics with the HVDC is presented. From the presentation of these important applications, it can be safely concluded that in the near future, electricity will be provided, controlled, managed and consumed electronically via power electronics systems. It is certain that the role of power electronics technology in power conversion processes will be intensified, and this is probably the second most important change in Electric Power Systems after the change from centralized production to distributed production.

**Keywords:** power electronics, electricity, UPS, electric propulsion, induction heating, HVDC

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος εξακολουθεί να είναι μια αναδύομενη τεχνολογία και έχει βρει το δρόμο της σε πολλές εφαρμογές, από την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. αιολική και ηλιακή ενέργεια) σε ηλεκτρικά οχήματα (EVs), βιοϊατρικές συσκευές και μικρές συσκευές όπως φορητοί φορτιστές. Στο εγγύς μέλλον, η ηλεκτρική ενέργεια θα παρέχεται και θα διαχειρίζεται τα ηλεκτρονικά ισχύος και θα καταναλώνεται μέσω ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. αυτό όχι μόνο θα εντείνει τον ρόλο της ηλεκτρονικής τεχνολογίας ισχύος στις διαδικασίες μετατροπής ισχύος, αλλά και θα υποδηλώνει ότι τα συστήματα ισχύος υφίστανται μια μεταβολή του παραδείγματος, από την κεντρική κατανομή έως την κατανεμημένη παραγωγή. Σήμερα έχουν εγκατασταθεί περισσότερες από 1000 gigawatts (GW) ανανεώσιμες πηγές (φωτοβολταϊκά (PV) και άνεμοι), τα οποία διαχειρίζονται με τεχνολογία ηλεκτρονικών ισχύος. Εντούτοις, τομείς όπως η εξοικονόμηση ενέργειας και η μεταφορά ηλεκτρισμού είναι ακμάζουσα, δημιουργώντας μια τεράστια αγορά όχι μόνο για συσκευές ισχύος, αλλά και για τεχνολογία συσκευασίας και σχεδιασμό μετατροπέα ισχύος. Ορισμένες από τις κινητήριες δυνάμεις της τεχνολογίας είναι το κόστος, ο όγκος, το βάρος, η λειτουργικότητα καθώς και η αξιοπιστία τους. Αυτή τη στιγμή, η τεχνολογία βλέπει μια αλλαγή από το να είναι καθαρά βασισμένη σε πυρίτιο στην κατασκευή τεχνολογίας WBG, όπως το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και το νιτρίδιο του γαλλίου (GaN), το οποίο απαιτεί ένα εντελώς νέο μοντέλο στον μετατροπέα ισχύος σχεδιασμό και διάταξη, καθώς αυτές οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν με ταχύτητα τουλάχιστον κατά μια τάξη μεγέθους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

### 1.1. Δίοδος

Στην ηλεκτρονική, η δίοδος είναι ένα στοιχείο που περιορίζει τη κατευθυντήρια ροή των φορέων αγωγιμότητας (charge carriers). Ουσιαστικά, η δίοδος επιτρέπει στο ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια κατεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη κατεύθυνση. Έτσι, η δίοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μια ηλεκτρονική εκδοχή της βαλβίδας, η οποία, για παράδειγμα, σε ένα σωλήνα νερού, δεν επιτρέπει ροή αντίθετη από την επιθυμητή. Οπότε, τα κυκλώματα που απαιτούν ροή προς μία μόνο κατεύθυνση περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες διόδους στη σχεδίαση του κυκλώματος. Οι πρώτες διόδοι περιλάμβαναν κρυστάλλους cat'swhisker και λυχνίες κενού. Σήμερα, οι περισσότερες διόδοι είναι κατασκευασμένες από υλικά ημιαγωγών όπως πυρίτιο ή γερμάνιο.

Οι περισσότερες σύγχρονες διόδοι βασίζονται στον ημιαγωγό p-n επαφών. Σε μια p-n δίοδο, συμβατικό ρεύμα μπορεί να ρέει από τη μεριά τύπου p (η άνοδος) στην άλλη μεριά τύπου n (η κάθοδος), αλλά δεν μπορεί να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Ένας άλλος τύπος δίοδου ημιαγωγών, η δίοδος Schottky, σχηματίζεται από την επαφή μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού παρά από μια επαφή p-n.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ή I-V μιας δίοδου ημιαγωγού αποδίδεται στη συμπεριφορά της περιοχής κατάρρευσης η οποία υπάρχει στην επαφή p-n μεταξύ των διαφορετικών ημιαγωγών. Όταν αρχικά δημιουργήθηκε η επαφή p-n, ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας (conduction band) της νοθευμένης-N (N-doped) περιοχής διαχέονται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή όπου υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από οπές (μέρη για τα ηλεκτρόνια στα οποία δεν βρίσκεται κανένα ηλεκτρόνιο) με τις οποίες τα ηλεκτρόνια ανασυνδυάζονται. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο συνδυάζεται με μια οπή, η οπή εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο παύει να είναι ελεύθερο. Επομένως δυο φορείς αγωγιμότητας εξαφανίστηκαν. Η περιοχή γύρω από την επαφή p-n ελαττώνεται από φορείς αγωγιμότητας και επομένως λειτουργεί ως μονωτής.



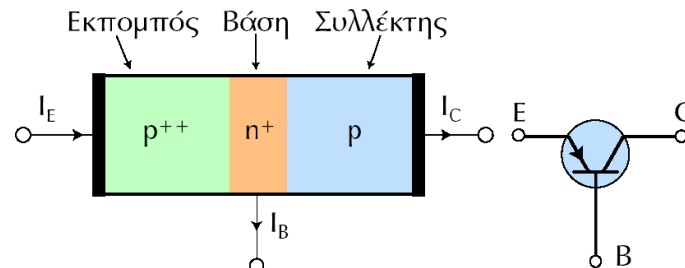
Παρόλα αυτά, το πλάτος κατάρρευσης (depletion width) δεν μπορεί να μεγαλώσει απεριόριστα. Για κάθε ζεύγος ηλεκτρονίο-οπής που ανασυνδυάζονται, ένα θετικά φορτισμένο 'νοθευμένο' (dopant) ιόν αφήνεται πίσω στη νοθευμένη-N περιοχή και ένα αρνητικά φορτισμένο 'νοθευμένο' ιόν αφήνεται στη νοθευμένη-P (P-doped) περιοχή. Καθώς προχωράνε οι ανασυνδυασμοί και περισσότερα ιόντα δημιουργούνται, δημιουργείται ένα αυξανόμενο ηλεκτρικό πεδίο στη ζώνη κατάρρευσης το οποίο επιδρά στην επιβράδυνση και τελικά στη διακοπή των ανασυνδυασμών. Σε αυτό το σημείο, υπάρχει μια ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού στην ζώνη κατάρρευσης. Αν μια εξωτερική τάση εφαρμοστεί στη δίοδο με την ίδια πολικότητα με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, η ζώνη κατάρρευσης συνεχίζει να λειτουργεί ως μονωτής εμποδίζοντας τη διέλευση σημαντικής ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναστροφή πόλωση. Αντίθετα, αν η πολικότητα της εξωτερικής τάσης είναι αντίθετη με την ενσωματωμένη διαφορά δυναμικού, θα συνεχίσουν οι ανασυνδυασμοί με αποτέλεσμα να έχουμε διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της επαφής p-n. Για τις διόδους από πυρίτιο, η εσωτερική τάση είναι περίπου ίση με 0.6 V. Επομένως, αν ένα εξωτερικό ρεύμα περάσει από τη δίοδο, θα δημιουργηθεί στη δίοδο μια τάση περίπου 0.6 V έτσι ώστε η νοθευμένη-P περιοχή να είναι θετική σε σχέση με τη νοθευμένη-N περιοχή και η δίοδος χαρακτηρίζεται ως ανοικτή, αφού έχει ορθή πόλωση.

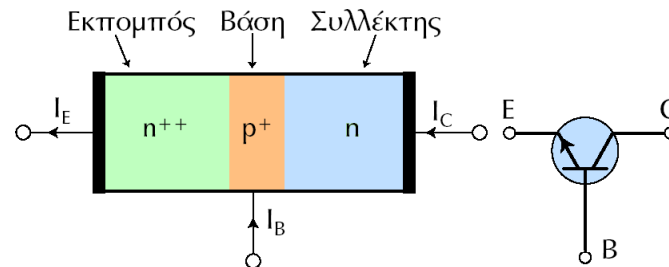
## 1.2 BJT – Διπολικό τρανζίστορ

Το διπολικό τρανζίστορ επαφής BJT (bipolar transistor junction) αποτελείται από τρεις ακροδέκτες, τον εκπομπό (emitter), τη βάση (base) και το συλλέκτη (collector). Ο έλεγχός του γίνεται από τον ακροδέκτη της βάσης ο οποίος αποτελεί το ηλεκτρόδιο ελέγχου. Ο εκπομπός είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή και προορισμός του είναι να εκπέμπει ηλεκτρόνια προς τη βάση. Η βάση είναι μια πολύ λεπτή περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη από αυτή του εκπομπού. Το πάχος της βάσης, επιτρέπει στα περισσότερα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τον εκπομπό να φθάνουν στον συλλέκτη. Ο συλλέκτης συλλέγει τα φορτία που καταφθάνουν από τον εκπομπό. Το επίπεδο εμπλουτισμού του συλλέκτη, βρίσκεται ανάμεσα σε εκείνο του εκπομπού και

της βάσης, ενώ η ισχύς που καταναλώνεται σ' αυτόν είναι μεγαλύτερη από εκείνες που καταναλώνονται στη βάση και στον εκπομπό, γι' αυτό και η περιοχή που καταλαμβάνει ο συλλέκτης είναι μεγαλύτερη. Το υλικό της βάσης είναι τύπου  $-n$  (τρανζίστορ τύπου  $-pnp$ ) ή τύπου  $-p$  (τρανζίστορ τύπου  $-npn$ ) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1 και 1.2.



Σχήμα 1.1: Δομή και κυκλωματικό σύμβολο τρανζίστορ- $pnp$



Σχήμα 1.2: Δομή και κυκλωματικό σύμβολο τρανζίστορ- $npn$

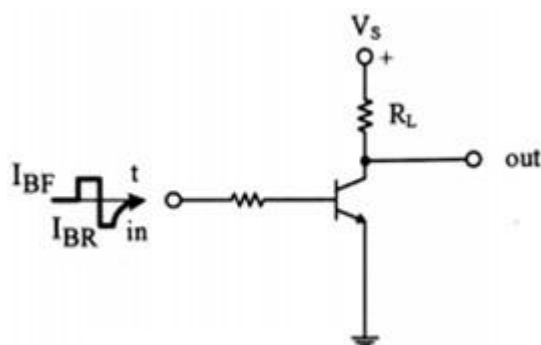
Στο κυκλωματικό σύμβολο, το βέλος βρίσκεται πάντα στον εκπομπό και δείχνει τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ η φορά του βέλους δείχνει τον ημιαγωγό- $n$ .

Το διπολικό τρανζίστορ, είναι στοιχείο ελεγχόμενο από ρεύμα. Δηλαδή, με την ρύθμιση ενός μικρού ρεύματος στο ρεύμα βάσης, επιτυγχάνεται ο έλεγχος του πολύ μεγαλύτερου ρεύματος του συλλέκτη. Οι περιοχές λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ είναι τρεις διαφορετικές, η περιοχή αποκοπής (ανοιχτός διακόπτης), η ενεργός περιοχή (ως ενισχυτής) και η περιοχή αποκοπής (κλειστός διακόπτης). Κάθε περιοχή, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες πολικότητες διαφορών δυναμικού στις δυο επαφές (εκπομπού - βάσης και βάσης - συλλέκτη) του τρανζίστορ. Στην περιοχή αποκοπής η ένωση βάσης - συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη, το ίδιο ισχύει και για την ένωση εκπομπού - βάσης. Στην ενεργό περιοχή η ένωση βάσης - συλλέκτη

είναι ορθά πολωμένη, ενώ η ένωση εκπομπού – βάσης ανάστροφα πολωμένη. Τέλος στην περιοχή κορεσμού και οι δυο ενώσεις είναι ορθά πολωμένες.

### 1.3. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του BJT

Στα παρακάτω σχήματα έχουμε τις κυματομορφές ρεύματος βάσης του BJT, ρεύματος συλλέκτη του BJT και το κύκλωμα κοινού εκπομπού για τη μέτρηση των διακοπτικών χρόνων. Όταν ένας παλμός ρεύματος τροφοδοτήσει τη βάση ενός τρανζίστορ ισχύος συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού τότε η κυματομορφή παρουσιάζεται όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.3: Κύκλωμα κοινού εκπομπού για τη μέτρηση των διακοπτικών χρόνων.

Οι χρόνοι  $t_d$  και  $t_{ri}$  δίνονται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή του συγκεκριμένου τρανζίστορ. Ο χρόνος σβέσης θα είναι

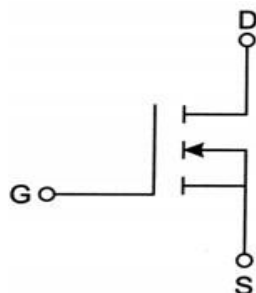
$$t_{of} = t_s + t_{fi}$$

Ο χρόνος  $t_s$  ορίζεται ως ο ολικός χρόνος αποθήκευσης (storagetime) και είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της παύσης του ρεύματος οδήγησης και της χρονικής στιγμής όπου το ρεύμα συλλέκτη είναι  $i_c = 0.9I_c$ . Το τρανζίστορ διατηρεί αποθηκευμένο ένα φορτίο περισσευόμενων φορέων στη βάση όταν βρίσκεται στην κατάσταση κορεσμού. Οπότε μέχρις ότου αφαιρεθεί όλο το πλεονάζον φορτίο το τρανζίστορ δεν μπορεί να αποκριθεί στην ακολουθούσα άκρη του παλμού οδήγησης. Ο χρόνος αυτός αποθήκευσης δίνεται από τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου BJT κατασκευαστή. Η

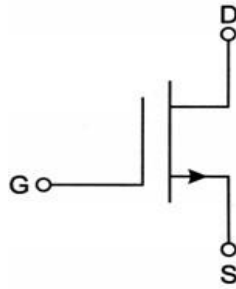
διαδικασία σβέσης του τρανζίστορ αρχίζει με την αφαίρεση του θετικού παλμού ρεύματος βάσης  $I_{bf}$  και την εφαρμογή του αρνητικού παλμού ρεύματος  $I_{br}$ . Οι οπές στην περιοχή n του συλλέκτη αρχίζουν να μειώνονται από το ρεύμα του συλλέκτη. Το αρνητικό ρεύμα βάσης δεν επηρεάζει την περιοχή n του συλλέκτη κατά τη διαδικασία επανασύνδεσης. Οι πλεονάζοντες φορείς μειονότητας της βάσης απομακρύνονται με τη χρησιμοποίηση του αρνητικού παλμού ρεύματος της βάσης.

#### 1.4. MOSFET - Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου

Το MOSFET (Metal-OxideSemiconductorFET) είναι το ευρύτερο χρησιμοποιούμενο τρανζίστορ και είναι ένας τύπος *fieldeffecttransistor* (FET). Τα κυκλώματα με MOSFET παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ, όμως υστερούν ως προς την ταχύτητα λειτουργίας τους. Επίσης, οι διαστάσεις κατασκευής MOSFET, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι κατά πολύ μικρότερες των διπολικών τρανζίστορ γεγονός που καθιστά την τεχνολογία των MOSFET πολύ ελκυστική για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι μονοπολικά τρανζίστορ, δηλαδή το ρεύμα οφείλεται σε ένα μόνο τύπο φορτίου, σε ηλεκτρόνια (n- καναλιού) ή σε οπές (p- καναλιού). Επιπλέον τα ρεύματα των MOSFET είναι ρεύματα ολίσθησης (αγωγιμότητα) και όχι διάχυσης τα οποία ελέγχονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η τάση που εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο ελέγχου. Τα ρεύματα αυτά ρέουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή στο σώμα του τρανζίστορ η οποία ονομάζεται κανάλι. Ο ακροδέκτης G, είναι το ηλεκτρόδιο του ελέγχου (πύλη-Gate) οι άλλοι δυο ακροδέκτες S και D ονομάζονται αντίστοιχα πηγή (Source) και υποδοχή (Drain).



Σχήμα 1.4: Κυκλωματικό σύμβολο MOSFET πύκνωσης – n-καναλιού πλήρες.

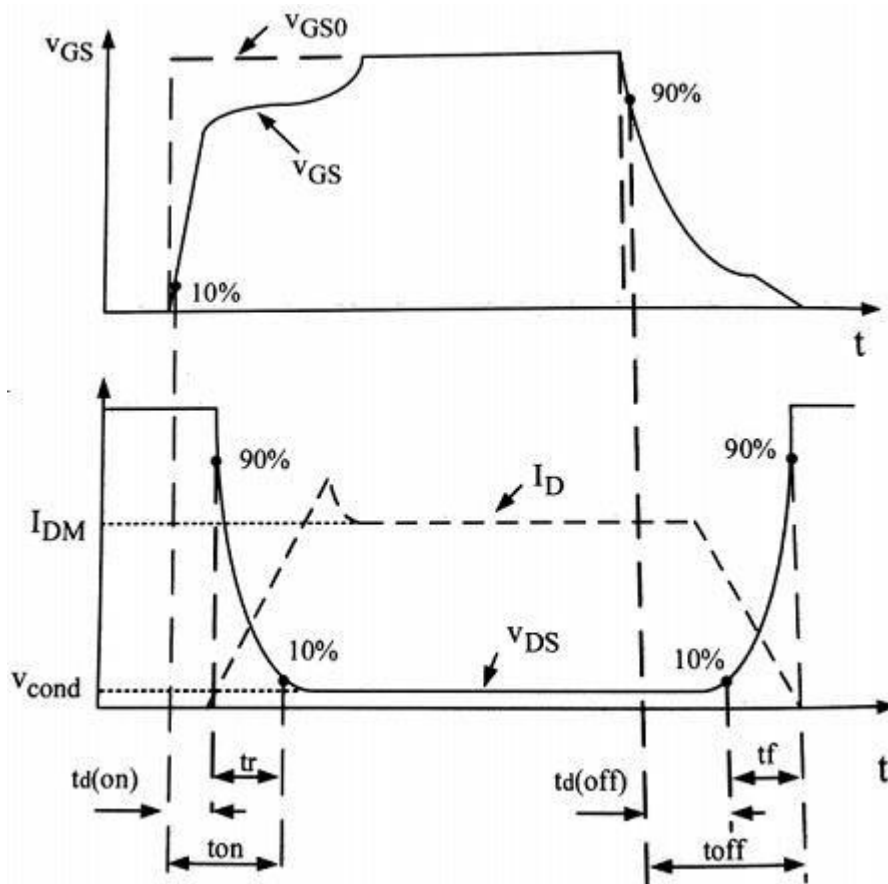


Σχήμα 1.5: Κυκλωματικό σύμβολο MOSFET πύκνωσης – n-καναλιού απλοποιημένο.

Επειδή το ηλεκτρόδιο της πύλης είναι μονωμένο από το υπόλοιπο σώμα του τρανζίστορ (με στρώμα διοξειδίου του πυριτίου-  $\text{SiO}_2$ ), το ρεύμα της πύλης για την οδήγηση του τρανζίστορ είναι εξαιρετικά μικρό (της τάξης των  $10^{-15}\text{mA}$ ) και πρακτικά θεωρείται μηδενικό. Αυτό σημαίνει ότι, το μονοπολικό τρανζίστορ (MOSFET) σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ (BJT) είναι στοιχείο ελεγχόμενο από τάση.

### 1.5. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του MOSFET

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι διακοπτικές χαρακτηριστικές του MOSFET ισχύος. Στο σχήμα 5(α) παρουσιάζεται η κυματομορφή του παλμού οδήγησης που εφαρμόζεται την πύλη του MOSFET και στο σχήμα 5(β) παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος υποδοχής  $I_D$  και της τάσης υποδοχής  $V_{DS}$  κατά την έναυση και σβέση του MOSFET. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τις απώλειές του κατά τη σβέση του, κατά την έναυση και κατά την αγωγή του θα πρέπει να γνωρίζουμε τη δυναμική συμπεριφορά του MOSFET μέσω των διακοπτικών του χαρακτηριστικών.

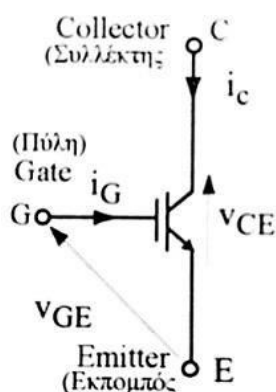


Σχήμα 1.6: Κυματομορφή τάσης πύλης  $V_{GS}$  και κυματομορφές ρεύματος υποδοχής  $I_D$  και τάσης υποδοχής – πηγής  $V_{DS}$ .

Το MOSFET έχει κάποιες εσωτερικές παρασιτικές χωρητικότητες από τις οποίες εξαρτώνται κατά κύριο λόγο οι διακοπτικοί του χρόνοι. Οι χωρητικότητες αυτές μπορούν να δημιουργήσουν χρόνους καθυστέρησης κατά τις μεταβατικές καταστάσεις του ημιαγωγού με αποτέλεσμα να μειώνονται οι διακοπτικές τους δυνατότητες. Για να έχει τη δυνατότητα γρήγορης φόρτισης και εκφόρτισης των παρασιτικών χωρητικότητων κατά την έναυση και την σβέση του θα πρέπει το κύκλωμα οδήγησης του MOSFET να συμπεριφέρεται στο MOSFET σαν μια πηγή παλμών με χαμηλή εσωτερική σύνθετη αντίσταση έτσι ώστε να μην παρουσιάζονται φαινόμενα μεταβατικών σφαλμάτων και καθυστέρησης έναυσης και σβέσης του MOSFET ισχύος. Η τάση  $V_{GS}$  του MOSFET δεν πρέπει να υπερβεί στις περισσότερες περιπτώσεις τα  $\pm 20$  Volt διότι θα το καταστρέψει. Οι παρασιτικές του χωρητικότητες παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

## 1.6. IGBT - Διπολικό Τρανζίστορ μονωμένης πύλης

Τα IGBT (διπολικά τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (InsulatedGateBipolarTransistor) είναι ένας συνδυασμός των χαρακτηριστικών ενός MOSFET και ενός BJT το οποίο συνδυάζει την υψηλή αποδοτικότητα μαζί με γρήγορη εναλλαγή και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος. Έχουν τρεις ακροδέκτες οι οποίοι έχουν ίδια ονομασία με αυτούς των BJT (εκπομπός – πύλη – συλλέκτης) ο έλεγχός τους όμως γίνεται από εφαρμογή τάσης όπως στα MOSFET. Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε πολλές εφαρμογές όπως είναι τα συστήματα μετάδοσης μεταβλητής συχνότητας (VFDs), ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τρένα, στραγγαλιστικά πηνία για λαμπτήρες ακόμη και για κλιματιστικά.



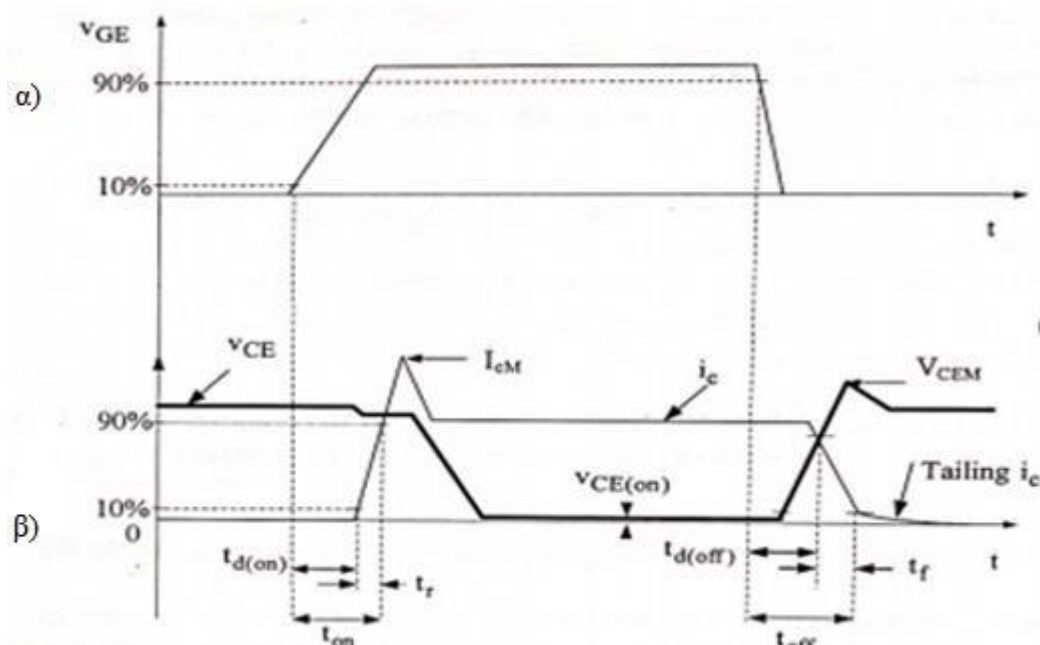
Σχήμα 1.7: Σύμβολο IGBT.

Τα IGBT είναι στοιχεία με ανώτερη απόδοση από τα υπόλοιπα τρανζίστορ και σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως είναι οι μετατροπείς DC – DC και αντιστροφείς έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο ποσοστό τα BJT.

Η συχνότητα λειτουργίας τους είναι περίπου 50 kHz και η μέγιστη ισχύς που μπορεί να διαχειριστεί σε μορφή “IGBTModules” τα οποία αποτελούνται από πολλά παράλληλα ή σε σειρά στοιχεία που μπορούν να διαχειριστούν πάρα πολύ υψηλές τιμές ρευμάτων και τάσης της τάξης εκατοντάδων Ampere και χιλιάδων Volt είναι της τάξης των Megawatt.

## 1.7. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του IGBT

Σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος που οι διακοπτικοί χρόνοι εξαρτώνται από τις κυματομορφές του ρεύματος βάσης και του ρεύματος συλλέκτη για ένα τυπικό IGBT οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από την τάση πύλης-εκπομπού και από το ρεύμα του συλλέκτη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διακοπτικοί χρόνοι και η δυναμική συμπεριφορά που είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό των απωλειών του ημιαγωγικού στοιχείου καθώς και η μέγιστη τιμή (PeakValue) της τάσης συλλέκτη-εκπομπού και τη μέγιστη τιμή του ρεύματος συλλέκτη.



Σχήμα 1.8: α) Τάση πύλης-εκπομπού  $V_{GE}$  β) Τάση συλλέκτη-εκπομπού  $V_{CE}$  και ρεύμα συλλέκτη  $i_c$

Οι κυματομορφές αυτές της δυναμικής συμπεριφοράς του IGBT είναι ανάλογες της κατάστασης του κυκλώματος ισχύος και του κυκλώματος οδήγησης. Οι τιμές που δίνονται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μια γενική καθοδήγηση ωστόσο οι πραγματικές τιμές της δυναμικής συμπεριφοράς του IGBT μπορούν να εξαχθούν μόνο όταν υλοποιηθεί το κύκλωμα ισχύος και το κύκλωμα οδήγησης παίρνοντας πραγματικές τιμές σε πειραματικές μετρήσεις.

Κατά τη μετάβαση στην κατάσταση αγωγής (Turn-on) η μέγιστη τιμή του ρεύματος συλλέκτη  $I_{CM}$  είναι αποτέλεσμα του ανακτώμενου φορτίου της διόδου ελεύθερης ροής

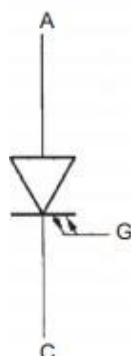


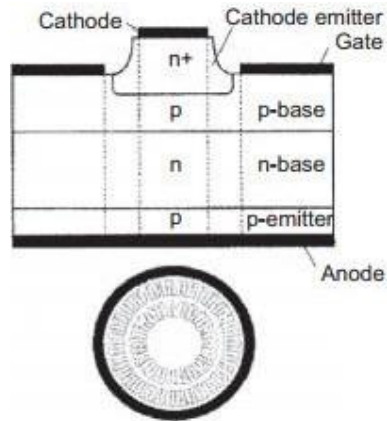
που είναι συνδεδεμένη αντιπαράλληλα με το IGBT. Κατά την μετάβαση στην κατάσταση αποκοπής (Turn-off) η μέγιστη τάση συλλέκτη-εκπομπού  $V_{CEM}$  είναι αποτέλεσμα των παρασιτικών αυτεπαγωγών του κυκλώματος ισχύος.

### 1.8. GTO – Θυρίστορ με αποκοπή από την Πύλη

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

Σχήμα 1.9: Κυκλωματικό σύμβολο GTO.





Σχήμα 1.10 : Δομή GTO.

Οι εφαρμογές ισχύος μεταξύ 3 και 10MW αποτελούν το πεδίο χρήσης του GTO ως ημιαγωγικού διακόπτη. Η διακοπτική του ταχύτητα φτάνει μέχρι 10 KHz. Το GTO είναι σε θέση να διατηρεί πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του κατά την αγωγή του γεγονός που επιτρέπει τη διέλευση υψηλών τιμών ρεύματος ενώ ένας μικρής διάρκειας παλμός ρεύματος αρκεί για να το μεταφέρει σε κατάσταση αγωγής. Από την άλλη πλευρά το GTO έχει μεγάλους χρόνους μετάβασης και κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων αυτών παρουσιάζει υψηλές διακοπτικές απώλειες γεγονός που περιορίζει τη μέγιστη διακοπτική του συχνότητα σε μερικές εκατοντάδες Hz. Το GTO επίσης είναι αρκετά ευαίσθητο σε απότομες μεταβολές ρεύματος κατά τη μετάβαση αγωγής και σε απότομες μεταβολές τάσης κατά τη μετάβαση αποκοπής. Αυτή η ευαισθησία επιβάλλει τη χρήση προστατευτικών κυκλωμάτων (snubbers) για να περιορισθούν οι ρυθμοί αύξησης ρεύματος και τάσης ( $di/dt$ ,  $dv/dt$ ).

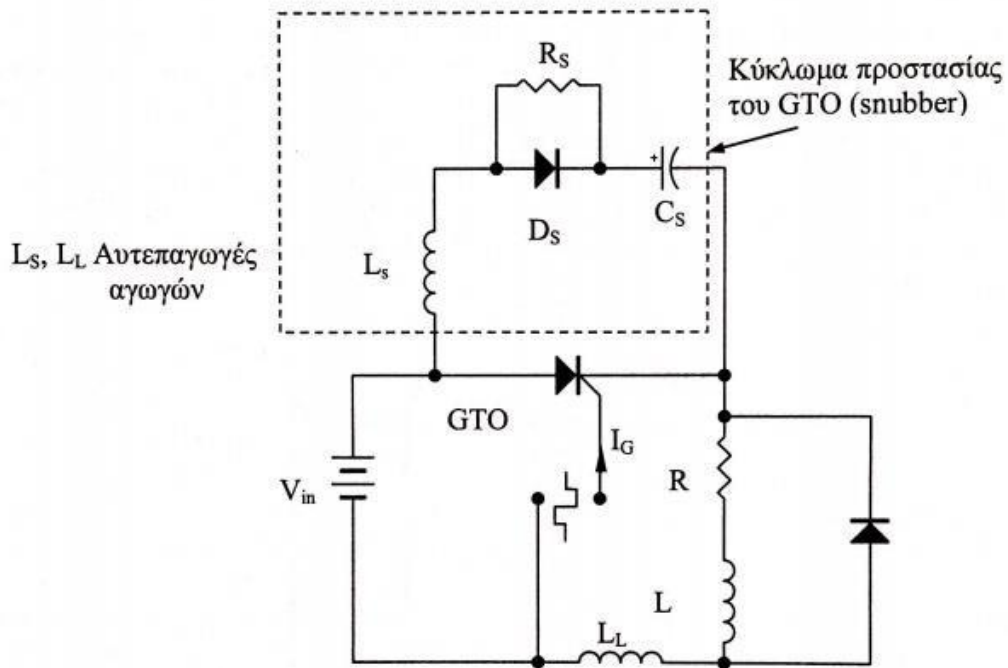
## 1.9. Διακοπτικές χαρακτηριστικές του GTO

Οι διακοπτικές χαρακτηριστικές ενός GTO είναι λίγο διαφορετικές από αυτές του απλού θυρίστορ και γι' αυτό το λόγο πρέπει να δώσουμε κάποιες επιπλέον επεξηγήσεις. Οι διακοπτικές χαρακτηριστικές του GTO κατά την έναυση του είναι οι ίδιες με αυτές του θυρίστορ αλλά οι χαρακτηριστικές κατά τη σβέση του διαφέρουν πολύ. Για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του GTO κατά τη σβέση θα μελετήσουμε το παρακάτω κύκλωμα ισχύος ενός DC-DC μετατροπέα (chopper) με GTO.

Εδώ το GTO χρησιμοποιείται ως διακόπτης ημιαγωγός που ανοίγει και κλείνει έτσι ώστε να τεμαχίζει ή να ψαλιδίζει την τάση εισόδου  $V_d$  και να την εφαρμόζει στα άκρα του R-L φορτίου. Με το άνοιγμα και κλείσιμο του GTO επιτυγχάνεται μια παλμική τάση στα άκρα του φορτίου. Στα άκρα του GTO υπάρχει ένα κύκλωμα προστασίας (snubber) αποτελούμενο από τα στοιχεία  $D_s, R_s$  και  $C_s$ . Το κύκλωμα αυτό παρέχει προστασία στο διακόπτη GTO από πιθανές υπερτάσεις που μπορούν να αναπτυχθούν στα άκρα του λόγω άλλων στοιχείων.

Στα άκρα του φορτίου υπάρχει μια δίοδος ελεύθερης ροής η οποία χρειάζεται για τη διέλευση του ρεύματος του πηνίου όταν ο διακόπτης GTO μεταβεί σε αποκοπή. Οι αυτεπαγωγές  $L_L$  και  $L_s$  είναι παρασιτικές αυτεπαγωγές φορτίου και κυκλώματος προστασίας αντίστοιχα. Οι αυτεπαγωγές αυτές είναι αποτέλεσμα των καλωδιώσεων και συνδέσεων του κυκλώματος ισχύος. Το snubber μειώνει το ρυθμό ανάπτυξης της τάσης  $dv/dt$  στα άκρα του GTO όταν αυτό μεταβαίνει στην κατάσταση αποκοπής αλλά βελτιώνει τις διακοπτικές χαρακτηριστικές αποκοπής του. Πριν το GTO μεταβεί στην κατάσταση αγωγής η χωρητικότητα του snubber  $C_s$  είναι φορτισμένη στην τάση εισόδου  $V_{in}$ .

Σχήμα 1.11: Κύκλωμα Ισχύος ενός DC-DC μετατροπέα (chopper) με GTO.



Η φόρτιση του  $C_s$  επιτυγχάνεται μέσω της πηγής εισόδου  $V_{in}$  και του κυκλώματος που αποτελείται από τα στοιχεία  $R-L-L_L-L_S-D_S-C_S$ . Κατά τη μετάβαση του GTO στην κατάσταση αγωγής ο πυκνωτής  $C_s$  εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης του snubber  $R_s$  και του GTO καταναλώνοντας την περισσότερη ενέργεια του στην αντίσταση  $R_s$ . Όταν το GTO σβήσει τότε ο πυκνωτής φορτίζεται πάλι στην τάση εισόδου μέσω του κυκλώματος  $R-L-L_L-L_S-D_S-C_S$  με συντονισμένο ρεύμα λόγω της χωρητικότητας και της αυτεπαγωγής του κυκλώματος που έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει το  $dv/dt$  στα άκρα του GTO.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### 2.1. Η ηλεκτρική ενέργεια στην ηλεκτροκίνηση

Ιστορικά, η ηλεκτρική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί σε οχήματα για ηλεκτρικά αξεσουάρ, όπως ηλεκτρικά παράθυρα, συστήματα ψυχαγωγίας, όργανα ταμπλό, κλιματισμό, θερμαντήρες καθισμάτων και άλλα αξεσουάρ. Σήμερα, κατασκευάζονται αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια όχι μόνο για ηλεκτρικά αξεσουάρ αλλά και για συστήματα πρόωσης. Τέτοια ηλεκτροκίνητα οχήματα μοιάζουν αρκετά με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα, αλλά έχουν σημαντικές εξελίξεις τεχνολογίας και μηχανικής κάτω από την κουκούλα, ειδικά όσον αφορά τα ηλεκτρονικά ισχύος. Σε ένα προωθημένο αυτοκίνητο με ηλεκτρικό κινητήρα, οι ηλεκτρικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των τροχών και η ισχύς για τους κινητήρες λαμβάνεται από μπαταρίες. Μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος που αναφέρεται συνήθως ως μετατροπέας χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ισχύος DC από την μπαταρία σε τροφοδοσία AC (σε μια απαιτούμενη τάση και συχνότητα) για τον κινητήρα. Ένας δεύτερος μετατροπέας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει το AC από τη γεννήτρια σε DC για να επαναφορτίσει τις μπαταρίες μέσω αναγεννητικής διακοπής (που ονομάζεται μετατροπέας γεννήτριας). Ένας μετατροπέας είναι μέρος της ηλεκτρονικής μονάδας ισχύος κίνησης πρόσφυσης και χρησιμοποιείται για την «αύξηση» (αύξηση τάσης) ή «μείωση προς τα κάτω» (μείωση τάσης) για να ταιριάζει με τις πηγές υψηλού φορτίου ή ελαφρού φορτίου των EV.

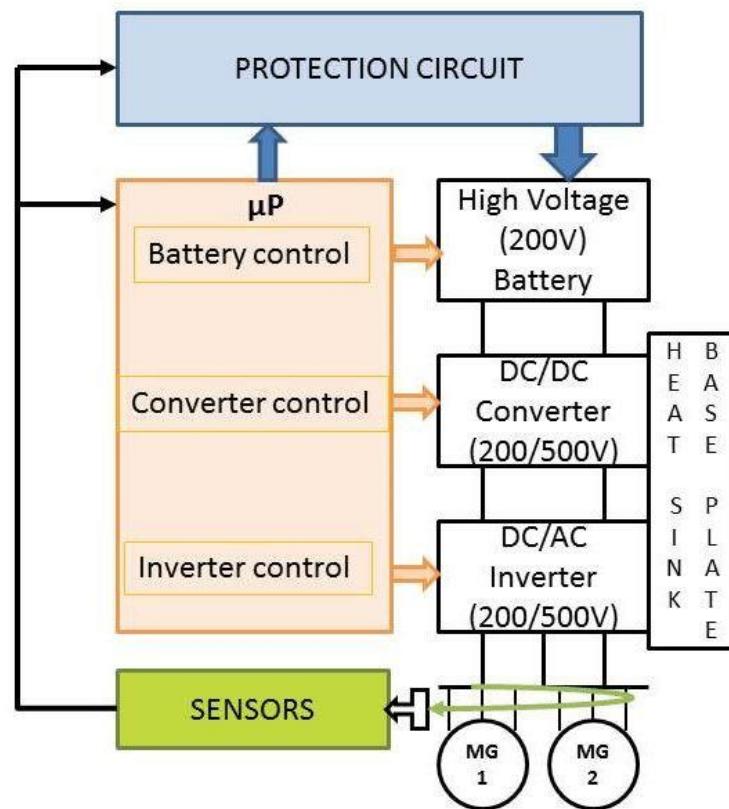
## 2.2. Ηλεκτρονικά ισχύος στα ηλεκτροκίνητα οχήματα

Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα διατίθενται σε τρεις κύριους τύπους: i) υβριδικές αρχιτεκτονικές που λειτουργούν σε κινητήρες ηλεκτροκίνησης και βενζινοκινητήρες, κοινώς γνωστοί ως υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs). ii) οχήματα αρχιτεκτονικής plug-in που λειτουργούν με ισχύ κίνησης ηλεκτρικής έλξης και που μπορούν επίσης να διαθέτουν κινητήρα προωστικής βενζίνης για υποβοήθηση απόδοσης ή για κοινή χρήση ισχύος πρόωσης, με μπαταρία που μπορεί να φορτιστεί από ηλεκτρικές πρίζες AC στο σπίτι (ή γρήγορα - σταθμοί φόρτισης σε αντιπροσωπεύει αυτοκινήτων και άλλες ελεγχόμενες τοποθεσίες), κοινώς γνωστοί ως υβριδικά plug-in ή ηλεκτρικά οχήματα "εκτεταμένης εμβέλειας" (PHEVs), iii) αυτοκίνητα που λειτουργούν αποκλειστικά με ηλεκτρική ισχύ, κοινώς γνωστά ως ηλεκτρικά οχήματα (EV). Όλοι αυτοί οι τύποι οχημάτων πρέπει να χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά υψηλής τάσης που είναι συσκευές στερεάς κατάστασης, για τους κινητήρες κίνησης έλξης.

Ο σχεδιασμός του μετατροπέα κίνησης έλξης καθορίζεται από τις συγκεκριμένες ανάγκες απόδοσης του κύκλου κίνησης της εφαρμογής, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζονται από πολλές μεταβλητές, όπως θερμοκρασία λειτουργίας, μέγιστη και συνεχής ισχύς, μέγεθος και βάρος. Κάθε μία από αυτές τις απαιτήσεις απόδοσης με τη σειρά της αυξάνει το κόστος. Οι περισσότεροι μετατροπείς εφαρμογών αυτοκινήτων έχουν μέγιστη βαθμολογία στην περιοχή 600V έως 1200V. Η ισχύς και η συχνότητα (μετρούνται σε Hertz ή Hz) διαχειρίζονται από υλικό ενσωματωμένο ως ολοκληρωμένα κυκλώματα που απαρτίζουν τους «εγκεφάλους» ή τις μονάδες ελέγχου ισχύος (PCU). Το PCU διαχειρίζεται τη λειτουργία του μετατροπέα σε όλη τη διάρκεια του κύκλου οδήγησης του οχήματος. Αν και τα περισσότερα τρέχοντα σχέδια μετατροπέα ενσωματώνουν τόσο τον μετατροπέα κινητήρα όσο και τον μετατροπέα γεννήτριας στη μονάδα μετατροπέα κίνησης έλξης, ορισμένες υβριδικές αρχιτεκτονικές ενδέχεται να περιλαμβάνουν μόνο τον μετατροπέα κινητήρα στην κύρια μονάδα μετατροπέα. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μετατροπέας γεννήτριας θα βρίσκεται σε ξεχωριστή διάταξη που θα εξακολουθεί να αποτελεί συστατικό στοιχείο του συνολικού υβριδικού συστήματος PCU.

Το Σχήμα 1 δείχνει ένα μπλοκ διάγραμμα μιας τυπικής μονάδας μετατροπής ισχύος έλξης οχήματος με ηλεκτρική κίνηση, μαζί με μερικά από τα κύρια συστατικά. Η μονάδα μετατροπής ισχύος περιέχει κυρίως τρία εξαρτήματα - διακόπτες στερεάς

κατάστασης IGBTs (μονωμένες πύλες Bi-Polar Transistors) που μετατρέπουν ισχύ από DC σε AC ή αντίστροφα, τον «εγκέφαλο» της συσκευής μετατροπής ισχύος γνωστής και ως PCU και άλλα αξεσουάρ όπως το σύστημα θερμικής διαχείρισης, το σύστημα διανομής ισχύος κ.λπ. Η μετατροπή ισχύος πραγματοποιείται σε δύο στάδια, δηλαδή υπάρχει ένα στάδιο μετατροπής που εκτελείται από έναν μετατροπέα ώθησης DC / DC που αυξάνει την τάση από την μπαταρία στις απαιτούμενες τιμές από τον μετατροπέα. Για παράδειγμα στο Toyota Prius [1], ο μετατροπέας ενίσχυσης αυξάνει την τάση από περίπου 200V σε περίπου 650V (μέγιστο). Το επόμενο στάδιο, που είναι το στάδιο αντιστροφής, μετατρέπει την τάση DC εξόδου του μετατροπέα ώθησης σε τάση AC και συχνότητα που απαιτείται για την κίνηση του ηλεκτροκινητήρα.



Σχήμα 1. Διάταξη ηλεκτρικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης οχήματος

Το συγκρότημα μετατροπέα στεγάζεται σε ένα περίβλημα με βάση ψυχρής πλάκας και διαθέτει ενσωματωμένο πυκνωτή σύνδεσης DC, καθώς και την αντίστοιχη πλακέτα οδηγού και PCU. Ο πίνακας προγραμμάτων οδήγησης περιέχει προγράμματα οδήγησης IGBT που παρέχουν υψηλά επίπεδα ρεύματος πύλης για σύντομες χρονικές

περιόδους, ώστε να ενεργοποιούνται και να απενεργοποιούνται οι συσκευές. Η πλάκα ψύκτρας / ψύξης είναι μια παθητική συσκευή ψύξης που απορροφά θερμότητα από τα ηλεκτρονικά ισχύος (συσκευές IGBT) και στη συνέχεια τη διαχέει στο περιβάλλον. Γενικά, υπάρχει επίσης μια θερμική διαχείριση που διατηρεί τη θερμοκρασία λειτουργίας εντός των καθορισμένων ορίων για τα ηλεκτρονικά ισχύος, συνήθως χρησιμοποιώντας υγρό ψυκτικό και το περίβλημα μπορεί να περιλαμβάνει ολοκληρωμένα κανάλια ψύξης. Το PCU αποτελείται από μικροεπεξεργαστή που ελέγχει τη φόρτιση / αποφόρτιση των μπαταριών και τη ροπή ή την ταχύτητα του ηλεκτρικού κινητήρα. Το PCU στέλνει τα κατάλληλα σήματα εντολών στην πλακέτα οδηγού έτσι ώστε τα IGBT να είναι ενεργοποιημένα ή απενεργοποιημένα για να επιτευχθεί η επιθυμητή ροπή κινητήρα / ταχύτητα και κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Όπως και το συγκρότημα μετατροπέα, ο μετατροπέας DC / DC είναι ένα ξεχωριστό συγκρότημα που διαθέτει επίσης συσκευή μεταφοράς ισχύος (IGBT), PCU, πλακέτα κίνησης, σύστημα θερμικής διαχείρισης, ψήκτρα κ.λπ. Εκτός από αυτά τα κύρια εξαρτήματα, τα συγκροτήματα μετατροπέα και μετατροπέα περιλαμβάνω:

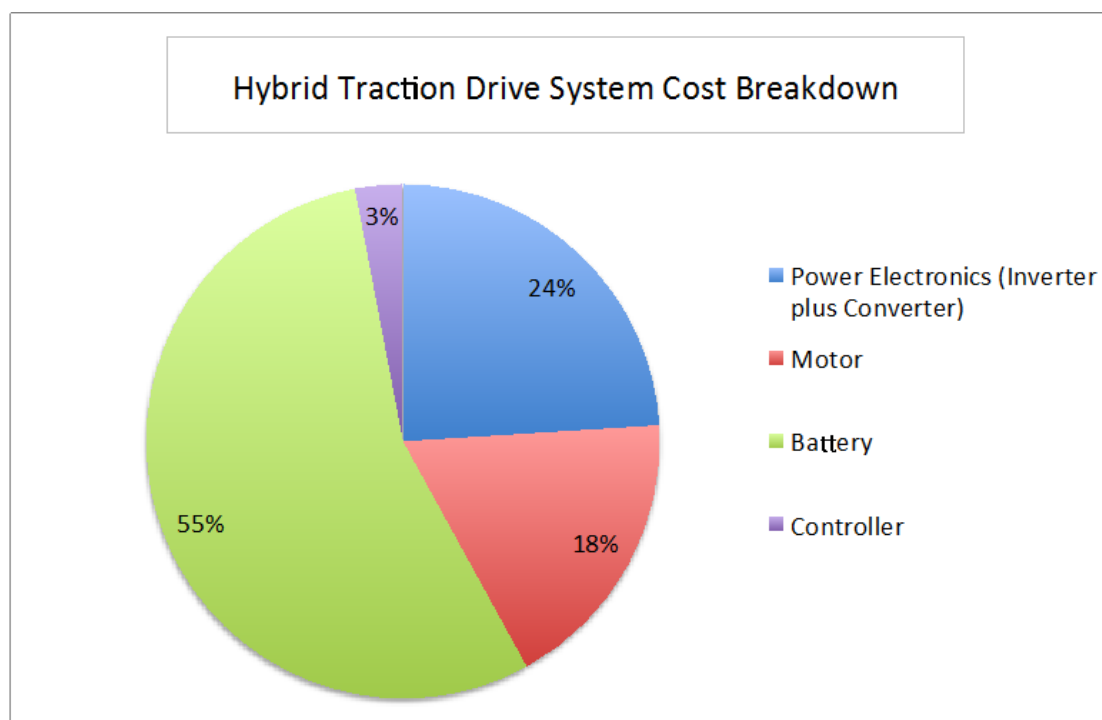
- Αισθητήρες: μέτρηση τάσης και ρεύματος.
- Κύκλωμα προστασίας: για προστασία από υπερβολική τάση, υπερβολικό ρεύμα και ζημιές που προκαλούνται από θερμική διαφυγή ή σημεία πρόσβασης.
- Κυκλώματα φίλτρου και ψαλιδιού: Πυκνωτής ζεύξης DC που χρησιμοποιείται για εξομάλυνση της τάσης ζεύξης DC και πυκνωτής εξομάλυνσης που χρησιμοποιείται για τη μείωση της παραλλαγής τάσης εξόδου AC, ένα φίλτρο LC για τη μείωση των αρμονικών στο ρεύμα AC. Ο πυκνωτής snubber καταστέλλει τις μεταβατικές τάσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει το IGBT όταν αλλάζει το ρεύμα στο επαγωγικό κύκλωμα.
- Συνδετήρες και ράβδοι διαύλου: Χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ισχύος από κάθε στάδιο και για διανομή στον κινητήρα και την μπαταρία.

Όλα αυτά τα συστατικά αποτελούν από κοινού τον πυρήνα της ηλεκτρονικής ισχύος κίνησης έλξης. Αν και υπάρχουν κάποιες παραλλαγές στις τοπολογίες που χρησιμοποιούνται από διαφορετικούς κατασκευαστές, τα βασικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα ισχύος και η δομή είναι αρκετά παρόμοια.

Όπως περιγράφεται σε αυτό το άρθρο, τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα σε οποιοδήποτε ηλεκτροκίνητο όχημα μεταφοράς και



αποτελούνται από πολλά υπο-εξαρτήματα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την ανάλυση κόστους ενός τυπικού υβριδικού συστήματος.



Σχήμα 2. Κόστος υβριδικής κίνησης

Ένα τυπικό υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει μια μονάδα διπλού μετατροπέα, την μπαταρία, τον κινητήρα και τον ελεγκτή. Τα ηλεκτρονικά ισχύος (μετατροπέας συν μετατροπέας) αντιστοιχούν στο 24% του κόστους του συστήματος. Τα άλλα στοιχεία του συστήματος και το μερίδιο κόστους τους στο συνολικό υβριδικό σύστημα είναι ο κινητήρας (18 τοις εκατό), η μπαταρία (55 τοις εκατό) και ο ελεγκτής (τρεις τοις εκατό) που θα μπορούσαν ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρονικά ισχύος επηρεάζουν σημαντικά το κόστος και την απόδοση του HEV και Οχήματα EV [2].

Στην επόμενη σειρά άρθρων, θα εξετάσουμε τις τάσεις στο κόστος των ηλεκτρονικών ισχύος για οχήματα με ηλεκτρική έλξη, τις μελλοντικές εξελίξεις στις τεχνολογίες ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος και τη δυνατότητα καινοτομιών με τη μορφή κατασκευής υψηλής απόδοσης, σε ανταγωνιστικές τιμές καινοτόμα προϊόντα.

Τα σύγχρονα οχήματα δεν είναι μόνο ένας συνδυασμός κινητήρα, πλαισίου, σώματος και τροχών. Είναι εξοπλισμένα με πολλούς αισθητήρες και ηλεκτρονικές συσκευές που βοηθούν τους οδηγούς. Μέχρι το 2020, περίπου το 35% του συνολικού κόστους κατασκευής οχημάτων θα αφορά τα ηλεκτρονικά. Η βιομηχανία οχημάτων

επεκτείνεται εκθετικά και προστίθενται περισσότερα χαρακτηριστικά στα οχήματα για ασφαλή οδήγηση. Τα περισσότερα από αυτά τα χαρακτηριστικά ενσωματώνονται ως ηλεκτρονικό σύστημα ή υποσύστημα. Για τον συντονισμό αυτών των ηλεκτρονικών συστημάτων, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων εισήγαγαν ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου (ECU). Ένα ECU λαμβάνει εισόδους από τους αισθητήρες και υπολογίζει δεδομένα για την απαιτούμενη εργασία του. Εκτός αυτού, ένα ECU μπορεί να λαμβάνει εισροές από άλλο ECU για την εκτέλεση των καθηκόντων του. Αυτός ο μεγάλος αριθμός επικοινωνιών των ECU δημιουργεί το δίκτυο εντός του οχήματος. Αν και το δίκτυο εντός του οχήματος θεωρήθηκε ως απομονωμένο δίκτυο, τα τελευταία χρόνια η έννοια αυτή έχει αλλάξει.

Τα σημερινά οχήματα όχι μόνο μεταφέρουν τους ανθρώπους αλλά και παρέχουν υπηρεσίες ψυχαγωγίας και άλλες υπηρεσίες. Για παράδειγμα, το τηλεματικό σύστημα (ένα υποσύστημα του συστήματος επικοινωνίας) συνδέεται με τον εξωτερικό κόσμο μέσω του ασύρματου δικτύου ευρείας περιοχής (LTE, UMTS, EDGE, GPRS κ.λπ.) ή ασύρματου τοπικού δικτύου (Wi-Fi) . Τα οχήματα χρησιμοποιούν το τηλεματικό σύστημα για να εμφανίζουν τους χάρτες, να λαμβάνουν τις ειδήσεις σχετικά με τις καιρικές συνθήκες, να ενημερώνουν το λογισμικό, να πραγματοποιούν κλήσεις έκτακτης ανάγκης κλπ. Επιπλέον, το σύστημα ψυχαγωγίας επιτρέπει τη σύνδεση ηλεκτρονικών συσκευών (π.χ. κινητών, tablet, smartwatch και φορητών υπολογιστών) μέσω Wi-Fi ή Bluetooth. Εκτός αυτού, μερικές από αυτές τις ηλεκτρονικές συσκευές μπορούν να συνδυαστούν με τα οχήματα, έτσι ώστε οι συσκευές να μπορούν να λειτουργούν από τα οχήματα. Για παράδειγμα, εάν ένα smartphone έχει αντιστοιχιστεί με ένα όχημα, τότε ο χρήστης του οχήματος μπορεί να κάνει τηλεφωνική κλήση από την οθόνη του οχήματος.

Στο JeepHack, οι Miller και Valasek βρήκαν ευάλωτη θέση στην πλατφόρμα Uconnect. Αυτή η ευπάθεια τους έδωσε το σημείο εισόδου για να θέσει σε κίνδυνο το όχημα. Επαναπρογράφησαν το λογισμικό και έστειλαν εντολές στο δίκτυο οχημάτων. Ήταν σε θέση να σταματήσουν το όχημα από αρκετά μίλια μακριά. Μετά από αυτή την επίδειξη, ανακλήθηκαν 1,4 εκατομμύρια οχήματα FCA (FiatChryslerAutomobiles) των ΗΠΑ. Το σύστημα SmartGate επιτρέπει στους ιδιοκτήτες αυτοκινήτων να συνδέουν ένα smartphone στο αυτοκίνητο. Στη συνέχεια ο ιδιοκτήτης μπορεί να ελέγξει διάφορες πληροφορίες του αυτοκινήτου. Για παράδειγμα, η ταχύτητα του αυτοκινήτου, η

κατάσταση καυσίμου, η μέση κατανάλωση καυσίμου και η επόμενη ημερομηνία αλλαγής λαδιού. Οι ερευνητές έδειξαν ότι ένας αντίπαλος μπορεί εύκολα να συνδεθεί με το αυτοκίνητο Wi-Fi και να διαβάσει όλες αυτές τις πληροφορίες. Επιπλέον, ο αντίπαλος μπορεί να κλειδώσει τον ιδιοκτήτη του αυτοκινήτου από το σύστημα SmartGate.

Το «NissanConnectEV» είναι μια εφαρμογή κινητής τηλεφωνίας για τον έλεγχο της κατάστασης της μπαταρίας, της εκτιμώμενης εμβέλειας οδήγησης και του συστήματος ελέγχου του κλίματος του ηλεκτρικού οχήματος NissanLeaf. Ένας ερευνητής ασφαλείας βρήκε μια ευπάθεια αυτής της εφαρμογής κινητής τηλεφωνίας και πήρε τον έλεγχο του θερμαντήρα του οχήματος. Στη συνέχεια, ο ερευνητής μπόρεσε να το κρατήσει συνεχώς για να αποστραγγίσει την μπαταρία του οχήματος. Ως αποτέλεσμα, για την προστασία των οχημάτων, η Nissan απενεργοποίησε όλες τις λειτουργίες της εφαρμογής "NissanConnectEV" της.

Το 2016, το KeenSecurityLab στο Tencent έδειξε το μοντέλο του TeslaShack. Εξέβαλαν τον οδηγό Tesla για πρόσβαση σε κακόβουλο ιστότοπο μέσω ενός hotspotWi-Fi και στη συνέχεια εγκατέστησαν το δικό τους λογισμικό για να αποκτήσουν πρόσβαση στα χαρακτηριστικά του Tesla. Ήταν σε θέση να ελέγχουν το σύστημα πέδησης του Tesla από δώδεκα μίλια μακριά. Στην Ολλανδία, μια ομάδα κλεφτών εκμεταλλεύτηκε το σύστημα GPS του Tesla για να εντοπίσει τα οχήματα και έκλεψε περισσότερα από εννέα Tesla μέσα σε μια εβδομάδα. Όλες αυτές οι εκμεταλλεύσεις εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από τις επικοινωνίες και τα δεδομένα του φορέα ECU. Επομένως, η επικοινωνία και η προστασία δεδομένων των ECU αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής.

Μέσα στα οχήματα, τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω bus επικοινωνίας. Πολλοί τύποι bus επικοινωνίας χρησιμοποιούνται σε τρέχοντα οχήματα. Για παράδειγμα, τα δίκτυα ελεγκτών (CAN), το τοπικό δίκτυο διασύνδεσης (LIN), η μεταφορά μέσω γνώμονα τα μέσα (MOST), το Ethernet και το FlexRay έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε οχήματα. Μεταξύ αυτών των bus επικοινωνίας, το πιο χρησιμοποιούμενο CANbus απελευθερώθηκε το 1986. Οι μηχανικοί των οχημάτων εκείνη την εποχή δεν σκέφτονταν πολλά για την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των δεδομένων, καθώς τα οχήματα χρησιμοποιούνταν μόνο ως μέσο μεταφοράς. Επομένως, κάθε ECU ή οποιοσδήποτε συνδεόταν με τον δίαυλο επικοινωνίας

μπορούσε να διαβάσει ή να στείλει δεδομένα σε άλλα ECU. Ακόμα και τα σημερινά οχήματα ακολουθούν την ίδια έννοια.

Τα οχήματα μπορούν να συνδεθούν με διάφορες υπηρεσίες που βασίζονται στο Διαδίκτυο, γεγονός που αυξάνει τους κινδύνους για την ασφάλεια. Για παράδειγμα, η OnStar της GM, η SafetyConnect της Toyota και η BMWAssist της BMW παρέχουν πρόσβαση σε οχήματα από οπουδήποτε. Εκτός αυτού, υπάρχουν πλατφόρμες οχημάτων τρίτων που παρέχουν λειτουργίες ψυχαγωγίας, πλοήγησης και επικοινωνίας. Η πλατφόρμα του Uconnect είναι πλέον διαθέσιμη στα Chrysler, Dodge, Jeep, Ram και FIAT. Οι ιδιοκτήτες αυτών των οχημάτων μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα smartphone για να εκκινήσουν τον κινητήρα και να κλειδώσουν ή να ξεκλειδώσουν τα οχήματα. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στο JeepHack, οι Miller και Valasek εκμεταλλεύτηκαν την ευπάθεια του Uconnect και σταμάτησαν το όχημα από αρκετά μίλια μακριά. Η απουσία εμπιστευτικότητας (τα δεδομένα του διαύλου επικοινωνίας δεν είναι κρυπτογραφημένα), η ακεραιότητα (η ECU δεν ελέγχει αν τα δεδομένα έχουν τροποποιηθεί) και η αυθεντικότητα (ο δέκτης ECU δεν ελέγχει αν τα δεδομένα προέρχονται από αυθεντικό ECU) είναι πρωταρχικοί λόγοι για αυτό το είδος της επίθεσης.

Ένας άλλος λόγος πίσω από αυτές τις επιθέσεις είναι η απουσία ενός μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης μεταξύ των ECU. Επί του παρόντος, κάθε ECU μπορεί να επικοινωνεί με άλλα ECU στο ίδιο bus. Εάν συμβεί ένα από τα ECU, τότε το συμβιβασμένο ECU μπορεί να παρακολουθεί άλλα μη συμπίεσμένα ECU. Επομένως, αυξάνει τους κινδύνους ασφαλείας.

Επιπλέον, τα δεδομένα ECU μπορεί να είναι πολύ σημαντικά για τις ασφαλιστικές εταιρείες ή τις οργανώσεις επιβολής του νόμου για την ανάλυση μετά από ατύχημα. Για να αναλύσετε ένα σενάριο μετά από ατύχημα, χρησιμοποιείται ένας καταγραφέας δεδομένων συμβάντων (EventRecorder - EDR). Καταγράφει όλα τα σημαντικά γεγονότα σε χώρο αποφυγής παραβιάσεων. Αυτά τα γεγονότα μπορεί να είναι ξαφνική αύξηση της ταχύτητας, αιφνίδια πέδηση, ανάπτυξη αερόσακων κλπ. Μετά από ατύχημα, οι ασφαλιστικές εταιρείες και οι οργανώσεις επιβολής του νόμου χρησιμοποιούν τα δεδομένα EDR για να ανοικοδομήσουν τη σκηνή ατυχήματος. Ωστόσο, τα δεδομένα EDR δεν παρέχουν εκτεταμένο ιστορικό και τα δεδομένα αντικαθίστανται λόγω περιορισμένης αποθήκευσης. Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα που

αποθηκεύονται σε ECU μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση του σεναρίου μετά το ατύχημα. Για παράδειγμα, τα στοιχεία ελέγχου ECU του τιμονιού, τα στοιχεία ελέγχου ECU αερόσακου, τα στοιχεία ECU του συστήματος πέδησης και τα στοιχεία ECU του συστήματος ελέγχου μετάδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το EDR. Εκτός αυτού, τα δεδομένα που συλλέγονται από τα ECU είναι χρήσιμα για να διερευνήσουν την οδηγική συμπεριφορά του οδηγού, το μοτίβο οδήγησης, την ταχύτητα οδήγησης κ.λπ. Αυτά τα είδη αναλυτικών στοιχείων είναι απαραίτητα για τις ασφαλιστικές εταιρείες να αποφασίσουν το ασφαλιστικό ασφάλιστρο για τον οδηγό. Για να γίνει μια σωστή ανάλυση, τα δεδομένα ECU πρέπει να προστατεύονται.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ UPS

Ως αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (UPS) ορίζεται ένα κομμάτι ηλεκτρικού εξοπλισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως άμεση πηγή ισχύος στο συνδεδεμένο φορτίο όταν υπάρχει οποιαδήποτε βλάβη στην κύρια πηγή ισχύος εισόδου.

Σε ένα UPS, η ενέργεια αποθηκεύεται γενικά σε σφόνδυλους, μπαταρίες ή σούπερ πυκνωτές. Σε σύγκριση με άλλο σύστημα άμεσης τροφοδοσίας, η UPS έχει το πλεονέκτημα της άμεσης προστασίας από τις διακοπές ρεύματος εισόδου. Έχει πολύ μικρό χρόνο λειτουργίας μπαταρίας. Ωστόσο, αυτή η ώρα είναι αρκετή για να κλείσετε με ασφάλεια τη συνδεδεμένη συσκευή (υπολογιστές, τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός κ.λπ.) ή για να ενεργοποιήσετε μια πηγή αναμονής.

Το UPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προστατευτική συσκευή για κάποιο υλικό το οποίο μπορεί να προκαλέσει σοβαρή ζημιά ή απώλεια με ξαφνική διακοπή ρεύματος. Αδιάλειπτη πηγή ενέργειας, δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας μπαταρίας και αντίγραφα ασφαλείας του σφονδύλου είναι τα άλλα ονόματα που χρησιμοποιούνται συχνά για το UPS. Το διαθέσιμο μέγεθος των μονάδων UPS κυμαίνεται από 200 VA που χρησιμοποιείται για σόλο υπολογιστή έως αρκετές μεγάλες μονάδες έως και 46 MVA.

### 3.1. Κύριοι ρόλοι του UPS

Όταν υπάρχει οποιαδήποτε βλάβη στην κύρια πηγή τροφοδοσίας, το UPS θα τροφοδοτήσει το ρεύμα για μικρό χρονικό διάστημα. Αυτός είναι ο πρωταρχικός ρόλος του UPS. Εκτός από αυτό, μπορεί επίσης να διορθώσει ορισμένα γενικά προβλήματα ισχύος που σχετίζονται με υπηρεσίες κοινής ωφέλειας σε διάφορους βαθμούς. Τα προβλήματα που μπορούν να διορθωθούν είναι η ακίδα τάσης (συνεχής υπέρταση), ο θόρυβος, η γρήγορη μείωση της τάσης εισόδου, η αρμονική παραμόρφωση και η αστάθεια της συχνότητας στο δίκτυο.

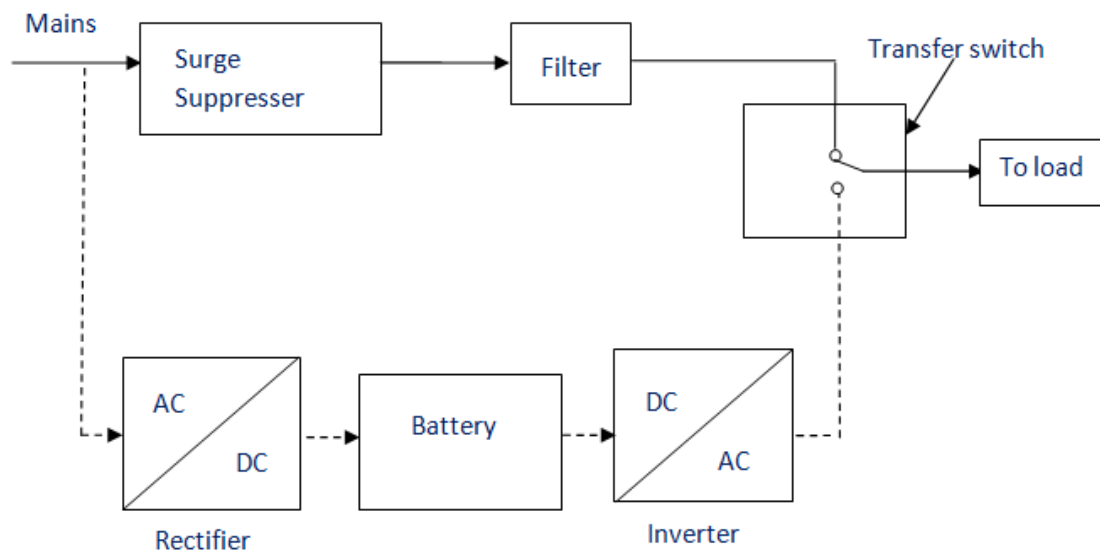
### **3.2. Τύποι UPS**

Γενικά, το σύστημα UPS κατηγοριοποιείται σε UPS On-line, UPS εκτός σύνδεσης και UPS διαδραστικόLine. Άλλα σχέδια περιλαμβάνουν υβριδικά Standbyon-line, Standby-Ferro, Delta μετατροπή On-Line.

### **3.3. UPS εκτός σύνδεσης**

Αυτό το UPS ονομάζεται επίσης ως σύστημα Standby UPS που μπορεί να δώσει μόνο τις πιο βασικές δυνατότητες. Εδώ, η κύρια πηγή είναι το φιλτραρισμένο δίκτυο AC (εμφανίζεται σε συμπαγή διαδρομή στο σχήμα 3). Όταν συμβεί διακοπή ρεύματος, ο διακόπτης μεταφοράς θα επιλέξει την εφεδρική πηγή (εμφανίζεται σε διακεκομμένη διαδρομή στο σχήμα 3). Έτσι μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα ότι το σύστημα αναμονής θα αρχίσει να λειτουργεί μόνο όταν υπάρχει αστοχία στο δίκτυο. Σε αυτό το σύστημα, η τάση AC διορθώνεται πρώτα και αποθηκεύεται στην μπαταρία αποθήκευσης που είναι συνδεδεμένη στον ανορθωτή.

Όταν συμβεί διακοπή ρεύματος, αυτή η τάση DC μετατρέπεται σε τάση εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω ενός μετατροπέα ισχύος και μεταφέρεται στο φορτίο που είναι συνδεδεμένο σε αυτόν. Αυτό είναι το λιγότερο ακριβό σύστημα UPS και παρέχει προστασία από υπερτάσεις και αντίγραφα ασφαλείας. Ο χρόνος μεταφοράς μπορεί να είναι περίπου 25 χιλιοστά του δευτερολέπτου που μπορεί να σχετίζεται με το χρόνο που χρειάζεται το σύστημα UPS για τον εντοπισμό της τάσης χρησιμότητας που έχει χαθεί. Το διάγραμμα μπλοκ φαίνεται παρακάτω.

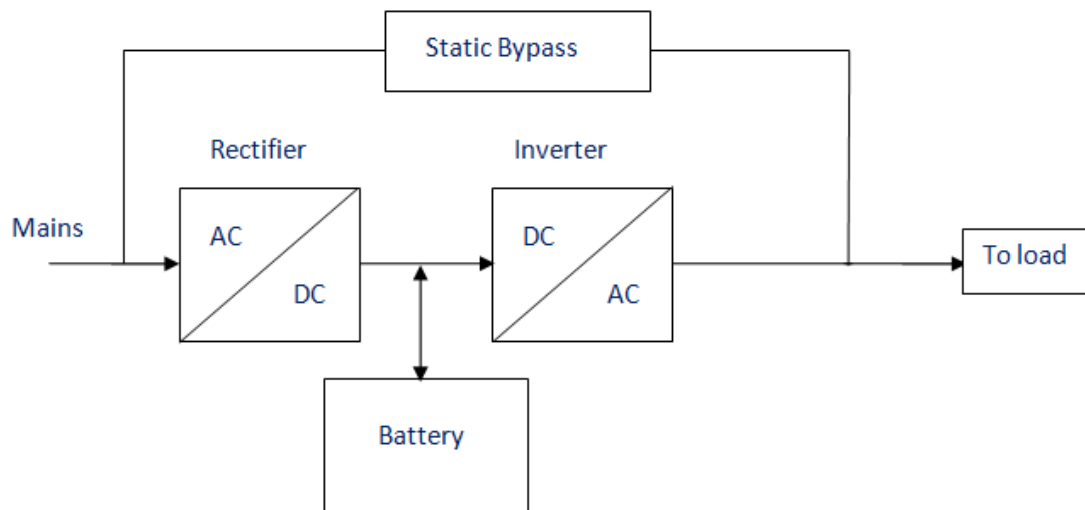


Σχήμα 3. Διάγραμμα μπλοκ συστήματος Standby UPS

### 3.4. Συνδεδεμένο UPS

Σε αυτόν τον τύπο UPS, χρησιμοποιείται μέθοδος διπλής μετατροπής. Εδώ, πρώτα η είσοδος εναλλασσόμενου ρεύματος μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα διορθώνοντας τη διαδικασία αποθήκευσης στην επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Αυτό το DC μετατρέπεται σε AC με τη διαδικασία αναστροφής και δίνεται στο φορτίο ή στον εξοπλισμό που συνδέεται (σχήμα4). Αυτός ο τύπος UPS χρησιμοποιείται όταν η ηλεκτρική απομόνωση είναι υποχρεωτική. Αυτό το σύστημα είναι λίγο πιο δαπανηρό λόγω του σχεδιασμού των συνεχώς τρέχοντων μετατροπέων και των συστημάτων ψύξης. Εδώ, ο ανορθωτής που τροφοδοτείται με το κανονικό ρεύμα AC οδηγεί απευθείας τον μετατροπέα. Ως εκ τούτου, είναι επίσης γνωστό ως UPS διπλής μετατροπής. Το μπλοκ διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.



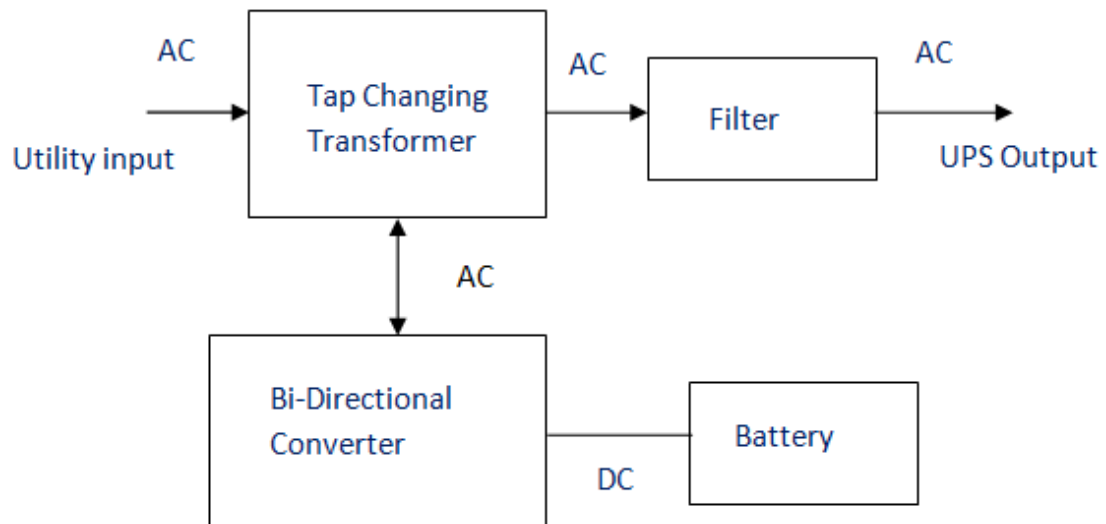


Σχήμα 4. Διάγραμμα μπλοκ συστήματος συνδεδεμένου UPS

Όταν υπάρχει διακοπή ρεύματος, ο ανορθωτής δεν έχει κανένα ρόλο στο κύκλωμα και η σταθερή ισχύς που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες που είναι συνδεδεμένες στον μετατροπέα δίνεται στο φορτίο μέσω του διακόπτη μεταφοράς. Μόλις αποκατασταθεί η ισχύς, ο ανορθωτής αρχίζει να φορτίζει τις μπαταρίες. Για να αποφευχθεί η υπερθέρμανση των μπαταριών λόγω του ανορθωτή υψηλής ισχύος, το ρεύμα φόρτισης είναι περιορισμένο. Κατά τη διάρκεια μιας κύριας διακοπής ισχύος, αυτό το σύστημα UPS λειτουργεί με μηδενικό χρόνο μεταφοράς. Ο λόγος είναι ότι η πηγή δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας λειτουργεί ως κύρια πηγή και όχι ως η κύρια είσοδος AC. Ωστόσο, η παρουσία ρεύματος εισόδου και ρεύματος βήματος μεγάλου φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε χρόνο μεταφοράς περίπου 4-6 χιλιοστά του δευτερολέπτου σε αυτό το σύστημα.

### 3.5. Γραμμικό διαδραστικό UPS

Για διακομιστές και ιστούς μικρών επιχειρήσεων και τμημάτων, χρησιμοποιείται διαδραστικό UPS γραμμής. Αυτό είναι λίγο πολύ ίδιο με αυτό του UPS εκτός σύνδεσης. Η διαφορά είναι η προσθήκη μετασχηματιστή ενδιάμεσων λήψεων. Η ρύθμιση τάσης γίνεται από αυτόν τον μετασχηματιστή ενδιάμεσων λήψεων αλλάζοντας τη λήψη ανάλογα με την τάση εισόδου. Πρόσθετο φίλτράρισμα παρέχεται σε αυτό το UPS με αποτέλεσμα χαμηλότερη παροδική απώλεια. Το μπλοκ διάγραμμα φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5. Διάγραμμα μπλοκ συστήματος γραμμικού διαδραστικού UPS

### 3.6. Εφαρμογές UPS

Οι εφαρμογές ενός UPS περιλαμβάνουν:

- Κέντρα δεδομένων (Data Centers)
- Βιομηχανίες
- Τηλεπικοινωνίες
- Νοσοκομεία
- Τράπεζες και ασφάλειες
- Μερικά ειδικά έργα (εκδηλώσεις)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ

### 4.1. Επαγωγική θέρμανση και συμβατικός έλεγχος

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία μεταλλικών υλικών λεπτής υφής. Η επαγωγική θέρμανση στη συνέχεια θερμαίνει ολόκληρο τον όγκο του μετάλλου έτσι ώστε κατά τη διάρκεια της ψύξης να πραγματοποιείται η απαιτούμενη θερμική επεξεργασία.

Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται και στην εγκατάσταση ορισμένων μηχανικών κατασκευών [7].

Κατά τη διαδικασία επαγωγής θέρμανσης ο στόχος τοποθετείται σε ένα πηνίο ενός ταλαντωμένου κυκλώματος (Σχήμα 6). Το πηνίο κινείται με εναλλασσόμενο ρεύμα. το μαγνητικό πεδίο προκαλεί ένα ρεύμα στο στόχο, στο οποίο δημιουργείται το ρεύμα. Αυτό, με τη σειρά του, προκαλεί τη θέρμανση του κομματιού εργασίας [4].

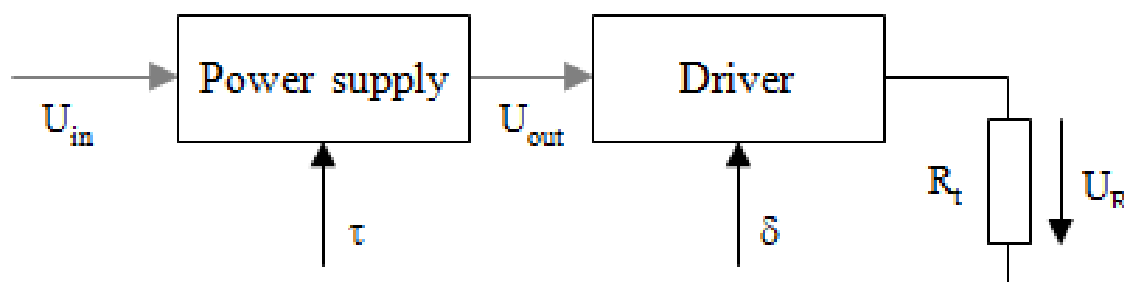
Η παραπάνω διαδικασία έχει δύο αδύνατα σημεία όσον αφορά την ηλεκτρονική. Το ίδιο το κομμάτι εργασίας ως πυρήνας σιδήρου αποπροσαρμόζει τη συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος συντονισμού. Αυτό θα αλλάξει την επαγωγική ισχύ, αποδίδοντας έτσι κακή ισχύ και έλεγχο θερμοκρασίας [1].



Σχήμα 6. Πηνίο επαγωγής θέρμανσης

#### 4.2. Συμβατικός έλεγχος ηλεκτρικής ισχύος

Το μεγαλύτερο μέρος της ρύθμισης ηλεκτρικής ισχύος αλλάζει την τιμή της τάσης φορτίου ( $R_t$ ) ( $U_R$ ). Σε εφαρμογές ακριβείας ηλεκτρολογικής μηχανικής, η τάση εξόδου ελέγχεται από έναν κάτοχο ακριβούς τιμής που λειτουργεί την τάση τροφοδοσίας και στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μια σταθερή τιμή.



Σχήμα 7. Διάγραμμα ροής

Σε περίπτωση παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, με την έλευση των σύγχρονων ημιαγωγών χρησιμοποιούνται συνήθως δύο διαφορετικές λύσεις: ο έλεγχος ισχύος με ενεργοποίηση φάσης και διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) [6].

$$U_R = f(U_{out}, d), \quad (2)$$

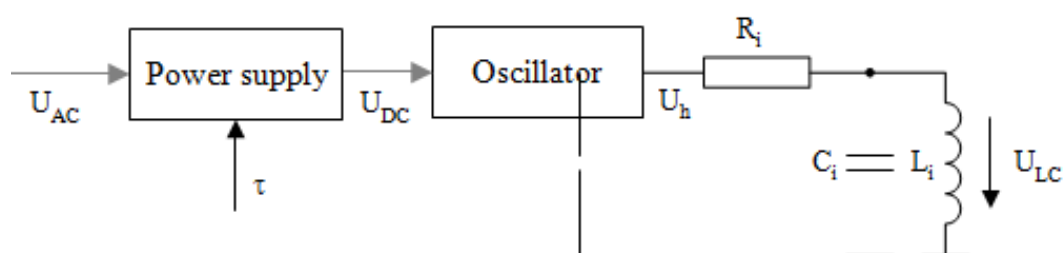
όπου  $d$  είναι μια σχετική παράμετρος για τον προσδιορισμό της τιμής (ισχύος) της παραγωγής [5]. Έτσι, δημιουργείται ένας διπλός, συχνά διπλός περιττός έλεγχος, ο οποίος εξαρτάται από δύο παραμέτρους σύμφωνα με την εξίσωση (3)

$$U_R = f(t, d). \quad (3)$$

Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση φορτίου, η ηλεκτρική ισχύς μπορεί να προσδιοριστεί σύμφωνα με την εξίσωση (2).

### 4.3. Παραδοσιακή δομή επαγωγικών θερμαντήρων

Ο προηγμένος επαγωγικός εξοπλισμός θέρμανσης ημιαγωγών αποτελείται ουσιαστικά από ένα τροφοδοτικό και έναν ταλαντωτή υψηλής ισχύος (Σχ.8). Το πηνίο ( $L_i$ ) και ένας παράλληλος συνδεδεμένος πυκνωτής ( $C_i$ ) σχηματίζουν ένα συντονιστικό κύκλωμα. Η συχνότητα ταλαντωτή είναι ίση με τη συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτικού κυκλώματος [7].



Σχήμα 8. Ο προηγμένος επαγωγικός εξοπλισμός θέρμανσης ημιαγωγών

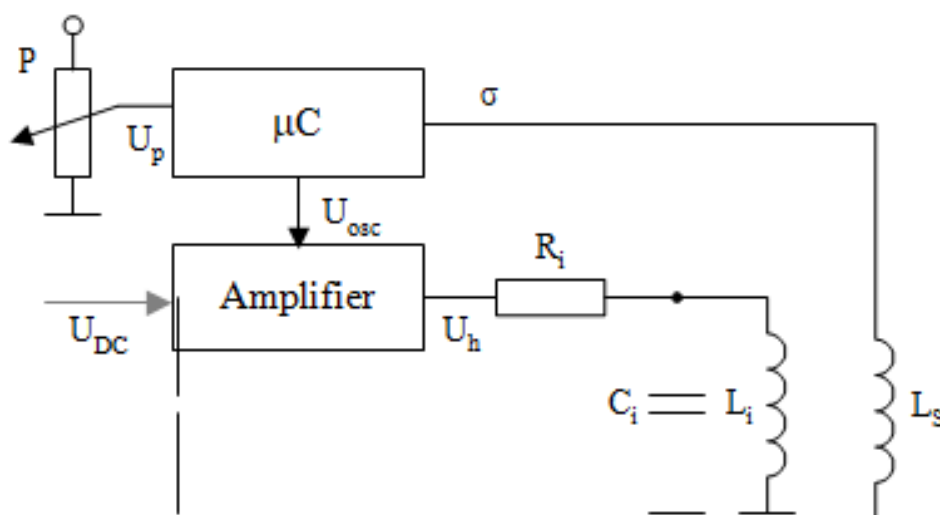
Η έξοδος της τροφοδοσίας, που υποδηλώνεται με  $U_{DC}$ , και η τάση πηνίου,  $U_{LC}$ , η ισχύς θέρμανσης είναι μόνο μια συνάρτηση της παραμέτρου  $\tau$ . Αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα ότι ο στόχος που τοποθετείται στο πηνίο αλλάζει την αντίστασή του. Επομένως, είναι απαραίτητο να συντονιστεί ξανά ο ταλαντωτής μετά την εισαγωγή του αντικειμένου στο πηνίο. Έτσι, η μέγιστη ισχύς είναι πάλι στο πηνίο, με σημαντική ισχύ θέρμανσης στο κομμάτι εργασίας.



Σχήμα 9. Επαγωγή θερμότητας στο πηνίο

#### 4.4. Νέες μέθοδοι ελέγχου επαγωγικής ισχύος με μικροελεγκτή

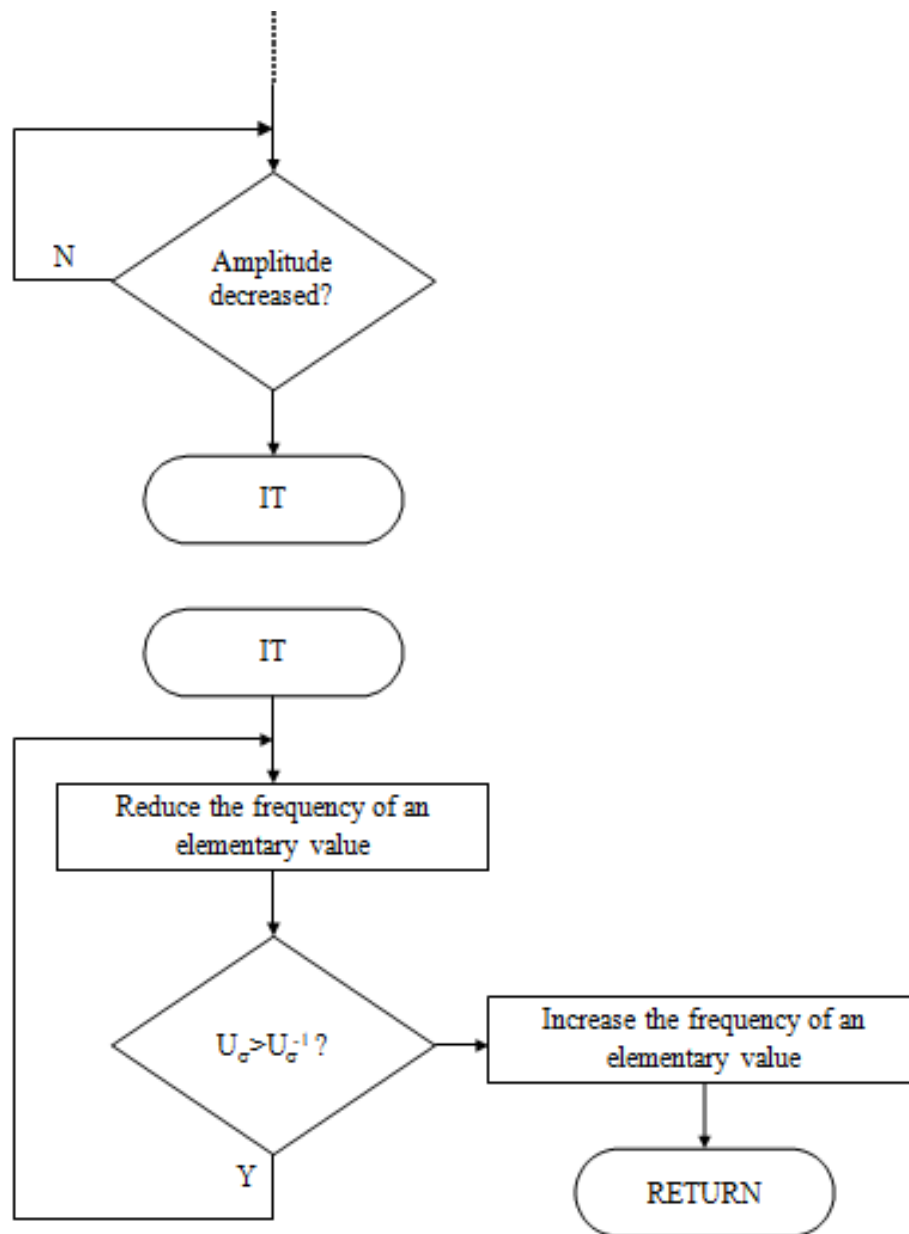
Στην προτεινόμενη διάταξη (Σχ.10) ο μικροελεγκτής ( $\mu C$ ) παράγει σήμα υψηλής συχνότητας ( $U_{osc}$ ), το οποίο ταιριάζει με τον ενισχυτή ισχύος με το κύκλωμα συντονισμού. Σε περίπτωση συχνότητας συντονισμού, η ισχύς θέρμανσης εξαρτάται μόνο από την παροχή τάσης ( $U_{DC}$ ).



Σχήμα 10. Ο μικροελεγκτής ( $\mu C$ ) παράγει σήμα υψηλής συχνότητας ( $U_{osc}$ )

Το σύστημα είναι ένα σημαντικό μέρος του πηνίου που τροφοδοτείται πίσω στην τιμή του ακτινοβολημένου μαγνητικού πεδίου, μέσω ενός πηνίου ανίχνευσης, στην κατάλληλη είσοδο ( $\mu$ ) ενός μικροελεγκτή [12]. Το αισθητήριο πηνίο του κατασκευασμένου εξοπλισμού μπορεί να παρατηρηθεί στο πάνω μέρος του Σχ. 1 που υποδηλώνεται με το «S».

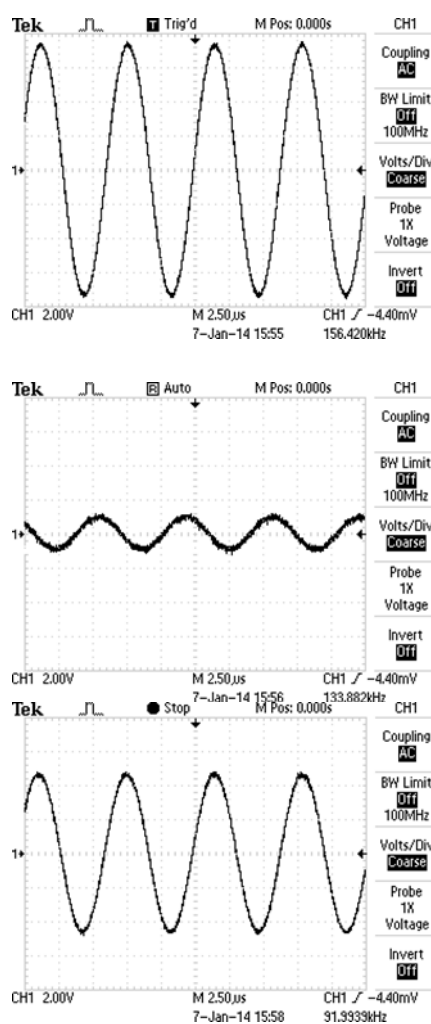
Με αυτό το υλικό είναι δυνατό να προσδιοριστεί η συχνότητα του κυκλώματος ταλαντώσεων εκτός συντονισμού [13]. Το πηνίο αισθητήρα ( $L_s$ ) ανιχνεύει την ισχύ του μαγνητικού πεδίου. Ο στόχος που έχει εισαχθεί κάνει αλλαγές ακτινοβολημένου σήματος επειδή το κύκλωμα συντονισμού είναι απενεργοποιημένο [14] [15]. Από την άλλη πλευρά, το κομμάτι εργασίας καταναλώνει ενέργεια από το μαγνητικό πεδίο [16].



Σχήμα 11. Διάγραμμα ροής του προγράμματος ελέγχου του ενσωματωμένου μικροελεγκτή

#### 4.5. Αυτόματος συντονισμός συχνότητας

Το σχετικό μέρος της δημιουργίας συχνοτήτων του διαγράμματος ροής του προγράμματος ελέγχου του ενσωματωμένου μικροελεγκτή φαίνεται στο Σχ. 6. Εάν αλλάξει η ένταση του αισθητηρίου πεδίου, το κύριο πρόγραμμα θα προκαλέσει διακοπή. Στην υπορουτίνα διακοπής αρχίζει να μειώνει τη συχνότητα [9].



Σχήμα 12. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συντονισμού, παρατηρούνται σήματα τάσης και συχνότητας

Το μέγεθος του βήματος μείωσης είναι 1 kHz. Η ένταση του ακτινοβολημένου μαγνητικού πεδίου ( $U_{\sigma}$ ) μετράται συνεχώς. Εάν το πλάτος μειωθεί ( $U_{\sigma} > U^{\sigma_0}$ ), υποχωρεί και ορίζει μια νέα τιμή συχνότητας συντονισμού [8].

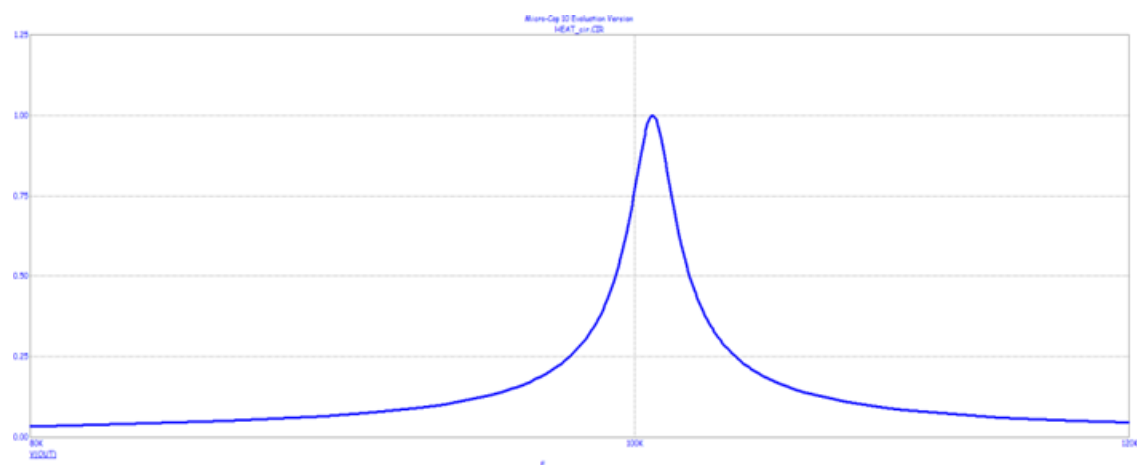
Η διαδικασία συντονισμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιταχύνει τη διαδοχική διαδικασία προσέγγισης [11].

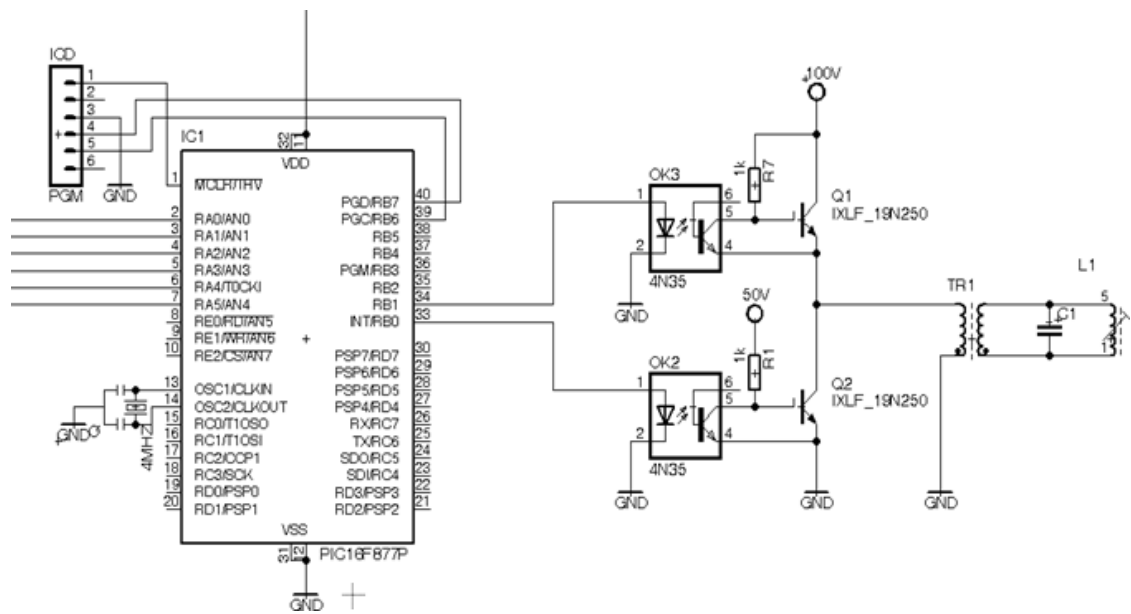
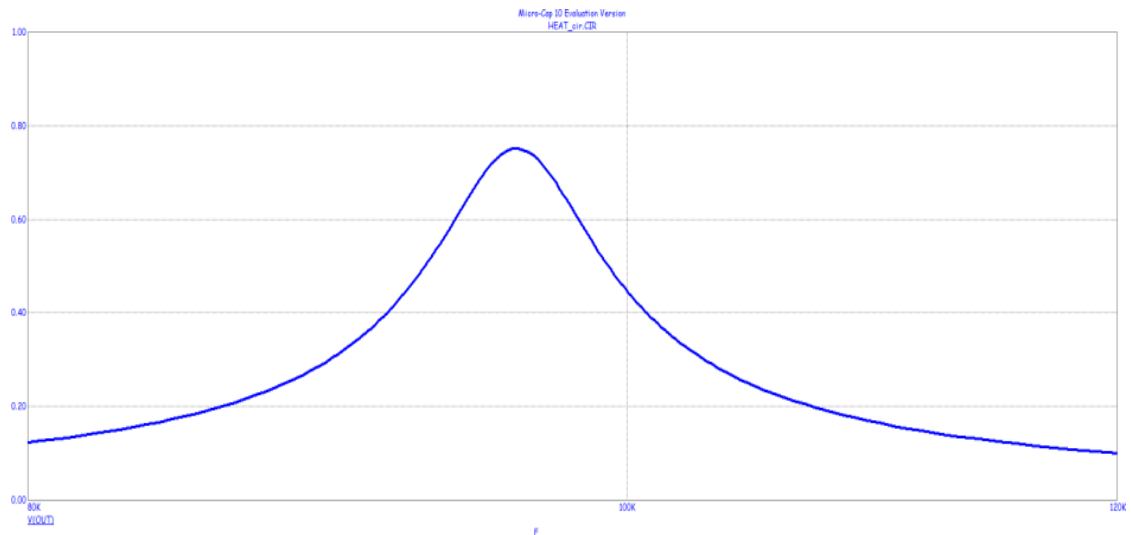


Στο Σχ. 12, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συντονισμού, παρατηρούνται σήματα τάσης και συχνότητας. Η επάνω σχήμα δείχνει το άδειο πηνίο θέρμανσης και το εύρος του που ανιχνεύεται σε συχνότητα συντονισμού ~ 156 kHz. Η μεσαία σχήμα δείχνει το πλάτος και τη συχνότητα στην εισαγωγή στόχου. Σημαντική μείωση παρατηρείται στο πλάτος. Με την έναρξη του συντονισμού, η τρέχουσα συχνότητα είναι ~ 134 kHz. Το αυξημένο πλάτος που βρέθηκε από τη νέα συχνότητα συντονισμού μπορεί να φανεί στην κάτω σχήμα παλμογράφου.

Το σχετικό μέρος του ενσωματωμένου μικροελεγκτή και του ηλεκτρονικού υψηλής ισχύος φαίνεται στο σχήμα του Σχ. 13.

Οι ημιαγωγοί υψηλής ισχύος, IGBTs (Q1, Q2), οδηγούνται από οπτοζεύκτες από τις ψηφιακές εξόδους μικροελεγκτή, χρησιμοποιώντας τις εσωτερικές αντιστάσεις pull-up σε RBO και RB1. Το συντονιστικό κύκλωμα (L1, L2) της αντιστοίχισης σύνθετης αντίστασης πραγματοποιείται από έναν μετασχηματιστή (TR1.) Έτσι, η οδήγηση της μισής γέφυρας χρησιμοποιεί το πλήρες δυναμικό των δυνατοτήτων HW SW του μικροελεγκτή.





Σχήμα 13. Το συζυγμένο κύκλωμα συντονισμού  $R_i$  συμπεριφέρεται ως φίλτρο διέλευσης ζώνης

#### 4.6. Έλεγχος ισχύος

Η ισχύς του εξοπλισμού θέρμανσης εξαρτάται από τις παραμέτρους του συνδεδεμένου κυκλώματος συντονισμού (Σχ.8,  $R_i$ ,  $L_i$ ,  $C_i$ ) και την τιμή συχνότητας διέγερσης ( $f_{osc}$ ). Το Σχ. 8 δείχνει ότι το συζευγμένο κύκλωμα συντονισμού  $R_i$  συμπεριφέρεται ως φίλτρο διέλευσης ζώνης [3]. Έτσι, η μαγνητική ενέργεια του πηνίου και η ισχύς θέρμανσης είναι συνάρτηση της συχνότητας, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 14 όταν το κύκλωμα ταλαντώσεων συχνότητας είναι διαφορετικό. Η τάση στο πηνίο μειώνεται, μαζί με την ισχύ επαγωγής, όπως περιγράφεται και στην εξίσωση (4). Το χαρακτηριστικό  $U-f$ , συντελεστής  $Q$  του κυκλώματος συντονισμού λόγω του εισαγόμενου αντικειμένου αλλάζει με τη συχνότητα συντονισμού [2].

Το Σχήμα 14 δείχνει επίσης ότι το χαρακτηριστικό του φίλτρου ζώνης είναι πιο επίπεδο, οπότε ο έλεγχος ισχύος επηρεάζεται λεπτά από τη μεταβολή της συχνότητας. Εάν είναι γνωστό πόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ισχύς από έναν δεδομένο στόχο, η συχνότητα μπορεί να συντονιστεί και να μειώσει την ισχύ. Για πρακτικούς λόγους, η συχνότητα μειώνεται. Η μείωση της ισχύος συμβαίνει ανάλογα με την κατάσταση ενός εξωτερικού χειριστηρίου (Σχ.8 ποτενσιόμετρο) ή ακόμη και με βάση έναν πίνακα αναζήτησης.



Σχήμα 14. Δομή πλακέτας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ HVDC

### 5.1. Εισαγωγή

Ένα **σύστημα μετάδοσης ηλεκτρικής ισχύος υψηλής τάσης, συνεχούς ρεύματος (HVDC)** χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα για τη μαζική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με τα περισσότερα κοινά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Για μετάδοση μεγάλων αποστάσεων, τα συστήματα HVDC μπορεί να είναι λιγότερο ακριβά και να έχουν χαμηλότερες απώλειες ηλεκτρικού ρεύματος. Για καλώδια υποβρύχιας ισχύος, το HVDC αποφεύγει τα βαριά ρεύματα που απαιτούνται για τη φόρτιση και την εκφόρτιση της χωρητικότητας του καλωδίου σε κάθε κύκλο. Για μικρότερες αποστάσεις, το υψηλότερο κόστος του εξοπλισμού μετατροπής DC σε σύγκριση με ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να δικαιολογείται, λόγω άλλων πλεονεκτημάτων των συνδέσεων συνεχούς ρεύματος.

Οι περισσότεροι σύνδεσμοι HVDC χρησιμοποιούν τάσεις μεταξύ 100 kV και 800 kV. Ένας σύνδεσμος 1.100 kV στην Κίνα ολοκληρώθηκε το 2019 σε απόσταση 3.300 km με ισχύ 12 GW. Με αυτήν την διάσταση, οι διηπειρωτικές συνδέσεις καθίστανται δυνατές που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της αολικής ενέργειας και των φωτοβολταϊκών.

Το HVDC επιτρέπει τη μετάδοση ισχύος μεταξύ μη συγχρονισμένων συστημάτων μετάδοσης AC. Δεδομένου ότι η ροή ισχύος μέσω ενός συνδέσμου HVDC μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα από τη γωνία φάσης μεταξύ πηγής και φορτίου, μπορεί να σταθεροποιήσει ένα δίκτυο έναντι διαταραχών λόγω γρήγορων αλλαγών στην ισχύ. Το HVDC επιτρέπει επίσης τη μεταφορά ισχύος μεταξύ των συστημάτων δικτύου που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, όπως 50 Hz και 60 Hz. Αυτό βελτιώνει τη σταθερότητα και την οικονομία κάθε δικτύου, επιτρέποντας την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ ασύμβατων δικτύων.

Η σύγχρονη μορφή μετάδοσης HVDC χρησιμοποιεί τεχνολογία που αναπτύχθηκε εκτενώς τη δεκαετία του 1930 στη Σουηδία (ASEA) και στη Γερμανία. Οι πρώτες

εμπορικές εγκαταστάσεις περιελάμβαναν μία στη Σοβιετική Ένωση το 1951 μεταξύ της Μόσχας και της Kashira, και ένα σύστημα 100 kV, 20 MW μεταξύ της Γκότλαντ και της ηπειρωτικής Σουηδίας το 1954. Πριν από το κινεζικό έργο του 2019, ο μακρύτερος σύνδεσμος HVDC στον κόσμο ήταν ο σύνδεσμος Ρίο Μαδέρα στη Βραζιλία, ο οποίος αποτελείται από δύο διπολικά  $\pm 600$  kV, 3150 MW το καθένα, συνδέοντας το Πόρτο Βέλχο στην πολιτεία Rondônia με την περιοχή του Σάο Πάολο. Το μήκος της γραμμής DC είναι 2.375 km (1.476 mi).

Η ζήτηση για καθαρή, ανανεώσιμη ενέργεια αλλάζει το πρόσωπο της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, για να αποκτήσετε ισχύ από υπεράκτια αιολικά πάρκα, αντί να μετατρέψετε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αιολική ενέργεια σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης (HVAC), το συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) είναι καλύτερη εφαρμογή. Το HVDC είναι η καλύτερη επιλογή για υπόγεια και υποβρύχια μετάδοση επειδή η χωρητικότητα ανά μονάδα καλωδίου εναλλασσόμενου ρεύματος το καθιστά ανέφικτο για μήκη πέρα από περίπου 100 km. Επιπλέον, το συνεχές ρεύμα (dc) μπορεί να μεταδώσει μεγάλες ποσότητες ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, με χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου και χαμηλότερες απώλειες από το εναλλασσόμενο ρεύμα (ac). (Στη μηχανική μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, η υψηλή τάση θεωρείται συνήθως οποιαδήποτε τάση άνω των 35 kV.)

Οι μέθοδοι μετάδοσης HVAC προέκυψαν στις αρχές της δεκαετίας του 1900 επειδή η διαμόρφωση DC του Thomas Edison λειτούργησε καλά σε χαμηλές τάσεις αλλά λιγότερο καλά σε μεγάλες αποστάσεις λόγω απώλειας εσωτερικής αντίστασης (IR). Ένα άλλο μειονέκτημα ήταν ότι το dc απαιτούσε τη χρήση ακριβών μετατροπέων τάσης και όχι απλών μετασχηματιστών για να φτάσει στις τάσεις τελικής χρήσης. Επιπλέον, η σχετική τεχνολογία, όπως οι διακόπτες DC για πολλαπλά τερματικά δίκτυα dc, είχε μείνει πίσω από άλλες εξελίξεις. (Ένα πλέγμα HVDC ονομάζεται "multi-terminal" όταν το σύστημα dc συνδέεται σε περισσότερους από δύο κόμβους στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.) Στην πραγματικότητα, οι ερευνητές προσπαθούν ακόμα να σχεδιάσουν έναν διακόπτη ικανό να επιβάλει το ρεύμα DC στο μηδέν για να αποφευχθεί η επικίνδυνη τόξο κατά τη διάρκεια λειτουργίες εναλλαγής.

Το HVDC έγινε πιο οικονομικό και επομένως πιο ελκυστικό στα τέλη της δεκαετίας του 1960 με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που περιελάμβαναν ανορθωτές υψηλής

ισχύος, όπως βαλβίδες τόξου υδραργύρου και, από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, θυρίστορ υψηλής ισχύος.

Η έλλειψη τεχνολογίας, ωστόσο, δεν εμπόδισε την Ευρώπη να χρησιμοποιεί HVDC. Στην πραγματικότητα, μια από τις πρώτες εμπορικές γραμμές HVDC ήταν ένα υποβρύχιο καλώδιο μήκους 98 χιλιομέτρων με επιστροφή εδάφους μεταξύ του νησιού της Γκότλαντ και της ηπειρωτικής Σουηδίας. Κατασκευάστηκε το 1954.

Οι συμβατικές διαμορφώσεις HVDC εμπίπτουν τώρα στις κατηγορίες μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων μέσω εναέριων γραμμών > 1.000 km. υποβρύχιο καλώδιο - π.χ. υποθαλάσσιο καλώδιο -> 100 km μήκος ή αυτό που ονομάζεται μετάδοση σε πλάτη. Μια μονάδα dc back-to-back συνδέει δύο γειτονικά πλέγματα εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς γραμμή μετάδοσης DC. Οι μετατροπείς βρίσκονται στον ίδιο σταθμό. Αυτή η διαμόρφωση εξυπηρετεί πολλαπλούς σκοπούς, όπως συναλλαγή ισχύος μεταξύ ασύγχρονων δικτύων, σταθεροποίηση διαφορετικών επιπέδων ενός πλέγματος και έλεγχος εναλλαγής ισχύος.

Αν και ο έλεγχος της ροής ισχύος σε έναν μόνο σύνδεσμο dc είναι σχετικά απλός, μπορεί να είναι μια εννοιολογική πρόκληση για τον συντονισμό ενός σύνθετου, πολλαπλών τερματικών πλέγματος dc.

Ευτυχώς, το PSS / E (λογισμικό προσομοίωσης συστήματος ισχύος για μηχανικούς) από τη Siemens Power Technologies International στις Η.Π.Α. και στη Γερμανία επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώνουν τόσο σταθερές συνθήκες όσο και δυναμικές εγκαταστάσεις πολλαπλών τερματικών dc. Το λογισμικό χρησιμοποιεί τους πιο πρόσφατους αριθμητικούς αλγόριθμους για την αποτελεσματική επίλυση τόσο μεγάλων όσο και μικρών δικτύων.

Τα μοντέλα PSS / E μπορούν να προσομοιώσουν τη μετάδοση υπερευψωμένης γραμμής DC υπερευψίας και τις εγκαταστάσεις back-to-back για την ανάλυση του ελέγχου ροής ισχύος, τη βελτίωση της δυναμικής απόδοσης του συστήματος και την ανακούφιση της συμφόρησης. Με αυτά τα μοντέλα, οι σχεδιαστές μπορούν να διερευνήσουν τον αντίκτυπο στη σταθερή κατάσταση και τη δυναμική απόδοση των συστημάτων όταν προστίθεται ένας σύνδεσμος HVDC.

Οι χρήστες μπορούν επίσης να συγκρίνουν εναλλακτικές λύσεις εναλλασσόμενου ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος για συνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων

με το δίκτυο στην ξηρά. Επιπλέον, οι χρήστες μπορούν να σχεδιάσουν και να δοκιμάσουν ειδικά χειριστήρια HVDC και προστατευτικά σχήματα για να επιδοτήσουν τις μελλοντικές προδιαγραφές μετατροπέα. Και οι σχεδιαστές μπορούν να αναπτύξουν μοντέλα PSS / E που προσομοιώνουν ειδικά χαρακτηριστικά HVDC.

Πριν εξετάσουμε την περίπτωση HVDC, ας εξετάσουμε την ανάλυση ενός συμβατικού συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι υπολογισμοί ροής φορτίου σε ένα δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των ροών ισχύος διακλάδωσης και των τάσεων κόμβου. Το δίκτυο αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων και ανισοτήτων. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές, επειδή αντιπροσωπεύουν το μοντέλο ενός συστήματος σε σταθερή κατάσταση (χωρίς εμπλοκή χρόνου) και μη γραμμικό λόγω των τριγωνομετρικών λειτουργιών των γωνιών τάσης κόμβου. Η μη γραμμικότητα σημαίνει ότι η λύση στις εξισώσεις είναι αριθμητική και όχι αναλυτική. Αρκετές επαναλαμβανόμενες μέθοδοι λύσης χρησιμοποιούνται από το PSS / E όπως οι Newton-Raphson και Gauss-Seidel και οι παραλλαγές τους.

Στην περίπτωση του HVDC, το λογισμικό PSS / E προσομοιώνει έναν σύνδεσμο με ειδικά μοντέλα που αποτελείται από ένα συντονισμένο ζεύγος ανορθωτή-μετατροπέα, που ονομάζεται μετατροπέας. Ένας μετατροπέας αλλάζει βασικά ac σε dc ή αντίστροφα. Όσον αφορά την ανάλυση, κάθε ζεύγος τοποθετεί ένα συντονισμένο σύνολο ειδικών συνθηκών ορίου στα λεωφορεία εναλλασσόμενου ρεύματος όπου συνδέεται ο σύνδεσμος. Όλες οι δύο τερματικές γραμμές dc αποτελούνται από αυτό που ονομάζεται μετατροπέας γραμμής μεταγωγής (LCC). Οι σταθμοί μετατροπέα μπορεί να περιλαμβάνουν έναν πυκνωτή μετατροπής, ο οποίος καταστέλλει τις αρμονικές που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία μετατροπής και μειώνει την απαίτηση για αρμονικά φίλτρα στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο πυκνωτής μετατροπής επηρεάζει το μοντέλο γραμμής DC και τη λύση του. Το PSS / E αντιπροσωπεύει κάθε τερματικό ως μια σειρά γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων περιορισμού που επιλύονται με μη επαναληπτικές μεθόδους. Αυτό παρέχει τα επαναληπτικά βήματα με συνθήκες ορίου dc, που αντιπροσωπεύονται από φορτία megawatt (MW) και megavolt-ampere-reactive (MVar).

Πρώτα ας σκεφτούμε τη μη τερματική μεταβλητή γραμμή δύο τερματικών dc. Διαμορφώνεται ως μια σειρά γραμμικών και μη γραμμικών εξισώσεων που είναι



συμμετρικές μεταξύ του ανορθωτή και του μετατροπέα. Ο ανορθωτής και ο μετατροπέας συνδέονται με μια εξίσωση γραμμής μετάδοσης, αλλά οι εξισώσεις ελέγχου για κάθε μετατροπέα αποσυνδέονται. Δηλαδή, δεν έχουν καμία επίδραση στις άλλες εξισώσεις. Η κατάσταση κάθε κυκλώματος μπορεί να επιτευχθεί με την επίλυση αυτών των εξισώσεων με την κατάλληλη ακολουθία. Αυτή η διαδικασία λύσης είναι μη επαναληπτική και παρέχει αξιόπιστα όρια DC για κάθε επανάληψη.

Τώρα ας εξετάσουμε τη γραμμή dc πυκνωτή. Αποτελείται από τη γραμμή μετάδοσης και τουλάχιστον έναν μετατροπέα πυκνωτή. Οι περιορισμοί για τον μετατροπέα πυκνωτή είναι ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Όταν τόσο ο ανορθωτής όσο και ο μετατροπέας μετακινούνται με πυκνωτή, το σύστημα εξισώσεων κάθε μετατροπέα μπορεί να συνδέεται ή να αποσυνδέεται με τον άλλο, ανάλογα με τη λειτουργία ελέγχου. Το PSS / E αντλεί την κατάσταση μετατροπέα επιλύοντας ταυτόχρονα αυτές τις εξισώσεις χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική τεχνική.

Η λογική της ροής ισχύος-ρύθμισης ρυθμίζει τόσο τη γωνία ελέγχου φάσης (τη γωνιακή διαφορά μεταξύ της τάσης και του ρεύματος που βρίσκεται μπροστά) όσο και τη θέση της βρύσης του μετασχηματιστή για τη ρύθμιση της τάσης και του ρεύματος dc. Σε κανονικές συνθήκες, οι γραμμές dc, κατά τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος dc, λειτουργούν σύμφωνα με τις ιδιότητες του μετατροπέα όταν η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ανορθωτή είναι επαρκής για τον έλεγχο γωνίας φάσης του ρεύματος. Ας υποθέσουμε ότι η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο ανορθωτή είναι κάτω από την κανονική. Στη συνέχεια, το λογισμικό σταματά να ελέγχει την τάση dc και ο μετατροπέας ρυθμίζεται για να διατηρεί το ρεύμα DC σε μια τιμή που είναι το επιθυμητό ρεύμα που μειώνεται από το τρέχον περιθώριο. Η γραμμή μπορεί να δοθεί εντολή να διατηρήσει είτε το επιθυμητό ρεύμα DC είτε την επιθυμητή ισχύ DC.

Για μετατροπέα χωρίς πυκνωτή, ο έλεγχος ισχύος διατηρείται εφόσον η τάση dc στον μετατροπέα υπερβαίνει μια καθορισμένη τιμή κατωφλίου. Αυτός ο έλεγχος εμποδίζει συνεχώς τη γραμμή να αναζητά έναν συνδυασμό χαμηλής τάσης DC και υψηλού ρεύματος DC. Ο συνδυασμός δημιουργεί δυσκολίες μετατροπής στον μετατροπέα καθώς και υπερβολική απαίτηση αέργου ισχύος και στους δύο μετατροπείς.

Εάν η τάση dc του μετατροπέα πέσει κάτω από την τιμή κατωφλίου όταν η γραμμή έχει οριστεί ότι βρίσκεται σε λειτουργία ελέγχου ισχύος, το ρεύμα γραμμής ορίζεται σε επίπεδο που καθορίζεται από την επιθυμητή ισχύ διαιρούμενη με το πρόγραμμα τάσης

dc. (Το χρονοδιάγραμμα τάσης είναι μια τάση στόχος που πρέπει να διατηρηθεί εντός μιας ζώνης ανοχής κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης περιόδου.) Αυτό κάνει την πραγματική ισχύ λήψης dc να είναι ανάλογη της τάσης dc.

Στην περίπτωση ενός μετατροπέα πυκνωτή, το λογισμικό ελέγχει την ισχύ υπολογίζοντας την ποσότητα του ρεύματος dc που απαιτείται για να πάρει ένα ορισμένο ποσό ελέγχου ισχύος dc, υποθέτοντας τη σωστή τάση dc. Το όριο τάσης δεν παίζει ρόλο στον έλεγχο ισχύος σε αυτήν την περίπτωση.

Για τον HVDC με βάση τον μετατροπέα πηγής τάσης (VSC), το PSS / E διαθέτει ένα γενικό μοντέλο χωρίς χειριστήρια ειδικά για τον κατασκευαστή. Είναι ανεξάρτητο από το συμβατικό μοντέλο δύο τερματικών γραμμών DC. Αντιπροσωπεύει απώλειες αντίστασης DC και απώλειες μετατροπής μετατροπέα. Για αυτό το μοντέλο, οι μετασχηματιστές είναι εξωτερικοί και οι συνθήκες ορίου ροής ισχύος καθορίζονται από παραμέτρους και όρια λειτουργίας μετατροπέα.

Το PSS / E μπορεί να προσομοιώσει πολλαπλά τερματικά συμβατικά συστήματα HVDC με μονόπολες και διπολικές διαμορφώσεις. Μια διαμόρφωση μονοπολικού HVDC χρησιμοποιεί μια μόνο γραμμή μετάδοσης υψηλής τάσης και τη γη, τη θάλασσα ή έναν μεταλλικό αγωγό ως επιστροφή. Ένα διπολικό σύστημα χρησιμοποιεί δύο ακροδέκτες, συνήθως με ηλεκτρόδια γείωσης στους ακροδέκτες, ή εναλλακτικά με έναν συνεχή μεταλλικό αγωγό που δένεται στην ίδια εναέρια γραμμή. Οι χρήστες πρέπει να επιλέξουν έναν μεμονωμένο μετατροπέα ελέγχου τάσης σε κάθε πόλο. Μοντέλα για δίκτυα πολλαπλών τερματικών dc που βασίζονται σε VSC δεν είναι ακόμη διαθέσιμα, αλλά η Siemens PTI σχεδιάζει να τα αναπτύξει καθώς εμφανίζονται τεχνολογίες από τους κυρίαρχους κατασκευαστές. Τα μονοπώλια είναι ισοδύναμα με ένα μόνο κύκλωμα, ενώ τα διπολικά ισοδύναμα με ένα διπλό κύκλωμα και προσφέρουν πλεονασμό σε περίπτωση διακοπής πόλων.

## 5.2. Μοντελοποίηση της δυναμικής τού HVDC

Επειδή η συμπεριφορά μετάδοσης dc κυριαρχείται από τα στοιχεία ελέγχου της, αυτά τα στοιχεία ελέγχου πρέπει να μοντελοποιηθούν. Το εύρος ζώνης ελέγχου είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό της προσομοίωσης PSS / E γενικά, οπότε συνήθως δεν είναι πρακτικό να αναπαριστάμε τη λεπτομερή δυναμική των στοιχείων ελέγχου.

Κάθε γέφυρα μετατροπέα ελέγχεται από έναν τοπικό βρόχο ανατροφοδότησης κρίσιμων παραμέτρων (δηλαδή, τάση, ρεύμα, γωνία πυροδότησης) σύμφωνα με τις απαιτήσεις ακρίβειας καθυστέρησης ενεργοποίησης της διαδικασίας διόρθωσης-αναστροφής. Αυτοί οι τοπικοί βρόχοι λειτουργούν ανεξάρτητα για τη διατήρηση του ρεύματος της γέφυρας ή της τάσης στις επιθυμητές τιμές. Αυτές οι τιμές παρέχονται από έναν εξωτερικό βρόχο ελέγχου που λειτουργεί σε εποπτικό ρόλο και συντονίζει τη δράση των διαφόρων γεφυρών μετατροπέα και του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η μοντελοποίηση της μετάδοσης dc αντιστοιχεί σε τρεις διαφορετικές ενέργειες που μπορούν να κάνουν τα χειριστήρια: κανονική ρύθμιση της λειτουργίας μετατροπέα dc. προσωρινά παρακάμπτοντας τα σημεία ρύθμισης μετατροπέα dc για τον χειρισμό διαταραχών τάσεων συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος κατά τη διάρκεια βλαβών. και διαμόρφωση του σημείου ρύθμισης ισχύος dc από μια συμπληρωματική συσκευή ελέγχου που μεταβάλλει την εναλλαγή καθαρής ισχύος.

Υπάρχουν μοντέλα μετάδοσης DC για διαφορετικά σημεία ρύθμισης ρεύματος και τάσης και όρια γωνίας καθυστέρησης. Κατά τη διάρκεια των μελετών σκοπιμότητας, οι σχεδιαστές δεν γνωρίζουν ακόμη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ελέγχου του HVDC. Έτσι μπορούν να ξεκινήσουν με το γενικό μοντέλο μετάδοσης DC PSS / E.

(Βλ. και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α της Εργασίας)

### 5.3. Η κατάσταση του HVDC σήμερα

Επί του παρόντος, υπάρχει ένας αριθμός μεγάλων (άνω των 800 MW) υπεράκτιων αιολικών πάρκων που συνδέονται με την ηπειρωτική Ευρώπη σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 100 km όπου τα βάθη της θάλασσας είναι περίπου 40 m. Δεδομένης της υπεράκτιας απόστασης, οι υποβρύχιες συνδέσεις καλωδίων με το ηπειρωτικό δίκτυο απαιτούν HVDC, σε συνδυασμό με τα συμπαγή οφέλη σχεδιασμού της τεχνολογίας HVDC με βάση τον μετατροπέα που προέρχεται από τάση (VSC). Οι υπεράκτιες, πλωτές, ανυψωτικές πλατφόρμες έχουν σχεδιαστεί για να φιλοξενήσουν όλο τον απαραίτητο ηλεκτρικό εξοπλισμό για τους μετατροπείς HVDC.

Η Κίνα έχει κατασκευάσει μια σειρά από αυτοκινητόδρομους υψηλής ισχύος dc ενέργειας, τοποθετημένες στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, για να μεταφέρει αποτελεσματικά (δηλαδή, να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες) ηλεκτρική ενέργεια από τεράστιους σταθμούς υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Κεντρική Κίνα σε κέντρα φόρτωσης που βρίσκονται σε απόσταση 2.000 έως 3.000 χιλιόμετρα. Αυτά τα συστήματα HVDC εξαιρετικά υψηλής τάσης (UHV) στα 800 kV απαιτούν τεχνολογία μετατροπής γραμμής εναλλαγής γραμμής τελευταίας τεχνολογίας. Το πρώτο στον κόσμο σύστημα 5 GW ± 800 kV 1.418 km HVDC τέθηκε σε λειτουργία το 2009, το οποίο βοηθά στην εξοικονόμηση περίπου 33 εκατομμυρίων τόνων CO<sub>2</sub> σε σύγκριση με την τοπική παραγωγή ενέργειας. Στην Κίνα, σχεδιάζονται συνολικά 35 έργα HVDC «μαζικής ισχύος» για το 2010 έως το 2020, με συνδυασμένη χωρητικότητα μετάδοσης 217 GW. Ένας μεγάλος αριθμός αυτών των έργων προορίζονται για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς που βρίσκονται στο κέντρο της χώρας σε απομακρυσμένα κέντρα φορτίου.

Η εφαρμογή πολύ-τερματικών υπεράκτιων υπεράκτιων HVDC βρίσκεται στη φάση προγραμματισμού για την ανάπτυξη ραχοκοκαλιά μετάδοσης από τις ακτές των κρατών του Ατλαντικού στις ΗΠΑ. Το φιλόδοξο έργο στοχεύει στη σύνδεση 6.000 MW υπεράκτιων αιολικών πάρκων - πολλαπλών αιολικών πάρκων, όλα σε σχετικά ρηγά νερά - μέσω σπονδυλικής στήλης μετάδοσης HVDC (καθοδηγείται από τις υπεράκτιες αποστάσεις μαζί με τα σχετικά οφέλη του HVDC). Επιπλέον, το έργο HVDC θα παρέχει ανακούφιση συμφόρησης δικτύου στο υπάρχον χερσαίο σύστημα μεταφοράς

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΑΠΕ**

### **6.1. Γενική εισαγωγή**

Τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας προσφέρουν περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή ενέργειας σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα ορυκτών καυσίμων. Μεταξύ όλων των τύπων εφαρμογών πράσινης ενέργειας, τα κυψέλες καυσίμου είναι τα πιο δημοφιλή επειδή μπορούν να παρέχουν συνεχή τροφοδοσία σε όλες τις εποχές, εφόσον παρέχεται καύσιμο. Συγκριτικά, άλλοι τύποι πράσινης ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Ωστόσο, η ανανεώσιμη ενέργεια που παρέχεται από τις κυψέλες καυσίμου έχει χαρακτηριστική εξόδου χαμηλής τάσης και για οποιαδήποτε πιθανή πρακτική εφαρμογή απαιτείται μετατροπείας DC-DC υψηλής βαθμίδας [1, 2]. Κάθε πηγή ενέργειας έρχεται κανονικά με ένα σύνολο προκλήσεων όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας, τις επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη χρήση. Η χαρακτηριστική ηλεκτρική ισχύς των κυψελών καυσίμου έχει ορισμένες δραστικές ελλείψεις και χαμηλή τάση εξόδου, η οποία μειώνεται όσο αυξάνεται το ρεύμα φορτίου. Οι στοιβές κυψελών καυσίμου δεν είναι επίσης σε θέση να ικανοποιήσουν τις παροδικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος στο φορτίο. Ωστόσο, οι χαμηλές εκπομπές και η υψηλή απόδοση της κυψέλης καυσίμου τους καθιστούν μια ευνοϊκή επιλογή για πηγές ενέργειας σε φορητές εφαρμογές [3, 4].

### **6.2. Εφαρμογή ηλεκτρονικών ισχύος στα συστήματα ΑΠΕ**

Η εφαρμογή εφαρμογών ηλεκτρονικής ισχύος στα συστήματα κυψελών καυσίμου είναι μια λύση που επιτρέπει την τεχνολογία κυψελών καυσίμου να χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε εφαρμογή. Ένα σύστημα κυψελών καυσίμου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε εφαρμογή με τη σωστή επιλογή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος. Η χρήση διαφορετικών εξαρτημάτων μεταγωγής και τοπολογιών μεταγωγής σε κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος θα αποφέρει διαφορετικά αποτελέσματα και αποτελεσματικότητα. Με τις τεχνολογικές εξελίξεις που έγιναν στη βιομηχανία ημιαγωγών, προστέθηκαν σκληρά εξαρτήματα ηλεκτρονικής ισχύος για τη βελτίωση

της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας. Το μέγεθος των εξαρτημάτων μεταγωγής γίνεται όλο και μικρότερο, γεγονός που τους καθιστά οικονομικά αποδοτικό. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη μεγάλο ποσοστό ηλεκτρικού θορύβου. Η ιδέα πίσω από τη χρήση μιας μεθόδου soft-switching αποσκοπεί στη μείωση του θορύβου και την αλλαγή των απωλειών. Επιπλέον, οι απώλειες μεταγωγής μπορούν να μειωθούν με την εφαρμογή διακοπών μηδενικής τάσης (ZVSs) ή διακοπών μηδενικού ρεύματος (ZCSs) [5].

Διάφοροι μετατροπείς DC είναι διαθέσιμοι που μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν το μέγεθος της τάσης DC ή / και να αντιστρέψουν την πολικότητα. Ο διακόπτης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ένα MOSFET ισχύος και μια δίοδο. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι μεταγωγείς ημιαγωγών, όπως IGBTs, BJTs ή θυροσκόπια σύμφωνα με την εφαρμογή [7]. Εκτός αυτού, πολλοί μεταγωγείς ημιαγωγών που προσφέρουν οι οποίοι μειώνουν σημαντικά τις απώλειες μεταγωγής είναι διαθέσιμοι στην αγορά, όπως εξαιρετικά γρήγορες IGBT 1200 V, οι οποίες μπορούν να μειώσουν τις απώλειες μεταγωγής και αγωγιμότητας με τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που επικεντρώνονται στην επίτευξη της υψηλότερης απόδοσης και αξιοπιστίας. Αυτά τα IGBTs 1200 V Trench έχουν σχεδιαστεί για να ικανοποιούν τις πιο απαιτητικές απαιτήσεις απόδοσης κάθε συστήματος, οι οποίες έχουν βελτιστοποιηθεί για τις χαμηλότερες απώλειες μεταγωγής και την ομαλότερη απενεργοποίηση σε υψηλότερη συχνότητα. Οι νέες προσεγγίσεις της τεχνολογίας SolderableFrontMetal (SFM) διευρύνουν σημαντικά την ικανότητα κυκλοφοριακής ισχύος, ενώ η διπλής όψης ψύξη περαιτέρω μειώνει την κατανάλωση ισχύος για να προσφέρει μια εξαιρετικά αποτελεσματική λύση [8]. Μια άλλη λύση είναι η SiliconCarbide (SiC), η οποία είναι γνωστή ως ηλεκτρονικά ισχύος ισχύος βασισμένη σε SiC, η οποία μπορεί να μειώσει το μέγεθος και να διακόψει τις απώλειες στο σύστημα ισχύος κατά 50%, εστιάζοντας ιδιαίτερα στην εφαρμογή ηλεκτρονικών υψηλής ισχύος, όπως βοηθητικά προγράμματα ηλεκτρικής ενέργειας, έξυπνα δίκτυα, , και την ομάδα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [9].

### 6.2.1. Μετατροπέας DC-DC Boost

Βασικά, ένας μετατροπέας ώθησης αποτελείται από το στοιχείο μεταγωγής, μια δίοδο, έναν επαγωγέα και έναν ελεγκτή μεταγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Το στοιχείο μεταγωγής μεταβαίνει μεταξύ της κατάστασης "on" και "off" για να αυξήσετε την τάση εισόδου στην επιθυμητή τάση εξόδου. Κατά την κατάσταση "ενεργοποίησης" του στοιχείου μεταγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται στον επαγωγέα και στη συνέχεια ο πυκνωτής τροφοδοτεί το ρεύμα στο φορτίο και τη δίοδο με αντίστροφη προκατάληψη. Όταν βρίσκεται στην κατάσταση "off", η αποθηκευμένη ενέργεια μεταφέρεται στο φορτίο και τον πυκνωτή μέσω της διόδου [6]. Ο μετατροπέας ώθησης λειτουργεί σε έναν από τους δύο τρόπους λειτουργίας, συνεχούς λειτουργίας αγωγιμότητας ή λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής, ο οποίος χαρακτηρίζεται από την κυματομορφή ρεύματος του επαγωγέα [10]. Το ρεύμα του επαγωγέα είναι μεγαλύτερο από το μηδέν όλη την ώρα όταν βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς αγωγής και το ρεύμα του επαγωγέα πέφτει στο μηδέν μετά από κάθε κύκλο μεταγωγής όταν βρίσκεται σε λειτουργία ασυνεχούς αγωγής [6].

### 6.2.2. Μετατροπέας Buck-Boost DC-DC

Το βασικό κύκλωμα ενός μετατροπέα buck-boost αποτελείται από ένα στοιχείο μεταγωγής, επαγωγέα, δίοδο και πυκνωτή. Η διαφορά μεταξύ ενός μετατροπέα buck-boost και ενός ρυθμιστή ώθησης είναι η διάταξη του στοιχείου μεταγωγής που τοποθετείται πριν από τον επαγωγέα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Η τοπολογία του buck-boost μπορεί να παράγει μια τάση εξόδου ίση με, μικρότερη ή μεγαλύτερη από την τάση εισόδου. Η τοπολογία του buck-boost είναι κατάλληλη για φορητές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν ένα ευρύ φάσμα επιπέδων εξόδου και είναι μια ελκυστική επιλογή όταν παρέχεται μεγάλο ρεύμα [6]. Η τάση εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου όταν ο κύκλος λειτουργίας είναι 0,5. Όταν ο κύκλος λειτουργίας είναι μικρότερος από 0,5, ο μετατροπέας buck-boost λειτουργεί σε λειτουργία buck, με αποτέλεσμα η τάση εξόδου να είναι χαμηλότερη από την τάση εισόδου. Για να γίνει ο μετατροπέας buck-boost να λειτουργήσει σε λειτουργία ώθησης και να προκαλέσει μεγαλύτερη τάση εξόδου από την τάση εισόδου, ο κύκλος λειτουργίας πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 0,5. Αυτή η σχέση φαίνεται στο Σχήμα 3 [6].

Chenet al. [32] πρότεινε ένα PWM μετατροπέα buck-boost που έχει δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους διακόπτες οι οποίοι μπορούν να λειτουργήσουν ως ενισχυτής ή ως μετατροπέας buck ανάλογα με τις συνθήκες εισόδου-εξόδου. αυτή η προσέγγιση θέτει χαμηλότερες τάσεις στα εξαρτήματα. Hwang et al. [33] πρότεινε ένα θετικό μετατροπέα buck-boost χαμηλής τάσης χρησιμοποιώντας ένα μέσο ρεύμα ελεγχόμενο με ένα απλό σχέδιο αντιστάθμισης. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μειώσει ορισμένα προβλήματα διαχείρισης ενέργειας, όπως μέγεθος, κόστος, πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και απλό σχεδιασμό αντιστάθμισης και παρέχει ρυθμιζόμενη απόδοση με μέγιστη απόδοση 72% σε συχνότητα μεταγωγής 1 MHz. Η Boopathy και η BhoopathyBagan [34] παρουσίασαν μια νέα μέθοδο εφαρμογής μετατροπέα buck-boost σε πραγματικό χρόνο με βελτιωμένη παροδική απόκριση για φορητές εφαρμογές χαμηλής ισχύος και σημαντικά βελτίωσε την απόδοση από 16% και 19%. Οι Hwu και Peng [35] πρότειναν ένα νέο μετατροπέα buck-boost συνδυάζοντας KY και μετατροπείς buck, οι οποίοι μπορούν να λύσουν το πρόβλημα της τάσης του μετατροπέα KY και να αυξήσουν την ικανότητα εφαρμογής του μετατροπέα KY με απόδοση άνω του ρεύματος φορτίου DC 0,25 A 88% ή περισσότερο.

### 6.2.3. Μετατροπέας DC-DC Cuk

Ο μετατροπέας Cuk περιέχει έναν επαγωγέα σε σειρά με τη θύρα εισόδου και εξόδου μετατροπέα. Το δίκτυο μεταγωγής συνδέει εναλλάξ έναν πυκνωτή στους επαγωγείς εισόδου και εξόδου. Ο λόγος μετατροπής είναι ίδιος με εκείνον του μετατροπέα buck-boost. Ως εκ τούτου, ο μετατροπέας αναστρέφει επίσης την πολικότητα τάσης, ενώ αυξάνει ή μειώνει το μέγεθος τάσης. Ο μετατροπέας Cuk είναι ένας τροποποιημένος μετατροπέας boost-buck και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την ενίσχυση ή την αποβίβαση της τάσης εξόδου σε σχέση με την είσοδο. Παράγει αρνητική τάση εξόδου από θετική τάση εισόδου και το πλεονέκτημά της είναι η παρουσία τόσο επαγωγικών όσο και επαγωγικών εξόδων. Αυτοί οι επαγωγείς χαμηλώνουν την κυμάτωση ρεύματος στην πηγή εισόδου και το φορτίο. Επιπλέον, ο μετατροπέας Cuk έχει επίσης υψηλότερη απόδοση, μειωμένη παραγωγή EMI και καλύτερη δυναμική απόκριση [36]. Lin et al. [37] σχεδίασε και κατέδειξε έναν ενεργό μετατροπέα Cuk με μεταγωγέα μηδενικής τάσης για την επίτευξη παράλληλης λειτουργίας και ισορροπημένης ανταλλαγής ρεύματος.



#### 6.2.4. Μετατροπέας DC-DC SEPIC

Ο μετατροπέας πρωτεύοντος επαγωγικού μορίου (SEPIC) μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει το μέγεθος τάσης. Ωστόσο, δεν αντιστρέφει την πολικότητα. Ο λόγος μετατροπής είναι. Το SEPIC έχει τα χαρακτηριστικά του τρόπου λειτουργίας buck-boost, χωρίς αναστροφή πολικότητας, χαμηλό παλμό ρεύματος εισόδου και ευρύ εύρος τάσης εισόδου. Έχει επίσης τα ακόλουθα πλεονεκτήματα, τα οποία εφαρμόζονται στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της κυψέλης καυσίμου: (i) Είναι ένας μετατροπέας που μπορεί να λειτουργήσει υπό συνθήκες ώθησης ή buck και υπάρχει μεγαλύτερη ελαστικότητα για την υποβοήθηση του σχεδιασμού της βοηθητικής πηγής. (ii) Σε σύγκριση με άλλους κοινούς μετατροπείς ώθησης ή buck, ο μετατροπέας SEPIC δεν έχει προβλήματα με τάση εξόδου αντίστροφης πολικότητας. (iii) Ο ακροδέκτης εισόδου ενός μετατροπέα SEPIC περιέχει έναν επαγωγέα, ο οποίος μπορεί να μειώσει τους παλμούς ρεύματος εισόδου και να ξεπεράσει το μειονέκτημα των παλμών ηλεκτρικού ρεύματος της κυψέλης καυσίμου για να αυξήσει την ακρίβεια του ελέγχου [38]. Το SEPIC χρησιμοποιείται συνήθως σε οπίσθιους φωτισμούς φωτοεκπομπής (LED) και φωτοβολταϊκές εφαρμογές, διότι μπορεί να παράγει μη εναλλασσόμενο ρεύμα και μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως μετατροπέας step-up και step-down. Ωστόσο, η αποδοτικότητα της μετατροπής ισχύος είναι χαμηλότερη από αυτή των άλλων μετατροπέων, όπως ο μετατροπέας buck και boost, επειδή ο επιπλέον επαγωγέας και ο πυκνωτής προκαλούν πρόσθετες απώλειες ισχύος [39-41]. Οι Song et al. [42] πρότειναν ένα τροποποιημένο σχεδιασμό SEPIC για έναν μετασχηματιστή βαθμίδων και βηματισμού που έχει υψηλότερη απόδοση μετατροπής ισχύος από την αρχική τοπολογία SEPIC σε λειτουργία συνεχούς αγωγής (CCM). Η ισχύς εισόδου μπορεί να παραδοθεί απευθείας στην έξοδο με λίγες απώλειες.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην Εργασία αυτή έγινε μια αναλυτική επισκόπηση των εφαρμογών των Ηλεκτρονικών Ισχύος σε πέντε(5) σημαντικές και ενδιαφέρουσες περιοχές: (1) Ηλεκτροκίνηση/ Ηλεκτρικά Οχήματα, (2) Επαγωγική Θέρμανση, (3) UPS, (4) Α.Π.Ε. και (5) HVDC. Είναι σαφές ότι ο συνδυασμός Ηλεκτρονικών Ισχύος, Μικροϋπολογιστών και Αυτομάτου Ελέγχου έχει επιφέρει και θα συνεχίσει να επιφέρει μια «επανάσταση» στις Βιομηχανικές Εφαρμογές όπου απαιτείται Έλεγχος της Ροής Ηλεκτρικής Ισχύος προς το Φορτίο.

Σήμερα, ακόμη και ένας κοινός μετατροπέας ισχύος του εμπορίου μπορεί να ελέγχει την ροή ηλεκτρικής ισχύος προς μια η περισσότερα «φορτία» και μάλιστα με ολοένα αυξανόμενη (υψηλότερη) συχνότητα μεταγωγής για να ικανοποιήσει ολοένα αυξανόμενες προδιαγραφές επίδοσης και απόδοσης (performance and efficiency). Αυτό οδηγεί σε αυξημένη πολυπλοκότητα που σχετίζεται με τον Ελεγκτή (πλακέτα ελέγχου), όπου συνήθως είναι εγκατεστημένα και τα δύο συνδυασμένα  $\mu\text{C}$  (ή  $\mu\text{P}$ , DSP) και FPGA μαζί με το αντίστοιχο λογισμικό. Αυτοί οι τρεις «παράγοντες» (**Ηλεκτρονικά Ισχύος + Αλγόριθμοι Ελέγχου/Software + Υλικό/Hardware**) απαιτούν μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση προγραμματισμού και εργαλεία ανάπτυξης από αυτά που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά. Ιδιαίτερως η ανάπτυξη και επαλήθευση αλγορίθμων ελέγχου (development and verification of control algorithms) θεωρείται «χρονοβόρα» εργασία σε ένα ερευνητικό ή βιομηχανικό έργο. Το IDE (Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης), που συνήθως παρέχεται από κατασκευαστές πλατφορμών ελέγχου ή τρίτα μέρη, κινείται συνεχώς από την κλασική, παλιά (βασισμένη σε κείμενο) προσέγγιση σε μια νέα, γρήγορη και απλή στη μάθηση γραφική μέθοδο προγραμματισμού. Επιπλέον, συνήθως απαιτείται υψηλό επίπεδο αφάιρεσης (abstraction) προκειμένου να επιταχυνθεί ο χρόνος μάθησης ακόμη και σε μη ειδικούς εργαζόμενους. Καινούργια εργαλεία λογισμικού (όπως η συν-προσομοίωση/cosimulation) βασισμένη σε Υλικό FPGA και DSP καθώς και τεχνικές επαλήθευσης «hardware-in-the-loop» χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο με αποτέλεσμα θεματική αύξηση της γκάμας των εφαρμογών. Συμπερασματικά πιστεύουμε πώς το αντικείμενο της Πτυχιακής μας είναι ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον πεδίο δράσης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (AC και DC)**

### **1. Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιδιότητα, η οποία χαρακτηρίζει τη δομή του συστήματος περισσότερο από κάθε άλλη είναι το μέγεθος του συστήματος. Η δομή και η σύνθεση του συστήματος εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το μέγεθος του. Οποσδήποτε όμως ακόμη και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο πολύπλοκο.

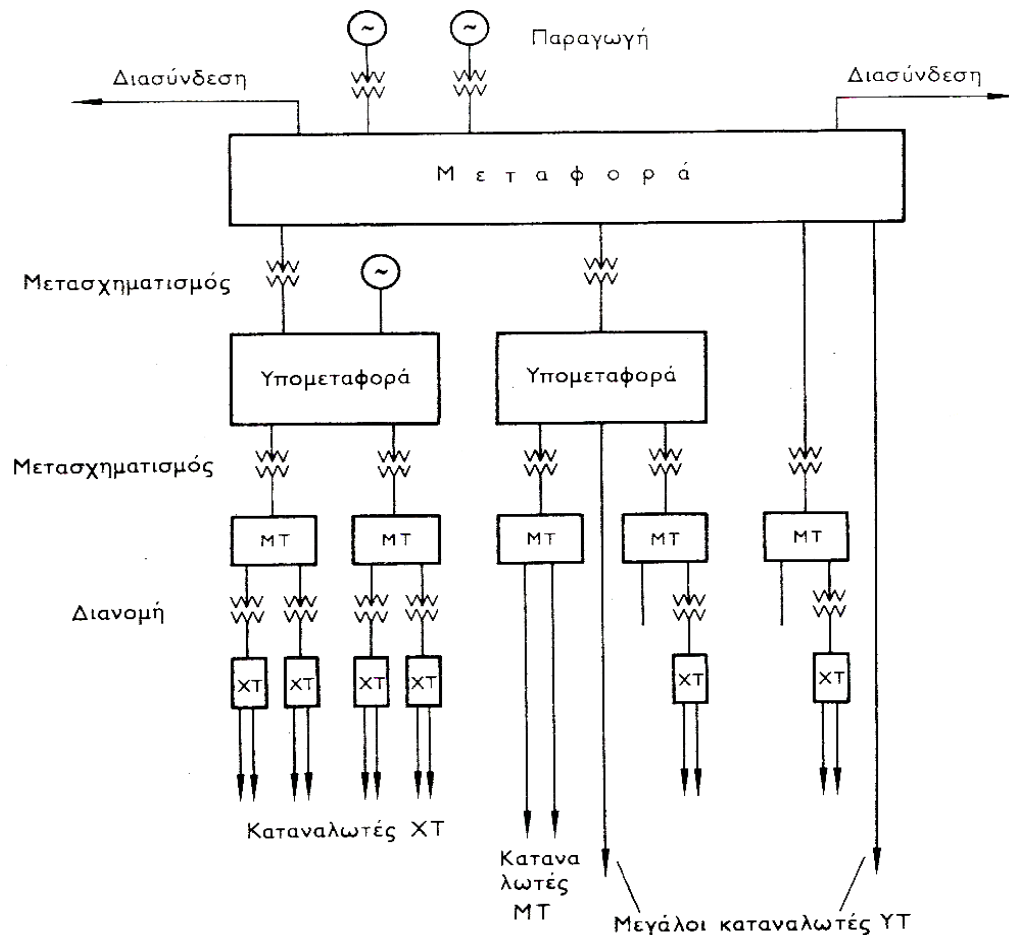
Δεδομένου ότι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατόν να διακριθούν τα εξής ειδικότερα συστήματα: το «Σύστημα Παραγωγής», το «Σύστημα Διασυνδέσεως και Μεταφοράς» και το «Σύστημα Διανομής». Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση. Το Σύστημα Μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Με το σύστημα μεταφοράς, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές καταναλώσεως. Το Σύστημα Διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσεως – μερικές φορές όμως και υψηλής τάσεως – στα οποία δίκτυα υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου, και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης κι χαμηλής τάσης.

Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή

διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Η διασύνδεση γίνεται συνήθως σε επίπεδο εθνικών συστημάτων, και προσφέρει ορισμένα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του κάθε συστήματος.

Η βασική δομή του συστήματος παριστάνεται στο σχήμα 1.1.α.

**Σχήμα 1.1.α.: Βασική δομή ενός ΣΗΕ**



Οι βασικές δομές αυτού του Συστήματος διατηρούνται μέχρι σήμερα, παρά τις σημαντικές αλλαγές που έχουν συμβεί τα τελευταία χρόνια και μέρος αυτής της αλλαγής αποτελούν τα μικροδίκτυα που αναφέρομαι πιο αναλυτικά παρακάτω. Ο προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια εξυπηρετούμενη περιοχή κατανάλωσης. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί, να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις [1.1]:

- Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οποudήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η ζήτηση ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο, και το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.
- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας.

Τρεις βασικοί παράγοντες που συνιστούν την ποιότητα αυτή είναι:

1. Σταθερή συχνότητα
2. Σταθερή τάση
3. Υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης
  - Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

## **2. Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού δικτύου**

Τρία γενικά, αλλά βασικά, χαρακτηριστικά σχεδιάσεως και αναφοράς ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι η Τάση, η Ισχύς Βραχυκυκλώσεως και η Στάθμη Μονώσεως αυτού. Τάση του δικτύου είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών. Ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος μέσα σε αυτό.

Η στάθμη μονώσεως του δικτύου αναφέρεται συνήθως στην τιμή της κρουστικής αντοχής αυτού, δηλαδή της διηλεκτρικής αντοχής της μονώσεως του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις τυποποιημένης μορφής.

## **3. Φορτία**

Γενικά, ο όρος φορτίο θα αναφέρεται σε μία συσκευή ή συγκρότημα συσκευών που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα. Στην πραγματικότητα οι συσκευές των φορτίων ποικίλουν από μία λάμπα φωτισμού νυκτός λίγων watt ως ένα κινητήρα επαγωγικό πολλών MW. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κατάλληλα σχεδιασμένο μπορεί να παρέχει ενέργεια σε όλα αυτά τα διάφορα φορτία. Τα διάφορα φορτία μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες :

1. Κινητήρες (πάσης φύσεως και τύπου)
2. Συσκευές θερμάνσεως
3. Ηλεκτρικές συσκευές
4. Φωτιστικά σώματα

Από ηλεκτρική άποψη υπάρχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ των διαφόρων φορτίων σε ότι αφορά το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικό ή τριφασικό), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και την τάση), και την περίοδο λειτουργίας (συστηματική ή τυχαία λειτουργία).

#### **4. Κανονικές/Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας**

Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι καλή και ασφαλής, οι δύο δε αυτές έννοιες χαρακτηρίζουν τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Ο όρος καλή λειτουργία αφορά περισσότερο τους καταναλωτές, ο δε όρος ασφαλής το σύστημα. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από το ηλεκτρικό σύστημα στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση, της οποίας η τιμή πρέπει να τηρείται μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια. Τα παραδεκτά όρια διακυμάνσεως της παρεχόμενης τάσης στην περιοχή του καταναλωτή είναι  $\pm 5\%$  επί της ονομαστικής τιμής της τάσεως, δηλαδή προκειμένου για XT επί των 230V. Ως καλή λειτουργία του δικτύου, θεωρείται εκείνη κατά την οποία η παροχή προς τους καταναλωτές είναι απρόσκοπτη και η τάση τροφοδοτήσεως τηρείται μέσα στα συμβατικά όρια. Κατά τη λειτουργία του συστήματος οι εγκαταστάσεις του υφίστανται διηλεκτρικές, θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις. Η ασφαλής λειτουργία απαιτεί, να μπορούν οι εγκαταστάσεις και ο εξοπλισμός του όλου συστήματος να υφίστανται ακίνδυνα τις ανωτέρω λειτουργικές καταπονήσεις, και οι τελευταίες να τηρούνται μέσα στα προκαθορισμένα για την ασφάλεια του δικτύου όρια.

#### **5. Ροή Ισχύος και Ενέργειας**

Η ισχύς αποτελεί βασικό μέτρο, το οποίο είναι φυσικό σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να χαρακτηρίζει το μέγεθος και την ικανότητα, τόσο του συστήματος ολόκληρου, όσο και κάθε στοιχείου της εγκαταστάσεως αυτού, όπως επίσης και του καταναλωτή. Η ηλεκτρική ισχύς ισούται γενικώς με το γινόμενο της τάσεως και του ρεύματος. Ενώ όμως στο συνεχές ρεύμα η ισχύς είναι μια και σχετίζεται με την ωμική αντίσταση του κυκλώματος, η ύπαρξη αυτεπαγωγών και χωρητικοτήτων σε ένα ηλεκτρικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργεί δύο μορφές ισχύος, την ενεργό ή πραγματική ισχύ και την άεργο ισχύ ή ισχύ αντιδράσεως.

#### **6. Αλληλεπίδραση Φορτίου – Συχνότητας και ο Αυτόματος Έλεγχος της.**

Τα όρια διακυμάνσεως της συχνότητας πρέπει να είναι πολύ στενά, για διάφορους ειδικούς λόγους, όπως είναι η σημασία της σταθερής ταχύτητας των κινητήρων και των ωρολογιακών μηχανισμών, καθώς και για γενικότερους λόγους όπως ο έλεγχος της όλης λειτουργίας του συστήματος. Ο τελευταίος λόγος είναι και ο σοβαρότερος όλων. Ασυνήθιστες αποκλίσεις της συχνότητας δείχνουν ότι κάποια ανωμαλία συμβαίνει στο σύστημα. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η σταθερότητα της συχνότητας διατηρείται υπό κανονικές συνθήκες μέσα σε 0,05 Hz με την βοήθεια Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου.

#### **7. Ευστάθεια Λειτουργίας Συστήματος**

Συναφής με την ισορροπία φορτίου – συχνότητας είναι η έννοια της ευστάθειας του συστήματος. Η ευστάθεια είναι μία βασική ιδιότητα, η οποία πρέπει να διέπει τη λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής και μεταφοράς και η οποία αποκτά τόσο μεγαλύτερη σπουδαιότητα, όσο πιο εκτεταμένο είναι το σύστημα, ή όσες περισσότερες διασυνδέσεις με γειτονικά συστήματα έχει. Το σύστημα χαρακτηρίζεται σαν ευσταθές, όταν, υφιστάμενο, ενώ λειτουργεί σε ορισμένη μόνιμη κατάσταση, μία διαταραχή από οποιαδήποτε αιτία τείνει να επανέλθει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, είτε την αρχική, είτε άλλη. Αντίθετα, εάν αυτό τείνει να μην επανέλθει πλέον σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας χαρακτηρίζεται σαν ασταθές. Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται η συνήθης κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, κατά την οποία αυτό εκτελεί τον προορισμό του, δηλαδή παράγει, μεταφέρει και διανέμει σε κάθε στιγμή τη ζητούμενη κατά την ίδια στιγμή από την κατανάλωση ισχύ.

#### **8. Ανωμαλίες (Faults) λειτουργίας του συστήματος**

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος δημιουργούνται πολλές φορές ανώμαλες συνθήκες, οφειλόμενες είτε σε βλάβες αυτού, είτε σε εξωτερικά τυχαία αίτια, ή σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις.

Οι ανώμαλες συνθήκες αποτελούν μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος – σε αντίθεση με την κανονική ή μόνιμη κατάσταση – κατά τις οποίες στο σύστημα εκδηλώνονται μεταβατικά φαινόμενα ταχείας ή βραδείας εξελίξεως, αναλόγως της περιπτώσεως. Κατά τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα δημιουργούνται

ταλαντώσεις τάσεων και εντάσεων στο σύστημα, κατά τις οποίες τα μεγέθη αυτά είναι δυνατόν να αποκτήσουν τιμές επικίνδυνες για την ασφάλεια του συστήματος.

Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν τις συνηθέστερες ανωμαλίες ενός ηλεκτρικού δικτύου και οφείλονται είτε σε βλάβες των εγκαταστάσεων, ή του εξοπλισμού αυτού, ή σε επιδράσεις εξωτερικών αιτιών, κυρίως ατμοσφαιρικών.

Όπως τα βραχυκυκλώματα αποτελούν ανώμαλες υπερεντάσεις οι οποίες καταπονούν θερμικά και δυναμικά τους αγωγούς των δικτύων, οι υπερτάσεις αποτελούν ανώμαλες τάσεις, πολλαπλάσιου μεγέθους των τάσεων λειτουργίας, οι οποίες αντίστοιχα καταπονούν διηλεκτρικά τις μονώσεις αυτών. Αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως προελεύσεως, τις ατμοσφαιρικές ή εξωτερικές και τις λειτουργικές ή εσωτερικές υπερτάσεις.



## **9. Σύστημα και μέσα προστασίας**

Το σύστημα προστασίας ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι το βασικότερο από τα βοηθητικά συστήματα, με τα οποία είναι εφοδιασμένο το δίκτυο και αποσκοπεί στην προστασία του από τις ανώμαλες καταστάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του και κυρίως από τα βραχυκυκλώματα.

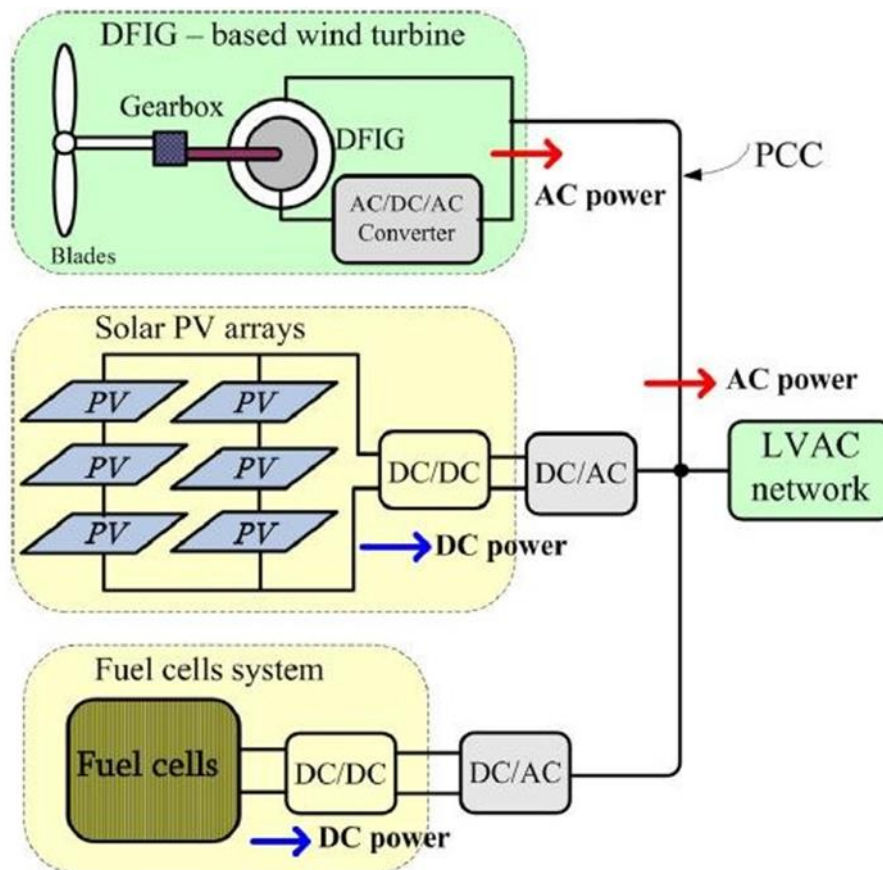
Κατηγορίες και είδη προστασιών έναντι βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν πολλά, από τα οποία αναφέρονται τα βασικότερα: Προστασία αποστάσεως (γραμμές μεταφοράς), Προστασία υπερεντάσεως (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές διανομής ΜΤ, κ.α.), Διαφορική προστασία (μετασχηματιστές, καλώδια, γεννήτριες, ζυγοί), Προστασία συγκρίσεως φάσεων (γραμμές μεταφοράς), Προστασία Buch – holtz (μετασχηματιστές, κ.α.), Προστασία υπερθερμάνσεως (μετασχηματιστές, κ.α.).

Τα κύρια όργανα προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι ή ρελαί, οι διακόπτες ισχύος ή αυτόματοι διακόπτες και οι ασφάλειες. Βασικοί τύποι διακοπών ισχύος υψηλής τάσεως είναι οι διακόπτες: ελαίου, πεπιεσμένου αέρος και εξαφθοριούχου θείου. Επίσης, ένα μέσο προστασίας του δικτύου από τις υπερτάσεις είναι το αλεξικέραυνο.

## **10. Μικροδίκτυα AC**

### **10.1. Ορισμός AC μικροδικτύου**

Σε ένα AC μικροδίκτυο, όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού με AC τάση εξόδου συνδέονται απευθείας με την AC γραμμή ή ενδεχομένως χρειάζονται μετατροπείς AC/DC/AC προκειμένου να συζευχθούν σταθερά με τα AC δίκτυα χαμηλής τάσης. Παραδείγματα μονάδων ΔΠ, οι οποίες παράγουν εναλλασσόμενη τάση εξόδου είναι οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά υδροηλεκτρικά, το βιοαέριο, τα παλιρροϊκά και οι κυματοτουρμπίνες. Σε αυτήν την περίπτωση, το μικροδίκτυο AC μπορεί να συνδεθεί με το κυρίως δίκτυο δια μέσου ενός μετασχηματιστή ισχύος. Επιπροσθέτως, τα AC φορτία είναι απευθείας συνδεδεμένα, ενώ τα DC φορτία χρειάζονται τους AC/DC μετατροπείς για να συνδεθούν στα μικροδίκτυα AC. Από την άλλη μεριά, οι μονάδες ΔΠ, οι οποίες παράγουν DC τάση στην έξοδό τους (για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά, οι κυψέλες καυσίμου και οι συσκευές αποθήκευσης ενέργειας) μπορούν να συνδεθούν στην AC γραμμή ενός AC μικροδικτύου μέσω μετατροπέων DC/AC. Η σχήμα 1.2 δείχνει την τυπική συνδεσμολογία ενός AC μικροδικτύου [4].



## 10.2. Πλεονεκτήματα των AC μικροδικτύων

- Plug-in προσέγγιση για όλες τις πηγές διεσπαρμένης παραγωγής.
- Πολύ ανεπτυγμένη διασύνδεση, στάνταρ και κώδικες.
- Υπάρχει ήδη εξοικείωση με το σχεδιασμό AC συστημάτων χαμηλής τάσης.
- Μετασχηματισμός της τάσης: Η AC τάση είναι εύκολο να αυξηθεί και να μειωθεί μέσω της χρήσης μετασχηματιστών. Από την άλλη πλευρά, η μετατροπή της DC τάσης γίνεται μέσω μετατροπέων DC-DC, των οποίων η υλοποίηση είναι πιο σύνθετη.
- Προστασία: Η προστασία των κυκλωμάτων AC βρίσκεται σε πιο ώριμο στάδιο σε σχέση με την αντίστοιχη για τα κυκλώματα DC, για τα οποία είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση περαιτέρω έρευνας [6].

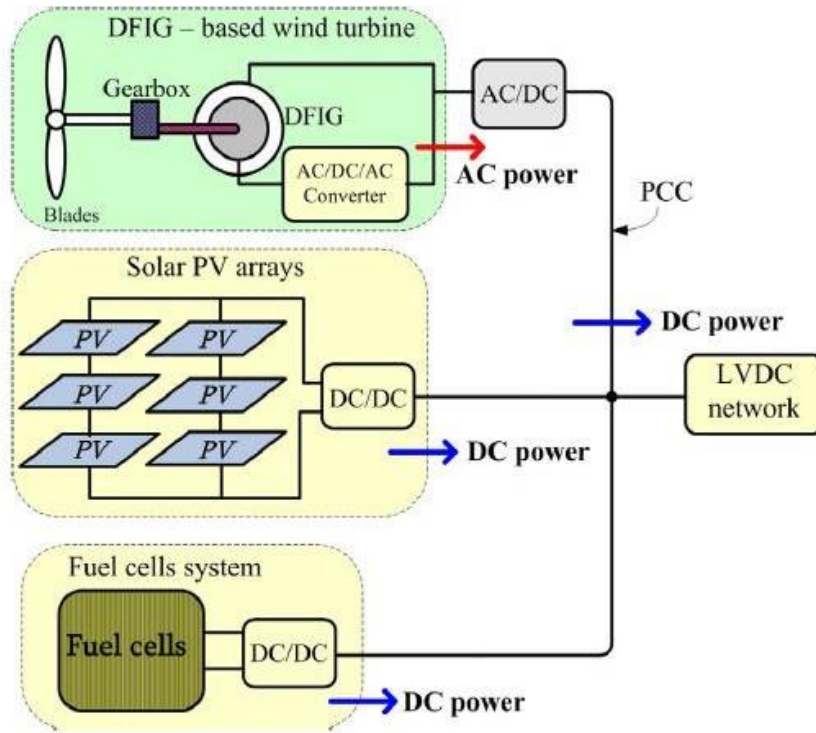
## 10.3. Προκλήσεις που αντιμετωπίζονται όταν πρόκειται για AC μικροδίκτυα

- Αυξημένες απαιτήσεις για μετατροπή από το AC στο DC και πίσω στο AC.
- Ενεργειακές απώλειες κατά τη διαδικασία των μετατροπών.
- Απαιτούνται περισσότερες συσκευές και εξοπλισμός.

## 11. Μικροδίκτυα DC

### 11.1. Ορισμός μικροδικτύου DC

Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες ΔΠ που παράγουν DC έξοδο συνδέονται απευθείας με τον DC ζυγό, ενώ εκείνες που παράγουν AC έξοδο συνδέονται μέσω μετατροπέων, όπως φαίνεται στην σχήμα 1.3 [4].



### 11.2. Διανομή LVDC (χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος)

Ιστορικά, τα πρώτα δίκτυα διανομής είχαν σχεδιαστεί ως συστήματα συνεχούς ρεύματος και μετατράπηκαν σε συστήματα εναλλασσομένου ρεύματος, λόγω των πλεονεκτημάτων του δευτέρου. Στη σύγχρονη εποχή, χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, το DC χρησιμοποιείται ευρέως, κυρίως στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους (HVDC). Η χρήση HVDC συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος, καλύτερη ροή ισχύος και μικρότερες απώλειες όταν πρόκειται να μεταφερθεί ισχύς σε μεγάλες αποστάσεις (>600km). Η HVDC χρησιμοποιείται προκειμένου να συνδεθούν μεταξύ τους δύο μεγάλα AC συστήματα διαφορετικών συχνοτήτων. Στο επίπεδο της διανομής τα DC συστήματα δεν χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα, και η εφαρμογή τους περιορίζεται σε ορισμένες εφαρμογές : σε επικουρικές εγκαταστάσεις μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμών, σε συστήματα ηλεκτροκίνησης λόγω της ευρείας χρήσης κινητήρων

DC (σιδηρόδρομος και μετρό), στα αεροσκάφη και στα ηλεκτροκίνητα πλοία καθώς επίσης και σε κέντρα επικοινωνιών και κέντρα δεδομένων (datacenters) [7].

Στην διανομή LVDC (διανομή χαμηλής τάσης συνεχούς ρεύματος), η μέση τάση του AC δικτύου μέσης τάσης μετατρέπεται, μέσω ενός μετασχηματιστή, σε χαμηλή τάση AC, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε DC τάση μέσω ανορθωτών. Η τάση αυτή μετατρέπεται εκ νέου σε AC (ή μετασχηματίζεται σε DC τάση διαφορετικού επιπέδου) κοντά στον καταναλωτή.

Ο στόχος του LVDC δικτύου είναι να αυξήσει την αποτελεσματικότητα του δικτύου χαμηλής τάσης. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος του δικτύου χαμηλής τάσης θα πρέπει να αυξηθεί με την μετατροπή του σε σύστημα DC, διότι οι απώλειες στα DC καλώδια είναι χαμηλότερες, λόγω της χρησιμοποίησης ενός υψηλότερου επιπέδου τάσεως. Επιπλέον, όλη η μεταφερόμενη ισχύς είναι ενεργός ισχύς, άρα περισσότερη ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια καλώδια. Συνεπώς, η έκταση και η πολυπλοκότητα του δικτύου μέσης τάσης μπορούν να μειωθούν, χάρη στην υψηλή ικανότητα μεταφοράς ισχύος και του χαμηλότερου κόστους του υλικού και της κατασκευής του δικτύου χαμηλής τάσης.

Ο στόχος του LVDC δικτύου είναι να εξασφαλίσει υψηλότερη ποιότητα ισχύος σε σχέση με το τρέχον AC δίκτυο διανομής. Το DC σύστημα κάνει δυνατή την αντιστάθμιση βυθίσεων τάσης και μικρών διακοπών του δικτύου μέσης τάσης, χωρίς επιπτώσεις στην τάση των καταναλωτών. Σήμερα, περισσότερες από το 90% των διακοπών τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας που βιώνουν οι καταναλωτές οφείλονται σε σφάλματα του δικτύου μέσης τάσης. Αν ένα blackout συμβεί στο δίκτυο μέσης τάσης, μια λειτουργία νησιδοποίησης θα είναι δυνατή στο LVDC δίκτυο στην περίπτωση που διεσπαρμένη παραγωγή και συσκευές αποθήκευσης είναι συνδεδεμένες σε αυτό, οπότε το LVDC σύστημα διανομής έχει χαρακτηριστικά ενός UPS, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, αυξάνει η αξιοπιστία του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης σχηματίζει τη δική του περιοχή προστασίας. Το κόστος διακοπής των εταιριών που διαχειρίζονται το δίκτυο θα μειωνόταν, αν το LVDC δίκτυο χρησιμοποιούταν [8].

Τα LVDC συστήματα θα μπορούσαν να παρέχουν πιο ευφυή παρακολούθηση και ελέγχους και καλύτερη παραγωγή και χρήση της ενέργειας. Τα συστήματα αυτά

μπορούν να υποστηρίξουν την αυξημένη διείσδυση διεσπαρμένων ανανεώσιμων, ηλεκτρικών αυτοκινήτων, αντλιών θερμότητας και να διευκολύνουν περισσότερο τη σύνδεση του εκρηκτικού αριθμού συσκευών που λειτουργούν με DC ρεύμα. Αυτό με τη σειρά του θα βοηθήσει να μειωθούν περαιτέρω οι εκπομπές CO<sub>2</sub>.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των LVDC μικροδικτύων εισάγει καινούργιες συνιστώσες, οι οποίες μπορούν να κάνουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πιο σύνθετο. Μία νέα, σύνθετη διάταξη θα ανακύψει, η οποία θα συνδυάζει DC και AC. Μία τέτοια αλλαγή παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις για τη λειτουργία και την προστασία του δικτύου, και μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν περιεκτικά στάνταρ σχετικά με τη βέλτιστη συνδεσμολόγηση, λειτουργία και προστασία των LVDC δικτύων. Προκειμένου τα LVDC συστήματα να καταστούν τεχνικώς εφικτά και να αξιολογηθεί η συμβατότητά τους με τα υπάρχοντα δίκτυα AC, είναι αναγκαία η κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Για παράδειγμα, σε μια διαταραχή, καθώς το σύστημα γίνεται πιο σύνθετο, νέοι τύποι σφαλμάτων θα παρουσιαστούν και αναμένονται διαφορετικές αποκρίσεις από το σύστημα [7].

### **11.3. Αιτίες για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων**

Γενικά, οι λόγοι για την ανάπτυξη των DC μικροδικτύων έχουν να κάνουν με τα πλεονεκτήματα που αυτά παρουσιάζουν σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής, καθώς επίσης και με τις σύγχρονες τάσεις στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, οι λόγοι αυτοί είναι οι εξής [8]:

- 1 Λόγω της αύξησης της ζήτησης, το υπάρχον σύστημα διανομής βρίσκεται κοντά στο σημείο στο οποίο αυτό δεν θα μπορεί πλέον να ανταποκριθεί στη ζήτηση αυτή. Συνεπώς, είναι επιθυμητές, η αύξηση της ποιότητας ισχύος (quality of power) και της απόδοσης (efficiency) του συστήματος.
- 2 Με τη χρήση τους, είναι δυνατή η αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος από το δίκτυο διανομής διότι:
  - Η χρήση συνεχούς τάσης καθιστά δυνατή την επιλογή ενός μεγαλύτερου, σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα AC επιπέδου τάσης.
  - Όλη η μεταφερόμενη ισχύς είναι ενεργός, έτσι περισσότερη ισχύς μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια καλώδια. [protecting the last mile] Στα DC συστήματα οι

αυτεπαγωγές και αλληλεπαγωγές δεν έχουν καμμία επίδραση κατά την κανονική λειτουργία και έτσι η άεργος συνιστώσα του ρεύματος, η οποία αυξάνει το πλάτος του ρεύματος καταλήγοντας σε μεγαλύτερες απώλειες δεν υφίσταται.

Επιπλέον, το επιδερμικό φαινόμενο, το οποίο προκαλείται από αντιτιθέμενα ρεύματα περιδίνησης, τα οποία επάγονται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα AC ρεύματα, φαινόμενο το οποίο αυξάνει την αντίσταση των καλωδίων στα AC δίκτυα δεν έχει υφίσταται όταν γίνεται χρήση DC μεγεθών. Σύμφωνα με το IEC 60228, οι αντιστάσεις, DC και AC, για το ίδιο καλώδιο δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις, η μεν αντίσταση DC από την:

Όπου είναι η DC αντίσταση του αγωγού σε κάποια λειτουργική κατάσταση, είναι η αντίσταση του αγωγού στους 20°C, είναι το μήκος του καλωδίου, είναι η θερμοκρασία λειτουργίας και είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας-αντίστασης, ο οποίος είναι 0.00393 για τον χαλκό και 0.00403 για το αλουμίνιο.

Η AC αντίσταση δίνεται από την:

Όπου είναι η AC αντίσταση του αγωγού σε μία κατάσταση λειτουργίας, είναι ο συντελεστής του επιδερμικού φαινομένου και είναι ο συντελεστής του proximity effect. Από τις σχέσεις αυτές, φαίνεται ευκρινώς ότι η AC αντίσταση είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την αντίστοιχη DC λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Με τα ίδια καλώδια και την ίδια πτώση τάσης, ένα μονοπολικό 1.5kV LVDC σύστημα μπορεί να μεταφέρει μέχρι 16, ενώ ένα διπολικό  $\pm 0.75$ kV LVDC σύστημα μέχρι 28 φορές περισσότερη ισχύ από ένα 0.4kV AC σύστημα [7].

1. Τα LVDC συστήματα δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μικρότερα καλώδια με χαμηλότερα κόστη, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής και της μεταφοράς ενέργειας. Η διατομή των καλωδίων είναι δυνατόν να μειωθεί κατά περίπου 20% σε κάθε αγωγό όταν το καλώδιο χρησιμοποιείται για να παράσχει ισχύ από ένα DC δίκτυο, αντί από ένα AC. Επίσης, ο αριθμός των αγωγών κάθε καλωδίου DC αναμένεται να είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο σε AC. Η ισχύς θα

μεταφέρεται από δύο αγωγούς για μονοπολικό σύστημα DC και από τρεις για διπολικό σύστημα DC, αντί για τέσσερις ή πέντε αγωγούς που χρησιμοποιούνται στο χαμηλής τάσης AC (low-voltage AC, LVAC). Συνεπώς, η ίδια ικανότητα ισχύος μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλότερη επένδυση σε υλικά καλωδίων σε σύγκριση με τα AC δίκτυα [7].

2. Είναι δυνατή η μείωση της έκτασης του δικτύου μέσης τάσης, αφού το δίκτυο χαμηλής τάσης θα είναι ικανό για τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας ισχύος.
3. Καθιστούν ευκολότερη τη σύνδεση διεσπαρμένων παραγωγών και αποθηκευτικών μέσων ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα χαμηλής τάσης. Οι περισσότερες συσκευές μικροπαραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά, και αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες και οι υπερπυκνωτές παράγουν DC εξόδους ή απαιτούν ένα ενδιάμεσο στάδιο DC. Αυτές οι οικολογικές πηγές ενέργειας μπορούν να συνδεθούν μέσω μετατροπέων DC/DC ή απευθείας στο LVDC δίκτυο, αποφεύγοντας την ενεργειακή απώλεια (η οποία είναι τυπικά 7-15% για την μετατροπή από DC σε AC) εξαιτίας της μετατροπής σε AC. Για παράδειγμα, η σύνδεση μικροπαραγωγής μεταβλητών στροφών, όπως ανεμογεννήτριες και τουρμπίνες μικροκαυσίμου σε ένα LVDC δίκτυο θα μειώσει τα στάδια μετατροπής κατά ένα. Επίσης, η σύνδεση πολλαπλών πηγών εν παραλλήλω είναι ευκολότερη στα DC παρά στα AC συστήματα, διότι δεν απαιτείται συγχρονισμός συχνότητας προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση [7].
4. Επιπλέον, ένα LVDC δίκτυο είναι πιο κατάλληλο για τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών που καταναλώνουν DC. Τα οικιακά ηλεκτρονικά φορτία, τα οποία εσωτερικά τροφοδοτούνται από DC κυριαρχούν σήμερα περισσότερο από τα AC φορτία. Ηλεκτρονικά φορτία όπως υπολογιστές, λαμπτήρες φθορισμού, τηλεοράσεις και άλλα, χρησιμοποιούν ανορθωτές γέφυρας για να παραλάβουν DC από το AC. Η μετατροπή από το AC στο DC εισάγει αρμονικές οι οποίες δημιουργούν θέματα ποιότητας ισχύος. Επίσης, η ανάγκη χρησιμοποίησης μεγάλου αριθμού μετατροπέων για τη μετατροπή των 230V AC σε χαμηλότερες τάσεις και μετά σε DC, καθώς επίσης και η ανάγκη για διόρθωση του συντέλεστή ισχύος μπορούν να αφαιρεθούν, μειώνοντας τις απώλειες και εξοικονομώντας κόστος. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για τους αντάπτορες του καταναλωτικού ηλεκτρονικού εξοπλισμού μπορούν να προκαλέσουν υπολογίσιμες απώλειες κατά την

αναμονή (stand-by) των συσκευών. Διαφορετικές ηλεκτρονικές συσκευές θα έχουν διαφορετικές απώλειες, αλλά γενικά η ποσότητα της ισχύος που χάνεται κατά τις μετατροπές είναι 10-25%, και περίπου η ίδια ποσότητα ισχύος χάνεται όταν οι μετατροπές είναι σε αναμονή (stand-by). Σύμφωνα με την International Energy Agency (IEA), η συνολική κατανάλωση του οικιακού ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε αναμονή στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκτιμηθεί ότι είναι μεγαλύτερη από 36 TW το χρόνο [7].

## 12. Δίκτυα συνεχούς ρεύματος

Λόγω της αυξανόμενης παρουσίας των ηλεκτρικών κινητήρων και των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος ένα μεγάλο μέρος της παράγωγης της ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να μετατραπεί από AC σε DC για τελική χρήση. Τα δίκτυα συνεχούς ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή σε μικροδίκτυα και σε έξυπνα δίκτυα, σε ηλεκτρονικά συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και σε υπερδίκτυα τα οποία είναι ειδικά για την ενσωμάτωση των ηπειρωτικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πλεονεκτήματα του συνεχούς ρεύματος [1.3]:

- Οι χρήστες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εργάζονται ως επί το πλείστον σε DC.
- Μικρότερες απώλειες κατά τη μεταφορά στις υψηλές ισχείς (καλώδια HVDC).
- Λιγότερες μετατροπές σε υψηλότερες συχνότητες.
- Δυνατόν να μεταφέρει περισσότερη ισχύ πάνω από ένα καλώδιο ή γραμμή με την ίδια διατομή.
- Χωρίς άεργο ισχύ.
- Χωρίς πρόβλημα του συντελεστή ισχύος.
- Αξιόπιστη επικοινωνία των γραμμών ισχύος.
- Φορτία και εξαρτήματα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- Μηδενική ισχύ βραχυκύκλωσης.
- Μειωμένη χρήση των πρώτων υλών.

Μειονεκτήματα του συνεχούς ρεύματος [1.3]:



- Ασφάλεια (ακόμη) δεν είναι προτυποποιημένη.
- Η μηχανική αλλαγή είναι δύσκολη.
- Προτυποποίηση μόνο για HVDC και όχι για LVDC.
- Δεν είναι ευρέως γνωστό.

Λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο στο σύνολο του, μπορεί κανείς να δει ότι το συνεχές ρεύμα είναι ήδη παρόν όπως το HVDC στο δίκτυο μεταφοράς και ότι το LVDC στο δίκτυο διανομής θα εφαρμοστεί στο μέλλον. Επίσης στο παρόν ηλεκτρικό δίκτυο, η DC ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις και σε υψηλές τάσεις. Στο μέλλον αναμένεται ότι η χρήση του HVDC στο δίκτυο μεταφοράς θα αυξηθεί.

Το συνεχές ρεύμα επίσης παίζει σημαντικό ρόλο στο δίκτυο διανομής. Στο τρέχον δίκτυο διανομής υπάρχουν λίγες πηγές, αλλά στο δίκτυο διανομής του μέλλοντος μεγάλος αριθμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναμένεται να συνδεθεί στις αστικές περιοχές.

Τέλος, γνωρίζοντας ότι σχεδόν όλα τα φορτία δουλεύουν με DC τάση και ότι όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγουν DC ενέργεια (άμεσα ή έμμεσα) είναι λογικό να διανεμηθεί επίσης η ενέργεια μέσω ενός DC δικτύου διανομής για να αποφευχθούν οι AC/DC μετατροπές [1.3].

### **13. Εφαρμογές στα δίκτυα συνεχούς ρεύματος**

Τα συστήματα συνεχούς ρεύματος βρίσκουν εφαρμογή στα HVDC και στα LVDC συστήματα. Παρακάτω αναλύονται αυτά τα συστήματα καθώς επίσης και τα πεδία εφαρμογών αυτών των δύο συστημάτων.

### **14. Συστήματα High voltage direct current (HVDC)**

Η HVDC τεχνολογία έχει χαρακτηριστικά που την καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για ορισμένες εφαρμογές της μετάδοσης. Η HVDC μετάδοση είναι ευρέως αναγνωρισμένη ως η συμφέρουσα για την μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες

αποστάσεις, τις ασύγχρονες διασυνδέσεις, και για τις μακρές διασταυρώσεις υποβρύχιων καλωδίων. Ο αριθμός των HVDC έργων που έχουν παραδοθεί ή που είναι υπό εξέταση σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια δείχνοντας ανανεωμένο ενδιαφέρον στην ώριμη αυτή τεχνολογία [1.6].

Οι εφαρμογές της HVDC μετάδοσης μπορούν να χωριστούν σε διάφορες βασικές κατηγορίες. Αν και ο λόγος για την επιλογή των HVDC είναι συχνά οικονομικός, αλλά μπορεί να υπάρχουν και άλλοι λόγοι για την επιλογή του. Το HVDC σύστημα μπορεί να είναι ο μόνος εφικτός τρόπος για τη διασύνδεση των δύο ασύγχρονων δικτύων, την μείωση των ρευμάτων του σφάλματος, την χρησιμοποίηση μακρών κυκλωμάτων υπόγειων καλωδίων, την αντιμετώπιση της συμφόρησης του δικτύου, την κοινοποίηση της χρησιμότητας της διασύνδεσης χωρίς την υποβάθμιση της αξιοπιστίας, και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών ανησυχιών [1.6].

Τουλάχιστον οι ακόλουθες περιπτώσεις χρήσης μπορούν εύκολα να απαριθμηθούν για τα HVDC συστήματα [1.6]:

- Μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις

Τα HVDC συστήματα μετάδοσης συχνά παρέχουν μια πιο οικονομική εναλλακτική λύση σε σχέση με τις εναλλασσόμενες μεταδόσεις για την μετάδοση μεγάλων ποσοτήτων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις από απομακρυσμένες πηγές όπως υδροηλεκτρικές κατασκευές, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυχείο, ή αιολικά πάρκα μεγάλης κλίμακας. Μεταφορές μεγάλης ποσότητας ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις είναι δυνατόν να γίνονται με λιγότερες γραμμές χρησιμοποιώντας HVDC συστήματα μεταφοράς.

- Υπόγεια και υποβρύχια μετάδοση

Υπόγεια καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις κοινοποιημένες διασυνδέσεις με τα άλλα δίκτυα χωρίς να επηρεάζουν την αξιοπιστία στις χρήσεις των κοινών δικτύων. Στα υπόγεια ή υποθαλάσσια καλωδιακά συστήματα υπάρχει σημαντική εξοικονόμηση κόστους στις εγκαταστάσεις καλωδίων και στις απώλειες κατά την χρήση της HVDC συστημάτων μεταφοράς. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί, οι εξοικονομήσεις αυτές μπορούν να καλύψουν τα υψηλά κόστη των σταθμών μετατροπής σε αποστάσεις 40 χιλιομέτρων και άνω.

- Ασύγχρονα δίκτυα

Με τα HVDC συστήματα μετάδοσης, οι διασυνδέσεις μεταξύ ασύγχρονων δικτύων μπορούν να γίνουν πιο οικονομικές ή να γίνουν πιο αξιόπιστα συστήματα λειτουργίας. Η ασύγχρονη διασύνδεση επιτρέπει τις διασυνδέσεις του κοινού οφέλους παρέχοντας έναν μεσολαβητή μεταξύ των δύο συστημάτων. Αυτές οι διασυνδέσεις συχνά χρησιμοποιούν διαδοχικούς μετατροπείς χωρίς γραμμή μεταφοράς. Οι ασύγχρονες HVDC συνδέσεις ενεργούν ως ένα αποτελεσματικό «τείχος ασφαλείας» έναντι της διάδοσης των διακοπών με υπερχειλίση στο πέρασμα τους από το ένα δίκτυο σε ένα άλλο.

- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από υπεράκτιες εγκαταστάσεις

Αυτο-μεταγωγή, δυναμικός έλεγχος της τάσης και δυνατότητα επανεκκίνησης από ολική διακοπή επιτρέπουν τις συμπαγές VSC HVDC μεταφορές να λειτουργούν απομονωμένα φορτία σε νησιά ή υπεράκτιες πλατφόρμες παραγωγής πάνω σε μεγάλης απόστασης υπόγεια καλώδια. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να μειώσει την ανάγκη για ακριβές τοπικές γεννήτριες ή να παρέχει ένα μέσο εγγύσης για τις υπεράκτιες παραγωγές όπως για παράδειγμα από ανεμογεννήτριες. Οι VSCs μπορούν να λειτουργήσουν σε μεταβλητές συχνότητες για αποτελεσματικότερη κίνηση μεγάλου συμπιεστή ή αντλίων φορτίων οι οποίες χρησιμοποιούν κινητήρες υψηλής τάσης.

- Πολυτερματικά συστήματα

Τα περισσότερα HVDC συστήματα είναι για μετάδοση σημείου προς σημείο με ένα σταθμό μετατροπεία σε κάθε άκρο. Η χρήση των ενδιάμεσων σημείων συνδέσεων είναι σπάνιες. Η συμβατική HVDC μετάδοση χρησιμοποιεί την αντιστροφή πολικότητας της τάσης για να αντιστρέψει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αντιστροφή της πολικότητας δεν απαιτεί καμία ειδική διάταξη μεταγωγής για διτερματικό σύστημα όπου και οι δύο ακροδέκτες αντίστρεφουν την πολικότητα με δράση ελέγχου χωρίς την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ειδικές DC-πλευράς ρυθμιστές μεταγωγής απαιτούνται για την αναστροφή της πολικότητας σε ένα πολυτερματικό σύστημα, ωστόσο, όπου μπορεί να είναι επιθυμητό να αντιστραφεί η κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα σημείο σύνδεσης διατηρώντας παράλληλα την ίδια κατεύθυνση του ηλεκτρικού ρεύματος στα υπόλοιπα τερματικά. Για ένα διπολικό σύστημα αυτό μπορεί να γίνει με τη σύνδεση του μετατροπεία στον

αντίθετο πόλο. Η VSC HVDC μεταφορά, όμως, αντιστρέφει το ηλεκτρικό ρεύμα μέσα από την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ρεύματος παρά την πολικότητα της τάσης. Ως εκ τούτου, το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να αντιστραφεί σε ένα ενδιάμεσο σημείο σύνδεσης ανεξάρτητα από την κύρια κατεύθυνση της ροής του ρεύματος χωρίς την αντιστροφή της πολικότητας της τάσης.

- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αστικές περιοχές

Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τις μεγάλες πόλεις εξαρτάται από την τοπική παραγωγή και την ικανότητα εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η τοπική παραγωγή συνήθως είναι παλαιότερη και λιγότερο αποδοτική απ' ό,τι οι νεότερες μονάδες που βρίσκονται μακριά. Συχνά, όμως, οι παλιές και οι λιγότερο αποδοτικές μονάδες που βρίσκονται κοντά στο κέντρο της πόλης θα πρέπει να αποστέλλονται εκτός της παραγωγής επειδή πρέπει να χρησιμοποιούνται για παροχής τάσης ή αξιοπιστίας λόγω ανεπαρκούς μεταφοράς. Οι κανονισμοί της ποιότητας του αέρα μπορούν να περιορίσουν την διαθεσιμότητα των μονάδων αυτών. Οι νέες μεταδόσεις σε μεγάλες πόλεις είναι δύσκολο να τοποθετηθούν λόγω περιορισμών των διασυνδέσεων και τους περιορισμούς χρήσης της γης.

#### **15. Συστήματα Low voltage direct current (LVDC)**

LVDC είναι ένα θέμα το οποίο αναπτύσσει δίκτυα διανομής προς τα έξυπνα δίκτυα και δημιουργεί νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η LVDC διανομή είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση για την ανάπτυξη, τα οφέλη των οποίων είναι μεταφορά μεγάλης ποσότητας ισχύος με χαμηλή τάση και βελτίωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της ισχύος. Επιπλέον, παρέχει ένα εύκολο σημείο σύνδεσης για την διασπαρμένη παραγωγή και τους χώρους αποθήκευσης της ενέργειας [1.7].

Τα πολυχρηστικά LVDC συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί ή προτείνονται να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές. Τουλάχιστον οι ακόλουθες έξι περιπτώσεις χρήσης μπορούν εύκολα να απαριθμηθούν για τα συστήματα διανομής LVDC [1.8]:

- Στα δημόσια LVDC συστήματα

Το LVDC σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την τεχνική και την οικονομική απόδοση της διανομής της χαμηλής τάσης και να αυξήσει την συνολική ασφάλεια της τροφοδοσίας. Παραδείγματα δημόσιων εφαρμογών είναι οι εγκαταστάσεις του δικτύου της χαμηλής τάσης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα συστήματα του δημόσιου φωτισμού.

- Κέντρα δεδομένων και τηλεπικοινωνιών, σταθμοί πομποδεκτών

Το LVDC σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ενεργειακής και της οικονομικής απόδοσης των ηλεκτρικών συστημάτων προμηθεύοντας διακομιστές και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές τα οποία χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία και την αύξηση της αξιοπιστίας της μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

- Ηλεκτρικά οχήματα

Τα LVDC συστήματα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε κινητήρες και γίνονται γνωστά επίσης ως ηλεκτρικά οχήματα. Μπαταρίες και πολλοί άλλοι αποθηκευτικοί χώροι ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν με την DC τάση. Το συνεχές ρεύμα επίσης χρησιμοποιείται για την γρήγορη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα LVDC συστήματα με αποθηκευτικούς χώρους ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόζονται επίσης σε μικρά και μεσαία ηλεκτρισμένα με ντίζελ θαλάσσια σκάφη αντί για τα LVAC για τη βελτίωση της ποιότητας της ισχύος, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την μείωση του κόστους.

- Διασπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας είναι συχνά πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντί της μετατροπής πάντα του DC που παράγεται σε AC, οι πηγές συνεχούς ρεύματος θα μπορούν να συνδεθούν στα DC δίκτυα με συσκευές με DC φορτία. Μια άλλη πτυχή είναι να συνδεθούν μερικοί παράγωγοι μικρής κλίμακας σε AC δίκτυα μέσω της ίδιας DC γραμμής. Και οι δύο αυτές λύσεις παρέχουν επίσης φυσικά σημεία σύζευξης για τις μπαταρίες επιτρέποντας την αποδοτική συγκομιδή των μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, η χρήση των DC δικτύων μειώνει την ποσότητα των μετατροπών των ηλεκτρονικών ισχύος σε σύγκριση με το παρόμοιο AC σύστημα και συνεπώς αυξάνει την ενεργειακή απόδοση και μειώνει το κόστος.

- Βιομηχανικές εφαρμογές

Οι LVDC (και HVDC) γραμμές έχουν παραδοσιακά χρησιμοποιηθεί στον κλάδο της παραγωγής για τον εφοδιασμό των ηλεκτρικών κινητήρων. Η χρήση του συνεχούς ρεύματος μπορεί εύκολα να επεκταθεί, για παράδειγμα, στο φωτισμό των διαδρόμων και την γραμμή παραγωγής.

- Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των κτηρίων

Οι περισσότερες από τις σύγχρονες συσκευές τελικής χρήσης των μονοκατοικιών, των πολυκατοικιών, των εμπορικών κτηρίων και των γραφείων χρησιμοποιούν εσωτερικά συνεχές ρεύμα. Απώλειες στις εσωτερικές μετατροπές μπορούν να μειωθούν εάν οι συσκευές τροφοδοτούνται απευθείας με κατάλληλες DC τάσεις. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και η μείωση του κόστους προβλέπονται ως αποτέλεσμα των LVDC συστημάτων, ειδικά όταν συνδυάζονται με τη use-case 4 (Use-case: είναι μια μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των συστημάτων για την αναγνώριση, την διευκρίνιση, και την οργάνωση των απαιτήσεων του συστήματος [1.10]).

#### **16. Ροή ισχύος σε DC δίκτυα**

Η ανάλυση ροών ισχύος συνίσταται στον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τις καταναλώσεις των φορτίων, την παραγωγή ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών. Οι μελέτες ροών ισχύος είναι απαραίτητες για διάφορους λόγους, μερικοί από τους οποίους αναφέρονται παρακάτω [1.2]:

- Για τον έλεγχο των τάσεων και ροών ισχύος, ώστε να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας.
- Για τη μελέτη των επιπτώσεων των ενδεχόμενων διαταραχών.
- Για την επιλογή της πλέον οικονομικής λειτουργίας των γεννητριών του συστήματος. Επειδή στη διάρκεια κάθε ημέρας τα φορτία μεταβάλλονται συνεχώς, απαιτείται συχνά ο εκ νέου υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος κάθε γεννήτριας, ώστε τα φορτία να τροφοδοτούνται με τον πιο οικονομικό τρόπο.

- Για μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανάλυση των ροών ισχύος είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις επιμέρους μελέτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. M. Rashid, «Ηλεκτρονικά Ισχύος. Κυκλώματα, εξαρτήματα & εφαρμογές», Εκδόσεις ΙΩΝ, 2010
2. Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, 2014
3. N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, “Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος. Ανάλυση, σχεδίαση και εφαρμογές των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος», Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2010
4. K. H. Sueker, “Power Electronics Design: A practitioner’s Guide”, Elsevier, 2005
5. N. Mohan, “First Courses on Power Electronics and Drives”, MNPERE, 2003
6. A. I. Maswood, “The Power Diode” στο “Power Electronics Handbook” (M. H. Rashid ed, 3rd edition), Butterworth-Heinemann, 2010
7. M. G. Simoes, “Power Bipolar Transistors” στο “Power Electronics Handbook” (M. H. Rashid ed, 3rd edition), Butterworth-Heinemann, 2010
8. V. Subrahmanyam, “Thyristor Control of Electric Drives”, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1988
9. P. C. Sen, “Thyristor DC Drives”, Wiley, 1981
10. W. Mack Grady, Robert J. Gilleskie, “Harmonics And How They Relate To Power Factor”, Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA’93), San Diego, CA, November 1993, διαθέσιμο στο <http://users.ece.utexas.edu/~grady/POWERFAC.pdf>
11. Schneider Electric, “The Facts About Harmonics and Power Factor”, διαθέσιμο στο [http://www.wwcctraining.com/pdf/Harmonics\\_Power\\_Solution\\_Karma.pdf](http://www.wwcctraining.com/pdf/Harmonics_Power_Solution_Karma.pdf)
12. Technical Data SA02607001E, “Power factor correction: a guide for the plant engineer”, 2014 διαθέσιμο στο <http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@electrical/documents/content/sa02607001e.pdf>
13. REO, “Power Factor Correction and Harmonics”, 2008 διαθέσιμο στο [http://www.reo.co.uk/files/power\\_factor\\_correction\\_engl\\_02-08\\_1.pdf](http://www.reo.co.uk/files/power_factor_correction_engl_02-08_1.pdf)
14. B. W. Williams, “Power Electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components”, McGraw-Hill, 1992
15. R. Visinti, “Rectifiers”, CERN Accelerator School, διαθέσιμο στο <https://cas.web.cern.ch/cas/Warrington/PDF/Visintini.pdf>
16. R. Visinti, “Rectifiers”, Elettra, διαθέσιμο στο <https://cds.cern.ch/record/987551/files/p133.pdf>
17. Δ. Πυλαρινός, Ηλεκτρονικά Ισχύος: Εργαστηριακές Σημειώσεις, TEI Κρήτης, 2014-2015
18. F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.



19. J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz et al., "Power electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronic*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
20. C. Wang, M. H. Nehrir, and S. R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 442–451, 2005.
21. S. Wang, Y. Kenarangui, and B. Fahimi, "Impact of Boost converter switching frequency on optimal operation of fuel cell systems," in *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC '06)*, pp. 1–5, September 2006.
22. J. J. Brey, C. R. Bordallo, J. M. Carrasco, E. Galván, A. Jimenez, and E. Moreno, "Power conditioning of fuel cell systems in portable applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 10-11, pp. 1559–1566, 2007.
23. R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, Chapman and Hall, New York, NY, USA, 1997.
24. L. Palma, M. H. Todorovic, and P. Enjeti, "Design considerations for a fuel cell powered DC-DC converter for portable applications," in *Proceedings of the 21st Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '06)*, pp. 1263–1268, March 2006.
25. N. Chang, J. Seo, D. Shin, and Y. Kim, "Room-temperature fuel cells and their integration into portable and embedded systems," in *Proceedings of the 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC '10)*, pp. 69–74, Taipei, Taiwan, January 2010.
26. W. Li, J. Liu, J. Wu, and X. He, "Design and analysis of isolated ZVT boost converters for high-efficiency and high-step-up applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 2363–2374, 2007.
27. G. K. Andersen, C. Klumpner, S. B. Kjær, and F. Blaabjerg, "A new power converter for fuel cells with high system efficiency," *International Journal of Electronics*, vol. 90, no. 11-12, pp. 737–750, 2003.
28. J.-T. Kim, S.-J. Jang, B.-K. Lee, S.-S. Kim, T.-W. Lee, and C.-Y. Won, "An active clamping current-fed half-bridge converter for fuel-cell generation systems," in *Proceedings of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC '04)*, pp. 4709–4714, Aachen, Germany, June 2004.
29. H. Xiao, L. Guo, and S. Xie, "A new ZVS bidirectional DC-DC converter with phase-shift plus PWM control scheme," in *Proceedings of the 22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '07)*, pp. 943–948, Anaheim, Calif, USA, March 2007.
30. K. Wang, C. Y. Lin, L. Zhu, D. Qu, F. C. Lee, and J.-S. Lai, "Bi-directional DC to DC converters for fuel cell systems," in *Proceedings of the Power Electronics in Transportation*, pp. 47–51, Dearborn, Mich, USA, October 1998.
31. K. Wang, L. Zhu, D. Qu, H. Odendaal, J. Lai, and F. C. Lee, "Design, implementation, and experimental results of bi-directional full-bridge dc/dc

- converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability,” in Proceedings of the IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC '00), pp. 1058–1063, 2000.
32. L. Zhu, “A novel soft-commutating isolated boost full-bridge ZVS-PWM DC-DC converter for bidirectional high power applications,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 2, pp. 422–429, 2006.
  33. M. Nymand and M. A. E. Andersen, “A new approach to high efficiency in isolated boost converters for high-power low-voltage fuel cell applications,” in Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC '08), pp. 127–131, Poznan, Poland, September 2008.
  34. P. Yang, J. Xu, G. Zhou, and S. Zhang, “A new quadratic boost converter with high voltage step-up ratio and reduced voltage stress,” in Proceedings of the IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC '12), pp. 1164–1168, June 2012.
  35. C. Yao, X. Ruan, X. Wang, and C. K. Tse, “Isolated buck-boost DC/DC converters suitable for wide input-voltage range,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 9, pp. 2599–2613, 2011.
  36. K. I. Hwu and Y. T. Yau, “A KY boost converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 11, pp. 2699–2703, 2010.
  37. P. Alotto, M. Guarnieri, and F. Moro, “Modeling and control of fuel cell-battery hybrid power systems for portable electronics,” in Proceedings of the 43rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC '08), Padova, Italy, September 2008.
  38. S.-H. Park, S.-R. Park, J.-S. Yu, Y.-C. Jung, and C.-Y. Won, “Analysis and design of a soft-switching boost converter with an HI-bridge auxiliary resonant circuit,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 8, pp. 2142–2149, 2010.
  39. C. Bo, W. Congling, and H. Yao, “Research on soft switching boost converter,” in Proceedings of the 2nd International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA '11), pp. 1015–1018, IEEE, August 2011.
  40. Z. Ivanovic, B. Blanusa, and M. Knezic, “Power loss model for efficiency improvement of boost converter,” in Proceedings of the 23rd International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT '11), pp. 1–6, October 2011.
  41. W. Huang, “A new control for multi-phase buck converter with fast transient response,” in Proceedings of the 16th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC '01), pp. 273–279, March 2001.
  42. T. Fuse, M. Ohta, M. Tokumasu, H. Fujii, S. Kawanaka, and A. Kameyama, “A 0.5-V power-supply scheme for low-power system LSIs using multi-Vth SOI CMOS technology,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 38, no. 2, pp. 303–311, 2003.
  43. J. P. Rodrigues, S. A. Mussa, M. L. Heldwein, and A. J. Perin, “Three-level ZVS active clamping PWM for the DC-DC buck converter,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 10, pp. 2249–2258, 2009.

44. J. J. Chen, B. H. Hwang, C. M. Kung, W. Y. Tai, and Y. S. Hwang, "A new single-inductor quadratic buck converter using average-current-mode control without slope-compensation," in Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA '10), pp. 1082–1087, June 2010.
45. M. Jahanmahin, A. Hajihosseini, E. Afjei, and M. Mesbah, "Improved configurations for Dc to Dc buck and boost converters," in Proceedings of the 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC '12), vol. 2, pp. 372–378, Tehran, Iran, February 2012.
46. J. Chen, D. Maksimović, and R. Erickson, "Buck-boost PWM converters having two independently controlled switches," in Proceedings of the IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, pp. 736–741, June 2001.
47. B.-H. Hwang, B.-N. Sheen, J.-J. Chen, Y.-S. Hwang, and C.-C. Yu, "A low-voltage positive buck-boost converter using average-current-controlled techniques," in Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS '12), pp. 2255–2258, Seoul, Republic of Korea, May 2012.
48. K. Boopathy and K. Bhoopathy Bagan, "A novel method of implementing real-time buck boost converter with improved transient response for low power applications," in Proceedings of the IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA '11), pp. 155–160, September 2011.
49. K. I. Hwu and T. J. Peng, "A novel buck-boost converter combining KY and buck converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 5, pp. 2236–2241, 2012.
50. R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers, Norwell, Mass, USA, 2nd edition, 2001.
51. B. R. Lin, C. Huang, and H. K. Chiang, "Analysis, design and implementation of an active snubber zero-voltage switching cuk converter," Power Electronics, IET, vol. 1, pp. 50–61, 2008.
52. H. S.-H. Chung, K. K. Tse, S. Y. Ron Hui, C. M. Mok, and M. T. Ho, "A novel maximum power point tracking technique for solar panels using a SEPIC or Cuk converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 3, pp. 717–724, 2003.
53. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, 3rd edition, 2002.
54. R. W. Erickson and D. Maksimovic, Fundamental of Power Electronics, Kluwer Academic, Boston, Mass, USA, 2nd edition, 2001.
55. M. S. Song, E. S. Oh, and B. K. Kang, "Modified SEPIC having enhanced power conversion efficiency," Electronics Letters, vol. 48, no. 18, pp. 1151–1153, 2012.
56. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, "Power electronic converter," in Application and Design, John Wiley & Sons, 3rd edition, 2001.
57. EG&G Technical Services and Science Application International Corporation, Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, Morgantown, WV, USA, 6th edition, 2002.

58. S. S. Saha, "Efficient soft-switched boost converter for fuel cell applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 1710–1719, 2011.
59. M. Nymand, R. Tranberg, M. E. Madsen, U. K. Madawala, and M. A. E. Andersen, "What is the best converter for low voltage fuel cell applications—a buck or boost?" in *Proceedings of the 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON '09)*, pp. 962–967, November 2009.
60. L. Kui-Jun and K. Rae-Young, "Nonisolated ZVT two-inductor boost converter with a single resonant inductor for high step-up applications," in *Proceedings of the IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE '11)*, 2011.
61. B. R. Lin and J. Y. Dong, "New zero-voltage switching DC-DC converter for renewable energy conversion systems," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 393–400, 2012.
62. M. Harfman-Todorovic, L. Palma, and P. Enjeti, "A hybrid DC-DC converter for Fuel cells powered laptop computers," in *Proceedings of the 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'06)*, June 2006.
63. G. R. Zhu, K. H. Loo, Y. M. Lai, and C. K. Tse, "Quasi-maximum efficiency point tracking for direct methanol fuel cell in DMFC/supercapacitor hybrid energy system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 3, pp. 561–571, 2012.
64. J.-M. Kwon, Y.-J. Kim, and H.-J. Cho, "High-efficiency active DMFC system for portable applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 8, pp. 2201–2209, 2011.
65. B. Sahu and G. A. Rincon-Mora, "A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous buck-boost converter for portable applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 443–452, 2004.
66. X. Duan, H. Deng, N. X. Sun, A. Q. Huang, and D. Y. Chen, "A high performance integrated boost DC-DC converter for portable power supply," in *Proceedings of the 19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '04)*, pp. 1039–1044, February 2004.
67. M. A. Al-Saffar, E. H. Ismail, and A. J. Sabzali, "High efficiency quadratic boost converter," in *Proceedings of the 27th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC '12)*, pp. 1245–1252, February 2012.
68. R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamental of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass, USA, 2nd edition, 2001.