



ΔΙΕΘΝΕΣ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ  
ΡΩΜ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗ ΡΟΗ  
ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑ»



Της φοιτήτριας  
Κυρατζή Θεοδοσία  
Αρ. Μητρώου: 514071

Επιβλέπων  
Ιορδάνης Κιοσκερίδης  
Καθηγητής

Ημερομηνία 16/9/2024

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη και προσομοίωση τριφασικού PWM μετατροπέα για την αμφίδρομη ροή της ενέργειας στη μπαταρία.

Κωδικός Δ.Ε. 23236

Φοιτήτρια: Κυρατζή Θεοδοσία

Εισηγητής: Κιοσκερίδης Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 23/07/23

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 16/9/2024

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.*

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Κυρατζή Θεοδοσίας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

## Περίληψη

Η ραγδαία εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων τα τελευταία χρόνια έχει προκαλέσει ανάγκες και προκλήσεις στη μηχανική των ηλεκτρονικών συστημάτων. Καθώς η τεχνολογία στρέφεται προς τις βιώσιμες πηγές ενέργειας, η ανάγκη για αποτελεσματικότερους τρόπους διαχείρισης της ενέργειας και αποθήκευσης της γίνεται ολοένα και πιο απαιτητική. Ο μετατροπέας, ένα κύκλωμα που χρησιμοποιείται όχι μόνο για τη μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη, αλλά και για την καλύτερη διαχείριση της ροής ισχύος, βρίσκεται στην καρδιά των ηλεκτρονικών συστημάτων που αφορούν τη διαχείριση και αποθήκευση ενέργειας.

Αυτή η διπλωματική εργασία αφορά τη σχεδίαση και ανάλυση ενός τριφασικού PWM μετατροπέα με χρήση IGBT. Εστιάζει στη δημιουργία ενός συστήματος ικανού να επιτρέπει και να διαχειρίζεται αμφίδρομη ροή ενέργειας, ένα χαρακτηριστικό απαραίτητο για προηγμένες λύσεις αποθήκευσης ενέργειας, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σε μια μπαταρία και παρέχεται πίσω στο δίκτυο όταν υπάρχει ζήτηση. Ένα τέτοιο σύστημα είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και σε ηλεκτρικά οχήματα.

Η επιλογή του τριφασικού PWM μετατροπέα έγινε με βάση την πιο αποτελεσματική μέθοδο για τον έλεγχο ισχύος που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη από απλές εμπορικές εφαρμογές μέχρι και βιομηχανικές εφαρμογές. Ο διακόπτης που επιλέχθηκε, το IGBT, είναι γνωστό για την υψηλή του απόδοση καθώς συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των προκατόχων του. Είναι ο ιδανικός ημιαγωγός για μια τέτοια εφαρμογή καθώς η αμφίδρομη ροή ενέργειας στο κύκλωμα απαιτεί ακριβείς ελέγχους.

Κατόπιν σχεδίασης του κυκλώματος μετατροπέα, γίνεται η προσομοίωση στη Simulink με τη βοήθεια της οποίας θα γίνει η ανάλυση της λειτουργικότητας και αποτελεσματικότητας του κυκλώματος.

# Study and Simulation of a Three-Phase PWM Modulator for bidirectional power flow control in a battery

Kyratzi Theodosia

## Abstract

The rapid evolution of energy systems in the recent years has caused needs and challenges in the engineering of electronic systems. As technology moves towards more sustainable energy sources, the need for more efficient ways to manage and store energy is becoming more and more demanding. The inverter, a component used not only to convert energy from one form to another, but also to better manage power flow, is at the heart of electronic systems dealing with energy management and storage. This thesis concerns the design and analysis of a three-phase PWM converter using IGBTs. It focuses on creating a system capable of enabling and managing two-way energy flow, a feature essential for advanced energy storage solutions, where energy is stored in a battery and fed back to the grid when there is demand. Such a system is particularly useful in renewable energy applications as well as in electric vehicles.

The choice of the three-phase PWM inverter was made based on the most efficient method for power control that is widely used from simple commercial applications to industrial applications. The selected switch, the IGBT, is known for its high performance as it combines the advantages of its predecessors. It is the ideal semiconductor for such an application as the two-way flow of energy in the circuit requires precise control.

After designing the converter circuit, the simulation is done in Simulink with the help of which the functionality and efficiency of the circuit will be analyzed.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου που είναι δίπλα μου και με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια, τους καθηγητές μου που με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας και κυρίως τον κ. Κιοσκερίδη, που πέραν όλων των γνώσεων που μου μετέδωσε όλα αυτά τα χρόνια, με καθοδήγησε για τη διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1ο: Μπαταρίες.....	11
1.1 Εισαγωγή.....	11
1.2 Μπαταρίες μολύβδου.....	12
1.2.1 Εισαγωγή.....	12
1.2.2 Φόρτιση και εκφόρτιση μπαταριών μολύβδου.....	13
1.3 Μπαταρίες λιθίου.....	15
1.3.1 Εισαγωγή.....	15
1.3.2 Λειτουργία μπαταριών λιθίου.....	15
1.3.3 Φόρτιση των μπαταριών λιθίου.....	16
1.3.4 Πλεονεκτήματα μπαταριών ιόντων λιθίου.....	16
1.4 Σύγκριση μπαταριών μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου.....	16
Κεφάλαιο 2ο: IGBT.....	18
2.1 Εισαγωγή.....	18
2.2 Κατασκευαστική δομή του IGBT.....	18
2.3 Λειτουργία του IGBT.....	19
2.4 Χαρακτηριστικές του IGBT.....	20
2.5 Πλεονεκτήματα του IGBT.....	21
Κεφάλαιο 3ο: Διαμόρφωση εύρους παλμού PWM.....	22
3.1 Εισαγωγή.....	22
3.2 Τεχνικές PWM.....	22
3.3 Εφαρμογές PWM.....	26
3.4 Πλεονεκτήματα PWM.....	26
3.5 Μειονεκτήματα PWM.....	26
Κεφάλαιο 4ο: Ελεγκτής PI.....	28
4.1 Εισαγωγή.....	28
4.2 Διάγραμμα και λειτουργία ενός PI ελεγκτή.....	29
4.3 Συντονισμός ενός ελεγκτή PI.....	29
4.4 Εφαρμογές ενός ελεγκτή PI.....	29
4.5 Πλεονεκτήματα ελεγκτή PI.....	30
4.6 Μειονεκτήματα ελεγκτή PI.....	30
Κεφάλαιο 5ο: Delta Modulator.....	31
Κεφάλαιο 6ο: Μετατροπείς – Αντιστροφείς.....	32
6.1 Εισαγωγή στους Μετατροπείς.....	32
6.2 Τύποι Μετατροπέων.....	33
6.3 Έλεγχος των μετατροπέων πηγής τάσης.....	35
6.4 PWM Μετατροπείς.....	35
6.4.1 Εισαγωγή.....	35

6.4.2 Τύποι PWM μετατροπέων .....	36
6.4.3 Πλεονεκτήματα PWM μετατροπέων .....	37
6.5 Τριφασικός IGBT μετατροπέας πηγής τάσης με PWM έλεγχο του ρεύματος .....	37
Κεφάλαιο 7ο: Κυκλωματική διάταξη .....	40
7.1 Λειτουργία του κυκλώματος .....	40
7.2 Επεξήγηση των μπλοκ της Simulink .....	41
7.3 Παραγωγή των τριών ρευμάτων αναφοράς (ABC Inv) .....	44
Κεφάλαιο 8ο: Προσομοιώσεις της Simulink .....	48
8.1 1η προσομοίωση .....	48
8.2 2η προσομοίωση .....	51
8.3 3η προσομοίωση .....	54
8.4 4η προσομοίωση .....	56
8.5 5η προσομοίωση .....	59
8.6 6η προσομοίωση .....	62
8.7 7η προσομοίωση .....	65
8.8 8η προσομοίωση .....	68
Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα .....	71

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Δομή μιας μπαταρίας.....	11
Εικόνα 1.2 : Φόρτιση μπαταρίας.....	13
Εικόνα 1.3 : Εκφόρτιση μπαταρίας.....	14
Εικόνα 1.4 : Κελί μπαταρίας ιόντων - λιθίου.....	15
Εικόνα 1.5 : Καμπύλες εκφόρτισης ιόντων λιθίου και μολύβδου - οξέος.....	17
Εικόνα 2.1 : IGBT καναλιού n και καναλιού p.....	18
Εικόνα 2.2 : Σχηματικά NPT -IGBT (αριστερά) και PT-IGBT (δεξιά).....	19
Εικόνα 2.3 : Δομή του IGBT.....	20
Εικόνα 2.4 : Χαρακτηριστική μεταφοράς του IGBT.....	20
Εικόνα 2.5 : Χαρακτηριστικές εξόδου του IGBT.....	21
Εικόνα 2.6 : Κυκλωματικό σύμβολο του IGBT.....	21
Εικόνα 3.1 : Duty Cycle.....	22
Εικόνα 3.2 : Single pulse width modulation.....	23
Εικόνα 3.3 : Multiple pulse width modulation.....	23
Εικόνα 3.4 : Sinusoidal pulse width modulation.....	24
Εικόνα 3.5 : Hysteresis band pulse width modulation.....	25
Εικόνα 3.6 : Σύγκριση παλμών Trail (μπλε) - Lead (πράσινη) - Pulse center (κίτρινη).....	25
Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα ενός αναλογικού - ολοκληρωτικού ελεγκτή.....	29
Εικόνα 5.1 : Δομή ενός διαμορφωτή δέλτα.....	31
Εικόνα 5.2 : Έξοδος διαμορφωτή δέλτα σε σύγκριση με την είσοδο.....	31
Εικόνα 6.1 : Δομή κυκλώματος αντιστροφέα.....	32
Εικόνα 6.2 : Κυματομορφές τάσης - ρεύματος μονοφασικού αντιστροφέα.....	33
Εικόνα 6.3 : Κυματομορφές εξόδου μετατροπέα.....	34
Εικόνα 6.4 : Κύκλωμα μονοφασικού PWM μετατροπέα.....	36
Εικόνα 6.5 : Κύκλωμα τριφασικού PWM μετατροπέα.....	37
Εικόνα 6.6 : Ελεγκτής PWM σταθερής συχνότητας.....	38
Εικόνα 6.7 : Ελεγκτής με διαμόρφωση Δέλτα.....	39
Εικόνα 7.1 : Μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος μετατροπέα.....	40
Εικόνα 7.2 : Κυκλωματική διάταξη του μετατροπέα στο περιβάλλον της Simulink.....	41
Εικόνα 7.3 : Three - phase source.....	42
Εικόνα 7.4 : Μπαταρία.....	42
Εικόνα 7.5 : Παράμετροι μετατροπέα (αριστερά) και φίλτρων (δεξιά).....	43
Εικόνα 7.6 : Μπλοκ διάγραμμα του Delta Modulator.....	43
Εικόνα 7.7 : Μπλοκ διάγραμμα του Vdc PI.....	44
Εικόνα 7.8 : Μπλοκ διάγραμμα του ABC Inv.....	44
Εικόνα 7.9 : Οι τρεις φάσεις της ΔΕΗ.....	45
Εικόνα 7.10 : Φιλτραρισμένες κυματομορφές (πάνω) και τετραγωνικός παλμός (κάτω - ενισχυμένος κατά 200).....	45
Εικόνα 7.11 : Τριγωνικός παλμός (ενισχυμένος κατά 200).....	46
Εικόνα 7.12 : Ημίτονο (ενισχυμένο κατά 200).....	46
Εικόνα 7.13 : Συνημίτονο (ενισχυμένο κατά 200).....	47
Εικόνα 8.1 : Κυματομορφές Vdc - Idc (710V 0°).....	48
Εικόνα 8.2 : Κυματομορφή I <sub>p</sub> * (710V 0°).....	49
Εικόνα 8.3 : Κυματομορφές V <sub>s</sub> - I <sub>s</sub> - I <sub>n</sub> - I <sub>L</sub> (710V 0°).....	49
Εικόνα 8.4 : Διαφορές φάσεων (710V 0° φόρτιση).....	50
Εικόνα 8.5 : Διαφορές φάσεων (710V 0° εκφόρτιση).....	50
Εικόνα 8.6 : Κυματομορφές Vdc-I <sub>p</sub> (710V -10°).....	51
Εικόνα 8.7 : Κυματομορφή I <sub>p</sub> * (710V -10°).....	52
Εικόνα 8.8 : Κυματομορφές V <sub>s</sub> - I <sub>s</sub> - I <sub>n</sub> - I <sub>L</sub> (710V -10°).....	52
Εικόνα 8.9 : Διαφορές φάσεων (710V -10° φόρτιση).....	53
Εικόνα 8.10 : Διαφορές φάσεων (710V -10° εκφόρτιση).....	53
Εικόνα 8.11 : Κυματομορφές Vdc - Idc (710V -20°).....	54

Εικόνα 8.12 : Κυματομορφή $I_p^*$ (710V -20°).....	54
Εικόνα 8.13 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ (710V -20°).....	55
Εικόνα 8.14 : Διαφορές φάσεων (710V -20° φόρτιση).....	55
Εικόνα 8.15 : Διαφορές φάσεων (710V -20° εκφόρτιση).....	56
Εικόνα 8.16 : Κυματομορφές $V_{dc} - I_{dc}$ (710V -30°).....	57
Εικόνα 8.17 : Κυματομορφή $I_p^*$ (710V -30°).....	57
Εικόνα 8.18 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ .....	58
Εικόνα 8.19 : Διαφορές φάσεων (710V -30° φόρτιση).....	58
Εικόνα 8.20 : Διαφορές φάσεων (710V -30° εκφόρτιση).....	59
Εικόνα 8.21 : Κυματομορφές $V_{dc} - I_{dc}$ (720V 0°).....	60
Εικόνα 8.22 : Κυματομορφή $I_p^*$ (720V 0°).....	60
Εικόνα 8.23 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ (720V 0°).....	61
Εικόνα 8.24 : Διαφορές φάσεων (720V 0° φόρτιση).....	61
Εικόνα 8.25 : Διαφορές φάσεων (720V 0° εκφόρτιση).....	62
Εικόνα 8.26 : Κυματομορφές $V_{dc} - I_{dc}$ (720V -10°).....	62
Εικόνα 8.27 : Κυματομορφή $I_p^*$ (720V -10°).....	63
Εικόνα 8.28 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ (720V -10°).....	63
Εικόνα 8.29 : Διαφορές φάσεων (720V -10° φόρτιση).....	64
Εικόνα 8.30 : Διαφορά φάσεων (720V -10° εκφόρτιση).....	64
Εικόνα 8.31 : Κυματομορφές $V_{dc} - I_{dc}$ (720V -20°).....	65
Εικόνα 8.32 : Κυματομορφή $I_p^*$ (720V -20°).....	66
Εικόνα 8.33 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ (720V -20°).....	66
Εικόνα 8.34 : Διαφορές φάσεων (720V -20° φόρτιση).....	67
Εικόνα 8.35 : Διαφορές φάσεων (720V -20° εκφόρτιση).....	67
Εικόνα 8.36 : Κυματομορφές $V_{dc} - I_{dc}$ (720V -30°).....	68
Εικόνα 8.37 : Κυματομορφή $I_p^*$ (720V -30°).....	69
Εικόνα 8.38 : Κυματομορφές $V_s - I_s - I_n - I_L$ (720V -30°).....	69
Εικόνα 8.39 : Διαφορές φάσεων (720V -30° φόρτιση).....	70
Εικόνα 8.40 : Διαφορές φάσεων (720V -30° εκφόρτιση).....	70

## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 1.1	Πρωτεύοντες Μπαταρίες .....	12
Πίνακας 1.2	Δευτερεύοντες Μπαταρίες .....	12
Πίνακας 9.1	Άεργος ισχύ δικτύου - μετατροπέα για 710V .....	72
Πίνακας 9.2	Άεργος ισχύ δικτύου - μετατροπέα για 720V .....	72

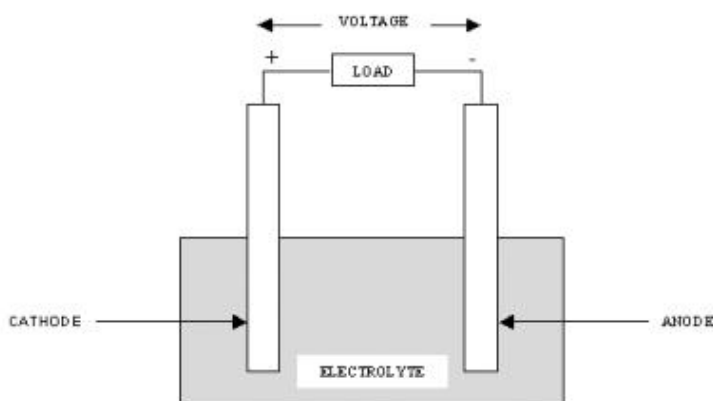
## Κεφάλαιο 1ο: Μπαταρίες

### 1.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες είναι συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια που περιέχεται στα υλικά της σε ηλεκτρική, μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης (οξειδοαναγωγής). Αυτός ο τύπος αντίδρασης περιλαμβάνει τη μεταφορά ηλεκτρονίων από το ένα υλικό στο άλλο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η βασική ηλεκτροχημική μονάδα σε κάθε μπαταρία ονομάζεται στοιχείο (cell) και είναι υπεύθυνο για την παραγωγή και αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μπαταρία αποτελείται από ένα είτε περισσότερα στοιχεία, τα οποία συνδέονται στη σειρά ή παράλληλα, ανάλογα με την επιθυμητή τάση εξόδου και τη χωρητικότητα.

Το στοιχείο αποτελείται από τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου και τον ηλεκτρολύτη. Η άνοδος είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο που απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο κύκλωμα και οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η κάθοδος είναι το θετικό ηλεκτρόδιο που προσλαμβάνει ηλεκτρόνια από το κύκλωμα και ανάγεται κατά τη διάρκεια της ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ο ηλεκτρολύτης παρέχει το μέσο μεταφοράς του φορτίου, με τη μορφή ιόντων, μεταξύ των ηλεκτροδίων της ανόδου και της καθόδου. Συνήθως στις μπαταρίες, η μηχανική επαφή των ηλεκτροδίων αποφεύγεται, παρεμβάλλοντας μεταξύ τους ένα υλικό διαχωρισμού. Ο διαχωριστής (separator), πρέπει να παρέχει εξαιρετική ιοντική αγωγιμότητα, ενώ σε ορισμένους τύπους μπαταριών, εξασφαλίζει επιπλέον την απορρόφηση του υγρού ηλεκτρολύτη.

Ανάλογα με το υλικό των ηλεκτροδίων και τον ηλεκτρολύτη, διακρίνεται μια μεγάλη ποικιλία στοιχείων και των αντίστοιχων μπαταριών. Η κύρια ταξινόμηση των μπαταριών, αναφέρεται στη δυνατότητα επαναφόρτισης τους.



Εικόνα 1.1: Δομή μιας μπαταρίας

Οι μπαταρίες που δεν έχουν την ικανότητα επαναφόρτισης, ονομάζονται πρωτεύοντες (primary, non-rechargeable batteries). Τα περισσότερα πρωτεύοντα στοιχεία χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτες που περιέχονται σε απορροφητικό υλικό ή διαχωριστή και έτσι ονομάζονται ξηρά στοιχεία. Οι πιο διαδεδομένες πρωτεύοντες μπαταρίες είναι οι αλκαλικές, οι οποίες μετά την εκφόρτιση τους απορρίπτονται.

Οι δευτερεύουσες ή επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (secondary, rechargeable batteries), έχουν τη δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική τους κατάσταση φόρτισης, μετά την κάθε εκφόρτιση. Στη

φόρτιση απαιτείται η παροχή ρεύματος στη μπαταρία, με φορά αντίθετη από τη φορά του ρεύματος εκφόρτισης. Με σκοπό την εξασφάλιση μεγάλης διάρκειας ζωής στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, η διαδικασία της φόρτισης πρέπει να επιτελείται με αυστηρά καθορισμένο τρόπο, ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο τους. Οι πιο διαδεδομένες δευτερεύουσες μπαταρίες είναι οι μολύβδου-οξέος (lead-acid), οι νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium, Ni-Cd), οι νικελίου υδριδίου μετάλλου (nickel-metal hydride, Ni-MH) και οι ιόντων λιθίου (lithium ion).

Πίνακας 1.1 Πρωτεύοντες Μπαταρίες

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Χαμηλό κόστος αγοράς	Υψηλό κόστος κύκλου ζωής (εφόσον μετά τη χρήση απορρίπτονται)
Μεγάλη διάρκεια ζωής(ιδανικές για συσκευές που χρησιμοποιούνται σπάνια)	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις
Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Δεν είναι δυνατή η επαναφόρτιση
Ευρέως διαθέσιμες και εύκολες στη χρήση	
Άμεση χρήση χωρίς την ανάγκη φόρτισης	

Πίνακας 1.2 Δευτερεύοντες Μπαταρίες

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
Δυνατότητα επαναφόρτισης	Υψηλό κόστος
Οικονομικές μακροπρόθεσμα	Μικρή διάρκεια ζωής
Μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Αυτοεκφόρτιση
Υψηλός ρυθμός εκφόρτισης για βαριά φορτία	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
Ευρέως διαδεδομένες σε ηλεκτρονικές συσκευές	Συντήρηση

## 1.2 Μπαταρίες μολύβδου

### 1.2.1 Εισαγωγή

Οι μπαταρίες μολύβδου εφευρέθηκαν το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante και αποτελούν τον παλαιότερο τύπο επαναφορτιζόμενης μπαταρίας. Έχουν ευρεία χρήση λόγω του χαμηλού τους κόστους και των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους.

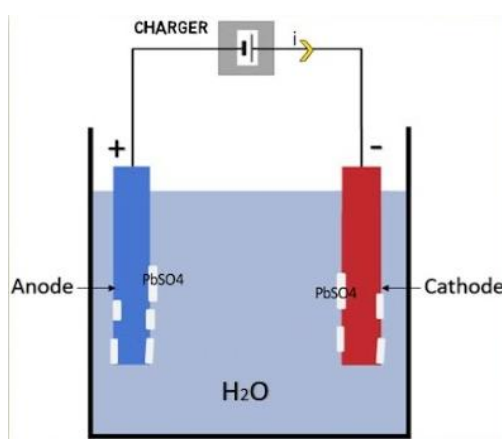
Οι μπαταρίες μολύβδου αποτελούνται από δύο πλάκες, την άνοδο και την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και τον διαχωριστή. Η άνοδος είναι η αρνητική πλάκα, φτιαγμένη από καθαρό μόλυβδο (Pb), ενώ η κάθοδος είναι η θετική πλάκα και φέρει ως ενεργό υλικό το διοξείδιο του μολύβδου (PbO<sub>2</sub>). Ο ηλεκτρολύτης αποτελεί μια μίξη θεικού οξέος (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) και απιονισμένου νερού και μέσα σε αυτόν

είναι βυθισμένες οι δύο πλάκες της μπαταρίας. Αυτές οι μπαταρίες είναι γνωστές ως ανοικτού τύπου (flooded-wet cell batteries). Χρειάζονται τακτικό έλεγχο και συντήρηση για την ανανέωση του υγρού ηλεκτρολύτη.

Ο δεύτερος τύπος μπαταριών μολύβδου είναι οι μπαταρίες κλειστού τύπου (valve regulated lead-acid VRLA ή sealed lead-acid SLA batteries). Οι μπαταρίες αυτές διακρίνονται σε AGM (Absorbent glass mat) και σε gel μπαταρίες. Η διαφορά αυτού του τύπου μπαταριών με τις μπαταρίες ανοικτού τύπου, είναι πως ο ηλεκτρολύτης είναι παγιδευμένος στη μπαταρία. Στις AGM μπαταρίες, ο ηλεκτρολύτης απορροφάται από τον διαχωριστή, ο οποίος είναι τοποθετημένος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και αποτελείται από ίνες γυαλιού. Στις gel μπαταρίες, έχει προστεθεί στον ηλεκτρολύτη πυρίτιο όπως και άλλοι πηκτικοί παράγοντες, και έτσι έχει τη μορφή τζελ.

## 1.2.2 Φόρτιση και εκφόρτιση μπαταριών μολύβδου

Η μπαταρία μολύβδου οξέος χρησιμοποιεί τη μέθοδο φόρτισης σταθερού ρεύματος σταθερής τάσης CCCV (Constant Current Constant Voltage). Ένα ρυθμισμένο ρεύμα αυξάνει την τάση ακροδεκτών έως ότου επιτευχθεί το ανώτερο όριο τάσης φόρτισης, οπότε το ρεύμα μειώνεται. Ο χρόνος φόρτισης είναι 12–16 ώρες και έως 36–48 ώρες για μεγάλες μπαταρίες. Με υψηλότερα ρεύματα φόρτισης και μεθόδους φόρτισης πολλαπλών σταδίων, ο χρόνος φόρτισης μπορεί να μειωθεί σε 8–10 ώρες.



Εικόνα 1.2: Φόρτιση μπαταρίας

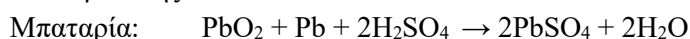
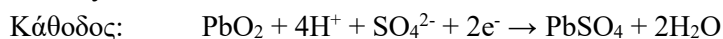
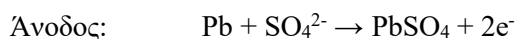
Με τη μέθοδο CCCV, οι μπαταρίες μολύβδου οξέος φορτίζονται σε τρία στάδια:

- *Constant current charge* - φόρτιση σταθερού ρεύματος. Στη διάρκεια αυτής της περιόδου, εφαρμόζεται ρεύμα σταθερής τιμής στην μπαταρία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα, τόσο πιο γρήγορα φορτίζει η μπαταρία. Μόλις η μπαταρία φορτίσει στο 70%, ξεκινάει το επόμενο στάδιο.
- *Topping charge* : Η μπαταρία φορτίζει με σταθερή τάση και ρεύμα που συνεχώς μειώνεται μέχρι η μπαταρία να φορτίσει πλήρως.
- *Float charge* : Η σταθερή τάση φόρτισης μειώνεται σε μια χαμηλότερη τιμή και εξασφαλίζει τη διατήρηση της μπαταρίας σε κατάσταση πλήρους φόρτισης.

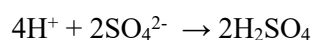
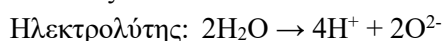
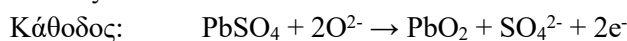
Όπως αναφέραμε προηγουμένως, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος αποτελούνται από τις δύο πλάκες καθόδου και ανόδου, οι οποίες περιέχουν διοξείδιο του μολύβδου  $PbO_2$  (κάθοδος) και καθαρό μολύβδο  $Pb$  (άνοδος), ενώ είναι βυθισμένες σε ένα μείγμα θεικού οξέος  $H_2SO_4$  και νερού  $H_2O$ . Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ο ηλεκτρολύτης διασπάται σε θετικά ιόντα υδρογόνου  $H_2$  και σε

## Κεφάλαιο 1ο

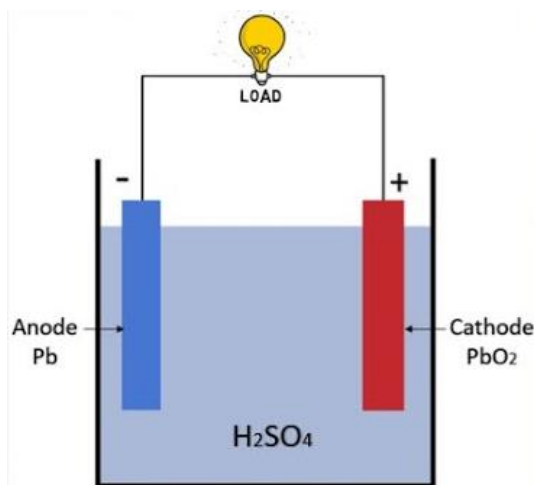
αρνητικά ιόντα θειικού άλας  $\text{SO}_4$ . Το θειικό άλας δίνει τα ηλεκτρόνια του στην άνοδο και αντιδρά με τον μόλυβδο δημιουργώντας θειικό μόλυβδο  $\text{PbSO}_4$ . Τα ηλεκτρόνια διαρρέουν το εξωτερικό κύκλωμα και καταλήγουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο, τα ιόντα υδρογόνου και το θειικό άλας αντιδρούν με το διοξείδιο του μολύβδου και δημιουργούν θειικό μόλυβδο και νερό, προκαλώντας έτσι την αραίωση του ηλεκτρολύτη. Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν τις χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης :



Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, το νερό διασπάται σε θετικά ιόντα υδρογόνου  $4\text{H}^+$  και αρνητικά ιόντα οξειδίου  $2\text{O}^{2-}$ . Τα ιόντα οξειδίου αντιδρούν με την κάθοδο και σχηματίζουν διοξείδιο του μολύβδου  $\text{PbO}_2$ , απελευθερώνοντας θειικό άλας  $\text{SO}_4^{2-}$  και δύο ηλεκτρόνια τα οποία μετακινούνται στην άνοδο. Ο θειικός μόλυβδος της ανόδου μετατρέπεται ξανά σε μόλυβδο  $\text{Pb}$  και θειικά ιόντα  $\text{SO}_4$ . Τα θειικά ιόντα που δημιουργήθηκαν στην άνοδο και στην κάθοδο, αντιδρούν με τα ιόντα υδρογόνου και δημιουργούν θειικό οξύ. Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν τις χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης :



Καθώς η μπαταρία πλησιάζει στην πλήρη φόρτιση, απελευθερώνονται αέρια υδρογόνου στην κάθοδο και αέρια οξυγόνου στην άνοδο. Αυτό συμβαίνει διότι το ρεύμα φόρτισης είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα που είναι απαραίτητο ώστε να μειωθεί ο θειικός μόλυβδος που συγκεντρώθηκε στις πλάκες τις μπαταρίας. Έτσι το ρεύμα ιονίζει το νερό στον ηλεκτρολύτη και απελευθερώνονται τα αέρια υδρογόνου και οξυγόνου. Επειδή το υδρογόνο είναι εύφλεκτο, εφίσταται προσοχή και επαρκής εξαερισμός κατά τη διάρκεια φόρτισης της μπαταρίας.



Εικόνα 1.3: Εκφόρτιση μπαταρίας

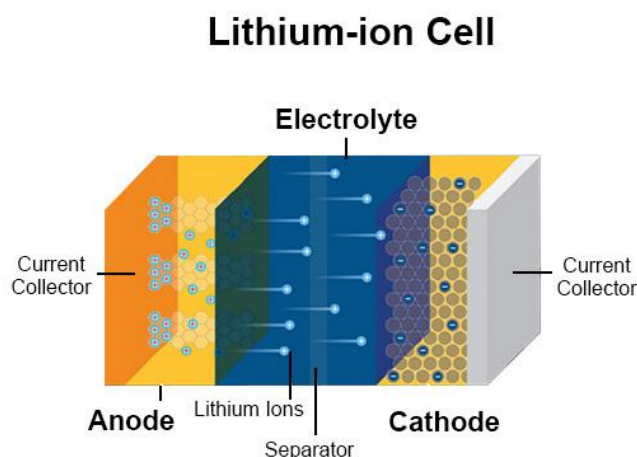
## 1.3 Μπαταρίες λιθίου

### 1.3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία ιόντων λιθίου είναι η πιο διαδεδομένη στον τομέα των επαναφορτιζόμενων μπαταριών και εμφανίζει ραγδαία ανάπτυξη καθώς χρησιμοποιείται στο μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονικών συσκευών που χρησιμοποιούνται καθημερινά. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν επικρατήσει πλήρως σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όπως τα κινητά τηλέφωνα, τα tablets, τα laptops και οι φωτογραφικές μηχανές λόγω του μικρού όγκου και βάρους τους.

Οι μπαταρίες αυτές αποτελούνται από μεμονωμένα ή πολλαπλά κελιά/στοιχεία και μια προστατευτική πλακέτα κυκλώματος. Ένα κελί ιόντων λιθίου αποτελείται από την άνοδο, την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη, τον διαχωριστή και τους συλλέκτες ρεύματος. Ο επεξεργαστής της πλακέτας παρακολουθεί την τάση, το ρεύμα, τη στάθμη φόρτισης και τη θερμοκρασία στη μπαταρία, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία της καθώς και την προστασία από πιθανό βραχυκύκλωμα.

Το αρνητικό ηλεκτρόδιο στις σύγχρονες μπαταρίες ιόντων λιθίου κατασκευάζεται από γραφίτη, ο οποίος επικάθεται σε φύλλο χαλκού. Το υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι το οξείδιο λιθίου κοβαλτίου ( $\text{LiCoO}_2$ ), είτε το οξείδιο λιθίου μαγγανίου ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ), το οποίο φέρεται πάνω σε φύλλο αλουμινίου. Ο ηλεκτρολύτης είναι κάποιο άλας λιθίου σε οργανικό διάλυμα. Ο ηλεκτρολύτης απορροφάται από τον πορώδη διαχωριστή, ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Στις μπαταρίες ιόντων λιθίου πολυμερούς, ο ηλεκτρολύτης είναι ένα άλας εμποτισμένο σε κατάλληλο πολυμερές υλικό. Οι μπαταρίες λιθίου πολυμερούς έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να κατασκευαστούν σε οποδήποτε σχήμα. Το πάχος του πολυμερούς πρέπει να είναι πολύ μικρό, ώστε να μην προκαλεί αύξηση του χρόνου φόρτισης.



Εικόνα 1.4: Κελί μπαταρίας ιόντων - λιθίου

### 1.3.2 Λειτουργία μπαταριών λιθίου

Η άνοδος και η κάθοδος έχουν αποθηκευμένο λίθιο. Καθώς η μπαταρία εκφορτίζεται και προσφέρει ηλεκτρικό ρεύμα, η άνοδος απελευθερώνει ιόντα λιθίου τα οποία μεταφέρονται στην κάθοδο απ' τον ηλεκτρολύτη μέσω του διαχωριστή. Η κίνηση των ιόντων λιθίου δημιουργεί ελεύθερα ηλεκτρόνια στην άνοδο τα οποία διαρρέουν στο εξωτερικό κύκλωμα από τον συλλέκτη ρεύματος και καταλήγουν

στο συλλέκτη ρεύματος της καθόδου. Κατά τη διάρκεια φόρτισης τα ιόντα λιθίου και κατ'επέκταση το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει με αντίθετη φορά, από την κάθοδο προς την άνοδο. Ο ρόλος του διαχωριστή είναι πως εμποδίζει την ελεύθερη ροή ηλεκτρονίων μέσα στη μπαταρία. Η διαδικασία είναι αρκετά απλή και φαινομενικά ασφαλής, όμως οι μπαταρίες λιθίου είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στην υπερφόρτιση. Κατά την υπερφόρτιση μεταφέρεται πολύ μεγάλος αριθμός ιόντων λιθίου από το θετικό ηλεκτρόδιο προς το αρνητικό και αυτό έχει ως συνέπεια την αποσύνθεση της καθόδου, ενώ από την υπερσυσσώρευση ιόντων λιθίου στην άνοδο υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού μεταλλικού λιθίου, καθιστώντας τη μπαταρία επικίνδυνη.

### 1.3.3 Φόρτιση των μπαταριών λιθίου

Η διαδικασία φόρτισης των μπαταριών ιόντων λιθίου μοιάζει με τη φόρτιση των μπαταριών μολύβδου, αρχικά με σταθερό ρεύμα και στη συνέχεια με σταθερή τάση (CC-CV constant current-constant voltage). Αν η τάση στους ακροδέκτες τις μπαταρίας είναι μικρότερη από 1.0V/στοιχείο, η μπαταρία θεωρείται κατεστραμμένη. Όταν η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας είναι κάτω από 2.50V/στοιχείο, η φόρτιση πραγματοποιείται με σταθερό ρεύμα περίπου 0.1C (trickle charge) σε ένα διάστημα συνήθως δέκα λεπτών. Στην περίπτωση που η τάση δεν αυξηθεί καθόλου, η μπαταρία θεωρείται κατεστραμμένη και η φόρτιση διακόπτεται.

Εφόσον η μπαταρία αναγνωριστεί σε καλή κατάσταση, ξεκινάει η πρώτη φάση της φόρτισης με σταθερό ρεύμα έως την τιμή 1.0C, μέχρι η τάση στους ακροδέκτες να φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή. Η τιμή αυτή εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας και τη θερμοκρασία και κυμαίνεται στις τιμές 4.10 - 4.25V. Όταν η τάση φτάσει την προκαθορισμένη τιμή, επιβάλλεται στη μπαταρία η μέγιστη τάση ενώ η ένταση του ρεύματος αρχίζει να μειώνεται. Μόλις η τιμή του ρεύματος μειωθεί στα 0.1 με 0.05C, η μπαταρία θεωρείται πλήρως φορτισμένη και η φόρτιση διακόπτεται.

Η φόρτιση στις μπαταρίες λιθίου διακόπτεται σε οποιοδήποτε στάδιο φόρτισης, αν ανιχνευθεί αύξηση της θερμοκρασίας μεγαλύτερη από ένα όριο. Επιπλέον, για λόγους ασφαλείας, ορίζεται ένα μέγιστο χρονικό διάστημα στο στάδιο φόρτισης με σταθερό ρεύμα και με σταθερή τάση.

### 1.3.4 Πλεονεκτήματα μπαταριών ιόντων λιθίου

Σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες επαναφορτιζόμενων μπαταριών, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Έχουν απ'τις υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες με έως και 330 Wh/kg σε σύγκριση με περίπου 75 Wh/kg των μπαταριών μολύβδου-οξέος. Επιπλέον, τα κελιά ιόντων λιθίου μπορούν να παρέχουν μέχρι και 3.6V, τάση μιάμιση με δύο φορές μεγαλύτερη από εναλλακτικές μπαταρίες, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως τα μέσα μεταφοράς. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση και ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης τους είναι πολύ μικρός της τάξης του 1.5-2% ανά μήνα.

Η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η μεγάλη διάρκεια ζωής έχουν κάνει τις μπαταρίες ιόντων λιθίου ηγέτη στην αγορά, όσον αφορά τις φορητές συσκευές αλλά και τα ηλεκτροκίνητα οχήματα.

## 1.4 Σύγκριση μπαταριών μολύβδου-οξέος και ιόντων λιθίου

Συγκρίνοντας τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος με τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, ανακαλύπτουμε σημαντικές διαφορές όσον αφορά την απόδοση και τις εφαρμογές που η κάθε μία είναι κατάλληλη. Συγκεκριμένα :

1. **Ενεργειακή Πυκνότητα.** Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν συνήθως 150-200Wh/kg κάτι που σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγαλύτερη ενέργεια σε ένα μικρότερο και ελαφρύτερο μέγεθος μπαταρίας. Αντίθετα, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, συνήθως 30-50Wh/kg, επομένως πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερες σε μέγεθος και βάρος για να αποθηκεύσουν ικανοποιητικά επίπεδα ενέργειας.
2. **Κύκλος ζωής.** Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής με περίπου 500-3000 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, ανάλογα με τον τύπο μπαταρίας και την χρήση της. Επιπλέον η χωρητικότητα της διατηρείται κατά τη διάρκεια ζωής της και μειώνεται πολύ πιο αργά από ότι σε μια μπαταρία μολύβδου. Οι μπαταρίες μολύβδου υποστηρίζουν περίπου 300-500 κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης και η χωρητικότητά τους μειώνεται σημαντικά με το χρόνο, ιδιαίτερα αν δεν συντηρηθούν σωστά ή εάν υπόκεινται συχνά σε βαθιές εκφορτίσεις.
3. **Απόδοση.** Μια μπαταρία ιόντων λιθίου έχει περίπου 90% έως και 95% απόδοση και συγκριτικά με μια μπαταρία μολύβδου που έχει 70-85%, χάνουν πολύ λιγότερη ενέργεια κατά τη διάρκεια φόρτισης-εκφόρτισης.
4. **Εκφόρτιση.** Η τάση σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου πέφτει ελάχιστα κατά τη χρήση της και μειώνεται σημαντικά σχεδόν μόνο όταν εκφορτίσει πλήρως, ενώ στις μπαταρίες μολύβδου η τάση μειώνεται καθ'όλη τη διάρκεια της εκφόρτισης της.



Εικόνα 1.5: Καμπύλες εκφόρτισης ιόντων λιθίου και μολύβδου - οξέος

5. **Συντήρηση.** Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου δεν χρειάζονται σχεδόν καθόλου συντήρηση, εν αντιθέσει με τις μπαταρίες μολύβδου, που χρειάζονται συχνά συντήρηση, όπως την προσθήκη υγρού ηλεκτρολύτη και τη διασφάλιση σωστής φόρτισης ώστε να μην προκληθεί θειοποίηση.
6. **Κόστος.** Το κόστος των μπαταριών μολύβδου-οξέος είναι πολύ μικρότερο από των ιόντων λιθίου, οι οποίες παρά το αρχικά υψηλότερο κόστος τους, είναι μακροπρόθεσμα πιο οικονομικές καθώς δεν έχουν ανάγκη συντήρησης και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
7. **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.** Οι μπαταρίες λιθίου, λόγω της κατασκευής τους που απαιτεί την εξόρυξη λιθίου και άλλων μετάλλων, έχει μεγάλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Από την άλλη, οι μπαταρίες μολύβδου είναι ανακυκλώσιμες παρ'όλα αυτά είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για το περιβάλλον αν δεν διαχειριστούν ή ανακυκλωθούν σωστά, καθώς περιέχουν μόλυβδο και θειικό οξύ.

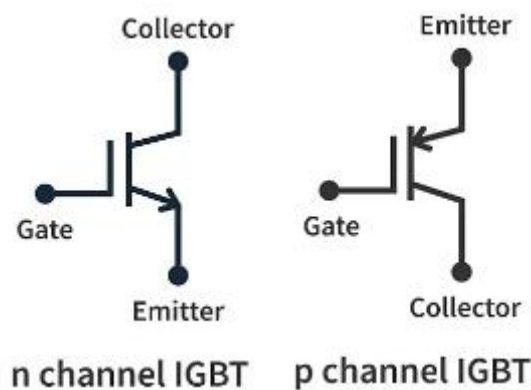
Από τις διαφορές των δύο μπαταριών προκύπτει πως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι σημαντικά ανώτερες των μπαταριών μολύβδου, καθώς με την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα, απόδοση και μέγεθος καθίστανται οι ιδανικές για το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών που χρησιμοποιούν μπαταρίες. Παρ'όλα αυτά, οι μπαταρίες μολύβδου - οξέος εξακολουθούν να είναι χρήσιμες σε εφαρμογές όπου το μέγεθος και το βάρος δεν αποτελεί πρόβλημα, κυρίως λόγω του χαμηλού τους κόστους.

## Κεφάλαιο 2ο: IGBT

### 2.1 Εισαγωγή

Το διπολικό τρανζίστορ επαφής μονωμένης πύλης IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) είναι ένα στοιχείο, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του διπολικού τρανζίστορ BJT με εκείνα του MOSFET, κάτι που το καθιστά ιδανικό ημιαγωγό σε διακοπτικές εφαρμογές. Το πλεονέκτημα του BJT είναι οι μικρές απώλειες σε κατάσταση αγωγιμότητας στις υψηλές τάσεις διάσπασης. Αντίθετα, το MOSFET έχει τους μικρότερους χρόνους μετάβασης και τον απλούστερο τρόπο οδήγησης, εξαιτίας της πολύ μεγάλης αντίστασης εισόδου. Τα πλεονεκτήματα αυτά συνδυάζονται με το βέλτιστο τρόπο στο IGBT. Έτσι το IGBT χρησιμοποιείται ευρέως στις σύγχρονες εφαρμογές διατάξεων χαμηλής και μέσης ισχύος. Διακρίνονται σε καναλιού-n, τα οποία είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα και σε καναλιού-p.

Ένα IGBT αποτελείται από έναν εκπομπό και έναν συλλέκτη, όπως στα BJT, από όπου διαρρέει το ρεύμα, και από μια πύλη, όπως στα MOSFET, απ' την οποία γίνεται ο έλεγχος του διακόπτη.



Εικόνα 2.1: IGBT καναλιού n και καναλιού p

### 2.2 Κατασκευαστική δομή του IGBT

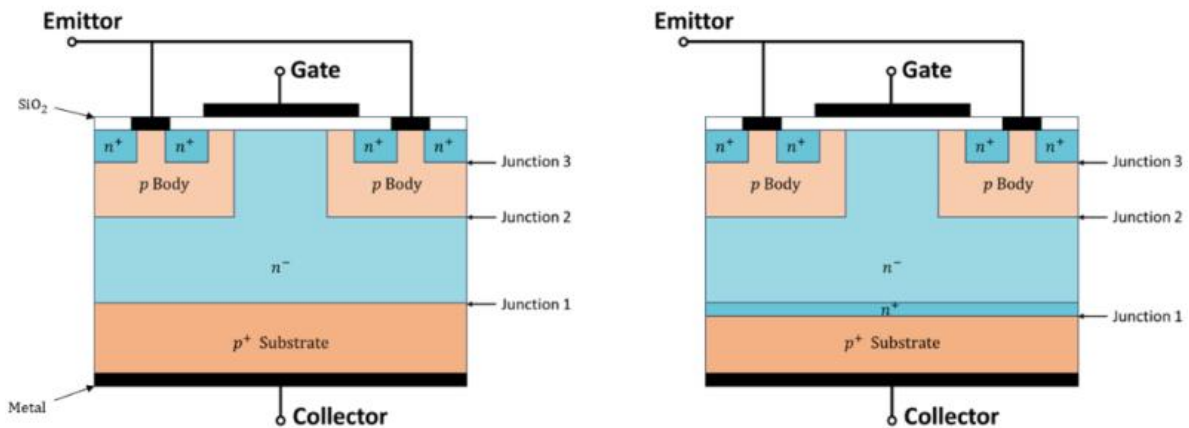
Το IGBT αποτελείται από τέσσερα στρώματα ημιαγωγών που σχηματίζουν μια δομή PNPN. Στο κάτω μέρος υπάρχει ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο για τον συλλέκτη, ενώ στο πάνω μέρος το ηλεκτρόδιο του εκπομπού είναι συνδεδεμένο μεταξύ του στρώματος P και N. Επιπλέον, υπάρχει ένα μονωτικό στρώμα από οξείδιο του πυριτίου που διαχωρίζει το ηλεκτρόδιο της πύλης από τον ημιαγωγό. Η κύρια διαφορά στη δομή ενός IGBT και ενός MOSFET είναι το επιπρόσθετο υπόστρωμα  $p^+$  με το οποίο συνδέεται ο ακροδέκτης του συλλέκτη, γνωστό ως στρώμα έγχυσης. Ο συλλέκτης αντιστοιχεί στην εκροή του MOSFET και ο εκπομπός στην πηγή. Στην περίπτωση ενός καναλιού-p, η δομή είναι η ίδια αλλά με αντίθετο τύπο προσμίξεων σε κάθε περιοχή.

Η πυκνότητα του  $n^-$  έχει να κάνει με την ικανότητα αποκλεισμού τάσης.

Το IGBT περιλαμβάνει δύο παρασιτικά BJT. Το BJT  $T_2$  αντιστοιχεί στο παρασιτικό BJT του MOSFET. Η πρόσθετη περιοχή  $p^+$  στο IGBT έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ακόμη BJT, του  $T_1$ . Τα δύο BJT σχηματίζουν ένα SCR. Η κάθοδος του SCR συνδέεται με τον εκπομπό και η άνοδος με το συλλέκτη του IGBT. Η περιοχή του σώματος  $n^-$  αποτελεί την πύλη του παρασιτικού SCR. Η

βραχυκύκλωση του σώματος με τον εκπομπό, αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας έναυσης του παρασιτικού SCR.

Η περιοχή  $n^+$  μεταξύ της περιοχής ολίσθησης και του συλλέκτη, υπάρχει μόνο στα IGBT με διάτρηση PT-IGBT ( Punch-Through IGBT). Όταν αυτή η περιοχή απουσιάζει, τα IGBT χαρακτηρίζονται χωρίς διάτρηση NPT-IGBT (Non Punch-Through IGBT).



Εικόνα 2.2: Σχηματικά NPT -IGBT (αριστερά) και PT-IGBT (δεξιά)

## 2.3 Λειτουργία του IGBT

Το IGBT είναι ένας ημιαγωγός τριών ακροδεκτών που ελέγχεται μέσω της πύλης, ενώ η εκροή γίνεται μεταξύ των ακροδεκτών συλλέκτη-εκπομπού. Καθώς είναι μια συσκευή μονής κατεύθυνσης, δεν επιτρέπει τη διέλευση ρεύματος στην αντίθετη κατεύθυνση, οπότε έχει μόνο δύο τρόπους λειτουργίας: τη λειτουργία στην περιοχή αποκοπής, όπου το IGBT συμπεριφέρεται όπως μια ανάστροφα πολωμένη δίοδος και την λειτουργία στην αγωγιμότητα η οποία επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος μεταξύ του συλλέκτη και του εκπομπού.

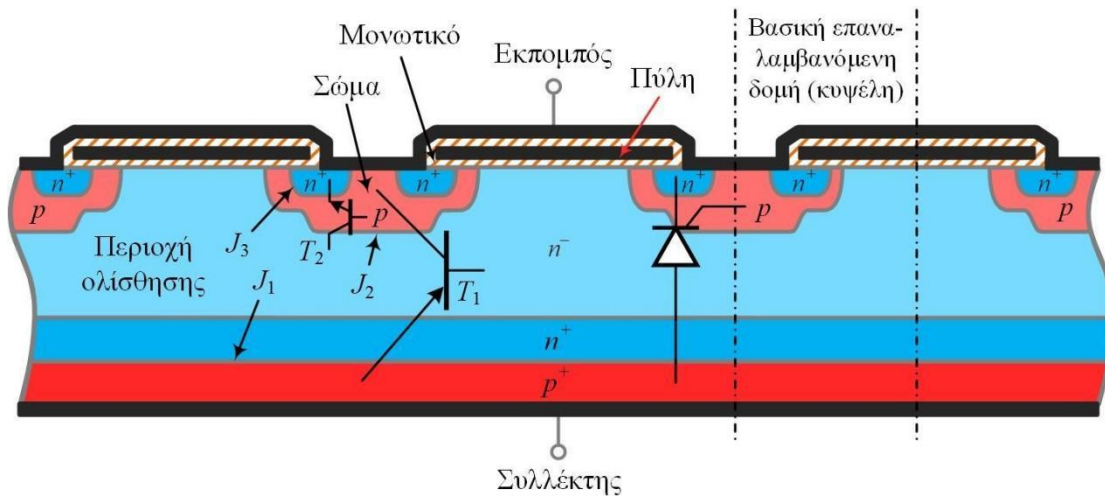
Το IGBT λειτουργεί στην περιοχή αποκοπής, όταν η τάση  $V_{GE}$  είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου  $V_{GE(th)}$ . Η τάση συλλέκτη - εκπομπού  $V_{CE}$  (θετικότερος συλλέκτης απ'τον εκπομπό), αναπτύσσεται στην επαφή  $J_2$ . Η περιοχή κένωσης της ανάστροφα πολωμένης  $J_2$  εκτείνεται κυρίως στην περιοχή ολίσθησης, η οποία κατασκευάζεται με σημαντικά μικρότερη πυκνότητα προσμίξεων από το σώμα. Στην επαφή  $J_2$  προκαλείται διάσπαση χιονοστιβάδας, όταν η τάση  $V_{CE}$  φτάσει την τιμή  $V_{CES}$  οπότε το ρεύμα του συλλέκτη αποκτά μεγάλες τιμές.

Η ανάστροφη τάση πόλωσης του IGBT αναπτύσσεται στην επαφή  $J_1$ . Η τάση διάσπασης της επαφής αυτής εξαρτάται από την παρουσία ή όχι του στρώματος  $n^+$ . Εάν υπάρχει, η τάση διάσπασης της επαφής είναι πολύ μικρή εξαιτίας της μεγάλης πυκνότητας προσμίξεων εκατέρωθεν της επαφής. Τότε το IGBT δεν έχει την ικανότητα να αποκόπτει ανάστροφες τάσεις. Επομένως, η τάση ανάστροφης διάσπασης  $V_{BR}$  είναι της τάξης των μερικών volt.

Εάν δεν υπάρχει η περιοχή  $n^+$ , η τάση διάσπασης της επαφής  $J_1$  μπορεί να γίνει περίπου ίση με την τάση διάσπασης της επαφής  $J_2$ .

Το IGBT μεταβαίνει στην αγωγιμότητα όταν η τάση στην πύλη  $V_{GE}$  γίνει μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου  $V_{GE(th)}$ . Τότε σχηματίζεται κάτω απ'την πύλη το στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής (κανάλι n) συνδέει αγωγίμα την περιοχή του εκπομπού με την περιοχή ολίσθησης και έτσι ρέει ένα ρεύμα μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη. Το ρεύμα αυτό πέρα από ηλεκτρόνια, οφείλεται και σε οπές. Τα ηλεκτρόνια ρέουν απ'την περιοχή  $n^+$  του εκπομπού, μέσω του καναλιού και της

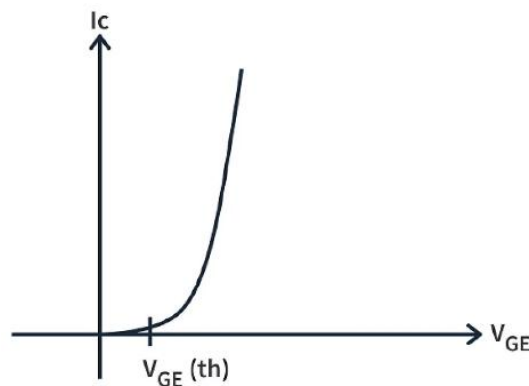
περιοχής ολίσθησης προς τον συλλέκτη. Παράλληλα εγγέονται σπές από την περιοχή  $p^+$  του συλλέκτη, στην περιοχή ολίσθησης και φθάνουν στον εκπομπό.



Εικόνα 2.3: Δομή του IGBT

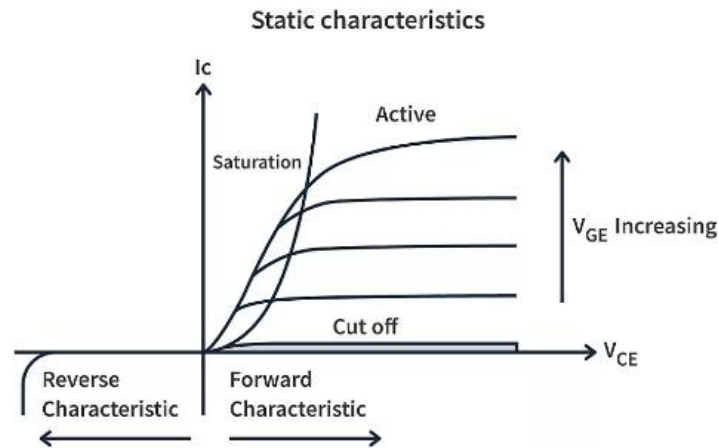
## 2.4 Χαρακτηριστικές του IGBT

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του IGBT είναι παρόμοια με αυτά του MOSFET και του BJT. Η χαρακτηριστική μεταφοράς του IGBT είναι παρόμοια με αυτή του MOSFET. Η τάση  $V_{GE(th)}$  μοιάζει με την τάση κατωφλίου του MOSFET και μόλις η τάση γίνει μεγαλύτερη απ'την τάση κατωφλίου, το ρεύμα  $I_C$  αυξάνεται. Το ρεύμα του συλλέκτη  $I_C$  μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση  $V_{GE}$  αλλά αυτό δεν ισχύει στις μικρές τιμές του ρεύματος, κοντά στην τάση κατωφλίου.



Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστική μεταφοράς του IGBT

Οι χαρακτηριστικές εξόδου κατά την ορθή πόλωση του IGBT, είναι όμοιες με αυτές του BJT με τη διαφορά ότι το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  δεν εξαρτάται απ'το ρεύμα βάσης  $I_B$  αλλά από την τάση της πύλης  $V_G$ . Το IGBT ελέγχεται από τάση και όχι από ρεύμα, όπως ακριβώς και το MOSFET. Όταν η τάση πύλης - εκπομπού  $V_{GE}$  είναι μικρότερη απ'την τάση κατωφλίου  $V_{GE(th)}$ , το IGBT βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, κατά την οποία διαρρέεται από ένα ελάχιστο ρεύμα διαρροής.

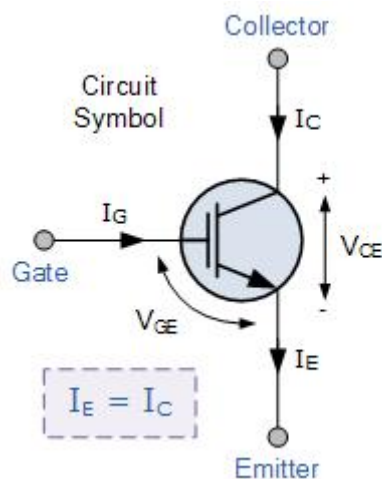


Εικόνα 2.5: Χαρακτηριστικές εξόδου του IGBT

## 2.5 Πλεονεκτήματα του IGBT

Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα του IGBT είναι η απλή και εύκολη οδήγησή του. Όπως στα MOSFET, χρειάζεται θετική πόλωση στην πύλη του για να είναι σε κατάσταση ON, ενώ μια μικρή αρνητική είτε μηδενική τάση, το απενεργοποιεί.

Χάρη στη χαμηλή αντίσταση και τις απώλειες σε κατάσταση αγωγιμότητας, καθώς και στην ικανότητα του να διακόπτει υψηλές τάσεις σε υψηλές συχνότητες, είναι το ιδανικό στοιχείο για την οδήγηση επαγωγικών φορτίων και για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Επιπλέον είναι πιο αξιόπιστα σε σχέση με τα MOSFET καθώς μπορούν να αντέξουν περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων και υψηλών μεταβολών τάσεων (power spikes).



Εικόνα 2.6: Κυκλωματικό σύμβολο του IGBT

## Κεφάλαιο 3ο: Διαμόρφωση εύρους παλμού PWM

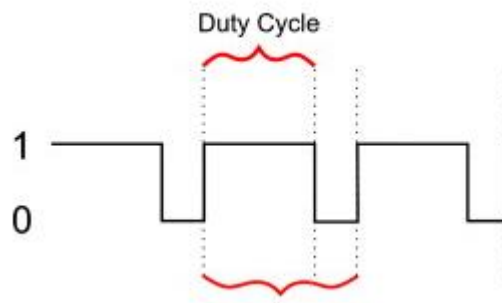
### 3.1 Εισαγωγή

Η διαμόρφωση εύρους παλμού PWM (Pulse Width Modulation) είναι μια τεχνική ελέγχου ισχύος που συναντάται συχνά σε συστήματα ισχύος και ψηφιακής επεξεργασίας.

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί είναι με τη διαμόρφωση της διάρκειας των παλμών ενός σήματος ώστε να ρυθμίσει την μέση ισχύ που παρέχεται στο φορτίο. Έτσι δεν χρειάζεται να ρυθμίζεται συνεχώς η τάση ή το ρεύμα και το σύστημα λειτουργεί με μεγαλύτερο έλεγχο.

Σημαντικές παράμετροι για τα σήματα PWM:

1. Duty Cycle: Η χρονική περίοδος που ένα σήμα είναι σε λειτουργία ονομάζεται κύκλος λειτουργίας. Ένα duty cycle εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό ή αναλογία. Ο χρόνος που χρειάζεται ένα σήμα για να ολοκληρώσει έναν κύκλο ON OFF ονομάζεται περίοδος. Η αναλογία του χρόνου που είναι ενεργοποιημένο ένα ψηφιακό σήμα σε μια χρονική περίοδο, περιγράφεται επακριβώς από το ποσοστό του duty cycle. Η περίοδος της κυματομορφής είναι ίση με τον λόγο ένα προς  $f$ , όπου  $f$  η συχνότητα της κυματομορφής. Θα λέγαμε ότι ένα ψηφιακό σήμα έχει κύκλο λειτουργίας 50% και μοιάζει με τέλειο τετραγωνικό κύμα εάν είναι ενεργοποιημένο για τη μισή περίοδο και απενεργοποιημένο για την άλλη μισή. Το ψηφιακό σήμα ξοδεύει περισσότερο χρόνο στην υψηλή κατάσταση από τη χαμηλή, εάν το ποσοστό είναι μεγαλύτερο από 50% και αντίστροφα εάν το duty cycle είναι χαμηλότερο από 50%.



Εικόνα 3.1: Duty Cycle

2. Συχνότητα: Η ταχύτητα με την οποία συμβαίνει κάτι σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο είναι γνωστή ως η συχνότητα του. Ο ρυθμός με τον οποίο εμφανίζεται μια δόνηση που οδηγεί σε κύμα όπως ραδιόφωνο φώς η ηχητικά κύματα. Αυτός ο ρυθμός συνήθως μετρείται σε δευτερόλεπτα. Το PWM χρησιμεύει ως τεχνική για τη μετατροπή παλμών υψηλής συχνότητας σε σήματα εξόδου χαμηλής συχνότητας.

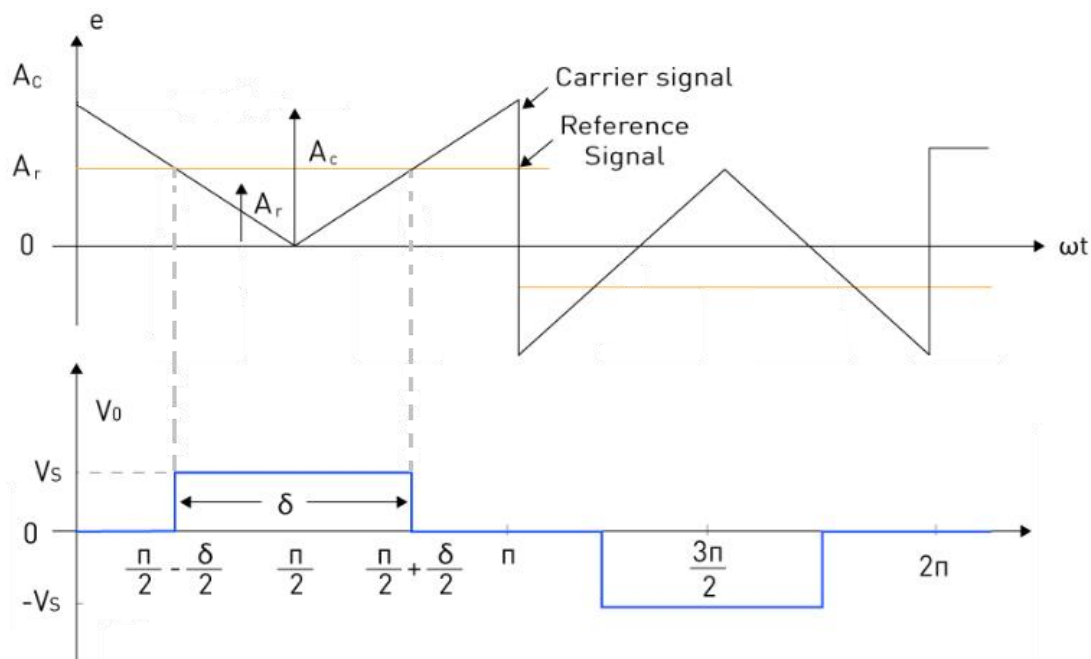
3. Έξοδος: Είναι το ποσοστό του duty cycle σε συνδυασμό με την τάση εισόδου. Αν για παράδειγμα η είσοδος μας είναι 5V και το duty cycle 50%, τότε η έξοδος στο φορτίο θα είναι 2.5V.

### 3.2 Τεχνικές PWM

Υπάρχουν πολλές τεχνικές PWM με κάποιες από αυτές να επικρατούν περισσότερο στις ηλεκτρονικές εφαρμογές. Κάποιες από τις πιο γνωστές είναι :

➤ SINGLE PWM

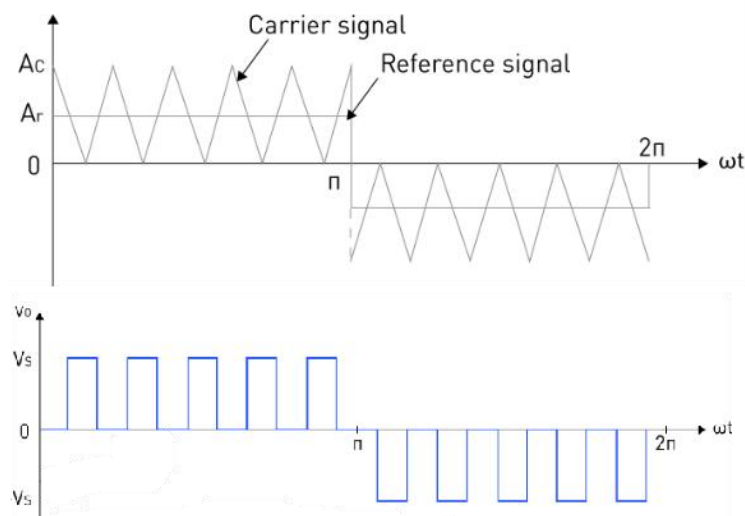
Είναι η απλούστερη μορφή PWM όπου παράγεται ένας παλμός σε κάθε κύκλο. Η μέση ισχύς που εφαρμόζεται στο φορτίο ελέγχεται μεταβάλλοντας το πλάτος του παλμού. Το Single PWM είναι απλό στη λειτουργία του και στη χρήση και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου απαιτείται βασικός έλεγχος της ισχύος.



Εικόνα 3.2: Single pulse width modulation

➤ MULTIPLE PWM

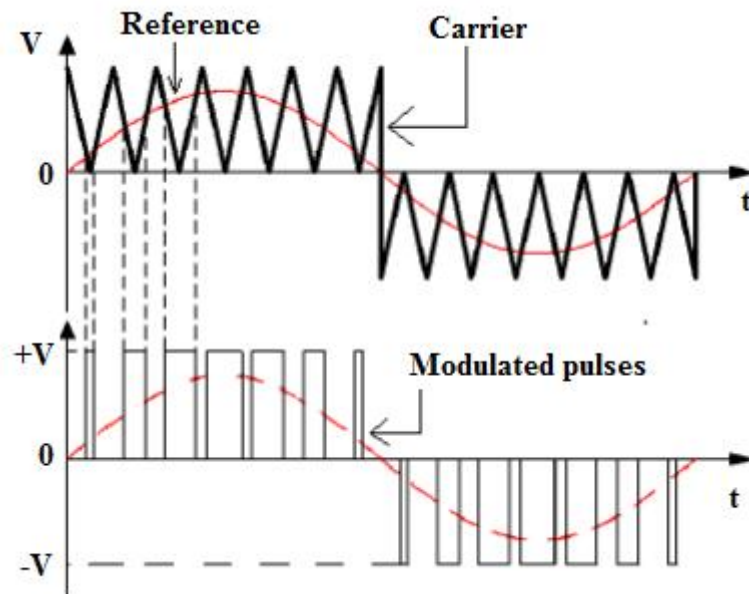
Πολλαπλοί παλμοί παράγονται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου. Αυτή η μέθοδος επιδιώκει να μειώσει την αρμονική παραμόρφωση ενώ αυξάνει τη ποιότητα της κυματομορφής εξόδου. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλότερη ποιότητα σήματος και μείωση του θορύβου.



Εικόνα 3.3: Multiple pulse width modulation

➤ **SINUSOIDAL PWM (SPWM)**

Έτσι ονομάζεται η διαδικασία αλλαγής του πλάτους παλμού ώστε να μοιάζει με ημιτονοειδή κυματομορφή . Μέσω της χρήσης μιας αναφοράς ημιτονοειδούς κύματος για την αλλαγή του πλάτους παλμών, το SPWM ελαχιστοποιεί την αρμονική παραμόρφωση και βελτιώνει την ποιότητα ισχύος. Χρησιμοποιείται σε συστήματα ελέγχου κινητήρα και σε μετατροπείς, όπου η κυματομορφή εξόδου υψηλής ποιότητας είναι πολύ σημαντική για τη μείωση των αρμονικών παρεμβολών και την αύξηση της απόδοσης του συστήματος.



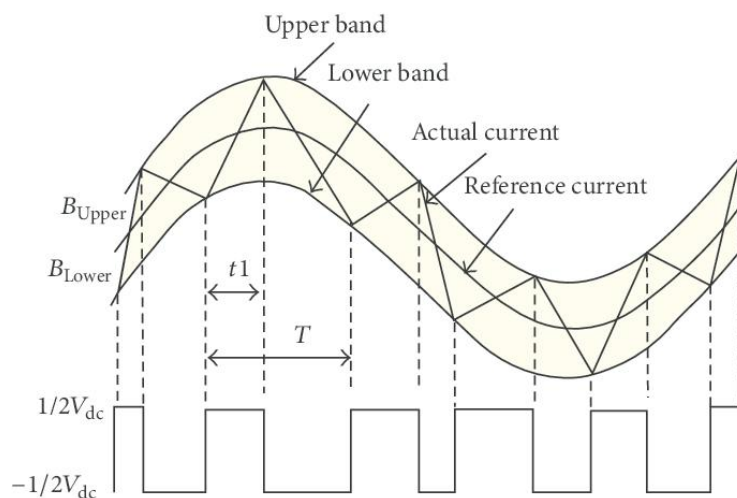
Εικόνα 3.4: Sinusoidal pulse width modulation

➤ **SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION (SHE)**

Είναι μια τεχνική διαμόρφωσης πλάτους παλμού που χρησιμοποιείται για την εξάλειψη συγκεκριμένων αρμονικών από την κυματομορφή εξόδου. Στόχος της τεχνικής αυτής είναι ο έλεγχος της εξόδου μειώνοντας ή εξαλείφοντας επιλεκτικά ορισμένες αρμονικές, διατηρώντας ταυτόχρονα τη θεμελιώδη συχνότητα.

➤ **HYSTERESIS BAND PWM**

Η διαμόρφωση εύρους παλμών ζώνης υστέρησης είναι η σύγκριση του λανθασμένου σήματος με μια προκαθορισμένη ζώνη που ονομάζεται υστέρηση. Το πλάτος παλμού αλλάζει για να επαναφέρει το σύστημα σε ισορροπία όταν το λανθασμένο σήμα ανεβαίνει πάνω από το εύρος υστέρησης. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια απλή και αξιόπιστη στρατηγική ελέγχου, ειδικά σε εφαρμογές όπου είναι συχνές ξαφνικές μεταβολές στο φορτίο ή διαταραχές. Οι μετατροπείς ισχύος και οι ρυθμιστές τάσης χρησιμοποιούν συχνά ζώνη υστέρησης PWM καθώς δεν επηρεάζονται από θορύβους και είναι απλοί στη χρήση τους.



Εικόνα 3.5: Hysteresis band pulse width modulation

➤ TRAIL EDGE

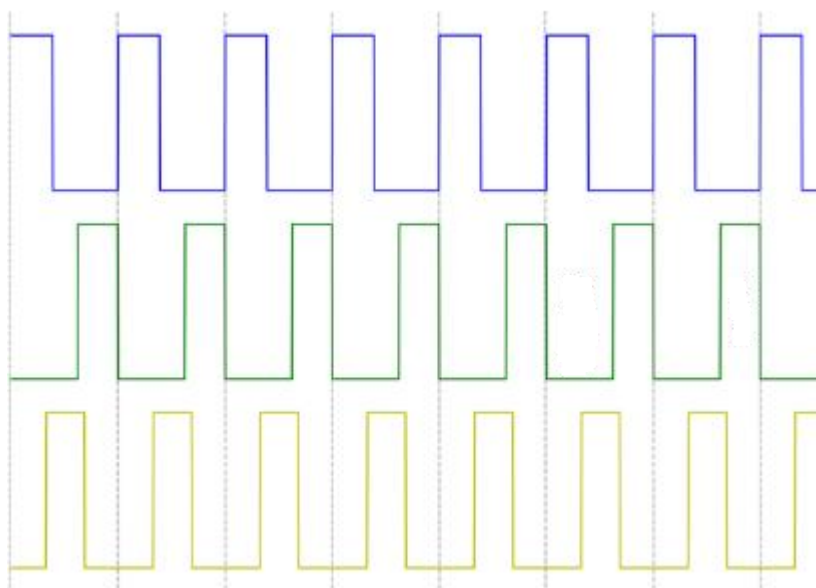
Με αυτήν την τεχνική, το σήμα ξεκινάει με πλήρη ισχύ και μειώνεται στο τέλος του κύκλου. Δηλαδή ο παλμός ξεκινάει στην υψηλή κατάσταση και μεταβαίνει στην χαμηλή στο τέλος κάθε κύκλου.

➤ LEAD EDGE

Η διαδικασία είναι αντίστροφη της Trail Edge, δηλαδή ο παλμός ξεκινάει από χαμηλή κατάσταση και η μετάβαση στην υψηλή συμβαίνει στην αρχή του κάθε κύκλου. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου χρειάζεται ομαλή απόκριση κατά την εκκίνηση του συστήματος.

➤ PULSE CENTER

Η τεχνική αυτή διορθώνει το κέντρο του παλμού οπότε η υψηλή κατάσταση βρίσκεται στο κέντρο της περιόδου. Χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση της αρμονικής παραμόρφωσης και τη σταθεροποίηση του σήματος εξόδου.



Εικόνα 3.6: Σύγκριση παλμών Trail (μπλε) - Lead (πράσινη) - Pulse center (κίτρινη)

➤ **SPACE VECTOR**

Η τεχνική space vector (SV-PWM) είναι μια προηγμένη τεχνική διαμόρφωσης πλάτους, η οποία υλοποιείται με ψηφιακό τρόπο και βελτιώνει την απόδοση και την ποιότητα ισχύος σε συστήματα ελέγχου τριφασικών κινητήρων και μετατροπέων. Η τεχνική αυτή αναπαριστά την τριφασική τάση ως διανύσματα σε ένα επίπεδο.

Σε έναν τριφασικό μετατροπέα, για κάθε σκέλος του είτε θα είναι ενεργοποιημένο το ένα τρανζίστορ ή το άλλο, επομένως υπάρχουν οκτώ διαφορετικές καταστάσεις. Η έξι από αυτές παράγουν μη μηδενική τάση εξόδου, ενώ οι άλλες δύο παράγουν μηδενικές τάσεις εξόδου. Οι καταστάσεις αυτές αναπαρίστανται ως διανύσματα σε ένα διδιάστατο σύστημα και δημιουργούν ένα εξάγωνο σχήμα. Για να προσεγγίσει το επιθυμητό διάνυσμα της τάσης, η SV-PWM υπολογίζει σε κάθε βήμα ποια από τα μηδενικά και μη μηδενικά διανύσματα θα χρησιμοποιηθούν και για πόσο χρόνο. Με βάση τους αλγόριθμους που θα τα υπολογίσουν, τα διανύσματα αυτά ενεργοποιούνται για ορισμένο χρόνο εντός της περιόδου και ως αποτέλεσμα δημιουργείται μια κυματομορφή τάσης πολύ κοντά στην επιθυμητή ημιτονική τάση.

### 3.3 Εφαρμογές PWM

Η τεχνική PWM χρησιμοποιείται σε ένα εύρος ηλεκτρονικών εφαρμογών λόγω της υψηλής απόδοσης, της χαμηλής απώλειας ισχύος και της ικανότητας για ακριβή έλεγχο της ενέργειας.

Κάποιες από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν PWM τεχνική είναι:

- Στις τηλεπικοινωνίες για την κωδικοποίηση του σήματος
- Στους κινητήρες για τη διαχείριση της ροπής και τη ρύθμιση της τάσης.
- Στους ενισχυτές ήχου
- Σε ιατρικές συσκευές
- Στα ανεμιστηράκια των υπολογιστών για την ρύθμιση της θερμοκρασίας στους επεξεργαστές
- Σε ρομποτικές εφαρμογές όπου τα PWM ελέγχουν τη θέση, την κίνηση και την περιστροφή των κινούμενων άκρων τους.
- Στους ρυθμιστές θερμοκρασίας ώστε να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία

### 3.4 Πλεονεκτήματα PWM

1. Η τεχνική PWM προστατεύει από υπερθέρμανση των ηλεκτρονικών συσκευών καθώς παρέχει την απαραίτητη ισχύ με παλμούς, μειώνοντας την ανάγκη για ψύκτρες
2. Έχει μεγάλη ακρίβεια και γρήγορο χρόνο απόκρισης, εφόσον η μέση τιμή ισχύος μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια μέσω του εύρους των παλμών.
3. Έχει πολύ μεγάλη απόδοση (περίπου 90%) με πολύ μικρές απώλειες.
4. Έχει την ικανότητα να διαχειριστεί μεγάλες ισχύς και υψηλές συχνότητες.
5. Χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές όπως στους μετατροπείς, σε κινητήρες και σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

### 3.5 Μειονεκτήματα PWM

1. Λόγω των γρήγορων εναλλαγών κατάστασης δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος.
2. Στις προχωρημένες τεχνικές, απαιτούνται σύνθετοι αλγόριθμοι κάνοντας το σύστημα πιο πολύπλοκο.

3. Λόγω της υψηλής ποιότητας που παρέχουν, χρειάζονται τα ανάλογα εξαρτήματα όπως διακόπτες IGBT, κάτι που αυξάνει το κόστος των εφαρμογών με PWM.

## Κεφάλαιο 4ο: Ελεγκτής PI

### 4.1 Εισαγωγή

Ο ελεγκτής PI είναι ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση που χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί είναι συνδυάζοντας δύο επιμέρους ελέγχους, τον αναλογικό (P) και τον ολοκληρωτικό (I).

Ο PI ελεγκτής προκύπτει από τον συνδυασμό ενός αναλογικού ελεγκτή (Proportional controller) και ενός ολοκληρωτικού ελεγκτή (Integral Controller), ο συνδυασμός των οποίων εξαλείφει τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με κάθε έναν από αυτούς.

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία ενός PI ελεγκτή πρέπει να κατανοήσουμε τη λειτουργία των επιμέρους στοιχείων του.

#### Αναλογικός ελεγκτής (Proportional controller)

Ένας αναλογικός ελεγκτής ρυθμίζει συνεχώς την έξοδο με βάση το σήμα σφάλματος που υπάρχει τη δεδομένη στιγμή. Ο αναλογικός όρος  $p$  υπολογίζει το τρέχον σφάλμα από το σημείο ρύθμισης set point και την τρέχουσα μετρούμενη έξοδο, και παράγει ένα σήμα ελέγχου ώστε να ρυθμίσει το σφάλμα.

$$C_o = K_p * e(t) \quad (4.1)$$

Όπου  $C_o$  είναι η έξοδος του ελεγκτή

$K_p$  είναι το κέρδος του ελεγκτή

$e(t)$  είναι το σφάλμα τη χρονική στιγμή  $t$ .

#### Ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral Controller)

Σε έναν ολοκληρωτικό ελεγκτή, το σφάλμα μετράται με την πάροδο του χρόνου και παράγεται ένα αποτέλεσμα με βάση το άθροισμα των προηγούμενων σφαλμάτων. Αυτό βοηθάει στην εξάλειψη του σφάλματος σταθερής κατάστασης steady-state error, το οποίο ο αναλογικός ελεγκτής δεν μπορεί να εξαλείψει.

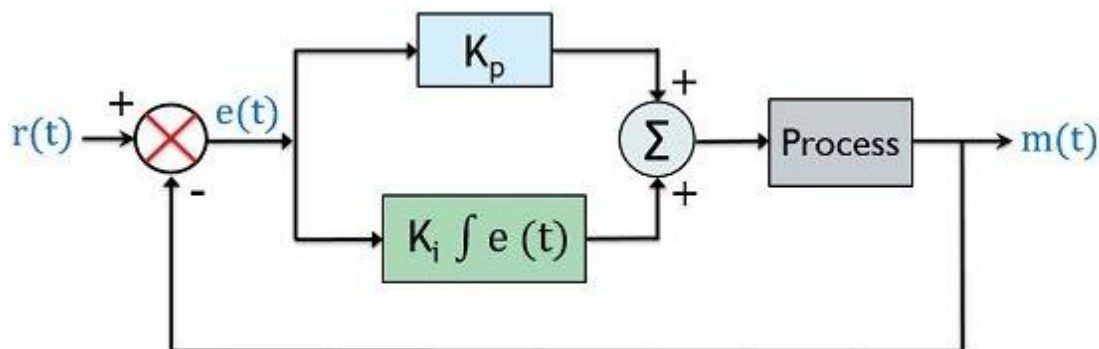
$$C_o = K_I * \int e(t) d(t) \quad (4.2)$$

Όπου το  $K_I$  συμβολίζει το κέρδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή.

Από το συνδυασμό των δύο αυτών ελεγκτών προκύπτει ο αναλογικός ολοκληρωτικός ελεγκτής και η έξοδος του ορίζεται με τη μαθηματική εξίσωση

$$C_o = K_p * e(t) + K_I * \int e(t) d(t) \quad (4.3)$$

## 4.2 Διάγραμμα και λειτουργία ενός PI ελεγκτή



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ενός αναλογικού - ολοκληρωτικού ελεγκτή

Για τη ρύθμιση σε ένα σύστημα ελέγχου, ο ελεγκτής PI ξεκινά υπολογίζοντας το σφάλμα μεταξύ της εξόδου και του set point. Έπειτα πολλαπλασιάζει το σφάλμα αυτό με τον συντελεστή κέρδους και δημιουργεί άμεσα ένα σήμα το οποίο είναι ανάλογο του σφάλματος.

Το ολοκληρωτικό σκέλος του ελεγκτή, υπολογίζει το άθροισμα όλων των προηγούμενων σφαλμάτων και με βάση το κέρδος του, υπολογίζει ένα δεύτερο σήμα. Τα δύο αποτελέσματα του αναλογικού και ολοκληρωτικού σκέλους αθροίζονται μεταξύ τους δημιουργώντας την επιθυμητή έξοδο του ελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η έξοδος του συστήματος ελαχιστοποιώντας το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου και διατηρώντας το επιθυμητό set point.

## 4.3 Συντονισμός ενός ελεγκτή PI

Για να συντονιστεί ένας ελεγκτής PI πρέπει τα κέρδη  $K_p$  και  $K_i$  να προσαρμοστούν ανάλογα, ώστε η έξοδος του ελεγκτή να εξαλείφει τα σφάλματα που προκύπτουν, αλλά και να αποφευχθεί ενδεχόμενη ταλάντωση. Για τη ρύθμιση του ελεγκτή αρχικά, θεωρούμε το  $K_i$  ως μηδέν. Σταδιακά αυξάνουμε την τιμή του  $K_p$  μέχρι να επιτευχθεί γρήγορη απόκριση του συστήματος χωρίς μεγάλη υπέρβαση. Στη συνέχεια αυξάνουμε την τιμή του  $K_i$  μέχρι να εξαλειφθεί το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Ελέγχουμε τον ελεγκτή κάτω από διάφορες συνθήκες ώστε να εξασφαλίσουμε τη γρήγορη απόκριση του ελεγκτή χωρίς τη δημιουργία ταλαντώσεων στην έξοδο.

## 4.4 Εφαρμογές ενός ελεγκτή PI

Οι ελεγκτές PI χρησιμοποιούνται σε διάφορα συστήματα ελέγχου.

- Συστήματα ελέγχου διεργασιών όπως της θερμοκρασίας σε φούρνους και της πίεσης σε σωλήνες και δεξαμενές.
- Έλεγχος ταχύτητας κινητήρα, όπως σε ανεμιστήρες ή αντλίες.
- Ηλεκτρονικά ισχύος, στους ρυθμιστές τάσης ή σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών με inverter.
- Στα αεροσκάφη στη χρήση του αυτόματου πιλότου ώστε να διατηρείται στα κατάλληλα επίπεδα η ταχύτητα, η κλίση και το υψόμετρο.
- Σε συστήματα ήχου, για την εξάλειψη του θορύβου.
- Στη ρομποτική, για την κίνηση και τη σωστή τοποθέτηση των ρομποτικών βραχιόνων.

#### 4.5 Πλεονεκτήματα ελεγκτή PI

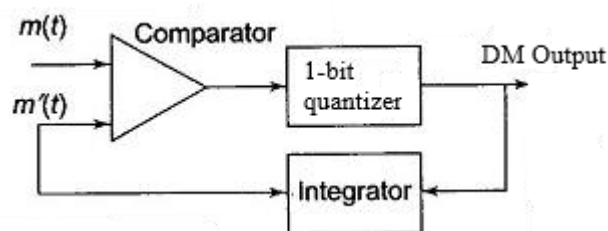
1. Είναι αρκετά απλός στην υλοποίηση του καθώς απαιτεί δύο παραμέτρων, τον συντελεστή κέρδους  $K_p$  και τον συντελεστή ολοκλήρωσης  $K_i$ .
2. Έχει πολύ γρήγορη απόκριση σε σχέση με άλλους ελεγκτές όπως PD ή PID ελεγκτές.
3. Εξαλείφει πλήρως το μόνιμο σφάλμα (steady-state error).
4. Είναι ευέλικτος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές.
5. Μπορούν να ανταπεξέλθει σε αποκλίσεις του συστήματος χωρίς να χρειαστεί να επαναρυθμιστεί.

#### 4.6 Μειονεκτήματα ελεγκτή PI

1. Πιθανόν να μην είναι ο κατάλληλος τύπος ελεγκτή για πολύπλοκες εφαρμογές όπως και για εφαρμογές όπου το set point αλλάζει γρήγορα
2. Σε κάποιες περιπτώσεις προκαλεί υπέρβαση πριν σταθεροποιηθεί.
3. Δεν έχει σκέλος παραγωγίσις (όπως ένας PID), που σημαίνει πως δεν μπορεί να προβλέψει μελλοντικά σφάλματα και συνεπώς μπορεί να δημιουργηθούν ταλαντώσεις ή αργές αντιδράσεις.
4. Παρ' όλο που είναι απλός στην υλοποίηση του, είναι δύσκολη η ρύθμιση των δύο συντελεστών κυρίως σε πολύπλοκα συστήματα. Αν οι παράμετροι αυτοί δεν υπολογιστούν σωστά, τότε το σύστημα θα είναι ασταθές ή αργό.

## Κεφάλαιο 5ο: Delta Modulator

Ο διαμορφωτής Δέλτα ή αλλιώς Delta Modulator, είναι ένα είδος κυκλώματος που μετατρέπει αναλογικό σήμα σε ψηφιακό ή το αντίστροφο. Χρησιμοποιείται στην επεξεργασία σήματος και στις τηλεπικοινωνίες για την ψηφιακή αναπαράσταση αναλογικών σημάτων, όπου η ποιότητα του σήματος δεν είναι σημαντική. Η διαφορά μεταξύ διαδοχικών δειγμάτων του σήματος, κωδικοποιείται σε δεδομένα n-bit, διαμορφώνοντας έναν διαφορικό παλμικό κώδικα (Differential pulse code modulation DPCM). Πρακτικά, ένας Delta Modulator κωδικοποιεί το σφάλμα μεταξύ δύο σημάτων σε 1 bit, εξοικονομώντας έτσι εύρος ζώνης.

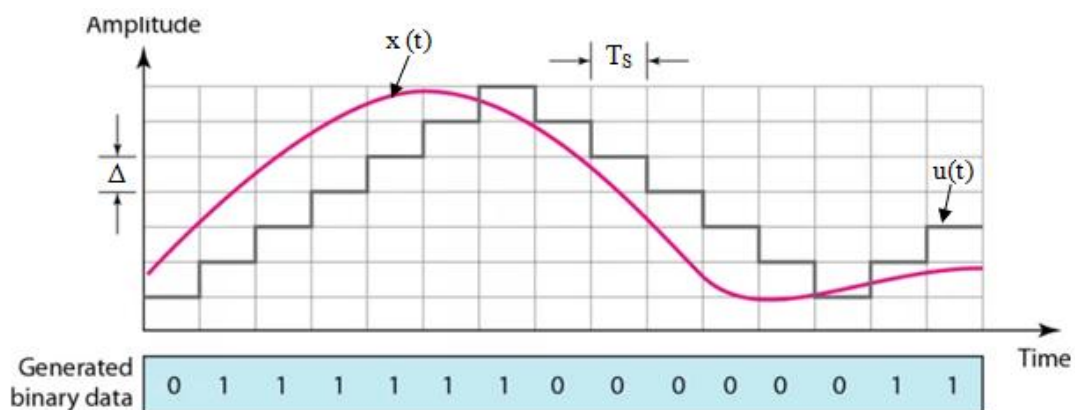


Εικόνα 5.1: Δομή ενός διαμορφωτή δέλτα

Ένας διαμορφωτής δέλτα αποτελείται από:

- Ολοκληρωτής: Ο ολοκληρωτής υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ του προηγούμενου και του τρέχοντος δείγματος.
- Συγκριτής: Ο συγκριτής συγκρίνει το σήμα εισόδου με την έξοδο του ολοκληρωτή και το αποτέλεσμα είναι η κατεύθυνση του σήματος.
- Κβαντιστής: Ο κβαντιστής παράγει το bit (0 ή 1) ανάλογα με το αν το σήμα εισόδου είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από το προβλεπόμενο σήμα.

Ο διαμορφωτής δέλτα μεταδίδει ένα bit ανά δείγμα, συγκρίνοντας το τρέχον δείγμα με το προηγούμενο και μεταδίδει (1) ή (0) υποδεικνύοντας αν το σήμα αυξάνεται ή μειώνεται. Έτσι δημιουργείται ένα ψηφιακό σήμα που μοιάζει με σκάλα, το οποίο ακολουθεί την κυματομορφή της εισόδου.



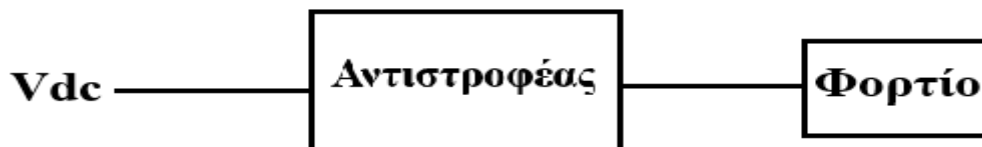
Εικόνα 5.2: Έξοδος διαμορφωτή δέλτα σε σύγκριση με την είσοδο

## Κεφάλαιο 6ο: Μετατροπείς – Αντιστροφείς

### 6.1 Εισαγωγή στους Μετατροπείς

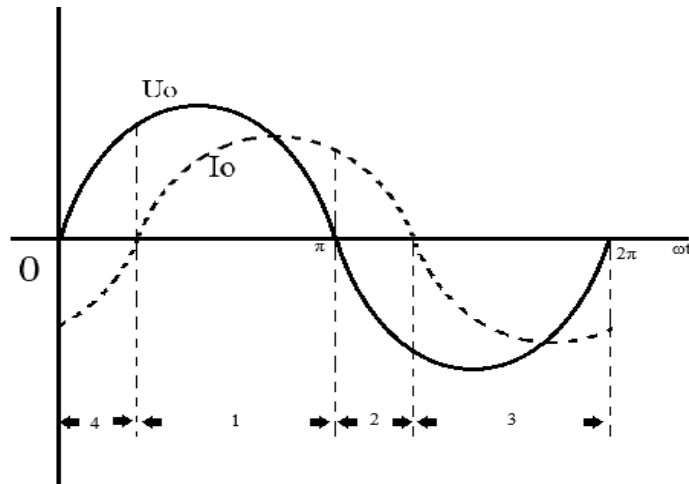
Οι αντιστροφείς (inverters), είναι ηλεκτρονικές συσκευές οι οποίες μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα DC σε εναλλασσόμενο ρεύμα AC. Κυκλώματα μετατροπέων είναι υπεύθυνα για την οδήγηση ηλεκτρικών κινητήρων όπου είναι απαραίτητος ο έλεγχος της ταχύτητας και της ροπής, ώστε να μην υπάρχει σπατάλη ενέργειας, καθώς και για εφαρμογές όπου χρειάζεται εναλλασσόμενη ενέργεια από DC πηγή, όπως οι μπαταρίες και τα φωτοβολταϊκά.

Η κύρια λειτουργία ενός αντιστροφέα, είναι η μετατροπή συνεχούς τάσης σε μια σταθερή εναλλασσόμενη τάση, την οποία επιτυγχάνει με το να ανοιγοκλείνει με μεγάλη ταχύτητα τους διακόπτες που επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος από τη DC είσοδο, δημιουργώντας έτσι μια κυματομορφή. Οι μετατροπείς σχεδιάζονται για να παράγουν ισχύ που ταιριάζει με τα χαρακτηριστικά τάσης και συχνότητας που απαιτεί το εκάστοτε κύκλωμα. Ένα τυπικό σχηματικό ενός κυκλώματος αντιστροφέα απεικονίζεται στην εικόνα 6.1.



Εικόνα 6.1: Δομή κυκλώματος αντιστροφέα

Στο σχήμα 6.2, απεικονίζεται η φιλτραρισμένη τάση και το ρεύμα εξόδου ενός μονοφασικού μετατροπέα, ο οποίος τροφοδοτεί επαγωγικό φορτίο. Στα χρονικά διαστήματα 1 και 3, το γινόμενο της στιγμιαίας τάσης και του στιγμιαίου ρεύματος, είναι θετικό. Δηλαδή η ισχύς είναι θετική άρα ρέει από την DC είσοδο προς την AC έξοδο, και ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας. Αντίθετα, στα διαστήματα 2 και 4, το γινόμενο είναι αρνητικό άρα η ισχύς ρέει από την AC έξοδο προς την DC είσοδο και ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής. Ο λόγος που ο μετατροπέας χαρακτηρίζεται ως αντιστροφέας είναι επειδή η μέση ισχύς σε μία περίοδο είναι θετική, άρα ρέει από την είσοδο προς την έξοδο, οπότε ο μετατροπέας λειτουργεί στο μεγαλύτερο διάστημα ως αντιστροφέας.



Εικόνα 6.2: Κυματομορφές τάσης - ρεύματος μονοφασικού αντιστροφέα

## 6.2 Τύποι Μετατροπέων

Θα ξεχωρίσουμε τους τύπους μετατροπέων με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα:

### 1. Ανάλογα με την είσοδο του μετατροπέα

#### I. Μετατροπέας πηγής τάσης

Όταν η είσοδος του μετατροπέα είναι μια πηγή σταθερής συνεχής τάσης DC, αυτός ονομάζεται μετατροπέας πηγής τάσης. Ένας μετατροπέας πηγής τάσης έχει στην είσοδο του μια DC πηγή με μηδενική (ιδανικά) αντίσταση. Στην πραγματικότητα η σύνθετη αντίσταση της πηγής δεν είναι μηδενική αλλά θεωρείται αμελητέα. Η συνεχής τάση εισόδου προέρχεται από μπαταρίες, από φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή συνηθέστερα από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου. Σε κυκλώματα με τέτοιους μετατροπείς, η τάση εξόδου AC καθορίζεται μόνο από τους ημιαγωγούς του Inverter και την τάση της DC πηγής.

#### II. Μετατροπέας πηγής ρεύματος

Όταν η είσοδος του μετατροπέα είναι μια πηγή σταθερού συνεχούς ρεύματος, αυτός ονομάζεται μετατροπέας πηγής ρεύματος. Η πηγή ρεύματος έχει άπειρη εσωτερική αντίσταση και συνδέεται στον μετατροπέα μέσω ενός μεγάλου πηνίου. Το ρεύμα εξόδου που παράγει ο Inverter, εξαρτάται από τους ημιαγωγούς του Inverter και την DC πηγή που εφαρμόζεται. Οι μετατροπείς πηγής ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως στον έλεγχο των ac κινητήρων πολύ μεγάλης ισχύος.

### 2. Ανάλογα με το φορτίο

#### I. Μονοφασικός μετατροπέας

Οι μονοφασικοί μετατροπείς μετατρέπουν την DC είσοδο σε μονοφασική έξοδο. Η έξοδος του μετατροπέα είναι μία φάση με συχνότητα 50Hz ή 60Hz ενώ η τάση έχει πολλές ονομαστικές τιμές οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν με τη χρήση κυκλωμάτων buck-boost ή step-up. Λόγω των μεγάλων απωλειών σε αυτά τα κυκλώματα, οι μονοφασικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με χαμηλά φορτία. Εφαρμογές που βρίσκουμε μονοφασικούς μετατροπείς είναι φωτοβολταϊκά που τροφοδοτούν οικίες και στα UPS (Uninterruptable Power Supplies).

## II. Τριφασικός μετατροπέας

Οι τριφασικοί μετατροπέες μετατρέπουν την DC ισχύ της εισόδου σε τριφασική. Παράγουν τρεις κυματομορφές με ίδια τάση και συχνότητα και μετατοπισμένες κατά  $120^\circ$  η μία από την άλλη. Λόγω της αποτελεσματικότητας των μετατροπέων αυτών, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με μεγάλα φορτία. Τέτοιες εφαρμογές είναι στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπου γίνεται απευθείας παροχή στο δίκτυο της ΔΕΗ, σε ηλεκτροκίνητα οχήματα και σε εφαρμογές HVDC (High Voltage Direct Current).

### 3. Ανάλογα με την κυματομορφή εξόδου

#### I. Τετραγωνική κυματομορφή

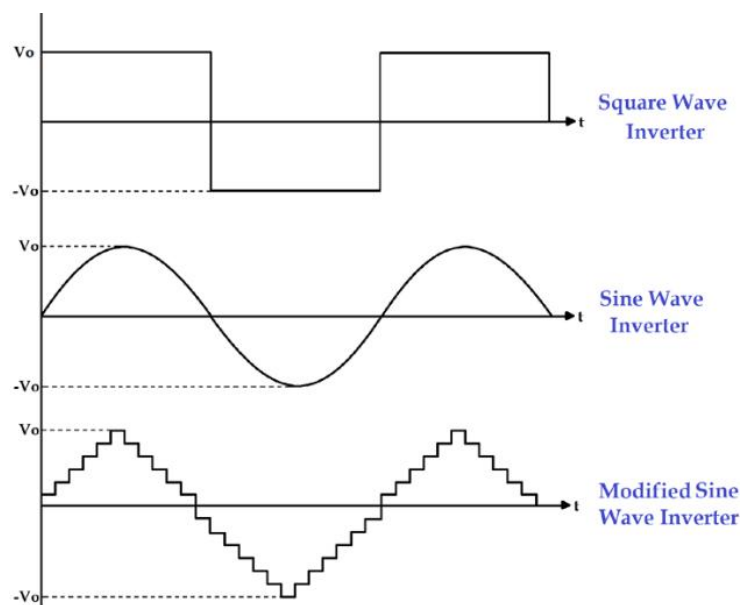
Οι μετατροπείς αυτοί είναι οι πιο απλοί μετατροπείς DC τάσης σε AC, όπου η έξοδος έχει τετραγωνική μορφή. Είναι φθηνές κατασκευές και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά εργαλεία και σε βαρέως τύπου εξοπλισμό, συσκευές που μπορούν να διαχειριστούν την κλιμακωτή έξοδο τους.

#### II. Τροποποιημένη ημιτονοειδής κυματομορφή

Η κατασκευή των μετατροπέων αυτών είναι πιο απλή από τους μετατροπείς ημιτονοειδούς κυματομορφής αλλά πιο περίπλοκη απ'τους μετατροπείς τετραγωνικής κυματομορφής. Σε αυτούς τους μετατροπείς η έξοδος είναι ένα κλιμακωτό ημιτονοειδές σήμα. Χρησιμοποιούνται σε απλά συστήματα όπως εκτυπωτές ή ραπτομηχανές, αλλά αποφεύγονται σε εφαρμογές με ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως στον τομέα του ήχου και της ιατρικής.

#### III. Ημιτονοειδής κυματομορφή

Οι μετατροπείς αυτοί μετατρέπουν την DC είσοδο σε ημιτονοειδές AC. Η έξοδος που παράγεται δεν είναι ένα ιδανικό καθαρό ημίτονο, αλλά είναι πολύ πιο ομαλό από τις εξόδους των δύο προαναφερθέντων κυματομορφών. Οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές, καθώς οι περισσότερες οικιακές συσκευές απαιτούν καθαρά ημίτονα για να λειτουργήσουν σωστά.



Εικόνα 6.3: Κυματομορφές εξόδου μετατροπέα

### 6.3 Έλεγχος των μετατροπέων πηγής τάσης

Ο έλεγχος της εξόδου ενός αντιστροφέα είναι σημαντικός ώστε να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία του κυκλώματος, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που απαιτείται σταθερή τιμή της τάσης και της συχνότητας όπως συμβαίνει στα κυκλώματα ac κινητήρων και στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για τον έλεγχο της συχνότητας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, ρυθμίζεται το πλάτος της τάσης εξόδου με τις εξής δύο μεθόδους:

➤ Με τον έλεγχο των διακοπών του αντιστροφέα με την τεχνική PWM (Pulse Width Modulation). Με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών, ο έλεγχος της τάσης εξόδου επιτυγχάνεται εντός του αντιστροφέα με τον έλεγχο της αποκοπής ή αγωγής των διακοπών του. Έτσι, η συνεχής τάση στην είσοδο των PWM αντιστροφέων είναι σταθερή. Οι πιο δημοφιλείς PWM τεχνικές που συναντάμε στους αντιστροφείς είναι:

- ✓ Η ημιτονοειδής PWM (sinusoidal PWM) - δημοφιλής σε βιομηχανικές εφαρμογές
- ✓ Η τεχνική PWM με έλεγχο του ρεύματος (current controlled PWM).
- ✓ Η PWM τεχνική εξάλειψης αρμονικών (harmonic elimination)
- ✓ Η τεχνική ελαχιστοποίησης της κυμάτωσης του ρεύματος (minimum ripple current)
- ✓ Η space vector.

➤ Ο έλεγχος της συνεχούς τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα. Στην περίπτωση αυτή, ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα της εξόδου, ενώ το πλάτος της ac τάσης εξόδου καθορίζεται από τη συνεχή τάση εισόδου. Ο έλεγχος της τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα, επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους, όπως για παράδειγμα με ένα κύκλωμα buck ή boost converter. Το κύκλωμα αυτό θα προσαρμόσει την τάση στην είσοδο του αντιστροφέα, έτσι ώστε η έξοδος του να βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα. Οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν σε χαμηλή συχνότητα, ίση με τη συχνότητα της ac τάσης εξόδου.

## 6.4 PWM Μετατροπείς

### 6.4.1 Εισαγωγή

PWM μετατροπείς ονομάζονται οι μετατροπείς που χρησιμοποιούν τεχνικές PWM για τη μετατροπή της DC εισόδου σε AC. Η τεχνολογία PWM παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης και του ελέγχου της τάσης σε έναν αντιστροφέα.

Η λειτουργία των μετατροπέων αυτών, βασίζεται στον έλεγχο του πλάτους των παλμών εξόδου. Στις τεχνικές PWM ελέγχεται η τάση και η συχνότητα της AC εξόδου, ανοιγοκλείνοντας γρήγορα την τροφοδοσία μέσω των ημιαγωγών του μετατροπέα που συνήθως αποτελείται από IGBT. Ο έλεγχος των διακοπών γίνεται μέσω ενός μικροεπεξεργαστή, ο οποίος παράγει τα PWM σήματα. Τα σήματα αυτά καθορίζουν για πόσο χρονικό διάστημα οι διακόπτες θα είναι σε κατάσταση αγωγιμότητας ή αποκοπής, και κατ' επέκταση καθορίζουν το πλάτος του παλμού εξόδου.

Τα κύρια στοιχεία που αποτελούν έναν PWM μετατροπέα είναι :

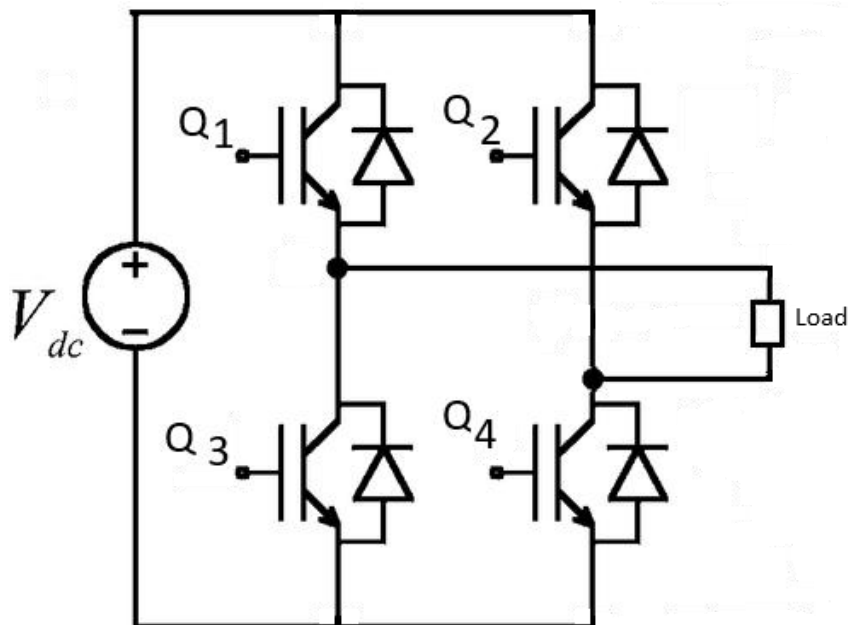
1. Μια DC πηγή όπως μια μπαταρία ή ένα φωτοβολταϊκό σύστημα
2. Ημιαγωγοί (IGBT) που αποτελούν τον μετατροπέα
3. Ο οδηγός που στέλνει τα σήματα στις πύλες των IGBT και ελέγχει την κατάσταση τους
4. Ένα φίλτρο LR στην έξοδο του μετατροπέα που εξομαλύνει τις κυματομορφές

### 6.4.2 Τύποι PWM μετατροπών

#### ➤ Μονοφασικοί PWM μετατροπείς

Σε ένα κύκλωμα μονοφασικού PWM μετατροπέα, ο μετατροπέας αποτελείται από τέσσερις διακόπτες σε διατάξη ανορθωτή γέφυρας, χρησιμοποιώντας συνήθως IGBT. Οι διακόπτες λειτουργούν σε ζεύγη, με τα μέλη κάθε ζεύγους να βρίσκονται διαγώνια μεταξύ τους.

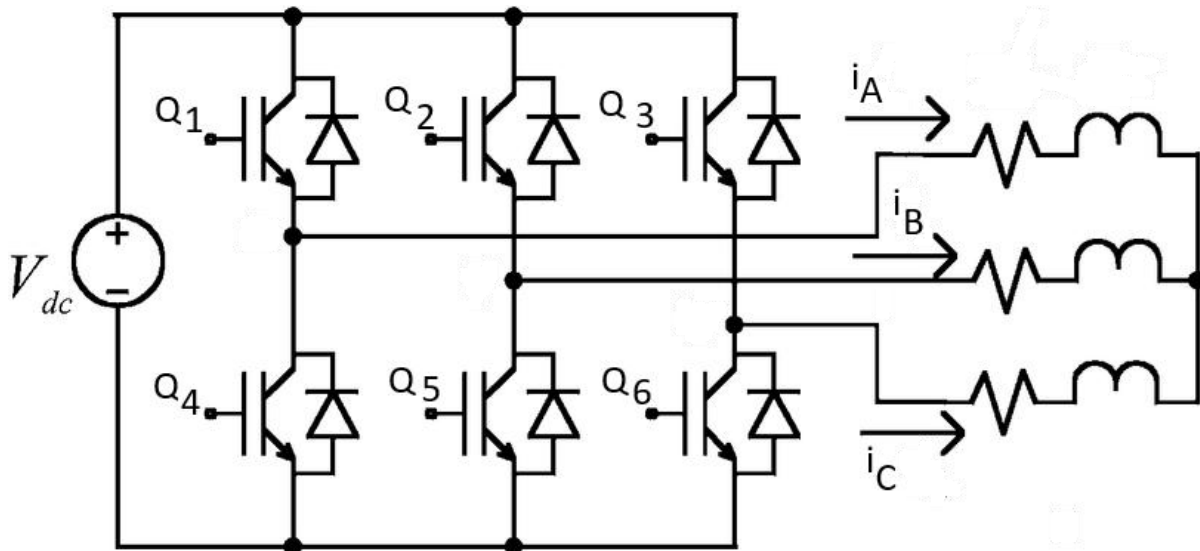
Σε κάθε ημιπερίοδο άγει ένα ζεύγος, με το πρώτο να δημιουργεί θετική πτώση τάσης στο φορτίο, ενώ το δεύτερο δημιουργεί αρνητική. Ο ελεγκτής κάθε στιγμή ελέγχει την έξοδο και αναλόγως προσαρμόζει το εύρος των παλμών ώστε ο μετατροπέας να διατηρεί στην έξοδο του το επιθυμητό πλάτος και συχνότητα.



Εικόνα 6.4: Κύκλωμα μονοφασικού PWM μετατροπέα

#### ➤ Τριφασικοί PWM μετατροπείς

Οι τριφασικοί PWM μετατροπείς έχουν μια αντίστοιχη κυκλωματική δομή με τους μονοφασικούς, με τη διαφορά ότι έχουν έξι διακόπτες αντί για τέσσερις κατανεμημένους σε τρία σκέλη. Ο ελεγκτής στέλνει τρία ξεχωριστά σήματα, ένα για κάθε φάση, τα οποία καθορίζουν την παραγωγή της τριφασικής εξόδου. Ο μετατροπέας στην περίπτωση του τριφασικού σήματος είναι λίγο πιο περίπλοκος, καθώς τα σήματα πρέπει να διατηρούν 120° διαφορά φάσης το ένα από το άλλο. Στην έξοδο το σήμα φιλτράρεται ώστε η κυματομορφή να είναι ομαλή εξασφαλίζοντας σταθερή παροχή ρεύματος. Τριφασικοί PWM μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε κυκλώματα υψηλής ισχύος όπως στη βιομηχανία και σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.



Εικόνα 6.5: Κύκλωμα τριφασικού PWM μετατροπέα

### 6.4.3 Πλεονεκτήματα PWM μετατροπέων

Τα πλεονεκτήματα στους PWM μετατροπείς είναι αρκετά σημαντικά.

Οι μετατροπείς αυτοί είναι πολύ ακριβείς όσον αφορά το πλάτος και τη συχνότητα του σήματος που παράγουν κάτι που είναι πολύ σημαντικό για αρκετές ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές και για τον έλεγχο κινητήριων συσκευών. Προσαρμόζοντας τους παλμούς στο επιθυμητό πλάτος, οι PWM μετατροπείς μπορούν να ρυθμίσουν με ακρίβεια την έξοδο τους ώστε να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Σε σύγκριση με άλλους μετατροπείς, οι PWM μετατροπείς μειώνουν σημαντικά την παραμόρφωση της κυματομορφής εξόδου που προκαλείται από τις αρμονικές. Έτσι η κυματομορφή που παράγεται είναι πιο ομαλή και πλησιάζει σημαντικά την επιθυμητή ημιτονοειδή κυματομορφή. Η παρουσία αρμονικών έχει ως αποτέλεσμα ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και ως εκ τούτου μπορεί να προκληθεί ζημιά στον εξοπλισμό του συστήματος.

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι επίσης η μεγάλη απόδοση ισχύος. Αυτό συμβαίνει διότι οι PWM μετατροπείς ελαχιστοποιούν τις απώλειες του συστήματος και με αυτόν τον τρόπο αξιοποιούν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την πηγή εισόδου τους.

### 6.5 Τριφασικός IGBT μετατροπέας πηγής τάσης με PWM έλεγχο του ρεύματος

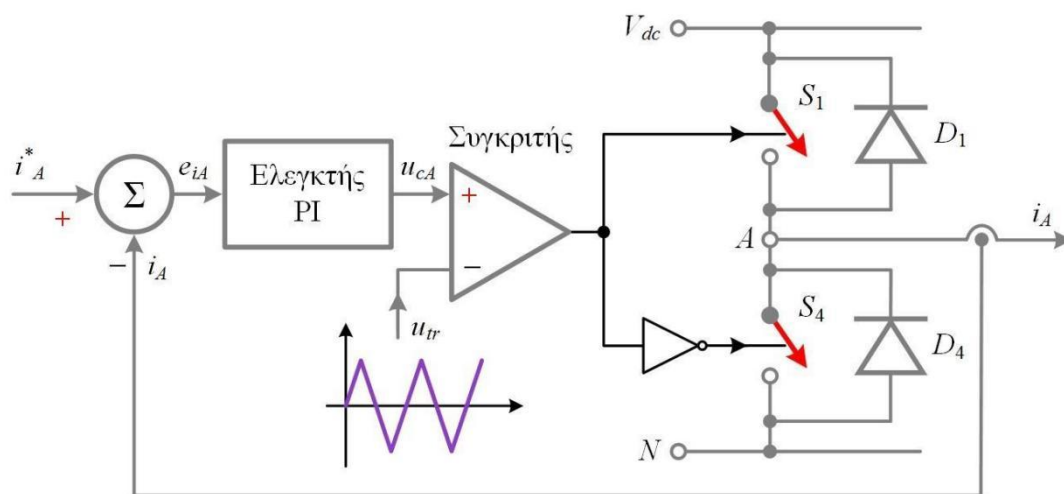
Τα συστήματα υψηλής ισχύος και οι βιομηχανικές εφαρμογές απαιτούν ακριβή έλεγχο της ισχύος για τη βέλτιστη απόδοση των συστημάτων. Ένας απ' τους κύριους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της απόδοσης είναι οι τριφασικοί μετατροπείς με IGBT με έλεγχο του ρεύματος μέσω διαμόρφωσης εύρους παλμών.

Ένας τριφασικός μετατροπέας πηγής τάσης λαμβάνει σταθερή τάση DC από μια πηγή όπως οι μπαταρίες ή τα φωτοβολταϊκά και τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενο ρεύμα τριών φάσεων. Στη διάταξη αυτή, επιλέγονται τα IGBT ως ημιαγωγικό στοιχείο καθώς μπορούν να διαχειρίζονται υψηλές τάσεις και ρεύματα, ενώ έχουν γρήγορη απόκριση και μικρές απώλειες. Ο μετατροπέας αποτελείται από έξι IGBT, με αντιπαράλληλη δίοδο, σε τρία σκέλη, ένα για κάθε φάση. Στις εξόδους του μετατροπέα είναι συνδεδεμένα τρία φίλτρα, ώστε να μειώσουν την παραμόρφωση στα AC σήματα που παράγει ο μετατροπέας.

Ο έλεγχος ρεύματος είναι πολύ σημαντικός ώστε ο μετατροπέας να ρυθμίζει με ακρίβεια την έξοδο του. Μια αρκετά ακριβής τεχνική για την εφαρμογή αυτή είναι η διαμόρφωση εύρους παλμού η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση της εξόδου του μετατροπέα προσαρμόζοντας την αγωγή ή την αποκοπή των διακοπών IGBT. Με λίγα λόγια, με τη ρύθμιση του χρόνου ενεργοποίησης των διακοπών, επιτυγχάνεται με ακρίβεια το ρεύμα της εξόδου του μετατροπέα.

Για να μπορέσει ο μετατροπέας να παράγει τα επιθυμητά ρεύματα, χρησιμοποιείται ένα σύστημα ανάδρασης. Ο ελεγκτής που λαμβάνει την πληροφορία της εξόδου, τη συγκρίνει με τα επιθυμητά ρεύματα αναφοράς. Ανάλογα με τα αποτελέσματα της κάθε φάσης, ο ελεγκτής PWM προσαρμόζει το duty cycle των IGBT ώστε η έξοδος του μετατροπέα να πλησιάσει όσο περισσότερο γίνεται τις τιμές των ρευμάτων αναφοράς.

Στον έλεγχο των ρευμάτων εξόδου χρησιμοποιείται συνήθως ο ελεγκτής υστέρησης ρεύματος (hysteresis controller) και ο PWM ελεγκτής σταθερής συχνότητας (fixed frequency PWM controller).



Εικόνα 6.6: Ελεγκτής PWM σταθερής συχνότητας

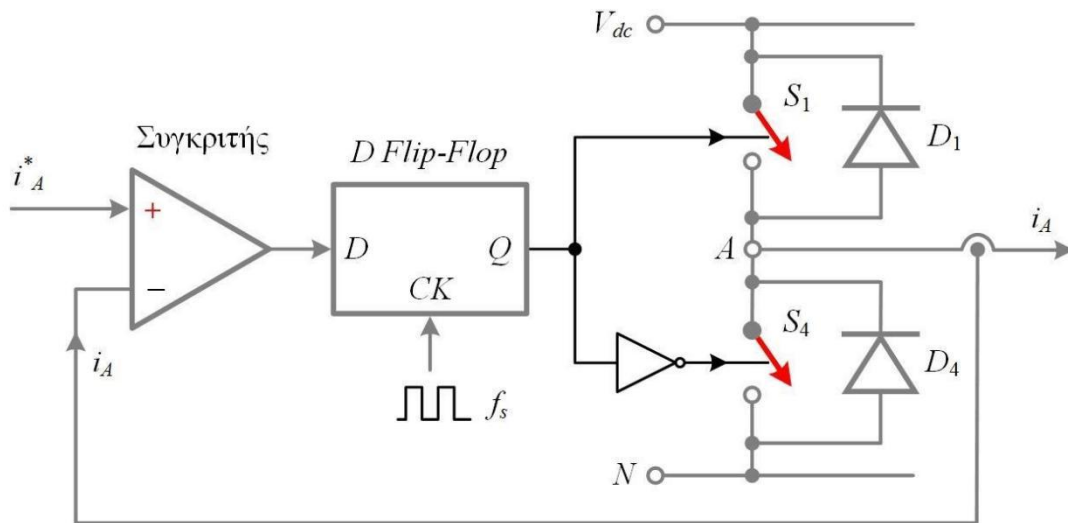
Ένα κύκλωμα με ελεγκτή υστέρησης ρεύματος απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα (εικόνα 6.6) για το σκέλος της φάσης A του τριφασικού αντιστροφέα. Αντίστοιχα επαναλαμβάνεται και για τα δύο σκέλη των φάσεων B και C. Τα τριφασικά ρεύματα αναφοράς με τα επιθυμητά πλάτη παράγονται από μια γεννήτρια ημιτονικών σημάτων. Ο συγκριτής αναλαμβάνει να συγκρίνει τα ρεύματα που παράγει η γεννήτρια με τα πραγματικά ρεύματα της εξόδου του μετατροπέα. Όταν το ρεύμα εξόδου είναι μεγαλύτερο από αυτό του ρεύματος αναφοράς, ο διακόπτης  $S_1$  οδηγείται στην αποκοπή και ο  $S_4$  στην αγωγιμότητα και με αυτόν τον τρόπο το ρεύμα  $i_A$  μειώνεται. Αντίθετα όταν το ρεύμα εξόδου είναι μικρότερο, ο  $S_1$  οδηγείται στην αγωγιμότητα ενώ ο  $S_4$  στην αποκοπή, οπότε το ρεύμα αυξάνεται. Με αυτόν τον τρόπο το ρεύμα εξόδου προσπαθεί να ακολουθήσει την κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς.

Το πρόβλημα με την τεχνική αυτή είναι ότι η συχνότητα λειτουργίας των διακοπών δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται στη διάρκεια μιας περιόδου, καθώς είναι ελάχιστη στις κορυφές του ac σήματος και μέγιστη στα σημεία τομής με το μηδέν. Επιπλέον εξαρτάται από τις αυτεπαγωγές του φορτίου.

Η τεχνική PWM σταθερής συχνότητας λύνει το πρόβλημα της μεταβολής των διακοπτικών συχνοτήτων. Το σφάλμα που προκύπτει από τη σύγκριση του πραγματικού ρεύματος του αντιστροφέα και του ρεύματος αναφοράς, επεξεργάζεται από έναν ελεγκτή PI (αναλογικό-ολοκληρωτικό). Το σήμα αυτό συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή σταθερής συχνότητας και

από τη σύγκριση αυτή προκύπτουν τα σήματα οδήγησης των διακοπών που καθορίζουν αν οι διακόπτες θα άγουν ή θα είναι σε αποκοπή. Στην τεχνική αυτή, η συχνότητα λειτουργίας καθορίζεται από τον σχεδιαστή του συστήματος, κάτι που σημαίνει πως σε κάποιες συνθήκες λειτουργίας, η συχνότητα θα είναι μικρότερη από την αναγκαία και σε κάποιες άλλες μεγαλύτερη.

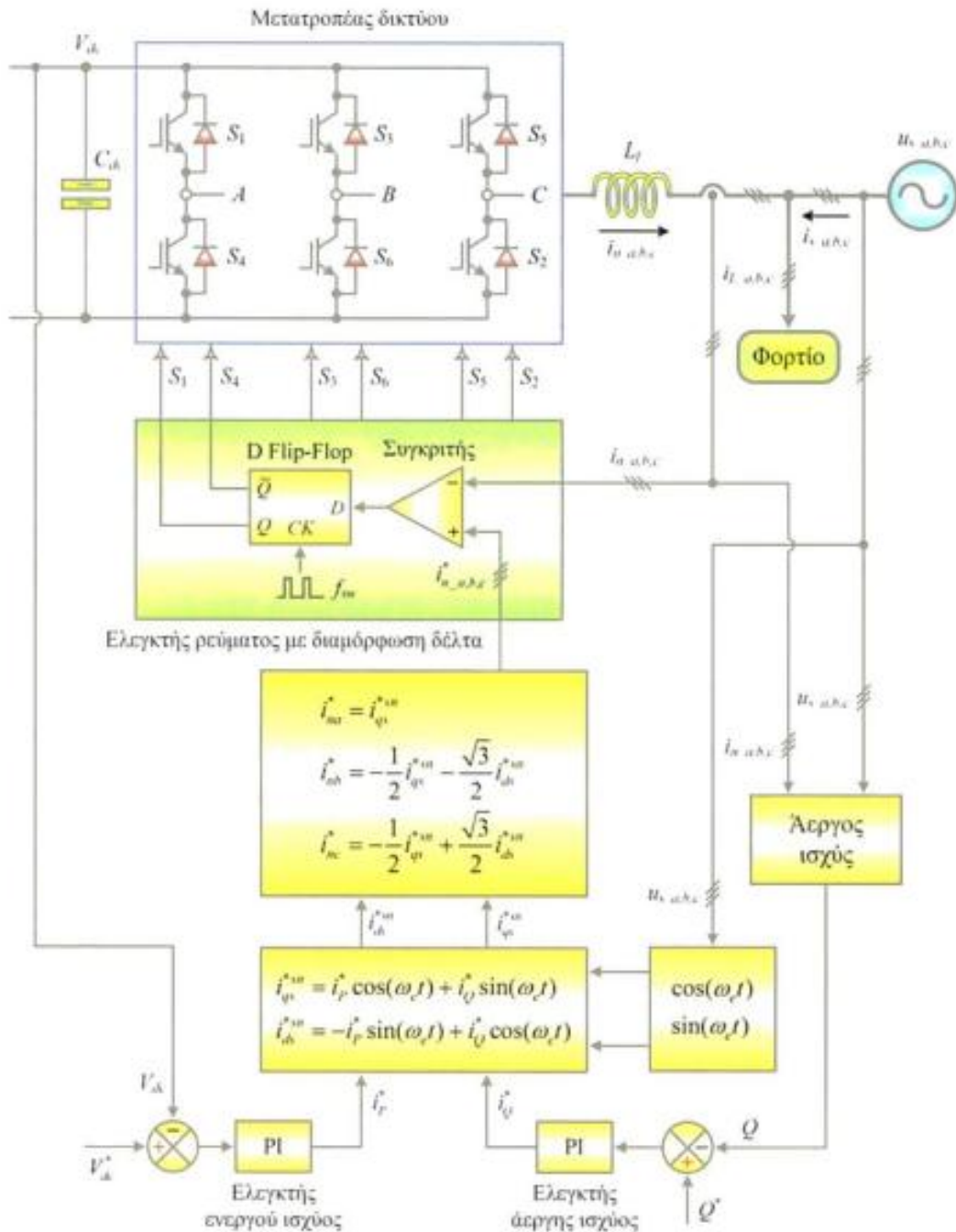
Ο ελεγκτής ρεύματος με διαμόρφωση δέλτα (Delta modulated current controller), του παρακάτω σχήματος (εικόνα 6.7), εξασφαλίζει ένα άνω όριο στη συχνότητα λειτουργίας των διακοπών. Η μέγιστη διακοπτική συχνότητα είναι η ίδια με τη συχνότητα  $f_s$  των παλμών χρονισμού του D flip-flop. Ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος, οι παλμοί στην έξοδο του διαμορφωτή δέλτα έχουν μικρότερη συχνότητα από την  $f_s$ . Η διακύμανση του ρεύματος φορτίου στον ελεγκτή αυτόν δεν είναι σταθερή, όπως στον ελεγκτή υστέρησης.



Εικόνα 6.7: Ελεγκτής με διαμόρφωση Δέλτα

## Κεφάλαιο 7ο: Κυκλωματική διάταξη

### 7.1 Λειτουργία του κυκλώματος



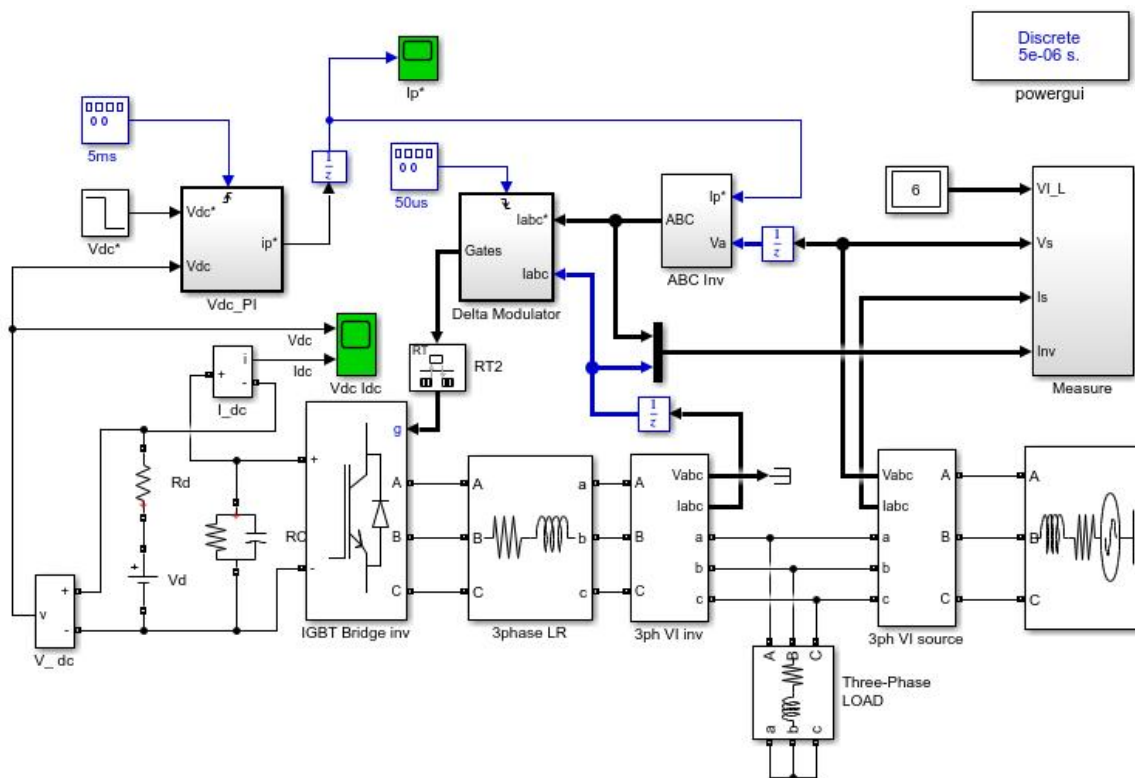
Εικόνα 7.1: Μπλοκ διάγραμμα του κυκλώματος μετατροπέα

Η κυκλωματική διάταξη του συστήματος μελέτης αυτής της εργασίας φαίνεται στην εικόνα 7.1. Η πρακτική λειτουργία του κυκλώματος έχει ως εξής :

Ο ελεγκτής PI, έχοντας ως πληροφορία την τρέχουσα τάση της μπαταρίας  $V_{dc}$  και συγκρίνοντας την με μια τάση αναφοράς  $V_{dc}^*$  που δίνουμε εμείς, κρίνει εάν η μπαταρία χρειάζεται να δώσει ή να πάρει ρεύμα (φόρτιση ή εκφόρτιση) και πόσο υψηλή θα είναι η τιμή του ρεύματος αυτού. Έτσι λοιπόν παράγεται το ρεύμα  $i_p^*$  το οποίο είναι η μία είσοδος του Διαμορφωτή Δέλτα. Με τη χρήση του  $i_p^*$  και των μαθηματικών εξισώσεων του Park, παράγονται τα τρία ρεύματα αναφοράς  $I_{ABC}^*$  τα οποία στέλνονται στον Διαμορφωτή Δέλτα. Ο διαμορφωτής λοιπόν συγκρίνει τα ρεύματα  $I_{ABC}^*$  και τα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα και ανάλογα με το αποτέλεσμα, στέλνει σήματα στις πύλες των IGBT του μετατροπέα ώστε να λειτουργήσει ως ανορθωτής ή αντιστροφέας, με βάση το αν χρειάζεται να φορτίσει ή να εκφορτίσει η μπαταρία. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα ελέγχει τη ροή της ενέργειας από το δίκτυο προς την μπαταρία, όταν αυτή χρειάζεται να φορτίσει, και από την μπαταρία προς το δίκτυο, όταν η μπαταρία είναι φορτισμένη και τα φορτία στο δίκτυο χρειάζονται ισχύ.

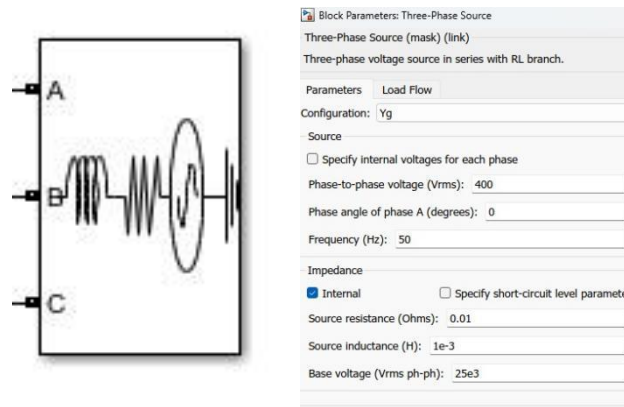
## 7.2 Επεξήγηση των μπλοκ της Simulink

Στην εικόνα 7.2 απεικονίζεται η διάταξη του κυκλώματος μετατροπέα στο περιβάλλον του Simulink. Λόγω της αρκετά πολύπλοκης λειτουργίας του, θα αναλύσουμε τη λειτουργία κάθε επιμέρους μπλοκ.



Εικόνα 7.2: Κυκλωματική διάταξη του μετατροπέα στο περιβάλλον της Simulink

Αρχικά, έχουμε το μπλοκ της τριφασικής πηγής **Three-Phase Source** με πολική τάση  $V_{rms} = 400\text{Volt}$ , συχνότητα  $50\text{Hz}$  και ωμική αντίσταση  $10\Omega\text{hm}$  με επαγωγή  $1\text{mH}$  που αντιπροσωπεύει το δίκτυο της ΔΕΗ.



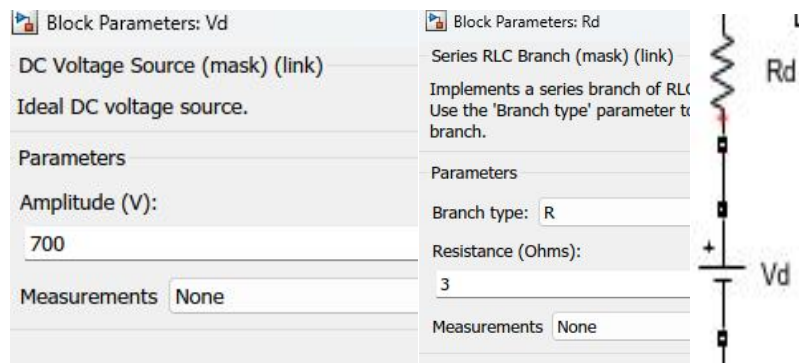
Εικόνα 7.3: Three - phase source

Το μπλοκ **Three Phase Load** αντιπροσωπεύει τα ωμικά-επαγωγικά φορτία που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.

Τα μπλοκ **3ph VI source** και **3ph VI inv** είναι δύο μετρητικά μπλοκ που μετράνε τις τάσεις και τα ρεύματα των τριών φάσεων της ΔΕΗ και του μετατροπέα αντίστοιχα.

Η **Vd** αντιπροσωπεύει την μπαταρία 700V που φορτίζει και εκφορτίζει μέσω του μετατροπέα με μια εσωτερική αντίσταση **Rd** 3Ωhm.

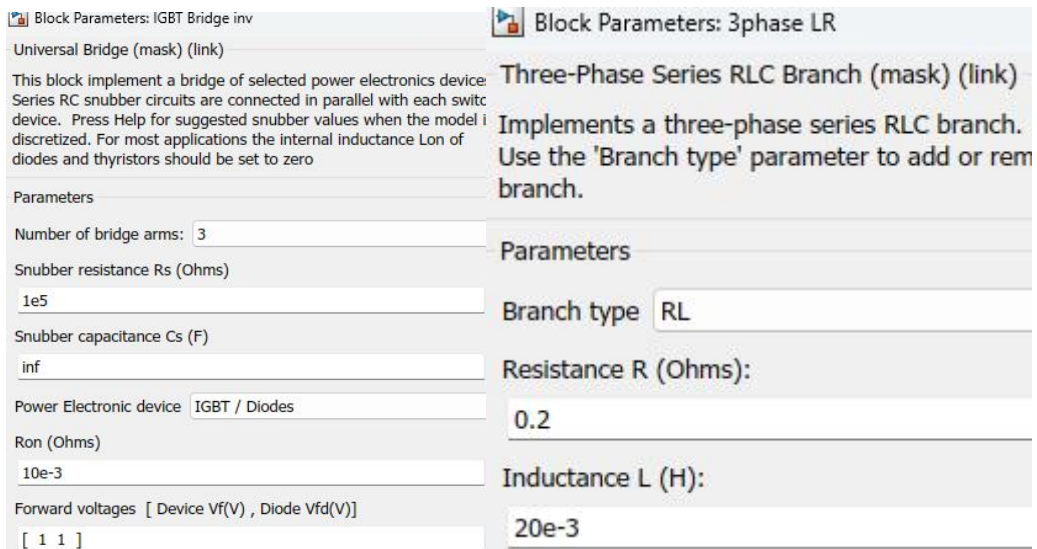
Παράλληλα στη μπαταρία, είναι συνδεδεμένος ένας πυκνωτής ο οποίος εξομαλύνει το ρεύμα της μπαταρίας. Χωρίς τον πυκνωτή το ρεύμα θα είχε μεγάλη κυμάτωση οπότε ο πυκνωτής λειτουργεί σαν φίλτρο.



Εικόνα 7.4: Μπαταρία

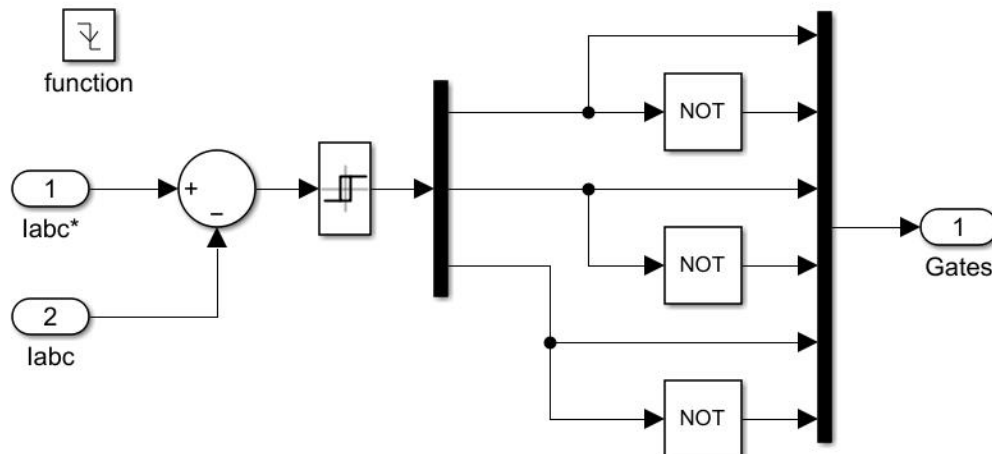
Το μπλοκ **Ignt Bridge Inv** αντιπροσωπεύει τον τριφασικό μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από έξι διακόπτες IGBT. Είναι υπεύθυνος για την μετατροπή του AC σήματος του δικτύου σε DC έξοδο για τη φόρτιση της μπαταρίας και για τη μετατροπή του DC σήματος εισόδου από τη μπαταρία σε AC έξοδο για την παροχή ισχύος πίσω στο δίκτυο. Ο μετατροπέας παίρνει τους παλμούς για τις πύλες των IGBT από έναν διαμορφωτή δέλτα **Delta Modulator**.

Επιπλέον, ο μετατροπέας συνδέεται με το δίκτυο της ΔΕΗ μέσω τριών φίλτρων **3phase LR**, ένα για κάθε φάση, τα οποία εξομαλύνουν τα ημίτονα που παράγει ο μετατροπέας.



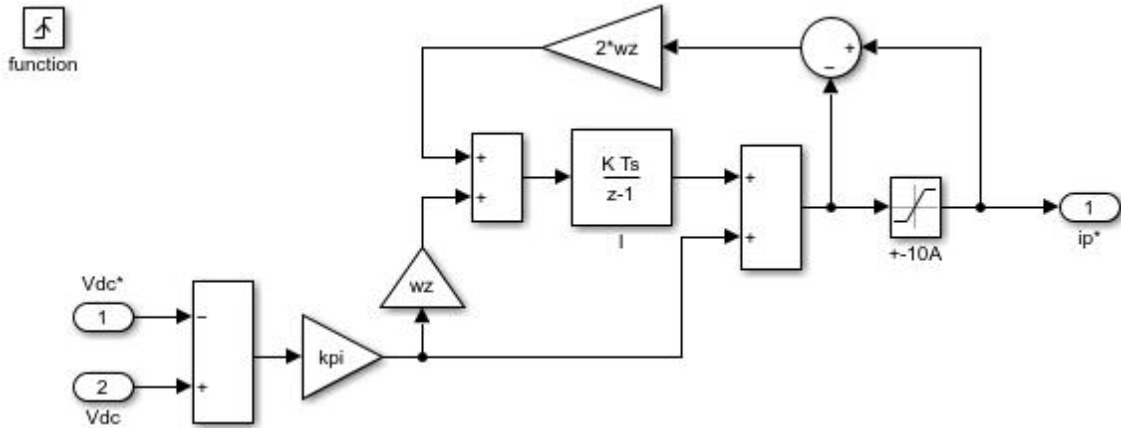
Εικόνα 7.5: Παράμετροι μετατροπέα (αριστερά) και φίλτρων (δεξιά)

Το μπλοκ **Delta Modulator** είναι υπεύθυνο για την παραγωγή των παλμών στις πύλες των IGBT του μετατροπέα, καθορίζοντας ποια θα άγουν και ποια θα βρίσκονται σε αποκοπή. Ο διαμορφωτής αυτός παίρνει στην είσοδο του τα πραγματικά ρεύματα που βγάζει στην έξοδο του ο μετατροπέας και τα ρεύματα αναφοράς που παράγει το μπλοκ ABC Inv (παρ. 7.3) και συγκρίνοντας τα, παράγει τους παλμούς για το κάθε σκέλος του μετατροπέα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή της τάσης κάθε φάσης.



Εικόνα 7.6: Μπλοκ διάγραμμα του Delta Modulator

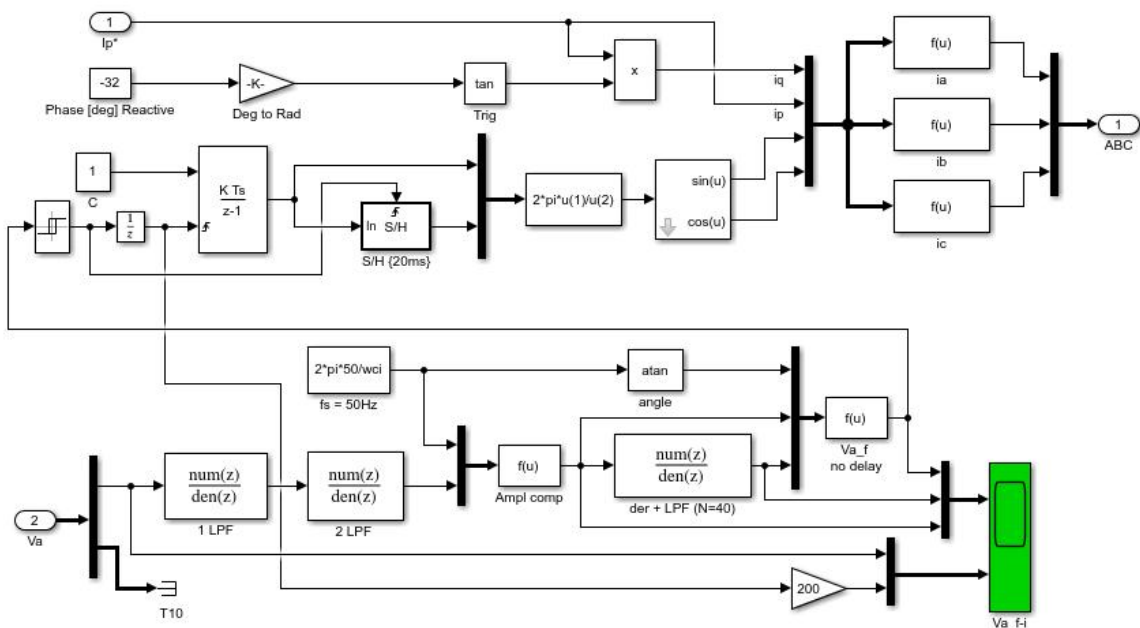
Το μπλοκ **Vdc\_PI** είναι ο αναλογικός ολοκληρωτικός ελεγκτής Proportional Integral Controller. Ως εισόδους παίρνει την τάση της μπαταρίας και την τάση αναφοράς με δύο τιμές, που ορίζουμε εμείς ως την τάση φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας. Με βάση αυτές τις δύο πληροφορίες, ο ελεγκτής ορίζει πόσο μεγάλα πρέπει να είναι τα ρεύματα στον μετατροπέα ώστε να γίνει η φόρτιση είτε η εκφόρτιση της μπαταρίας.



Εικόνα 7.7: Μπλοκ διάγραμμα του Vdc PI

Το **ABC Inv** είναι ένα αρκετά περίπλοκο μπλοκ που θα εξηγηθεί εκτενώς στην παράγραφο 7.3. Η πρακτική λειτουργία του είναι να παράξει τα τρία ρεύματα αναφοράς, με τα οποία ο Delta Modulator θα συγκρίνει τα πραγματικά ρεύματα, ώστε να στείλει τους παλμούς στους διακόπτες IGBT του μετατροπέα.

### 7.3 Παραγωγή των τριών ρευμάτων αναφοράς (ABC Inv)

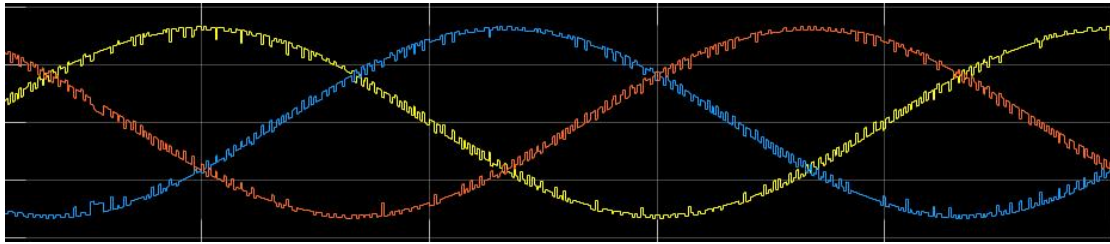


Εικόνα 7.8: Μπλοκ διάγραμμα του ABC Inv

Η λειτουργία του ABC Inv είναι αρκετά πολύπλοκη όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του (εικόνα 7.8) και βασίζεται στο μαθηματικό θεώρημα του Park. Σκοπός του μπλοκ αυτού είναι να παράξει τρία ρεύματα αναφοράς, τα οποία θα σταλούν στη συνέχεια στον διαμορφωτή δέλτα, ώστε να τα συγκρίνει με τα πραγματικά ρεύματα του Inverter και αναλόγως το αποτέλεσμα να ελέγξει τους διακόπτες του μετατροπέα.

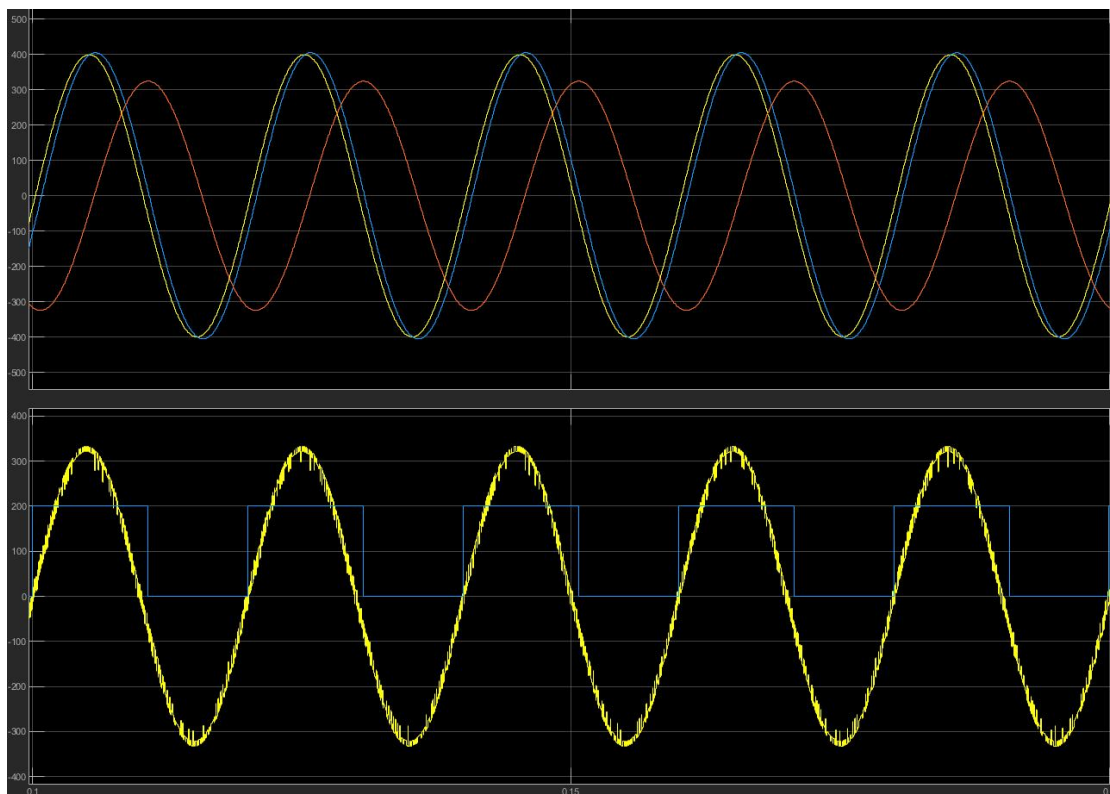
Για να λειτουργήσει το κύκλωμα μας, χρειάζεται να γνωρίζει τη φασική τάση A της ΔΕΗ, ώστε να μπορεί να συγχρονίσει με το δίκτυο. Επομένως τροφοδοτούμε τις τρεις τάσεις που μας δίνει η ΔΕΗ στην μια είσοδο του μπλοκ. Από αυτές τις τρεις ξεχωρίζουμε την φάση A και τις άλλες δύο τις

απορρίπτουμε. Λόγω του θορύβου που υπάρχει στην κυματομορφή της τάσης (εικόνα 7.9), δεν είναι ένα τέλειο ημίτονο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσια, γι' αυτό και πρέπει να γίνουν κάποιες ενέργειες ώστε να γίνει η εξομάλυνσή της.



Εικόνα 7.9: Οι τρεις φάσεις της ΔΕΗ

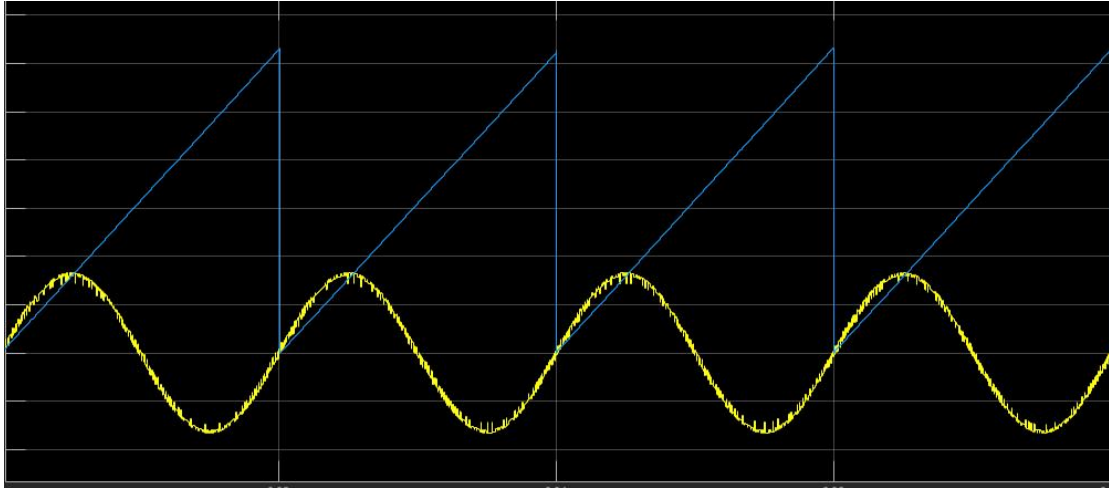
Το ημίτονο της φάσης Α περνάει από δύο χαμηλοπερατά φίλτρα για να γίνει ο καθαρισμός του από τον θόρυβο. Το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι η κόκκινη κυματομορφή (εικόνα 7.10) η οποία είναι πλέον καθαρή από θόρυβο αλλά έχει μετατοπιστεί στο χρόνο. Για να την επαναφέρουμε πρέπει να την περάσουμε από το επόμενο μπλοκ, το οποίο μας δίνει την μπλε κυματομορφή (εικόνα 7.10) η οποία έχει υποστεί σημαντική βελτίωση αλλά εξακολουθεί να έχει μια μικρή καθυστέρηση. Παίρνοντας το σήμα της μπλε κυματομορφής, το σήμα της κόκκινης και τη συχνότητα αποκοπής των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην αρχή, το μπλοκ Va\_f παράγει στην έξοδο του την κίτρινη κυματομορφή, η οποία πλέον είναι η αρχική κυματομορφή απαλλαγμένη από θόρυβο με μία αμελητέα μετατόπιση (εικόνα 7.10).



Εικόνα 7.10: Φιλτραρισμένες κυματομορφές (πάνω) και τετραγωνικός παλμός (κάτω - ενισχυμένος κατά 200)

Με την κυματομορφή αναφοράς που έχουμε παράξει, παίρνουμε μέσω ενός συγκριτή τον μπλε παλμό (εικόνα 7.10), ο οποίος ξεκινάει πάντα από το μηδέν της ημιτονοειδούς κυματομορφής.

Ο παλμός αυτός περνάει από έναν ολοκληρωτή και δημιουργείται ένα τριγωνικό σήμα (εικόνα 7.11).

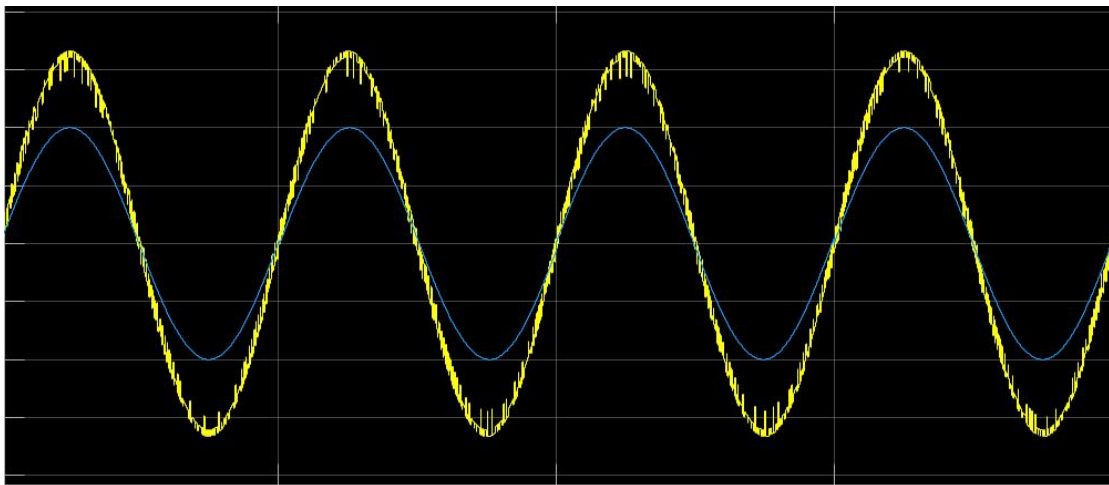


Εικόνα 7.11: Τριγωνικός παλμός (ενισχυμένος κατά 200)

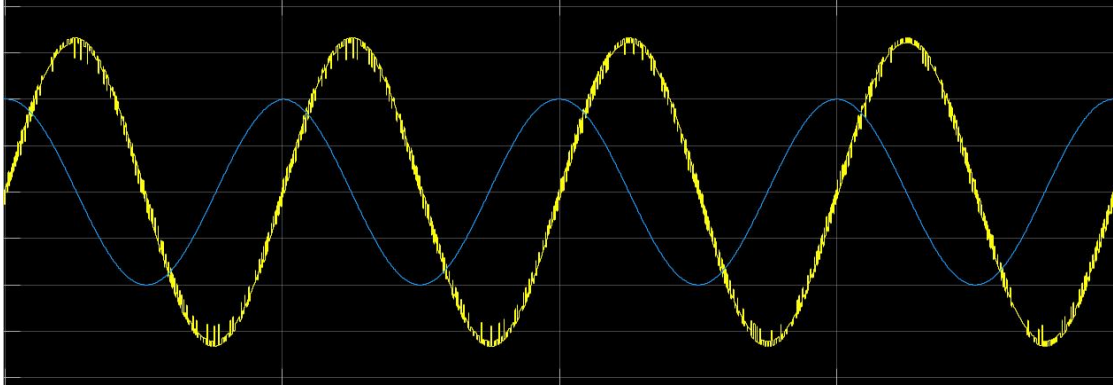
Μέσω του τριγώνου αυτού, θα παράξουμε ένα ημίτονο (εικόνα 7.12) και ένα συνημίτονο (εικόνα 7.13) τα οποία είναι συγχρονισμένα με το ημίτονο της ΔΕΗ. Το πλάτος των σημάτων αυτών είναι 1.

Ελέγχοντας το πλάτος του ημιτόνου και του συνημιτόνου από τα dc σήματα  $i_p^*$  και  $i_q^*$ , παράγονται τα τρία ημίτονα αναφοράς μέσω των μαθηματικών εξισώσεων του Park.

Το σήμα  $i_p^*$  είναι το ρεύμα ελέγχου που μας δίνει ο ελεγκτής PI και καθορίζει πόσο μεγάλα πρέπει να είναι τα ρεύματα στον Inverter. Το σήμα  $i_q^*$  παράγεται μέσω του  $i_p^*$  με τη χρήση μιας γωνίας αναφοράς.



Εικόνα 7.12: Ημίτονο (ενισχυμένο κατά 200)



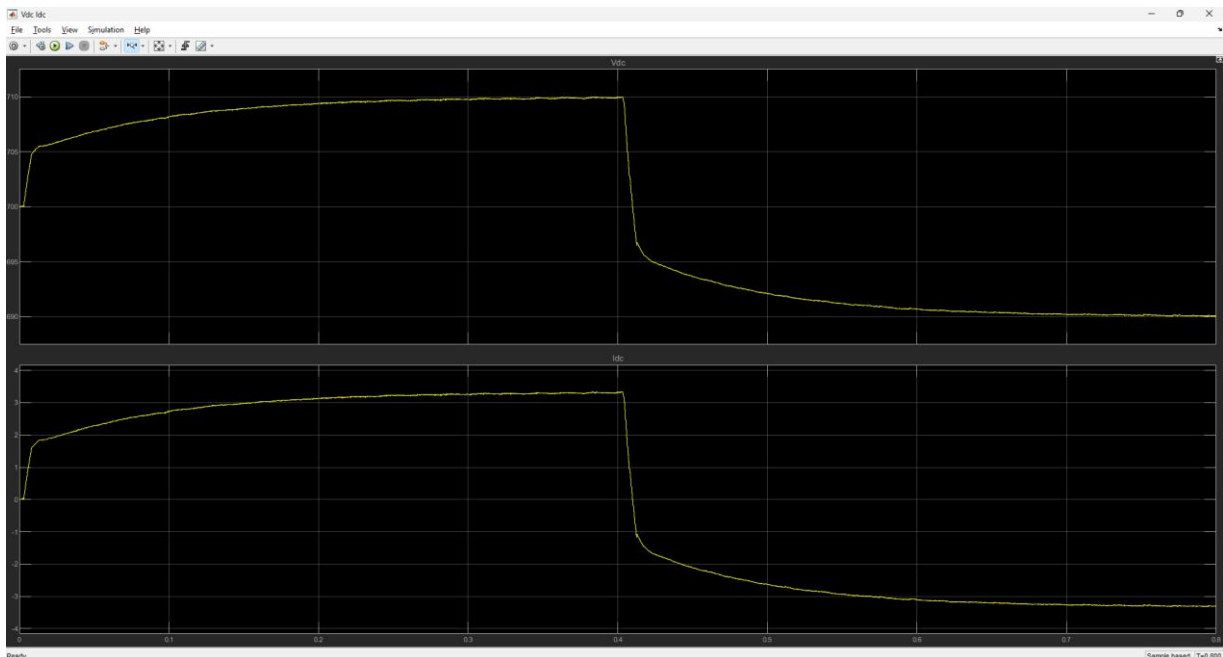
Εικόνα 7.13: Σημημίτονο (ενισχυμένο κατά 200)

## Κεφάλαιο 8ο: Προσομοιώσεις της Simulink

Στο κύκλωμα του μετατροπέα, θα παρακολουθήσουμε τις μεταβολές που θα προκύψουν στις κυματομορφές, με βάση δύο παραμέτρους, την τάση  $V_{dc}^*$  που καθορίζει τη φόρτιση του πυκνωτή και τη γωνία του  $i_p^*$  από την οποία παράγουμε το  $i_Q^*$  και κατ' επέκταση τα τρία ρεύματα αναφοράς. Στην ανάλυση των κυματομορφών, οι τιμές των ρευμάτων και τάσεων που θα αναφερθούν αφορούν τιμές peak.

### 8.1 1η προσομοίωση

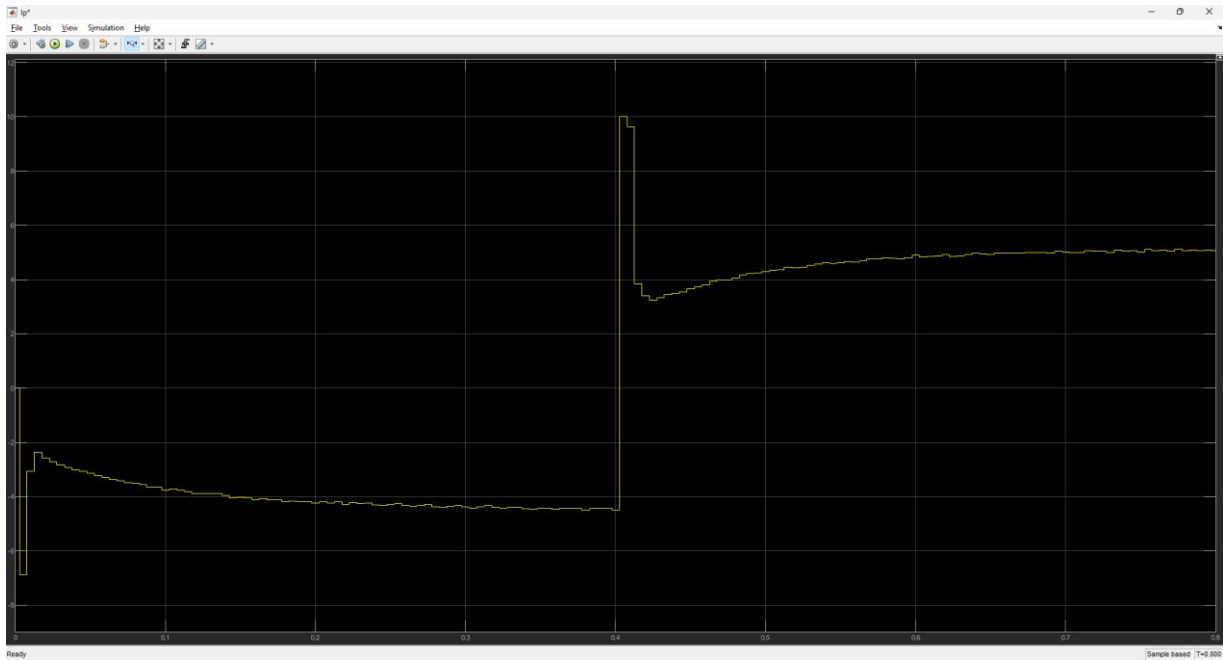
Για αρχή, οι τιμές στο  $V_{dc}^*$  θα είναι 710V και η γωνία του ρεύματος  $0^\circ$ . Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στην μπαταρία απεικονίζονται στην εικόνα 8.1.



Εικόνα 8.1: Κυματομορφές  $V_{dc}$  -  $I_{dc}$  (710V  $0^\circ$ )

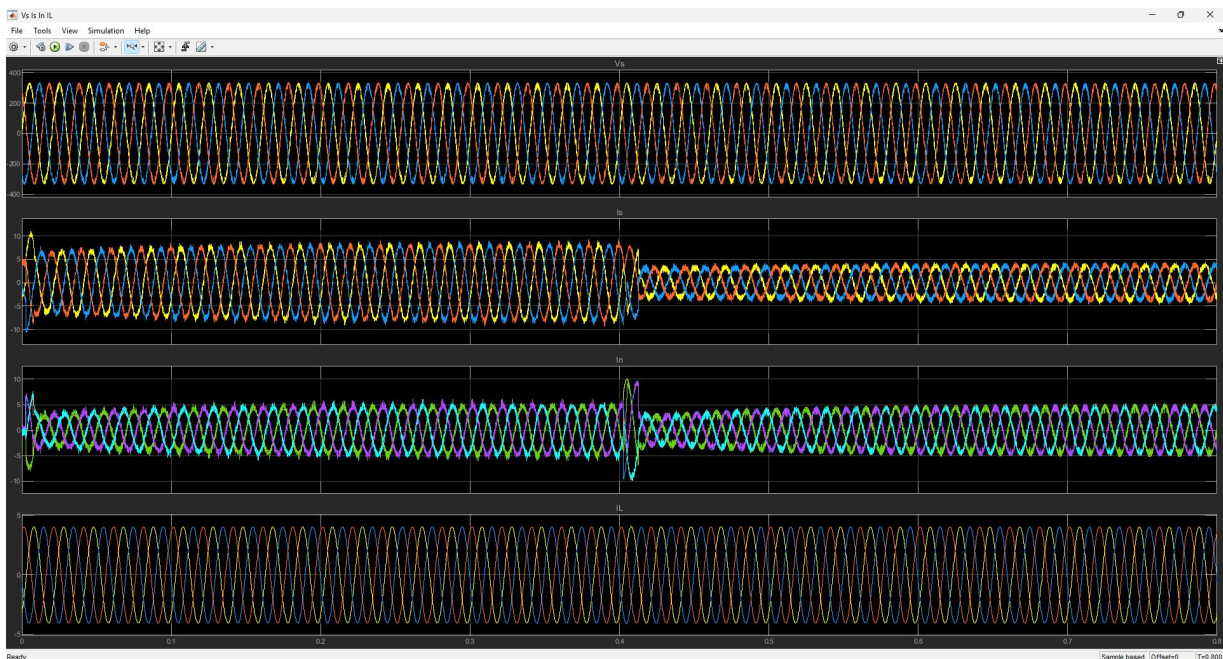
Κατά τη φόρτιση της μπαταρίας από 0 έως 0.4s, λόγω της τιμής  $V_{dc}^* = 710V$ , η μπαταρία φορτίζει με μια αρχικά απότομη αύξηση του ρεύματος στην τιμή  $I_{dc} = 1.8A$  και στην συνέχεια με ένα σταθερά αυξανόμενο ρεύμα μέχρι την τιμή 3.3A. Η τάση ακολουθεί την ίδια πορεία με το ρεύμα με αρχική αύξηση από 700V στην τιμή 705.5V και μέχρι την τιμή των 710V για τα επόμενα 0.4s (εικόνα 8.1).

Κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας από 0.4 έως 0.8s, παρατηρείται απότομη μείωση του ρεύματος από την τιμή 3.3A μέχρι τα -1.2A και στη συνέχεια σταθερή μείωση μέχρι την τιμή -3.3A. Το αρνητικό πρόσημο του ρεύματος δηλώνει την αλλαγή φοράς του, εφόσον πλέον η μπαταρία παρέχει ρεύμα στο κύκλωμα. Ομοίως με το ρεύμα, η τάση μειώνεται απότομα στην τιμή 697V και στη συνέχεια πέφτει με σταθερό ρυθμό μέχρι τα 690V (εικόνα 8.1).



Εικόνα 8.2: Κυματομορφή  $I_p^*$  (710V 0°)

Στην κυματομορφή  $I_p^*$  που αφορά το ρεύμα που υπολογίζει ο Vdc PI ως το ρεύμα που χρειάζεται η μπαταρία για τη φόρτιση ή την εκφόρτιση της, παρατηρείται ένα spike έως τα  $-6.9A$  και στη συνέχεια σταθερή καθοδική πορεία από τα  $-2.4A$  έως τα  $-4.5A$ . Στην επόμενη ημιπερίοδο, υπάρχει απότομη αύξηση στα  $10A$ , που επαναφέρεται στα  $3.3A$  και στη συνέχεια ακολουθεί σταθερή αύξηση έως τα  $5A$  (εικόνα 8.2).



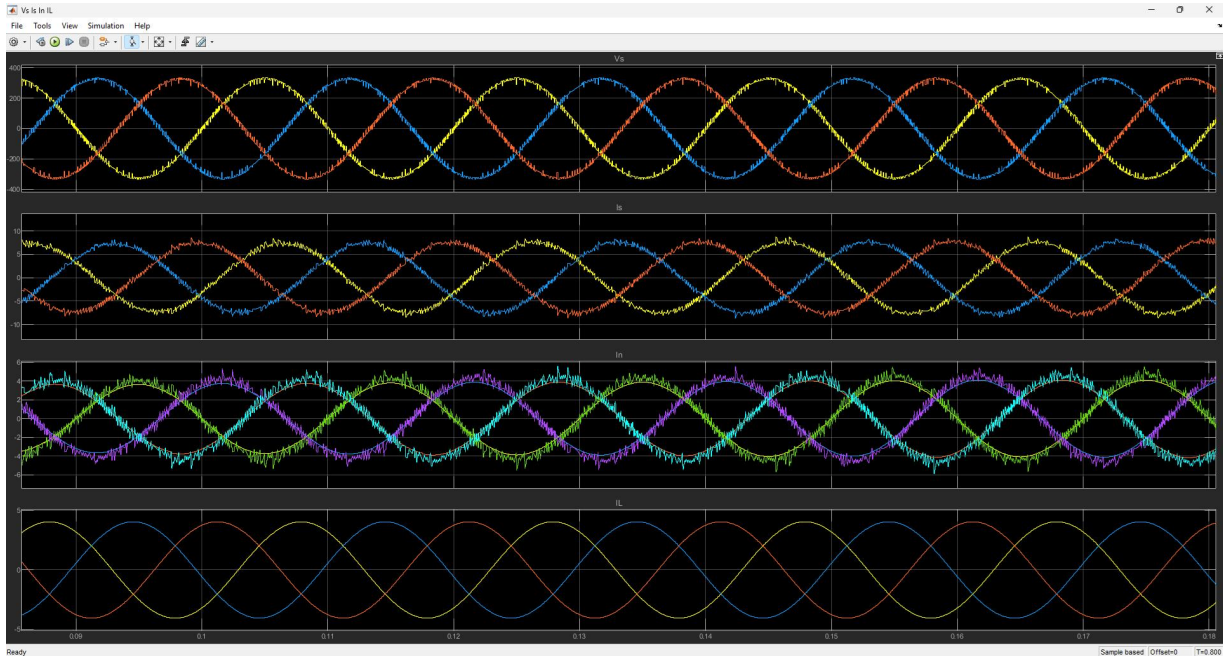
Εικόνα 8.3: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  (710V 0°)

Στην εικόνα 8.3 φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης του δικτύου, του ρεύματος του δικτύου, του ρεύματος στον μετατροπέα και του ρεύματος στο φορτίο. Το ρεύμα του δικτύου εμφανίζει μικρή αύξηση τα πρώτα  $0.2s$  από  $6A$  έως  $8A$  και παραμένει σταθερό για το υπόλοιπο της περιόδου φόρτισης της μπαταρίας. Στην εκφόρτιση της μπαταρίας, το ρεύμα  $I_s$  ακολουθεί σταθερή αύξηση από  $3A$  μέχρι  $3.9A$

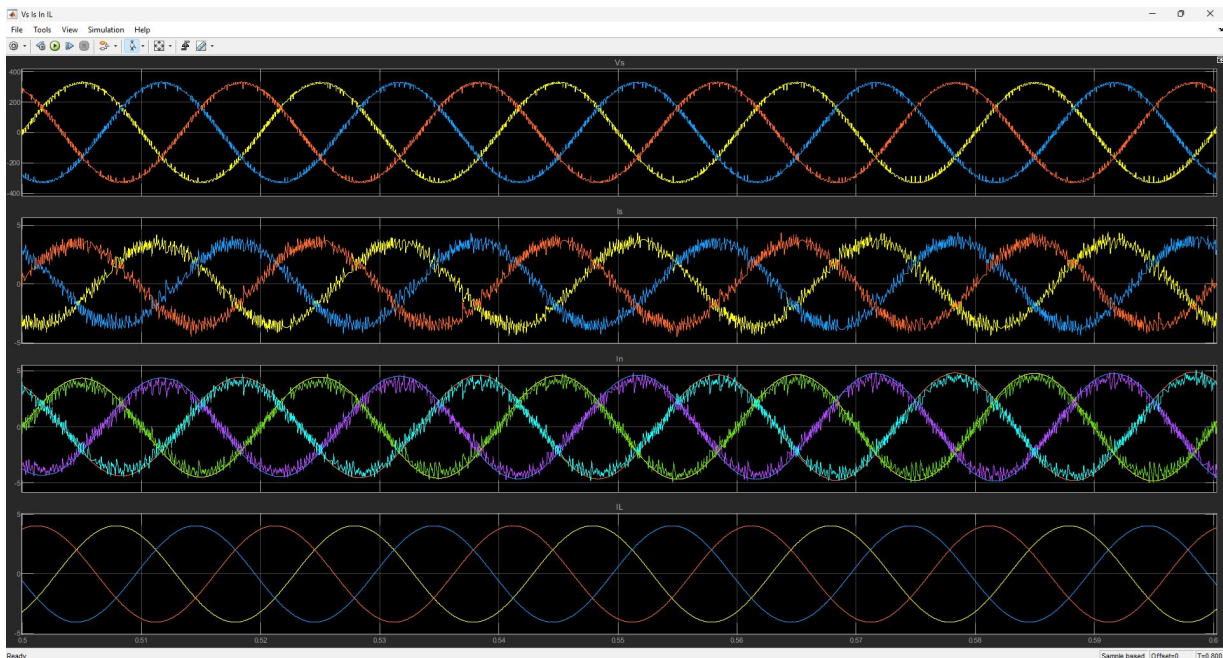
## Κεφάλαιο 8ο

Το ρεύμα του μετατροπέα κατά τη διάρκεια της φόρτισης αυξάνει σταθερά από 2.75A έως 4.7A μέχρι τα 0.2s και παραμένει σταθερό μέχρι τα 0.4s. Στην εκφόρτιση, μειώνεται στα 2.7A και αυξάνεται μέχρι την τιμή 4.5A

Παρατηρούμε επίσης πως η διαφορά φάσης της τάσης δικτύου και του ρεύματος δικτύου είναι περίπου  $20^\circ$  κατά τη φόρτιση (εικόνα 8.4) της μπαταρίας και περίπου  $130^\circ$  κατά την εκφόρτιση (εικόνα 8.5). Αντίστροφα, η τάση δικτύου με το ρεύμα του μετατροπέα έχουν διαφορά φάσης σχεδόν  $180^\circ$  κατά τη φόρτιση (εικόνα 8.4) και περίπου  $0^\circ$  κατά την εκφόρτιση (εικόνα 8.5).



Εικόνα 8.4: Διαφορές φάσεων (710V  $0^\circ$  φόρτιση)



Εικόνα 8.5: Διαφορές φάσεων (710V  $0^\circ$  εκφόρτιση)

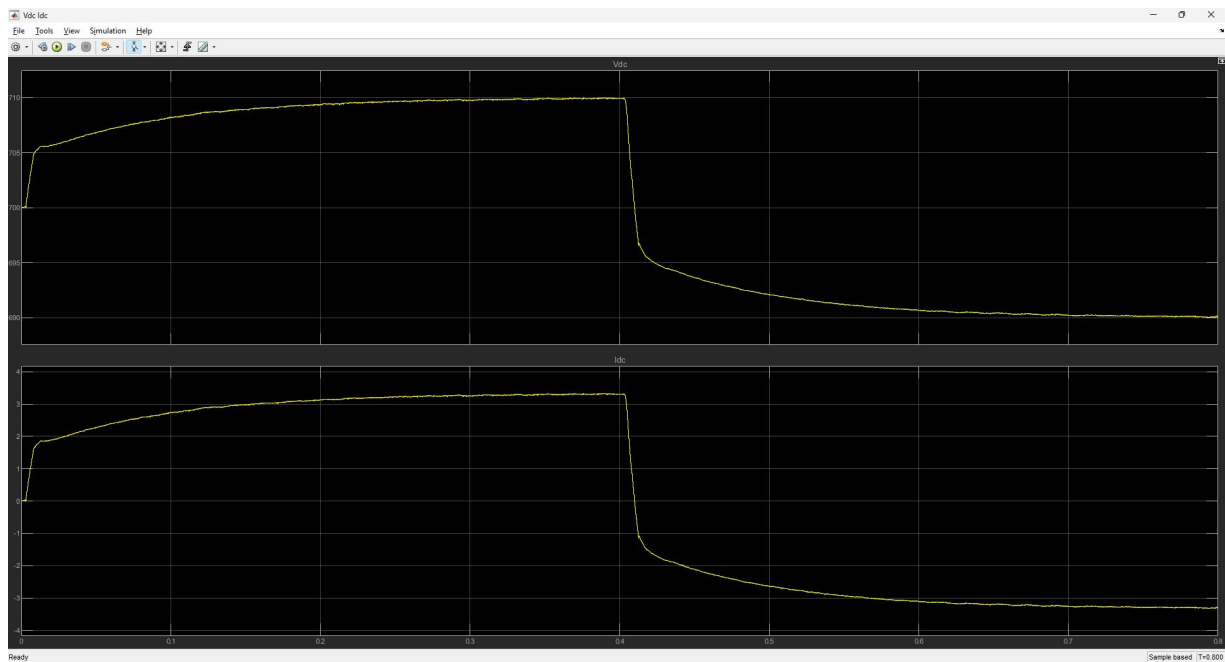
Οι κυματομορφές των ρευμάτων του φορτίου παραμένουν σταθερές καθ'όλη τη διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν, γι'αυτό και θα αγνοηθούν στις επόμενες παραγράφους.

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-1007W
	Άεργος Ισχύ	1564Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2239W
	Άεργος Ισχύ	-10.3Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1233W
	Άεργος Ισχύ	1550Var

## 8.2 2η προσομοίωση

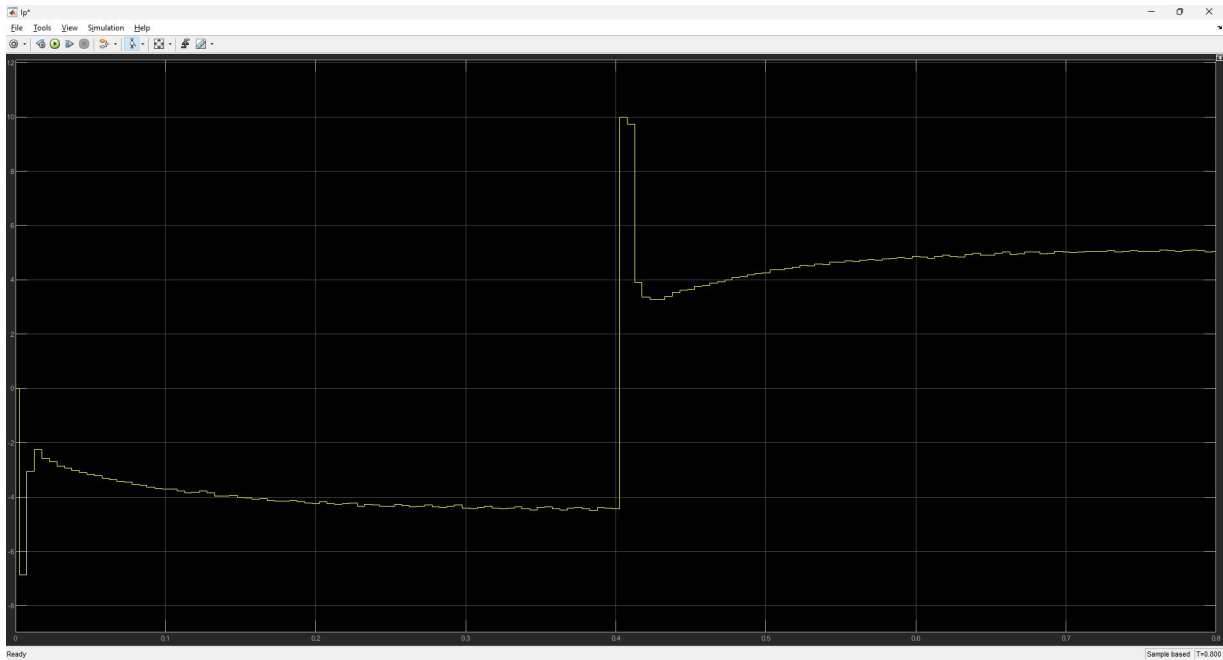
Για την επόμενη προσομοίωση, η  $V_{dc}^*$  θα παραμείνει στην ίδια τιμή (710V) και θα αλλάξει η τιμή της γωνίας σε  $-10^\circ$ .



Εικόνα 8.6: Κυματομορφές  $V_{dc}$ - $I_p$  (710V  $-10^\circ$ )

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος στη μπαταρία, είναι όμοιες με αυτές στην προηγούμενη προσομοίωση. Κατά τη φόρτιση, μετά την αρχικά απότομη αύξησή τους, αυξάνονται σταθερά μέχρι τις τιμές 710V και 3.3A. Ομοίως και στην εκφόρτιση, οι τελικές τιμές τους είναι 690V και -3.3A (εικόνα 8.6).

Η κυματομορφή του ρεύματος  $I_p^*$ , είναι όμοια με την κυματομορφή του  $I_p^*$  με γωνία  $0^\circ$ . Ακολουθεί καθοδική πορεία στην πρώτη ημιπερίοδο μέχρι την τιμή -4.5A, ενώ στη δεύτερη ημιπερίοδο αυξάνεται μέχρι την τιμή 5A (εικόνα 8.7).

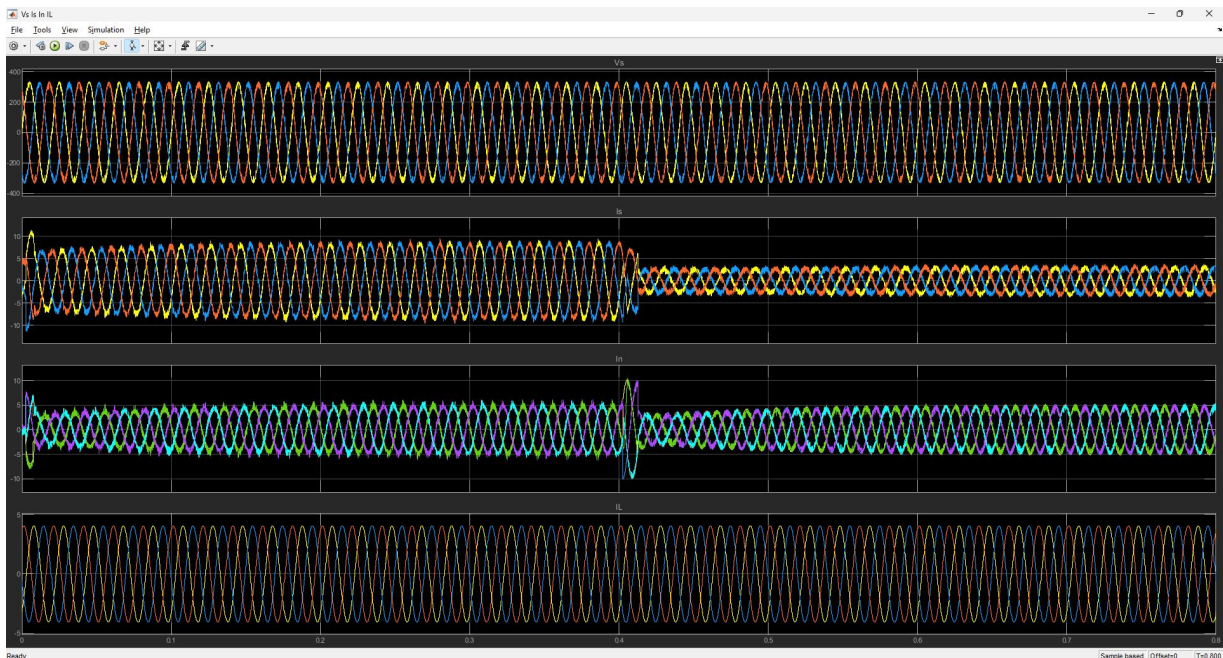


Εικόνα 8.7: Κυματομορφή  $I_r^*$  ( $710V -10^\circ$ )

Οι κυματομορφές των ρευμάτων  $I_s$  και  $I_n$  (εικόνα 8.8) όταν αλλάζουμε σε  $-10^\circ$  είναι παρόμοιες με τις κυματομορφές των  $0^\circ$  με μικρές αλλαγές στις τιμές τους.

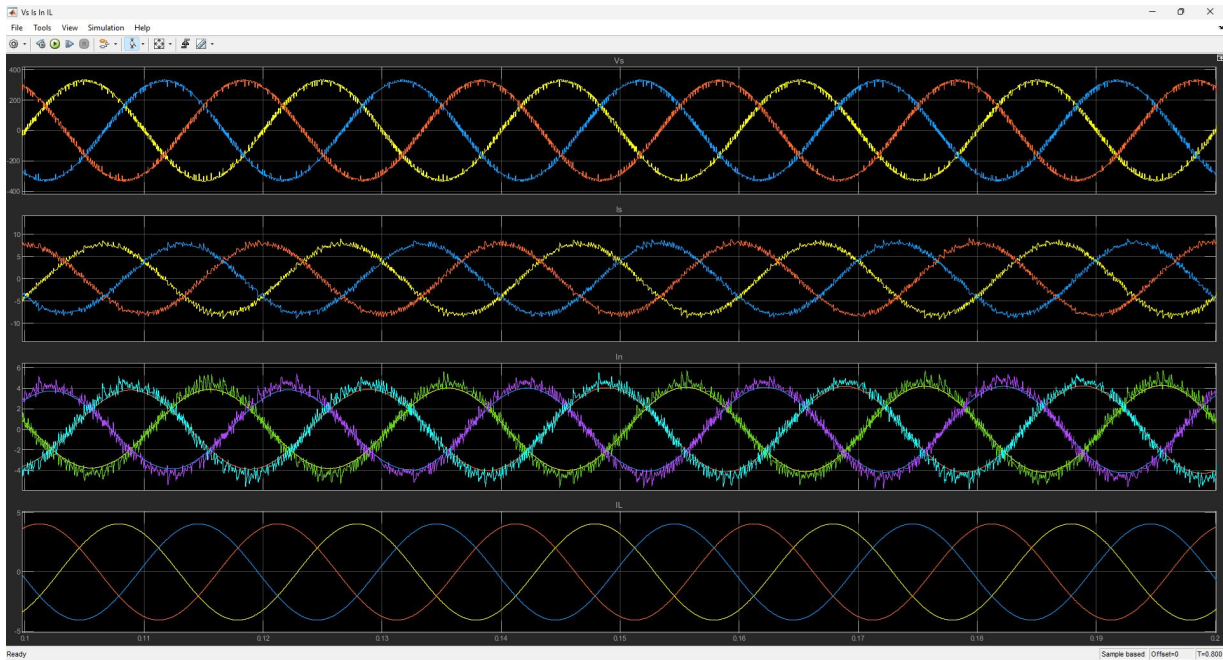
Η κυματομορφή  $I_s$ , κατά τη φόρτιση, αυξάνει από την τιμή 6A έως τα 8.5A, ενώ κατά την εκφόρτιση, μειώνεται στα 2.5A και από την τιμή αυτή, ακολουθεί την ημιτονοειδή της πορεία με βαθμιαία αύξηση στα 3.2A.

Η κυματομορφή  $I_n$ , κατά τη φόρτιση αυξάνεται σταδιακά από τα 3A έως τα 5A και κατά την εκφόρτιση, από τα 3.5A αυξάνεται μέχρι τα 4.9A. (εικόνα 8.8)

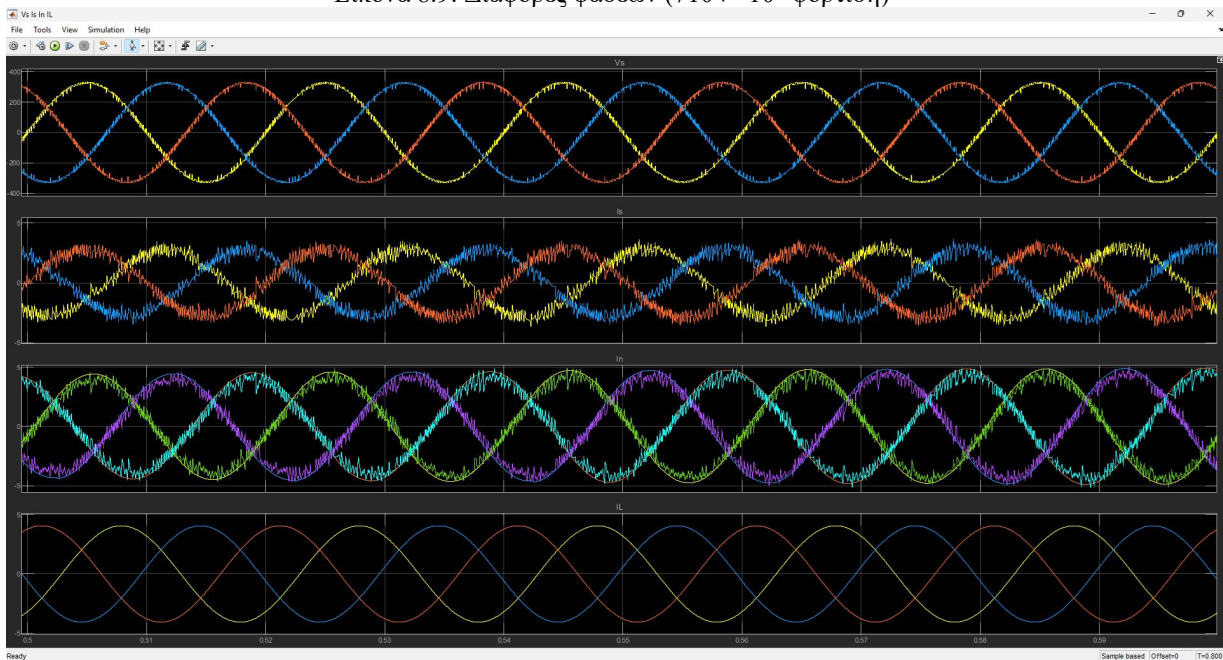


Εικόνα 8.8: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  ( $710V -10^\circ$ )

Οι φάσεις των ρευμάτων με την τάση δικτύου, φαίνεται στις εικόνες 8.9 και 8.10 αντίστοιχα.



Εικόνα 8.9: Διαφορές φάσεων (710V -10° φόρτιση)



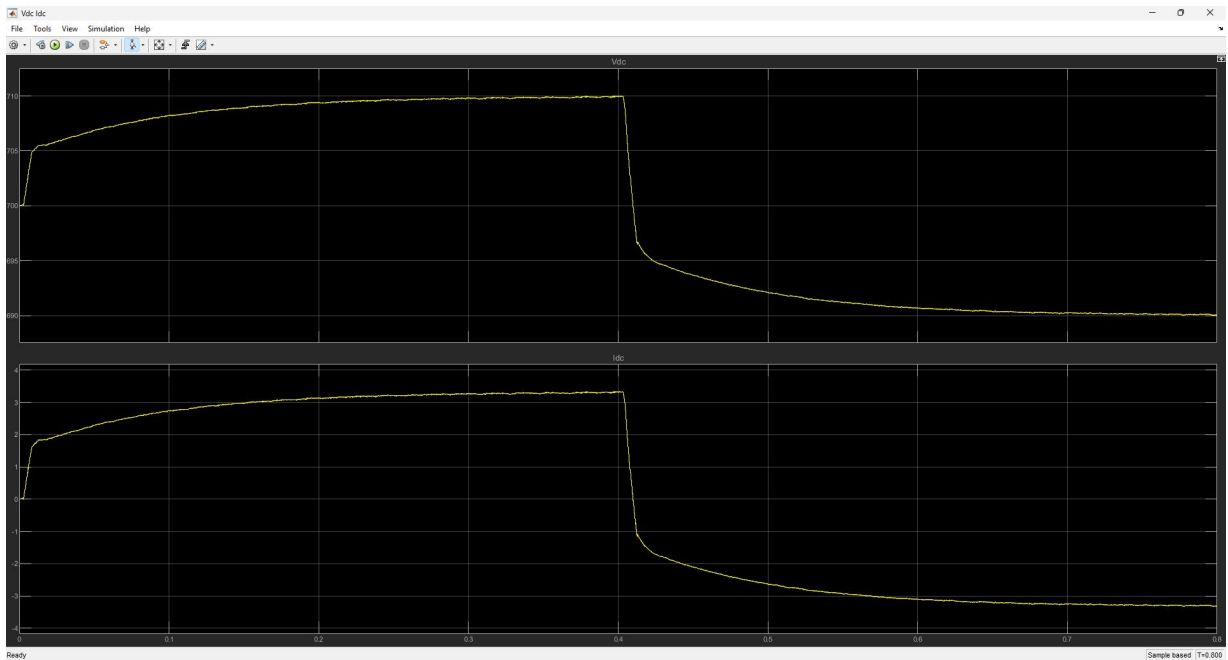
Εικόνα 8.10: Διαφορές φάσεων (710V -10° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-1002W
	Άεργος Ισχύ	1131Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2235W
	Άεργος Ισχύ	424.6Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1235W
	Άεργος Ισχύ	1552Var

### 8.3 3η προσομοίωση

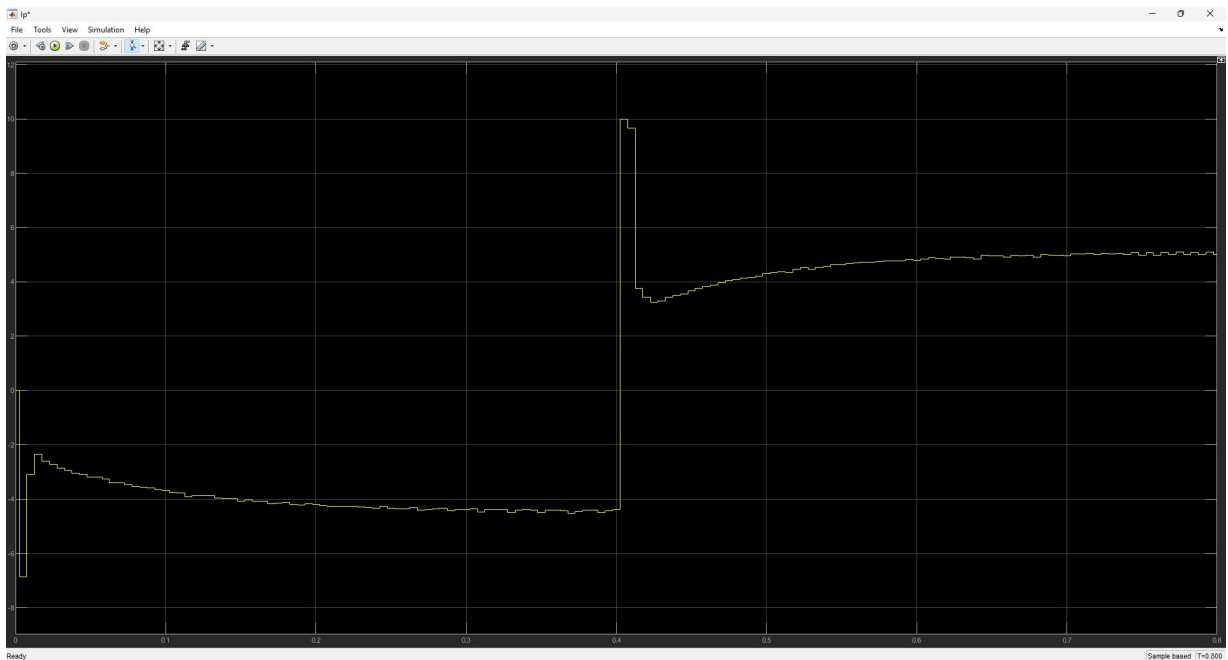
Στην προσομοίωση αυτήν, η  $V_{dc}^*$  θα παραμείνει στα 710V ενώ η γωνία θα πάρει τιμή  $-20^\circ$ .



Εικόνα 8.11: Κυματομορφές Vdc - Idc (710V  $-20^\circ$ )

Ομοίως με τις περιπτώσεις των  $0^\circ$  και  $-10^\circ$ , οι κυματομορφές Vdc και Idc ακολουθούν τις ίδιες ανοδικές και καθοδικές πορείες, με την ανώτατη τιμή στα 710V για την τάση και στα 3.3A για την ένταση του ρεύματος κατά την ημιπερίοδο της φόρτισης, και στα 690V για την τάση και στα -3.3A για την ένταση του ρεύματος κατά την ημιπερίοδο της εκφόρτισης (εικόνα 8.11).

Η κυματομορφή του ρεύματος  $I_p^*$ , είναι όμοια με την κυματομορφή του  $I_p^*$  με γωνία  $0^\circ$  και με γωνία  $-10^\circ$ . Ακολουθεί ανοδική πορεία στην πρώτη ημιπερίοδο μέχρι την τιμή -4.45A περίπου, ενώ στη δεύτερη ημιπερίοδο αυξάνεται μέχρι την τιμή 5A. (εικόνα 8.12)

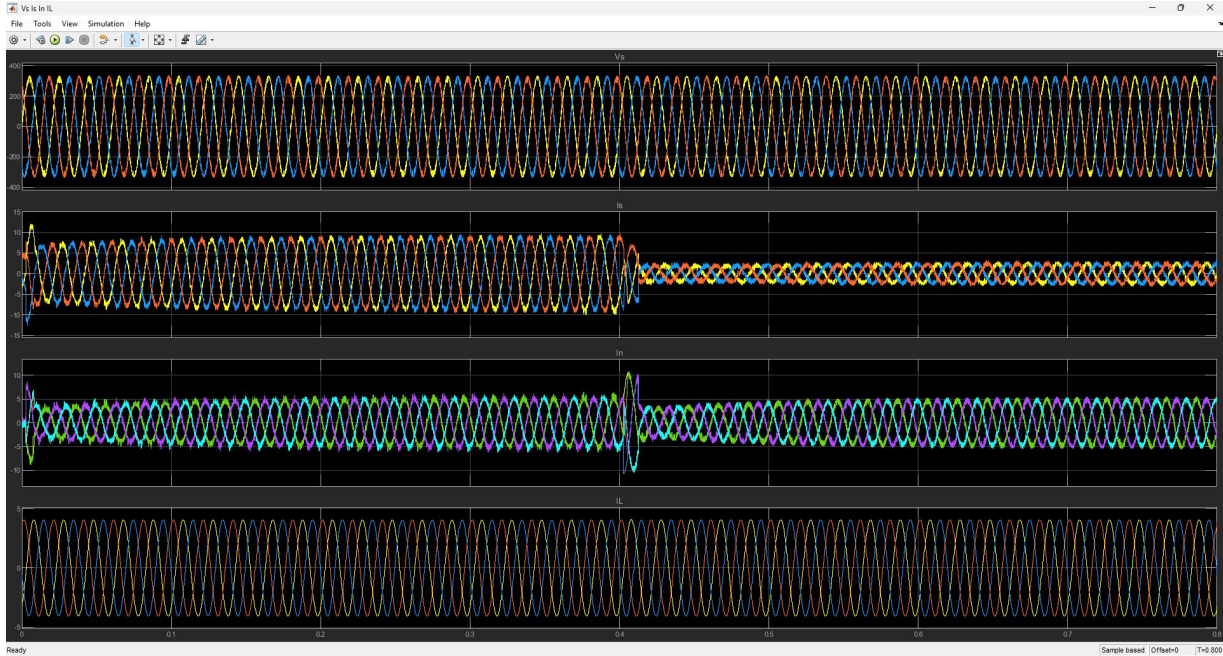


Εικόνα 8.12: Κυματομορφή  $I_p^*$  (710V  $-20^\circ$ )

Για τα ρεύματα  $I_s$  και  $I_n$ , παρατηρούμε παρόμοιες κυματομορφές με μικρές αλλαγές.

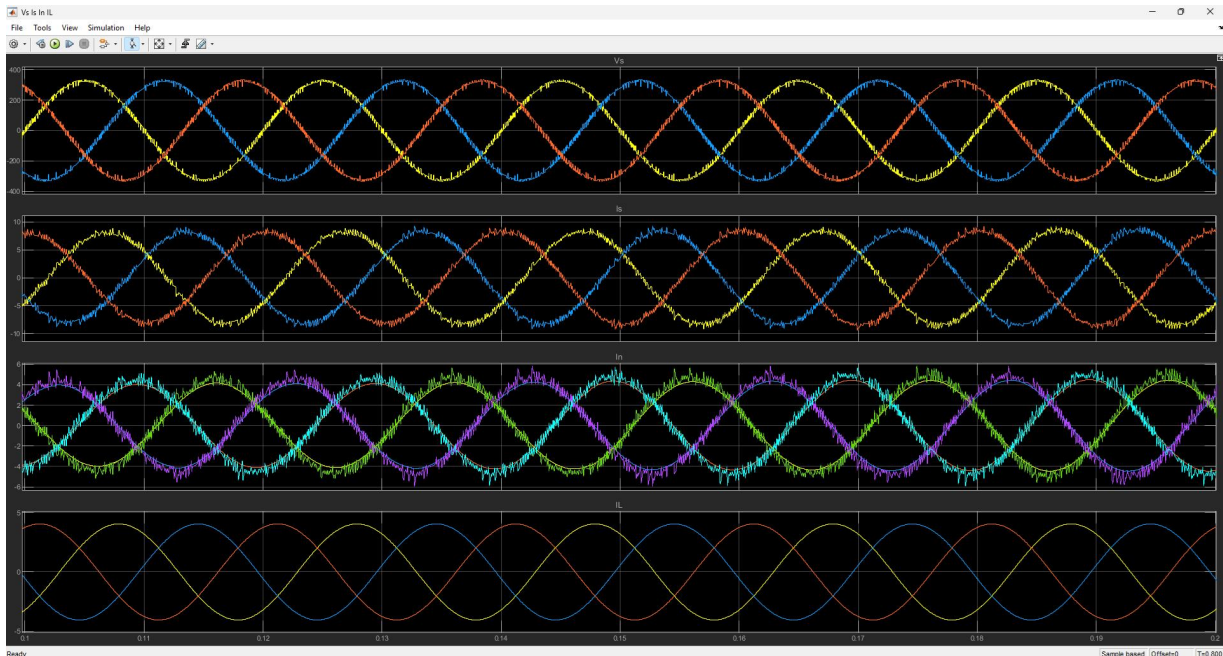
Το ρεύμα  $I_s$  κατά τη φόρτιση αυξάνει από την τιμή των 7A μέχρι την τιμή των 8.5A , ενώ στην εκφόρτιση μειώνεται στα 2A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι την τιμή 2.5A.

Το ρεύμα  $I_n$  κατά τη φόρτιση αυξάνει βαθμιαία από τα 3.3A μέχρι τα 5.2A, ενώ στην εκφόρτιση μειώνεται στα 3.2A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι την τιμή των 5A. (εικόνα 8.13)

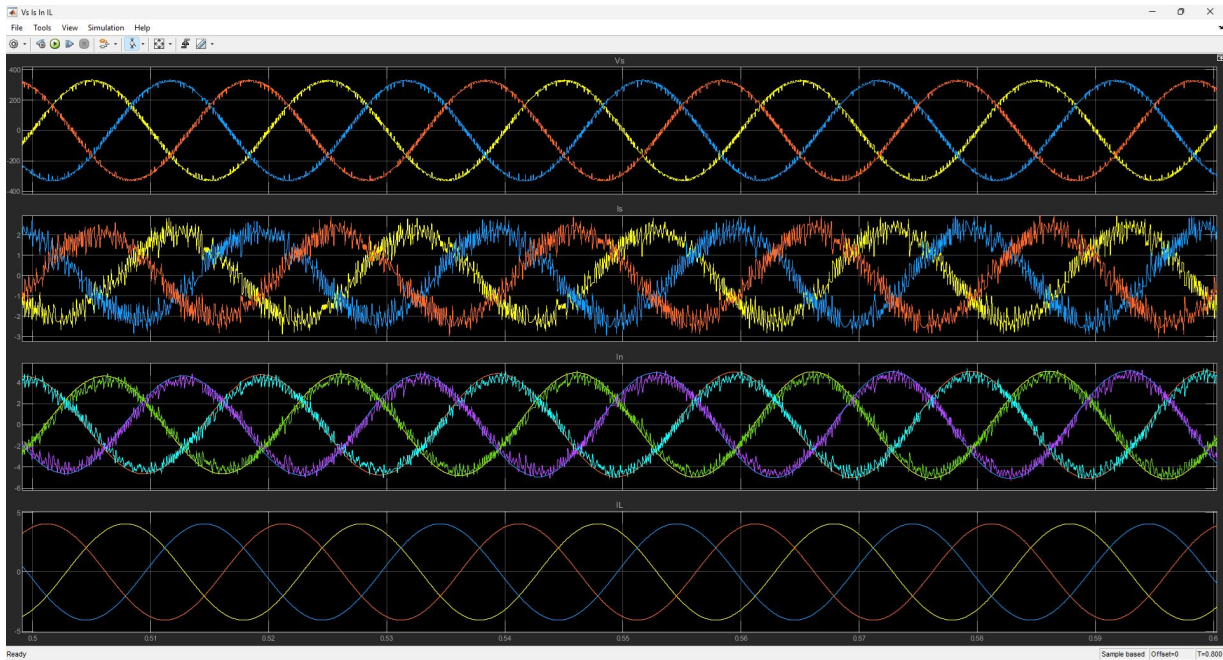


Εικόνα 8.13: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  (710V -20°)

Η διαφορά φάσης της τάσης δικτύου και των ρευμάτων φαίνεται στην εικόνα 8.14 και 8.15 για τη φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας αντίστοιχα.



Εικόνα 8.14: Διαφορές φάσεων (710V -20° φόρτιση)



Εικόνα 8.15: Διαφορές φάσεων (710V -20° εκφόρτιση)

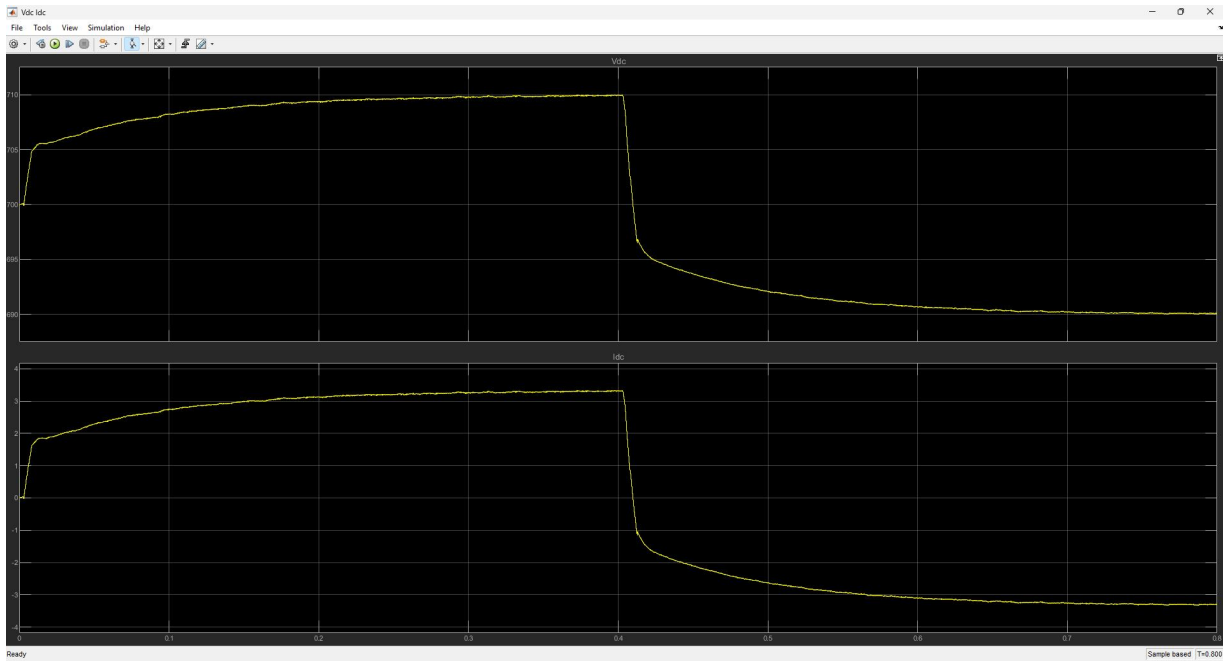
Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-1011W
	Άεργος Ισχύ	674.8Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2246W
	Άεργος Ισχύ	884Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1238W
	Άεργος Ισχύ	1555Var

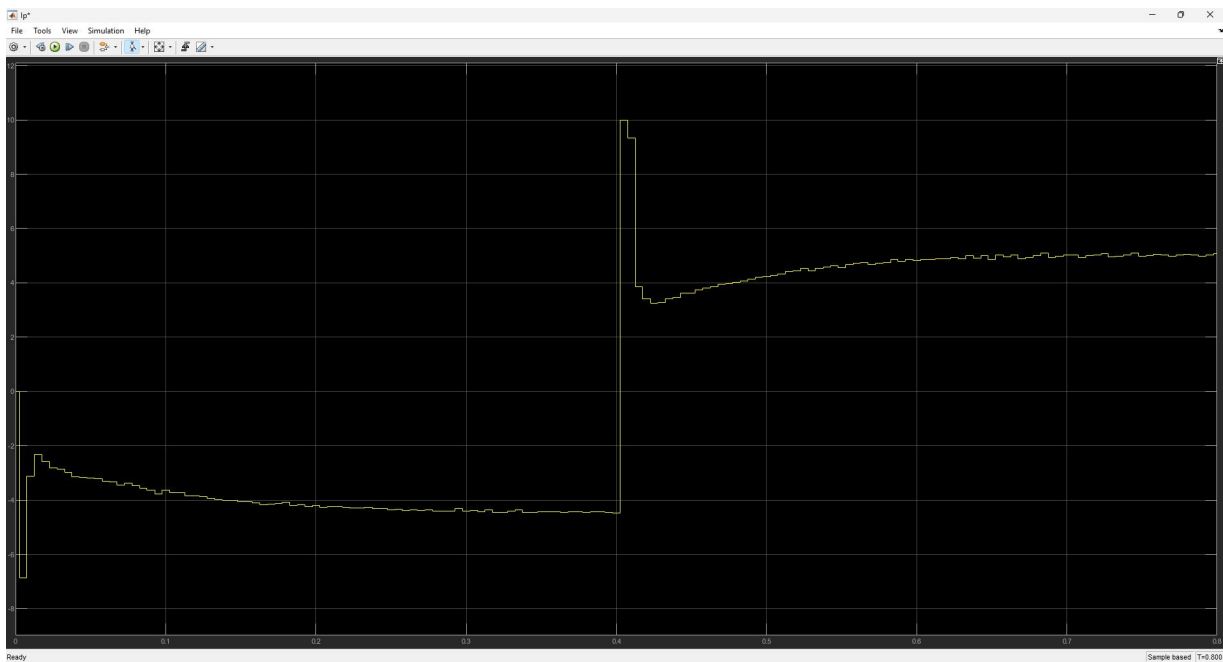
#### 8.4 4η προσομοίωση

Η τελευταία προσομοίωση με τάση  $V_{dc}^* = 710V$ , όπου θέτουμε γωνία  $-30^\circ$ .

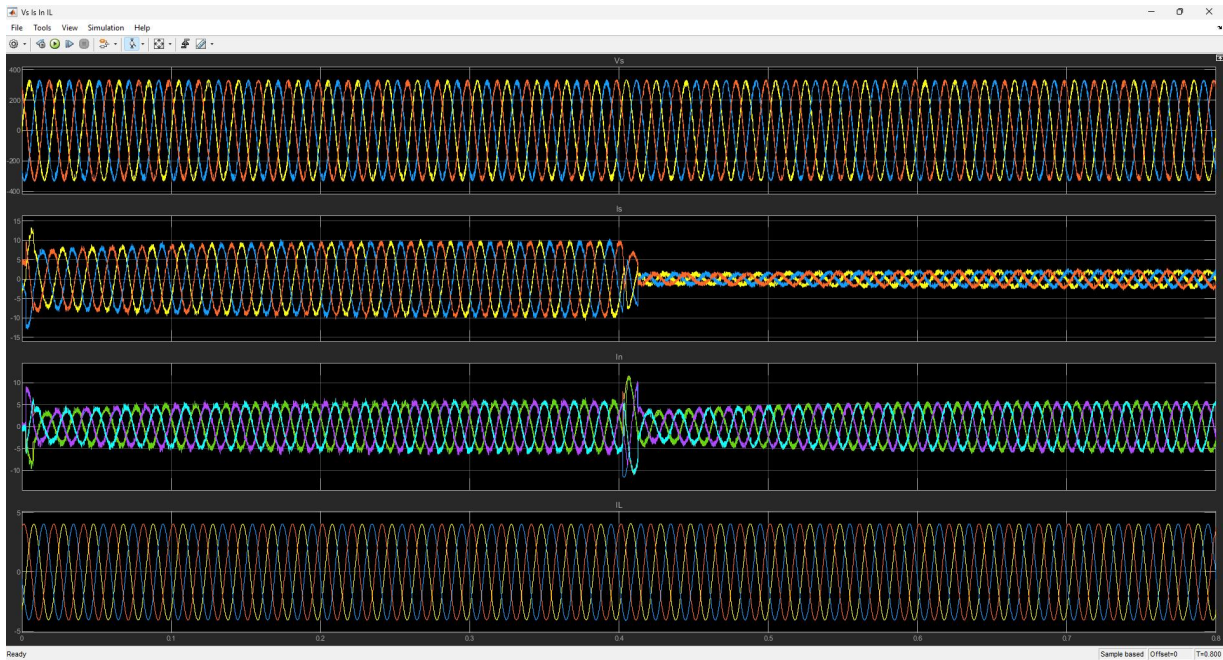
Οι κυματομορφές  $V_{dc}$  και  $I_{dc}$  είναι όμοιες με τις προηγούμενες κυματομορφές των  $0^\circ$   $-10^\circ$  και  $-20^\circ$ . Η ανοδική πορεία στην ημιπερίοδο φόρτισης γίνεται μέχρι τις τιμές 710V και 3.3A ενώ η καθοδική πορεία στην ημιπερίοδο εκφόρτισης γίνεται μέχρι τις τιμές 690V και -3.3A (εικόνα 8.16). Η κυματομορφή  $I_p^*$  είναι όμοια με τις προηγούμενες τρεις κυματομορφές ρευμάτων, έχοντας κατώτατη τιμή τα -4.45A και ανώτατη τα 5A (εικόνα 8.17).



Εικόνα 8.16: Κυματομορφές  $V_{dc}$  -  $I_{dc}$  (710V -30°)



Εικόνα 8.17: Κυματομορφή  $I_r^*$  (710V -30°)

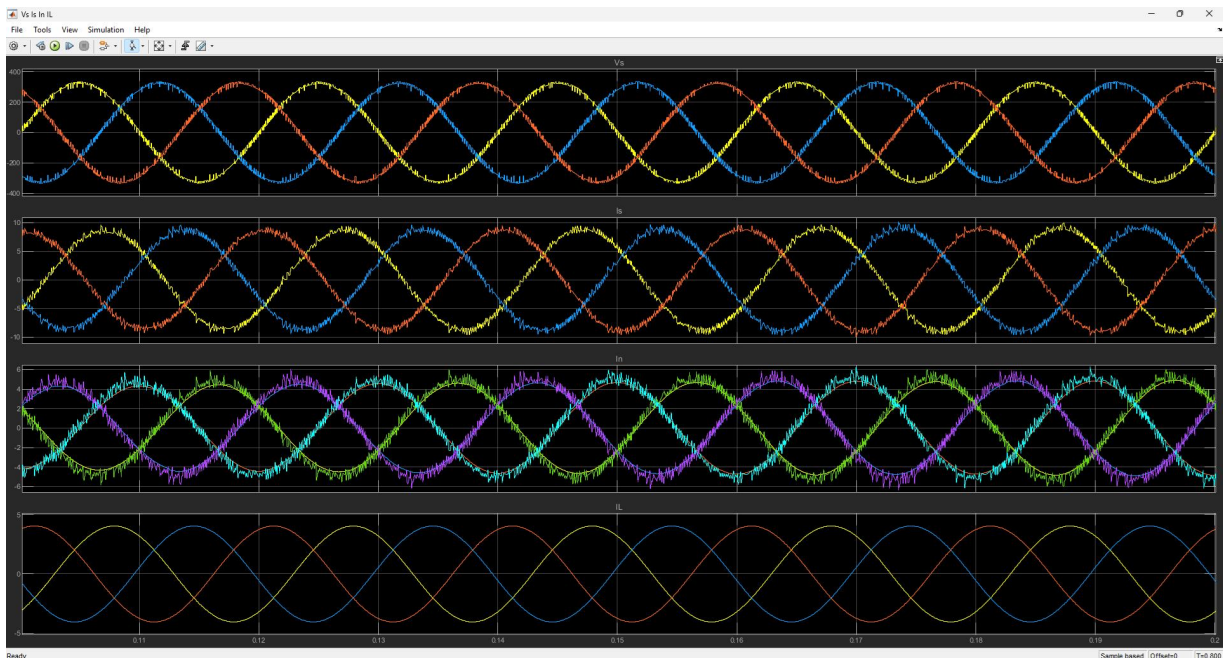


Εικόνα 8.18: Κυματομορφές  $V_s$  -  $I_s$  -  $I_n$  -  $I_L$

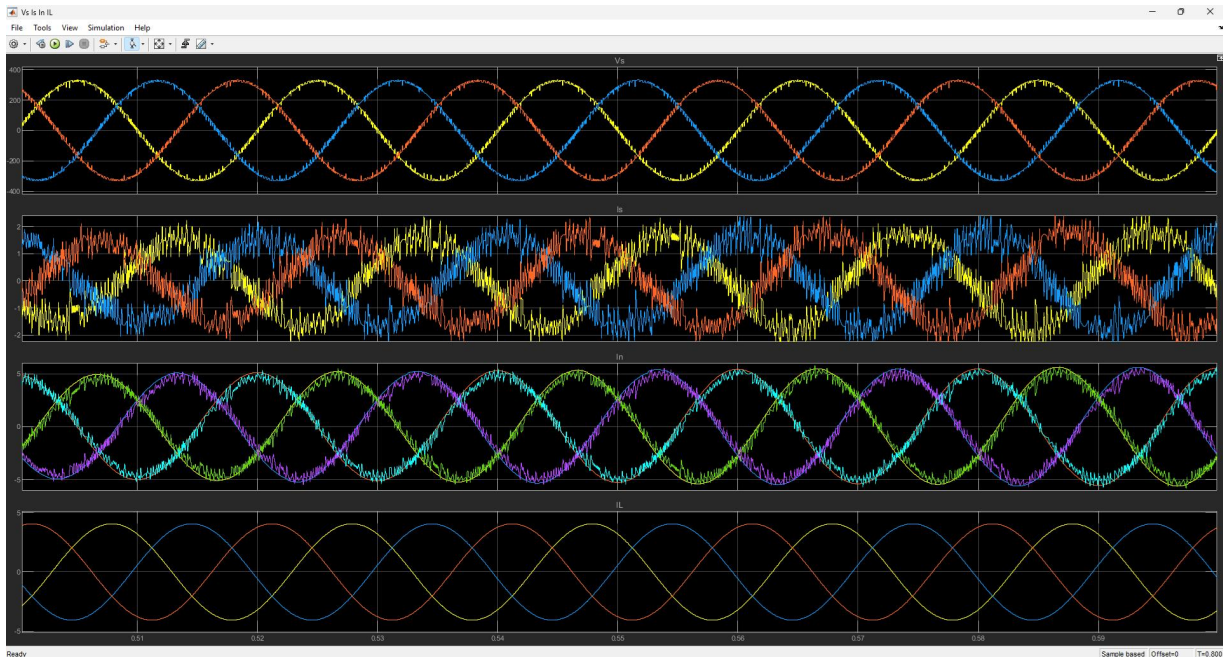
Η κυματομορφή του ρεύματος δικτύου, κατά τη διάρκεια φόρτισης, αυξάνεται σταδιακά από περίπου 7A στα 9A, ενώ κατά τη φόρτιση πέφτει στα 1.2A και αυξάνεται αργά στα 2A μέχρι το τέλος της περιόδου (εικόνα 8.18).

Η κυματομορφή του ρεύματος μετατροπέα, κατά τη διάρκεια φόρτισης, αυξάνεται από 3A έως 5.2A, ενώ κατά την εκφόρτιση, αυξάνεται στα 3.4A και από εκεί βαθμιαία μέχρι τα 5.4A (εικόνα 8.18).

Η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης δικτύου και ρευμάτων, φαίνεται στις εικόνες 8.19 και 8.20 για τη φόρτιση και την εκφόρτιση αντίστοιχα.



Εικόνα 8.19: Διαφορές φάσεων (710V -30° φόρτιση)



Εικόνα 8.20: Διαφορές φάσεων (710V -30° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-990.7 W
	Άεργος Ισχύ	130.1 Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2227 W
	Άεργος Ισχύ	1432 Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1240 W
	Άεργος Ισχύ	1559 Var

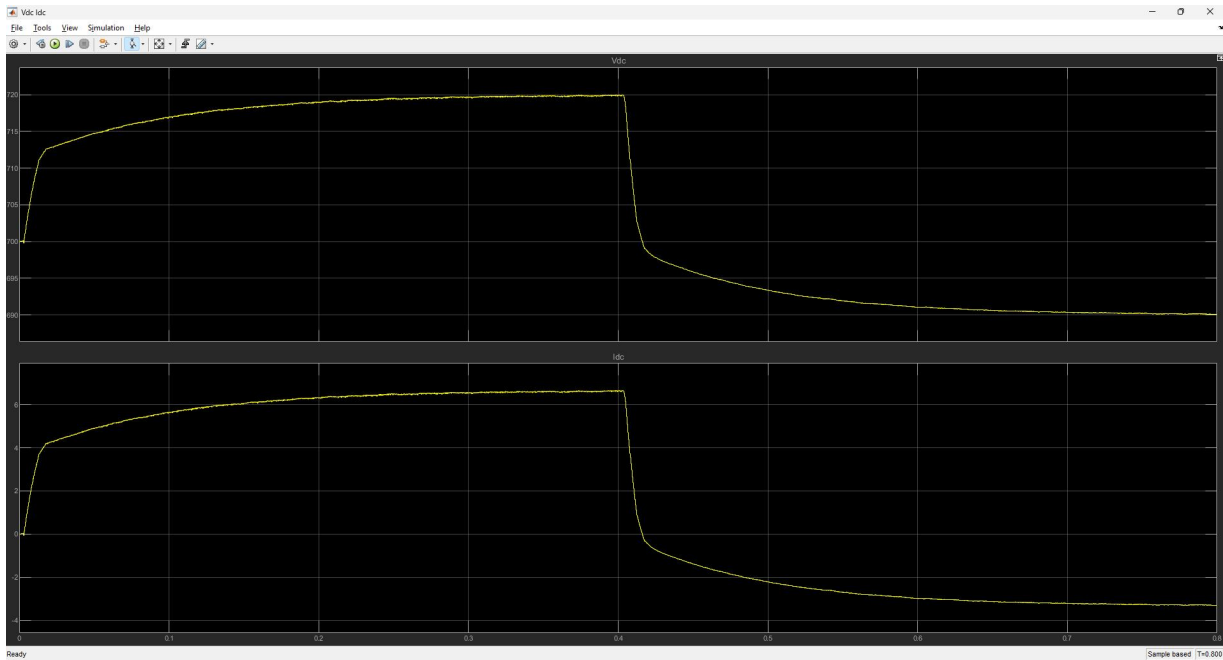
### 8.5 5η προσομοίωση

Η τιμή της  $V_{dc}^*$  θα αλλάξει στα 720V, και η γωνία θα είναι  $0^\circ$ .

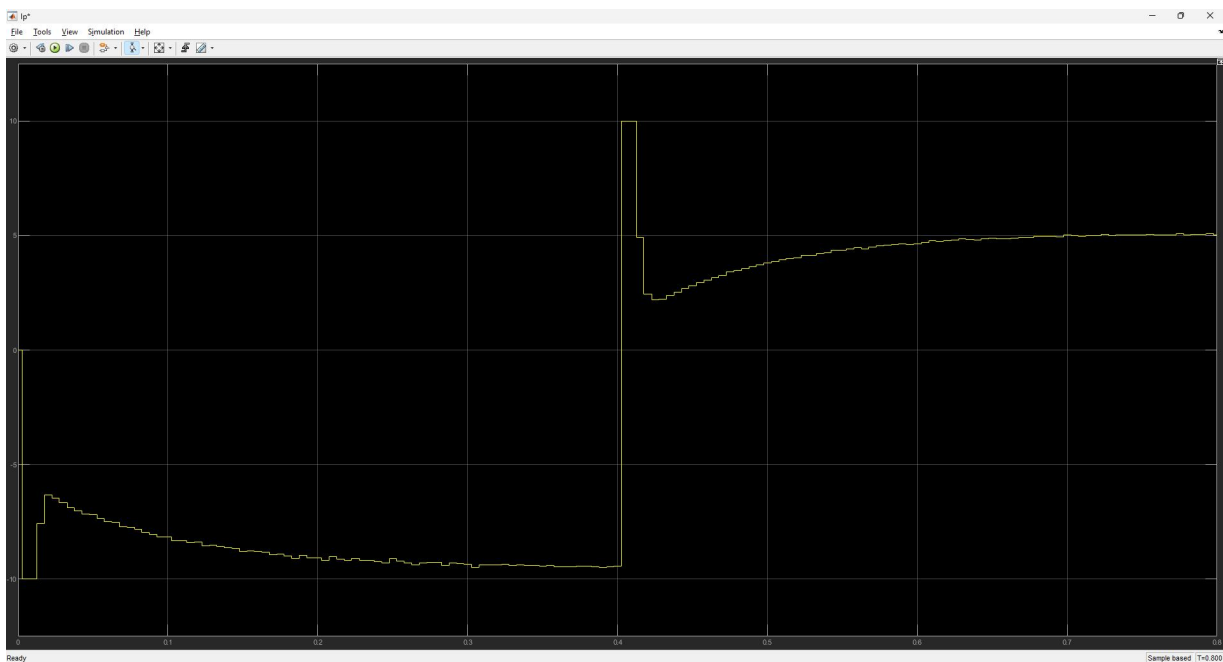
Η διαφορά που παρατηρείται στις κυματομορφές αυτές σε σχέση με τις προηγούμενες όπου η τάση  $V_{dc}^*$  ήταν μικρότερη, είναι πως η φόρτιση της μπαταρίας ολοκληρώνεται πιο γρήγορα.

Η τάση αυξάνεται απότομα στην αρχή της φόρτισης στα 712V περίπου και μέχρι την ολοκλήρωση της ημιπεριόδου φόρτισης αυξάνεται βαθμιαία στα 720V. Ομοίως, το ρεύμα αυξάνεται απότομα στην τιμή 4.2A περίπου και στη συνέχεια αυξάνεται βαθμιαία μέχρι τα 6.6A.

Κατά την εκφόρτιση, η τάση μειώνεται απότομα στα 698V και στη συνέχεια η μπαταρία εκφορτίζει μέχρι τα 690V. Το ρεύμα μειώνεται απότομα στην τιμή των -0.3A και στη συνέχεια σταδιακά μέχρι το τέλος της εκφόρτισης όπου αγγίζει την τιμή των -3.3A. (εικόνα 8.21)

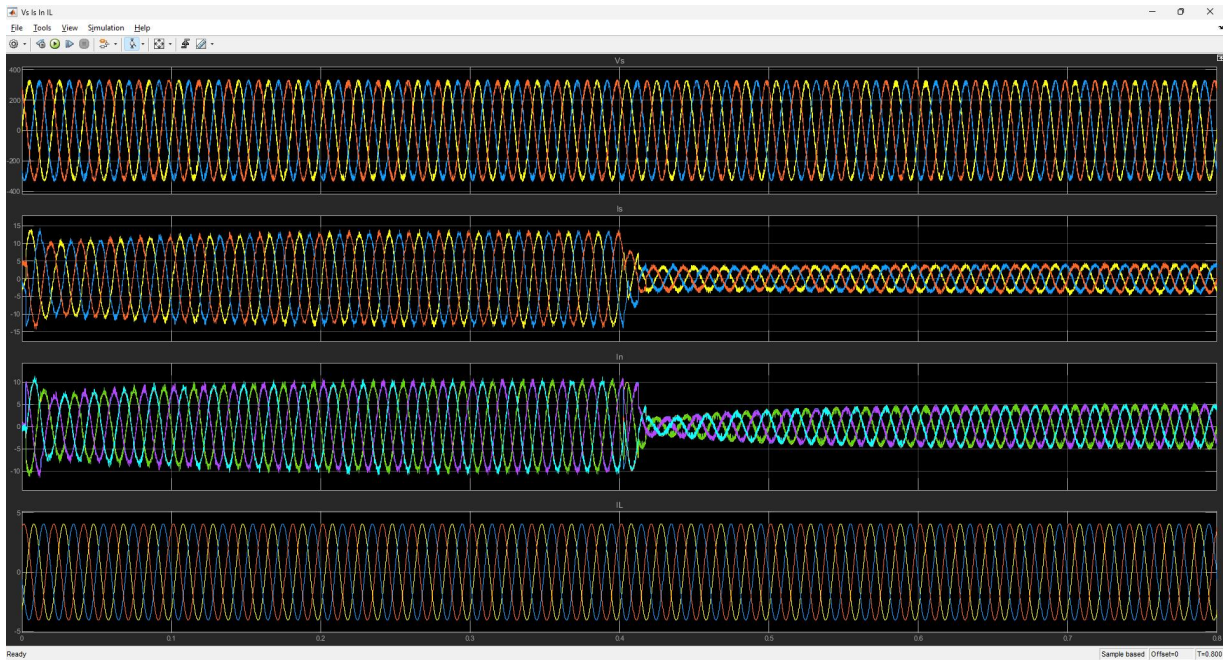


Εικόνα 8.21: Κυματομορφές  $V_{dc}$  -  $I_{dc}$  (720V 0°)



Εικόνα 8.22: Κυματομορφή  $I_p^*$  (720V 0°)

Το ρεύμα  $I_p^*$  μειώνεται ραγδαία κατά την ημιπερίοδο φόρτισης στην τιμή των -10A, στη συνέχεια παίρνει την τιμή -6.3A και μειώνεται σταδιακά μέχρι τα -9.4A. Στην εκφόρτιση, αυξάνεται απότομα στα 10A και στη συνέχεια παίρνει την τιμή 2.2A από την οποία αυξάνεται σταδιακά μέχρι τα 5A όπου ολοκληρώνεται η εκφόρτιση (εικόνα 8.22).

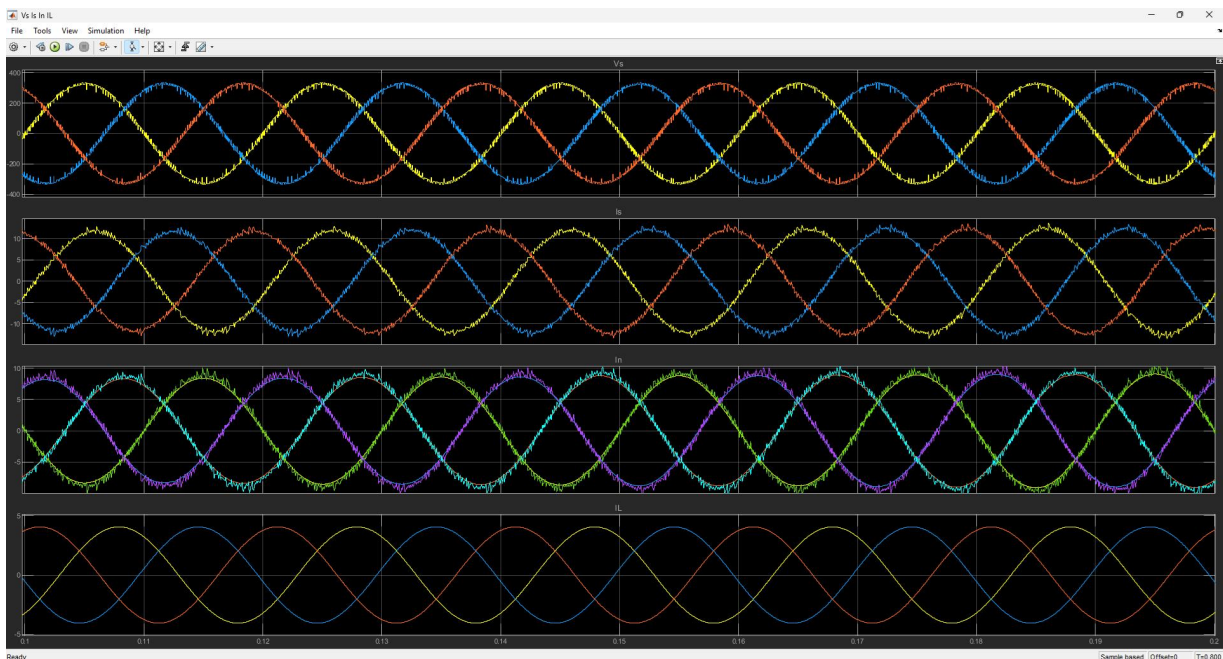


Εικόνα 8.23: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  ( $720V \ 0^\circ$ )

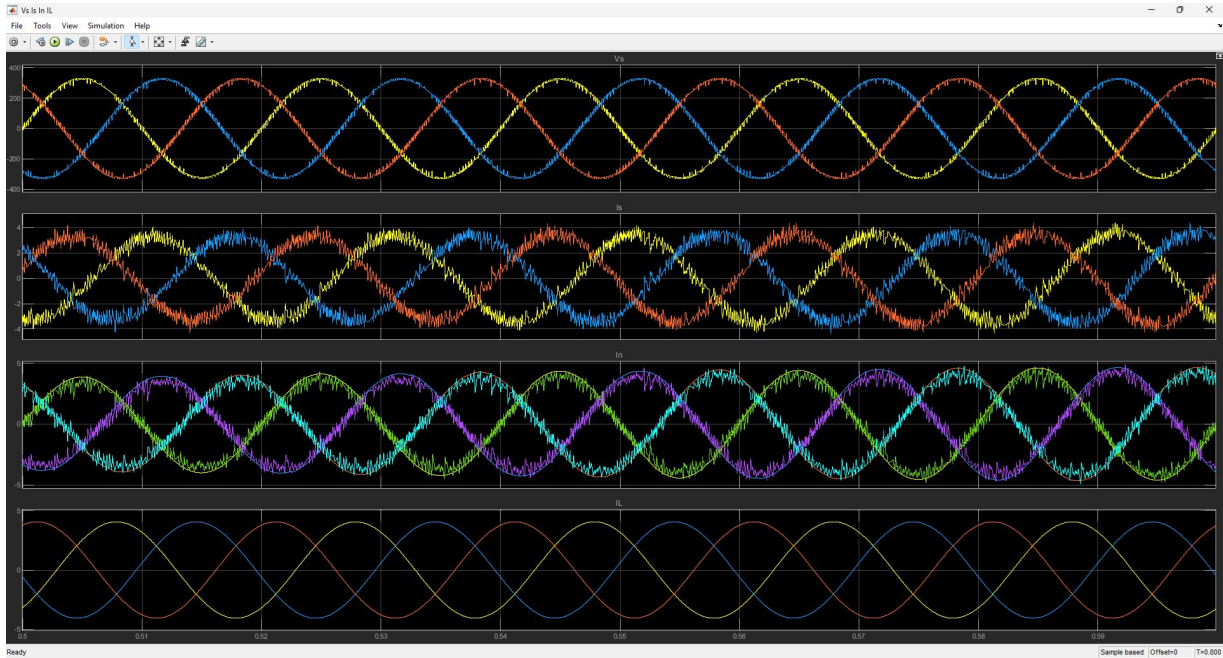
Κατά την ημπερίοδο φόρτισης, το ρεύμα δικτύου  $I_s$  ξεκινάει απ'την τιμή 10A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι τα 12.5A στο τέλος της φόρτισης. Κατά την εκφόρτιση, μειώνεται στην τιμή 3.25A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι τα 3.7A στο τέλος της εκφόρτισης (εικόνα 8.23).

Το ρεύμα του μετατροπέα ξεκινάει απ'την τιμή 6.5A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι τα 9.75A. Στην εκφόρτιση μειώνεται στην τιμή 1.7A και σταδιακά αυξάνεται μέχρι τα 4.6A (εικόνα 8.23).

Οι διαφορές φάσεων μεταξύ των κυματομορφών τάσης – ρεύματος φαίνονται στις εικόνες 8.24 και 8.25 για τη φόρτιση και την εκφόρτιση αντίστοιχα.



Εικόνα 8.24: Διαφορές φάσεων ( $720V \ 0^\circ$  φόρτιση)



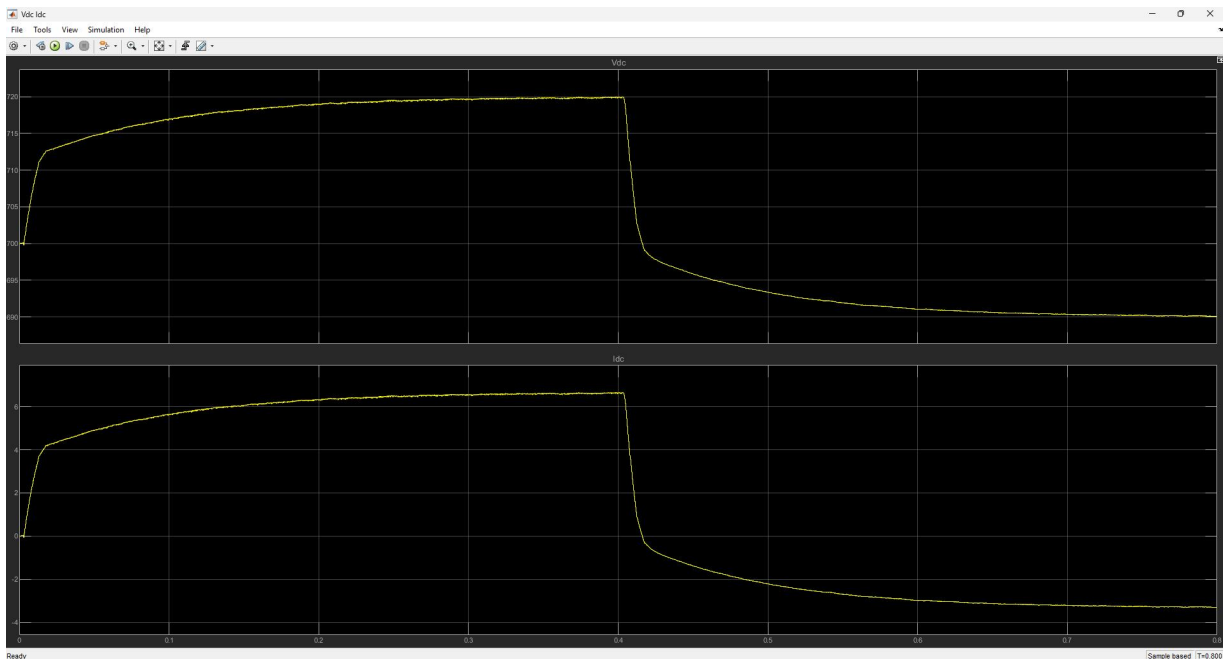
Εικόνα 8.25: Διαφορές φάσεων (720V 0° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-1009 W
	Άεργος Ισχύ	1567 Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2241 W
	Άεργος Ισχύ	-13.89 Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1233W
	Άεργος Ισχύ	1550 Var

### 8.6 6η προσομοίωση

Η  $V_{dc}^*$  παραμένει στην τιμή 720V ενώ αλλάζει η γωνία στις  $-10^\circ$ .

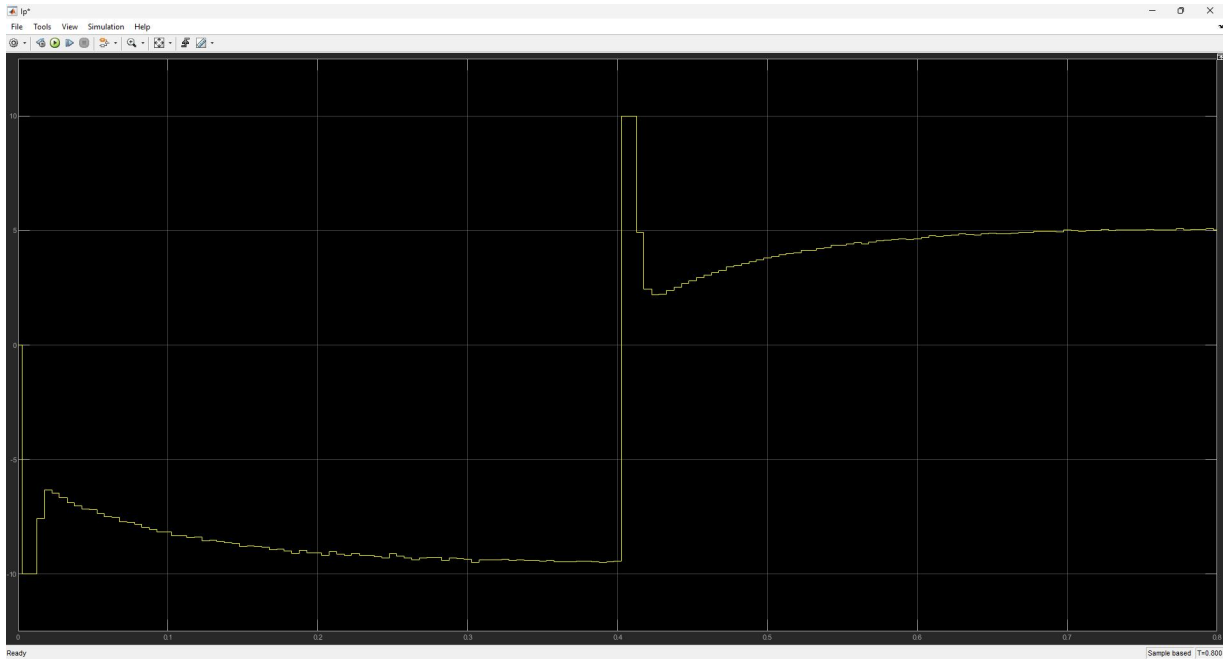


Εικόνα 8.26: Κυματομορφές  $V_{dc}$  -  $I_{dc}$  (720V  $-10^\circ$ )

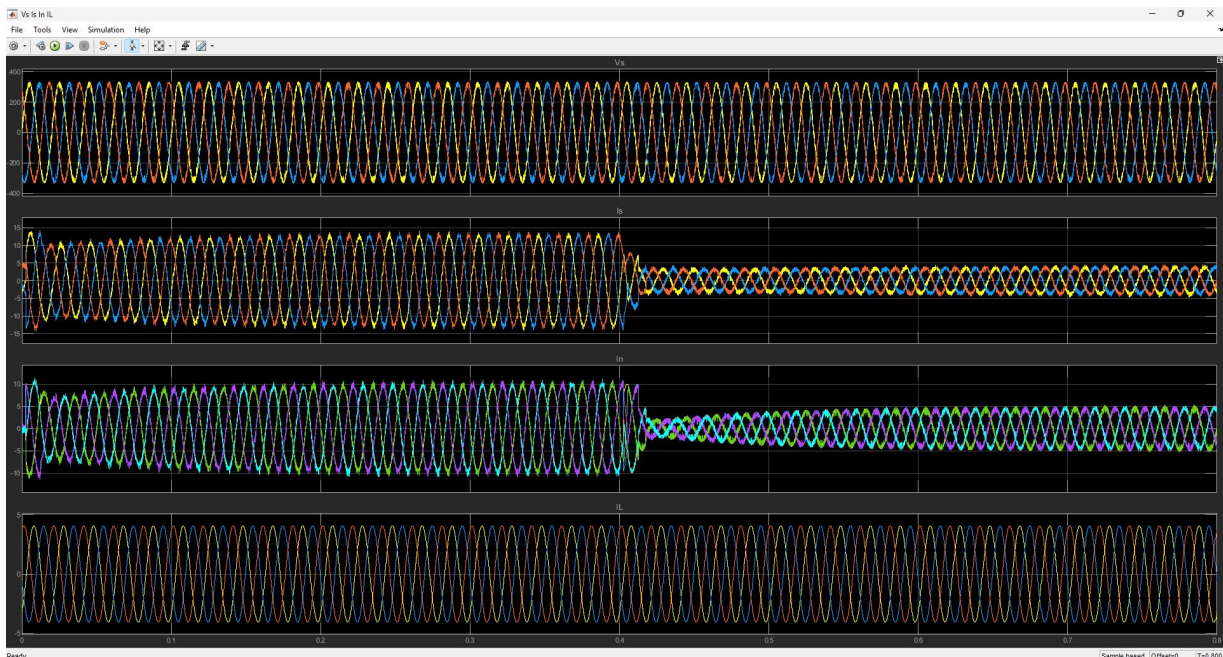
Τα αποτελέσματα που παίρνουμε για την τάση και το ρεύμα στην μπαταρία, δεν αλλάζουν σε σχέση με την προηγούμενη προσομοίωση των  $0^\circ$ . Συγκεκριμένα, η τάση ακολουθεί την ίδια πορεία, αυξάνοντας από 700V στα 712.5V και αυξάνοντας βαθμιαία μέχρι την τιμή 720V. Στην εκφόρτιση, μειώνεται στα 698V και συνεχίζει σταδιακά μέχρι τα 690V.

Ομοίως το ρεύμα από 0 αυξάνεται απότομα στα 4.2A και σταδιακά μέχρι την τιμή 6.6A στο τέλος της φόρτισης. Στην εκφόρτιση, μειώνεται στα -0.4A και σταδιακά μέχρι τα -3.3A στο τέλος της εκφόρτισης (εικόνα 8.26).

Το ρεύμα  $I_p^*$  είναι επίσης πανομοιότυπο με το ρεύμα της προηγούμενης προσομοίωσης. Το ρεύμα στη φόρτιση, μειώνεται απότομα στα -10A και από τα -6.4A μειώνεται μέχρι τα -9.45A. Κατά την εκφόρτιση, το ρεύμα αυξάνει απότομα στα 10A και από τα 2.2A αυξάνεται μέχρι τα 5A (εικόνα 8.27).



Εικόνα 8.27: Κυματομορφή  $I_p^*$  (720V -10°)



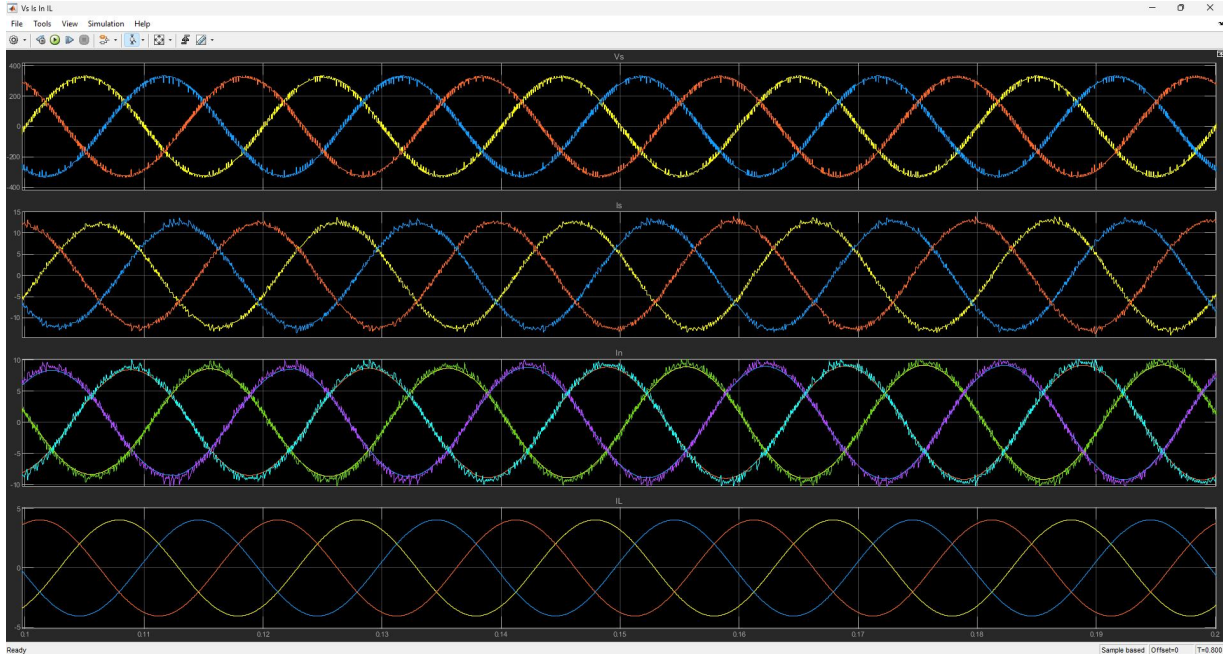
Εικόνα 8.28: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  (720V -10°)

## Κεφάλαιο 8ο

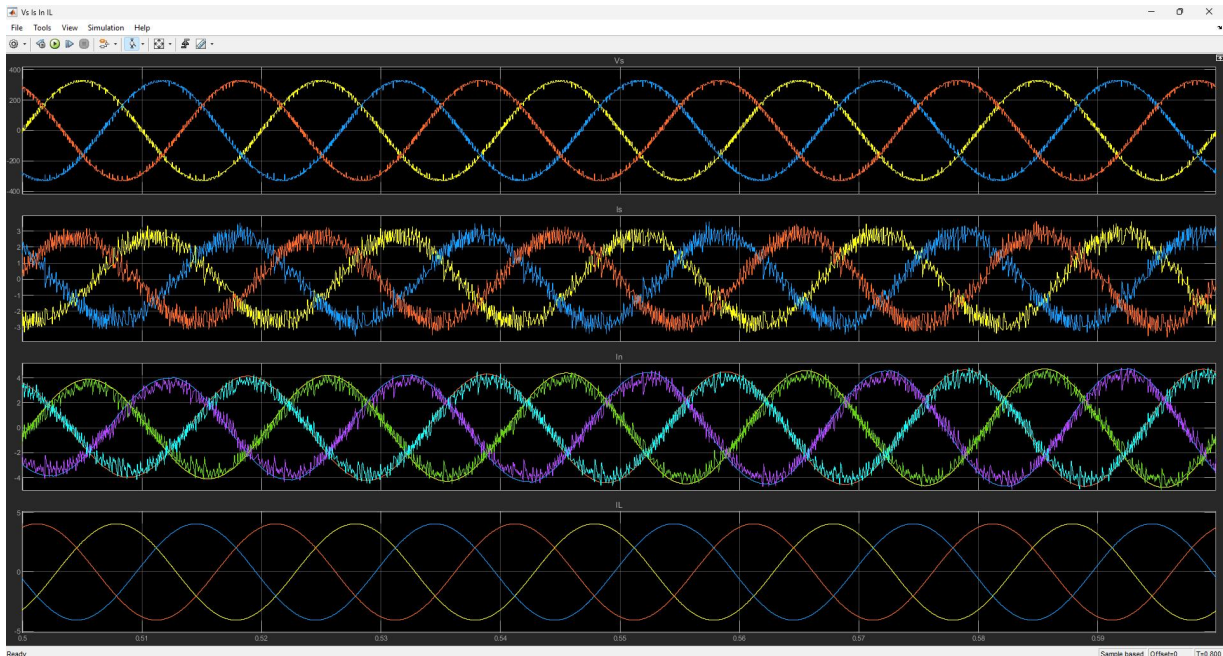
Για τα  $I_s$  και  $I_n$  δεν αλλάζουν πολλά. Το ρεύμα  $I_s$  ξεκινώντας από τα 10.5A αυξάνεται στα 13.4A μέχρι το τέλος της φόρτισης. Στην εκφόρτιση μειώνεται στα 2.9A και μέχρι το τέλος της έχει αγγίξει τα 3A.

Το ρεύμα του μετατροπέα  $I_n$  ξεκινάει από την τιμή 6.75A και αυξάνεται μέχρι τα 10A κατά τη φόρτιση. Στην εκφόρτιση μειώνεται στα 1.8A και μέχρι το τέλος της φτάνει την τιμή 4.6A. (εικόνα 8.28)

Οι διαφορές των φάσεων στις κυματομορφές τάσης – ρεύματος φαίνονται στις εικόνες 8.29 και 8.30.



Εικόνα 8.29: Διαφορές φάσεων (720V -10° φόρτιση)



Εικόνα 8.30: Διαφορά φάσεων (720V -10° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

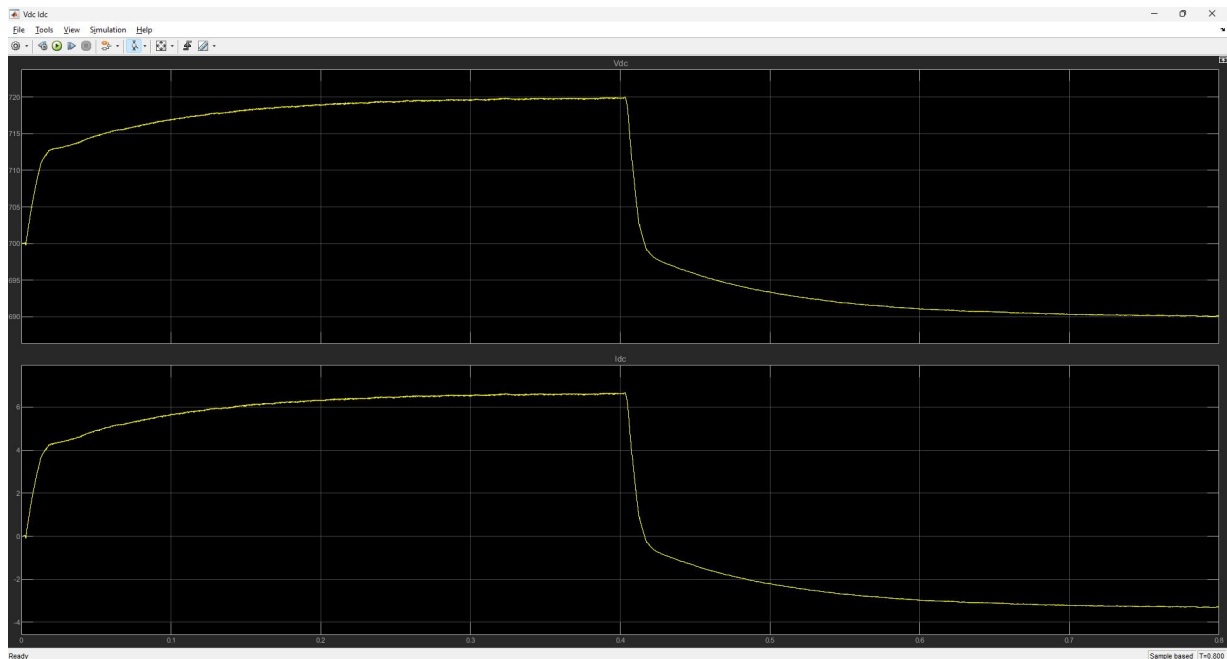
Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-1003 W
	Άεργος Ισχύ	1132 Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2236 W
	Άεργος Ισχύ	423.8 Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1235W
	Άεργος Ισχύ	1552 Var

### 8.7 7η προσομοίωση

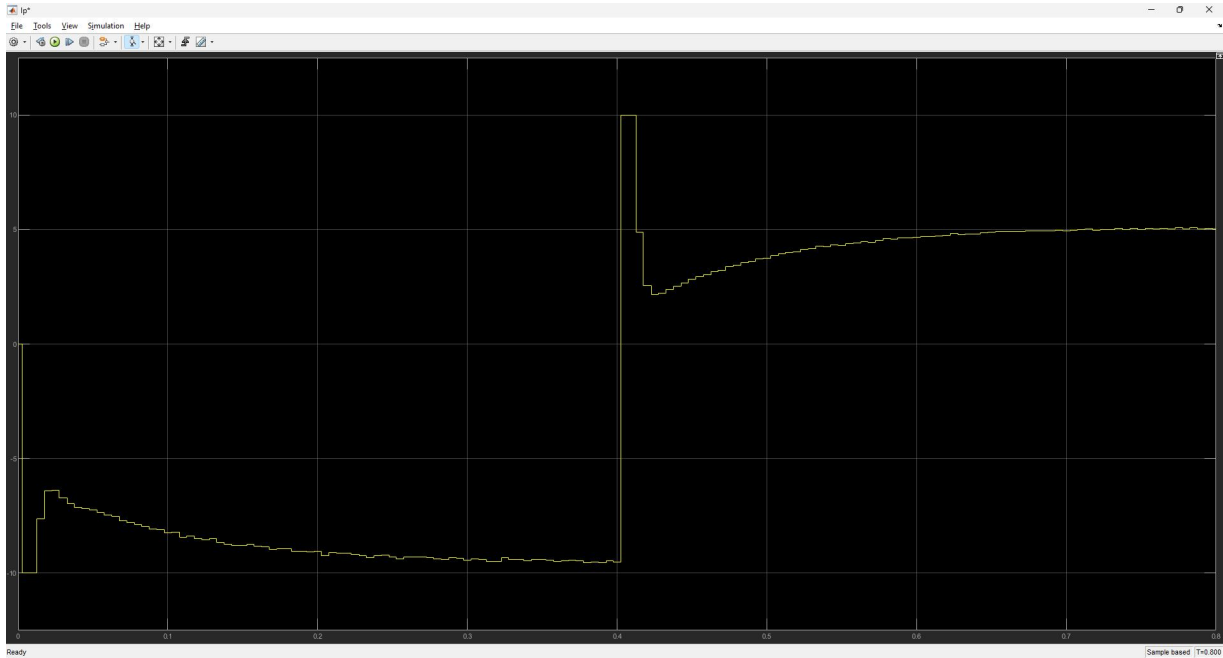
Σε αυτήν την προσομοίωση, η  $V_{dc}$  θα παραμείνει στα 720V και η γωνία θα αλλάξει στις  $-20^\circ$ .

Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας ακολουθούν όμοια πορεία με όλες τις προηγούμενες κυματομορφές  $V_{dc}$  και  $I_{dc}$ . Στην φόρτιση η τάση αυξάνεται απότομα από 710V στα 712.5V και από εκεί συνεχίζει βαθμιαία να αυξάνεται μέχρι τα 720V. Στην ημιπερίοδο της εκφόρτισης, η τάση μειώνεται απότομα στα 698V και στη συνέχεια βαθμιαία μέχρι τα 690V. Ομοίως η κυματομορφή του ρεύματος παίρνει τις τιμές από 0 στα 4.2A και στη συνέχεια μέχρι τα 6.6A, στην εκφόρτιση μειώνεται στα -0.3A και συνεχίζει μέχρι τα -3.3A (εικόνα 8.31).

Το ρεύμα  $I_p$  ομοίως με τις προηγούμενες περιπτώσεις, στην αρχή της περιόδου μειώνεται απότομα στα -10A, επανέρχεται γρήγορα στα -6.4 και σταδιακά μειώνεται μέχρι τα -9.5A. Στη συνέχεια στην εκφόρτιση, αυξάνεται απότομα στα 10A και αφού επανέλθει γρήγορα στα 2.2A, συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι τα 5A (εικόνα 8.32).



Εικόνα 8.31: Κυματομορφές  $V_{dc}$  –  $I_{dc}$  (720V  $-20^\circ$ )

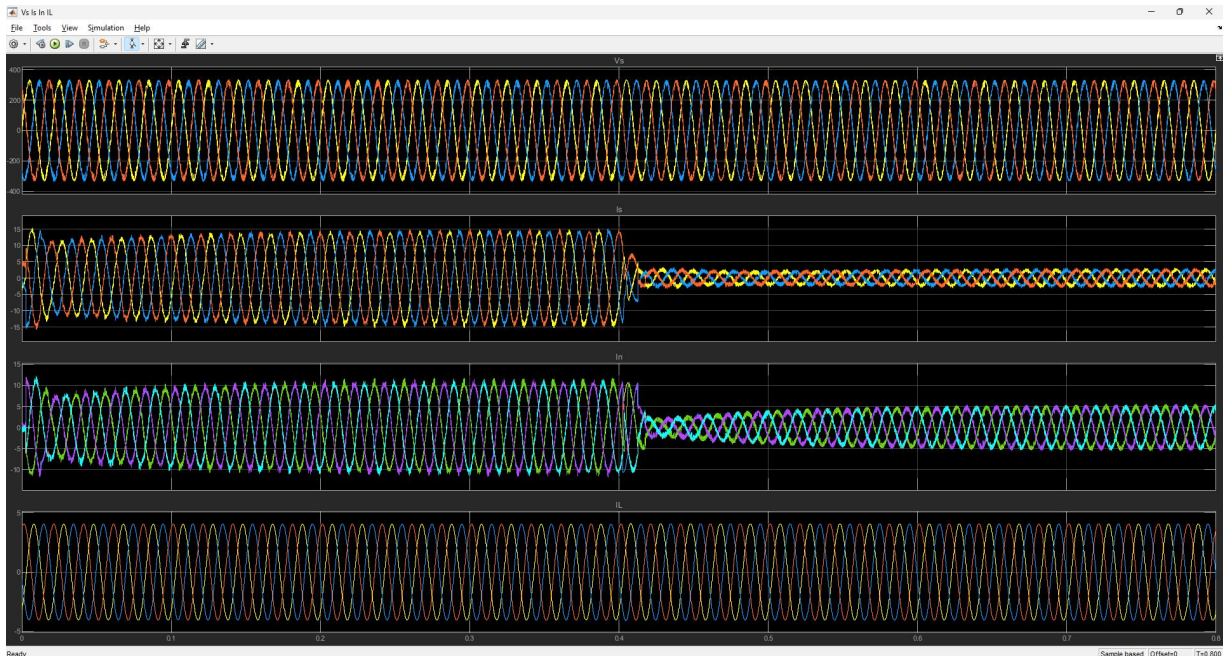


Εικόνα 8.32: Κυματομορφή  $I_r^*$  (720V -20°)

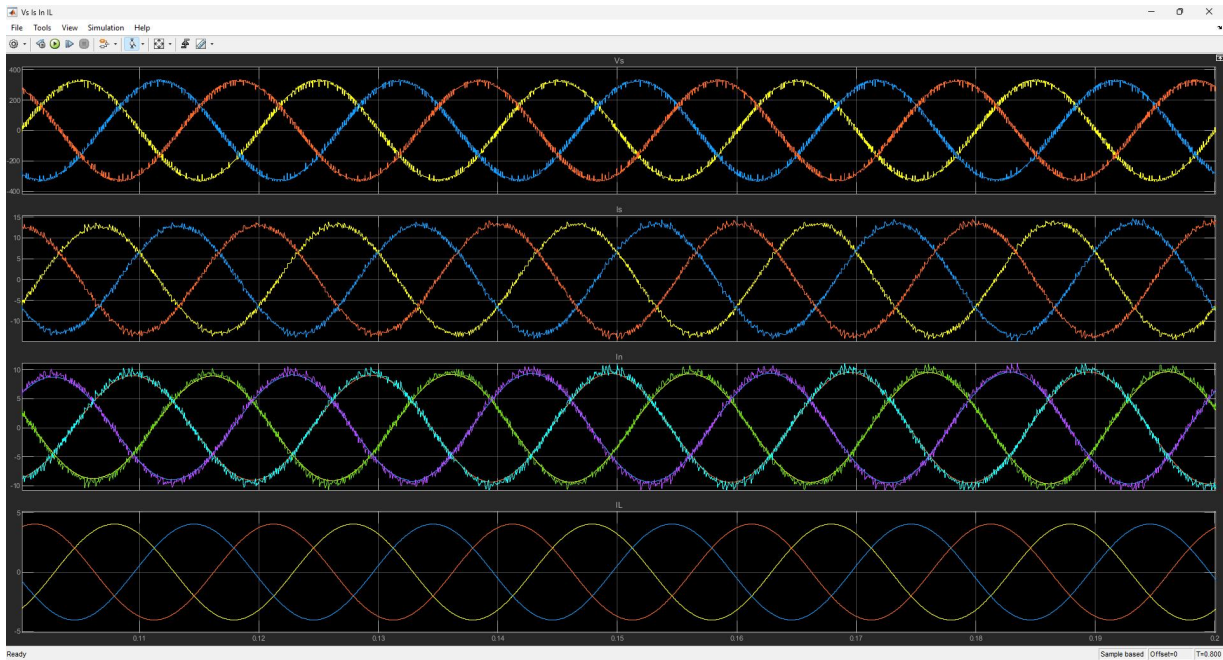
Το ρεύμα  $I_s$ , κατά τη φόρτιση, ξεκινά με κυματομορφή 10.7A και μέχρι το τέλος της φόρτισης φτάνει την τιμή των 13.8A. Στην αρχή της εκφόρτισης, μειώνεται στα 2.4A και σταδιακά αυξάνει ελάχιστα μέχρι το τέλος της εκφόρτισης στα 2.5A (εικόνα 8.33).

Το ρεύμα  $I_n$ , κατά τη φόρτιση, παράγει ρεύμα στην τιμή των 7.3A το οποίο σταδιακά αυξάνεται καθ'όλη τη διάρκεια της φόρτισης στα 10.4A. Στην εκφόρτιση η τιμή του πέφτει στα 1.9A και αυξάνεται μέχρι τα 5.1A (εικόνα 8.33).

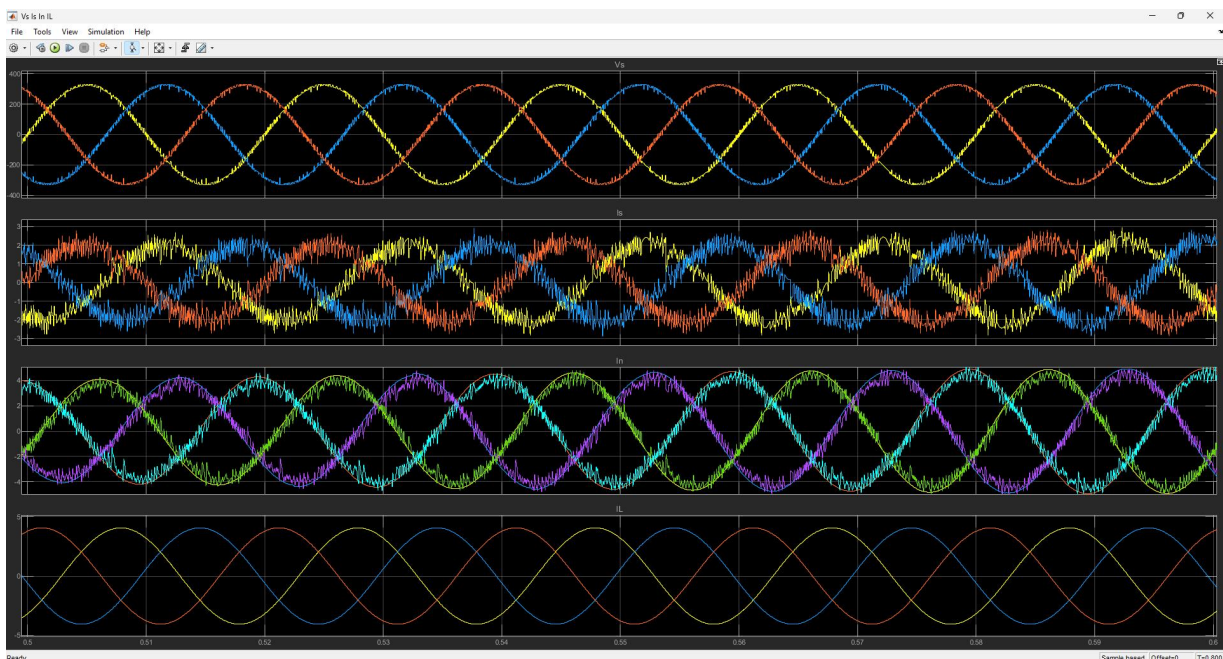
Οι διαφορές των φάσεων στα ρεύματα σε σχέση με την τάση δικτύου φαίνεται στις εικόνες 8.34 και 8.35.



Εικόνα 8.33: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  (720V -20°)



Εικόνα 8.34: Διαφορές φάσεων (720V -20° φόρτιση)



Εικόνα 8.35: Διαφορές φάσεων (720V -20° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

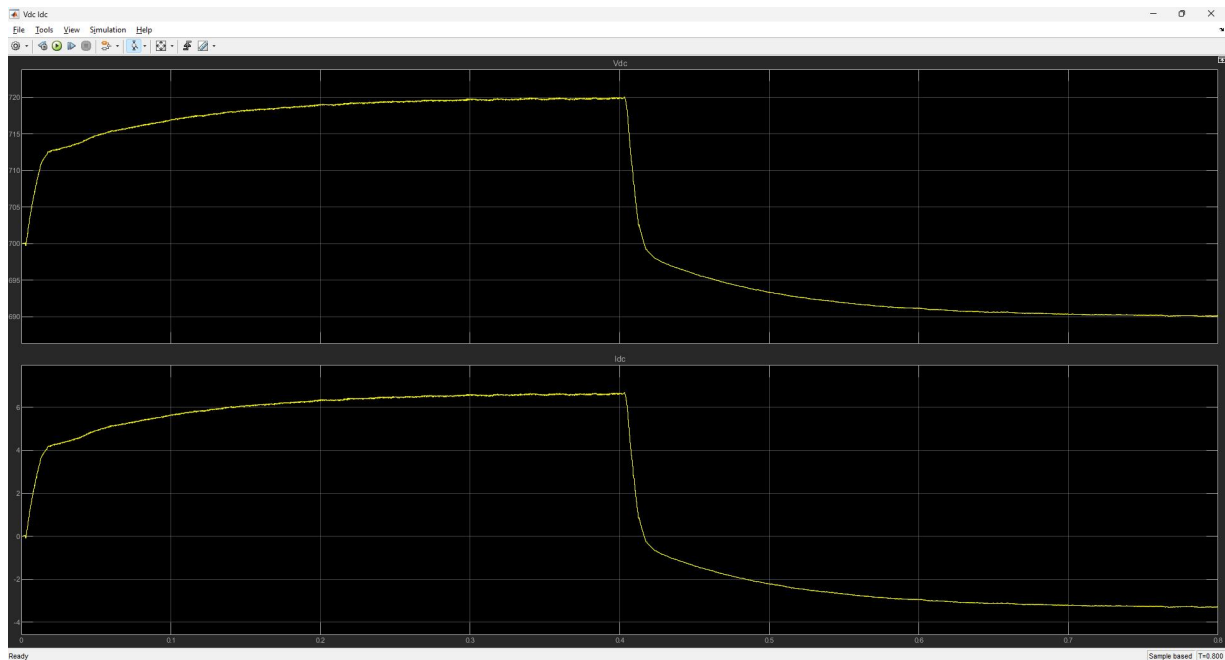
Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-994.4 W
	Αεργός Ισχύ	655.3 Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2229 W
	Αεργός Ισχύ	903.5 Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1238W
	Αεργός Ισχύ	1555 Var

### 8.8 8η προσομοίωση

Για την τελευταία προσομοίωση θα θέσουμε την τάση  $V_{dc}^*=720V$  και γωνία  $-30^\circ$ .

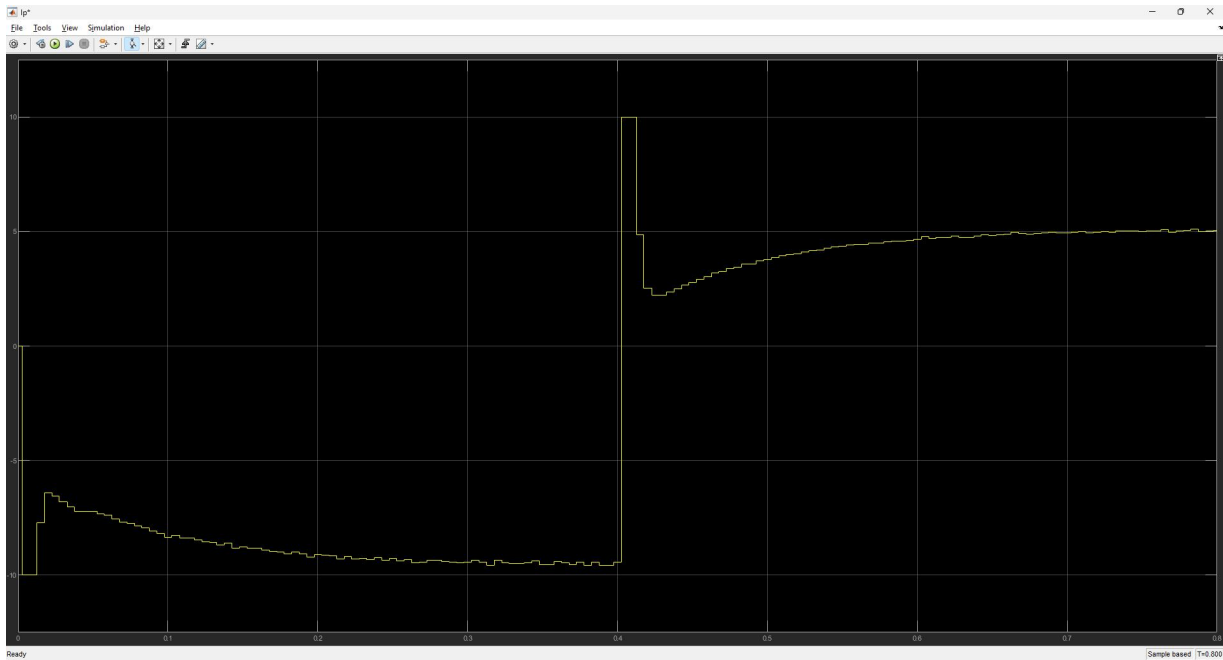
Η κυματομορφή της  $V_{dc}$  όπως και της  $I_{dc}$  είναι όμοιες με τις προηγούμενες κυματομορφές των  $720V$ . Η τάση στην αρχή της φόρτισης παίρνει πολύ γρήγορα την τιμή των  $712.5V$  και για το υπόλοιπο της φόρτισης αυξάνεται σταδιακά μέχρι τα  $720V$ . Στην αρχή της εκφόρτισης, πέφτει γρήγορα στην τιμή των  $699V$  και μέχρι το τέλος της εκφόρτισης μειώνεται σταδιακά μέχρι τα  $690V$ .

Το ρεύμα ακολουθεί το ίδιο μοτίβο, παίρνοντας στην αρχή της φόρτισης την τιμή των  $4.2A$  και στη συνέχεια με βαθμιαία αύξηση, φτάνει στην τιμή των  $6.6A$ . Στην εκφόρτιση, μειώνεται γρήγορα στα  $-0.3A$  και στη συνέχεια για το υπόλοιπο της εκφόρτισης, μειώνεται σταδιακά μέχρι τα  $-3.3A$ . (εικόνα 8.36)



Εικόνα 8.36: Κυματομορφές  $V_{dc} - I_{dc}$  ( $720V - 30^\circ$ )

Το  $I_p^*$  ομοίως με τα αντίστοιχα ρεύματα στις προηγούμενες προσομοιώσεις, παίρνει απότομα την τιμή των  $-10A$  στην αρχή της φόρτισης και αφού επανέλθει γρήγορα στα  $-6.4A$ , μειώνεται σταδιακά στα  $-9.5A$  μέχρι το τέλος της ημιπεριόδου. Στην εκκίνηση της εκφόρτισης, αυξάνεται ραγδαία στα  $10A$  και αφού επανέλθει σύντομα στα  $2.2A$ , συνεχίζει σταθερή άνοδο μέχρι τα  $5A$  (εικόνα 8.37).

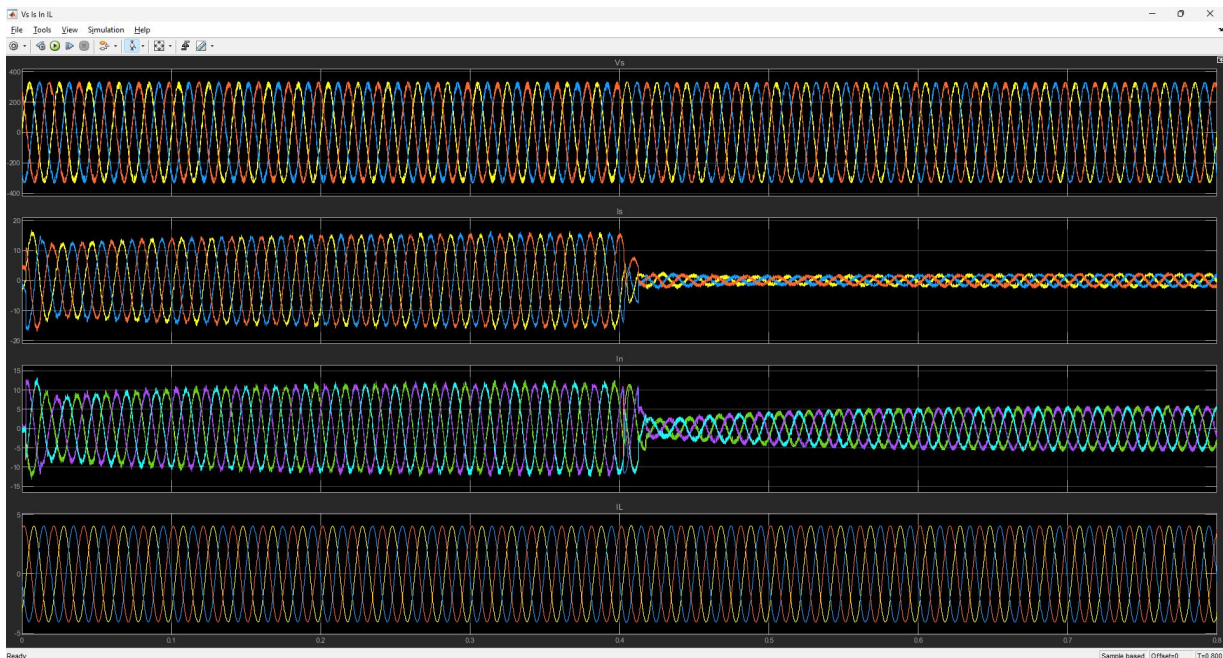


Εικόνα 8.37: Κυματομορφή  $I_r^*$  (720V -30°)

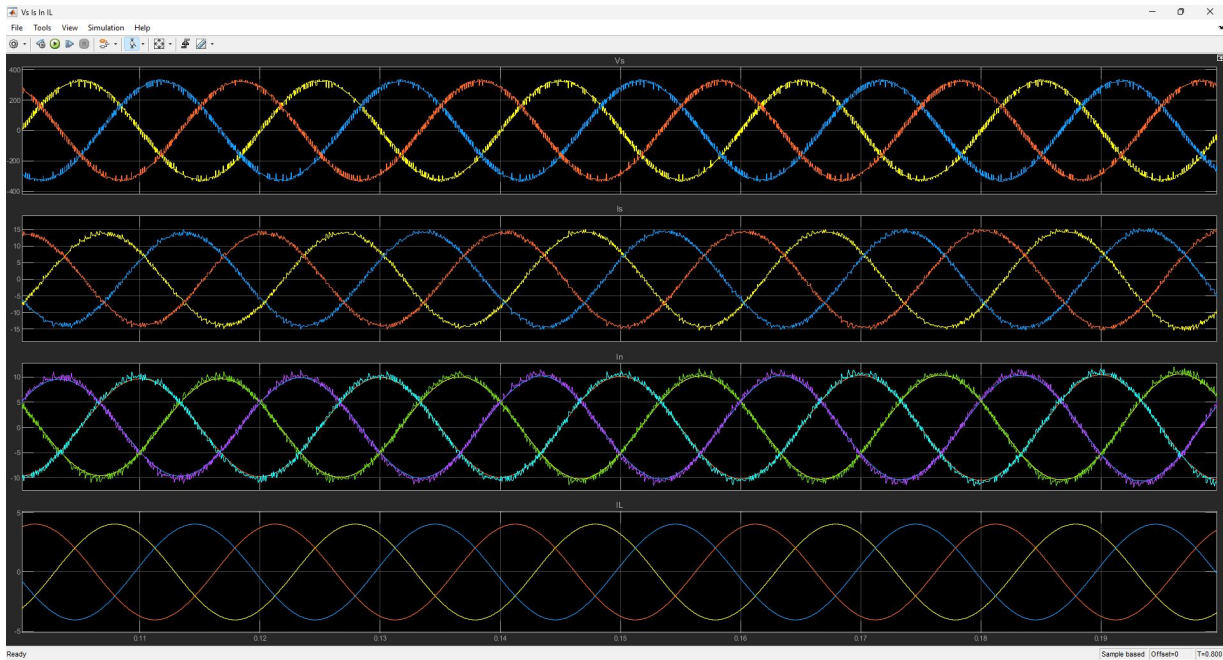
Το ρεύμα δικτύου  $I_s$ , στην αρχή της φόρτισης ξεκινάει με τιμή 11.5A και φτάνει έως τα 15A στο τέλος της φόρτισης. Στην εκφόρτιση, η τιμή του μειώνεται στα 2A τα οποία και διατηρεί για το υπόλοιπο της εκφόρτισης (εικόνα 8.38).

Το ρεύμα του μετατροπέα  $I_n$ , στην αρχή της φόρτισης ξεκινάει με τιμή 7.9A, τα οποία σταδιακά αυξάνονται έως την τιμή 11.3A. Στην εκφόρτιση, η τιμή του ρεύματος μειώνεται στα 2.3A, τα οποία σταδιακά αυξάνονται έως τα 5.4A (εικόνα 8.38).

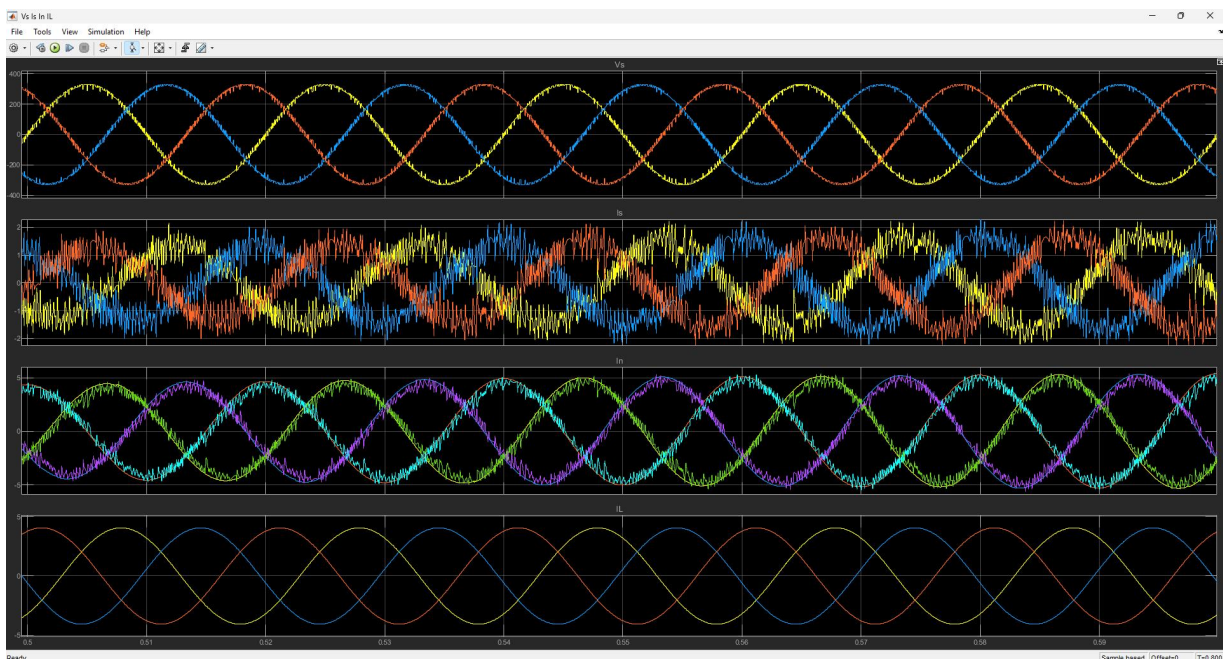
Η διαφορά φάσης μεταξύ ρευμάτων και τάσης δικτύου, φαίνεται στις εικόνες 8.39 και 8.40.



Εικόνα 8.38: Κυματομορφές  $V_s - I_s - I_n - I_L$  (720V -30°)



Εικόνα 8.39: Διαφορές φάσεων (720V -30° φόρτιση)



Εικόνα 8.40: Διαφορές φάσεων (720V -30° εκφόρτιση)

Οι μετρήσεις των ισχύων του κυκλώματος είναι οι εξής:

Δίκτυο:	Ενεργός Ισχύ	-982.5 W
	Αεργός Ισχύ	142.7 Var
Μετατροπέας:	Ενεργός Ισχύ	2219 W
	Αεργός Ισχύ	1419 Var
Φορτίο:	Ενεργός Ισχύ	1240 W
	Αεργός Ισχύ	1558 Var

## Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις από την προσομοίωση του τριφασικού IGBT μετατροπέα, ο οποίος σχεδιάστηκε για την αμφίδρομη ροή ενέργειας στην μπαταρία. Οι προσομοιώσεις είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση της απόδοσης και του ορθού σχεδιασμού του συστήματος, ώστε να γίνει η σωστή υλοποίηση σε επόμενο στάδιο.

Στις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν, οι παράμετροι που άλλαζαν ήταν η τάση  $V_{dc}^*$ , η οποία ήταν υπεύθυνη για τη φόρτιση της μπαταρίας, και η γωνία για την παραγωγή του ρεύματος  $I_Q^*$ , το οποίο ήταν υπεύθυνο για την παραγωγή των τριών ρευμάτων αναφοράς  $I_{abc}^*$ .

Όταν άλλαζε η τιμή της  $V_{dc}^*$ , παρατηρήθηκαν αλλαγές στις τιμές των κυματομορφών. Αλλάζοντας την τιμή από 710V σε 720V, πρακτικά αυτό που επιτυγχάνουμε είναι να φορτίσουμε τη μπαταρία πιο γρήγορα. Επομένως οι τιμές στις κυματομορφές  $V_{dc}$  και  $I_{dc}$  της μπαταρίας αυξήθηκαν, ως αποτέλεσμα της γρηγορότερης φόρτισης. Στην εκφόρτιση της μπαταρίας, οι τιμές δεν παρουσίασαν σημαντική αλλαγή, καθώς οι απαιτήσεις της ισχύς του δικτύου ήταν ίδιες, οπότε η μπαταρία εκφόρτιζε με τον ίδιο ρυθμό κάθε φορά. Τα ρεύματα  $I_s$  και  $I_n$  στην αλλαγή της  $V_{dc}^*$  στα 720V, παρουσίασαν σημαντική αύξηση κατά την ημιπερίοδο της φόρτισης, όπως είναι αναμενόμενο καθώς η μπαταρία απαιτούσε υψηλότερο ρεύμα για να φορτίσει με γρηγορότερο ρυθμό. Στην εκφόρτιση της, οι τιμές τους παρέμειναν περίπου στα ίδια επίπεδα με την προσομοίωση των 710V.

Η αλλαγή της γωνίας ήταν το σημαντικότερο σημείο μελέτης για την προσομοίωση του μετατροπέα. Η κυματομορφή του ρεύματος δικτύου, επηρεαζόταν από την αλλαγή της γωνίας, όχι τόσο στις τιμές της έντασης, όσο στη διαφορά φάσης της με την τάση δικτύου. Στα διάφορα σενάρια παρατηρήσαμε πως η διαφορά φάσης στη φόρτιση ήταν κατά προσέγγιση 20°, 30°, 35° και 40° για γωνία 0°, -10°, -20° και -30° αντίστοιχα, ενώ στην εκφόρτιση η διαφορά φάσης ήταν προσεγγιστικά 130°, 135°, 145° και 165° για γωνία 0°, -10°, -20° και -30° αντίστοιχα. Παρατηρούμε δηλαδή πως οι κυματομορφές του ρεύματος  $I_s$ , μετατοπίζονται στο χρόνο προς τα δεξιά, που σημαίνει πως καθυστερούν περισσότερο σε σχέση με την τάση δικτύου. Γενικά η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος δικτύου εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του κυκλώματος. Όταν το κύκλωμα βρίσκεται στην ημιπερίοδο της φόρτισης, δηλαδή το δίκτυο παρέχει ισχύ στη μπαταρία, η τάση και το ρεύμα δικτύου βρίσκονται σε φάση, δηλαδή διαφορά φάσης 0° ή πολύ κοντά στις 0°. Αντίθετα, όταν το κύκλωμα βρίσκεται στην εκφόρτιση, άρα η μπαταρία παρέχει ισχύ πίσω στο δίκτυο, το ρεύμα αλλάζει φορά και η διαφορά φάσης πλέον είναι 180° ή πολύ κοντά στις 180°. Αυτές οι τιμές αφορούν ένα ιδανικό σύστημα όπου η παραγόμενη ισχύς είναι μόνο ενεργός. Όταν υπάρχει παρουσία άεργου ισχύος, αυτό επηρεάζει τη διαφορά φάσης ανάλογα με το επαγωγικό ή χωρητικό φορτίο του κυκλώματος. Στην περίπτωση του κυκλώματος μελέτης, το φορτίο είναι επαγωγικό, επομένως το ρεύμα καθυστερεί σε σχέση με την τάση. Αυτό που επιτυγχάνουμε αυξάνοντας τη γωνία είναι να ελέγξουμε την παραγωγή της άεργου ισχύς, κάτι που φαίνεται και στα αποτελέσματα ισχύος που μελετήσαμε στο τέλος κάθε σεναρίου.

Το φορτίο σε κάθε σενάριο προσομοίωσης, απαιτεί την ίδια ενεργό και άεργο ισχύ, περίπου 1235W και 1553Var. Κάθε φορά που αυξάνεται η γωνία, παρατηρούμε πως η άεργος ισχύς του δικτύου μειώνεται, ενώ αυξάνεται η άεργος ισχύς του μετατροπέα. Αυτό σημαίνει πως όσο αυξάνουμε τη γωνία, το φορτίο λαμβάνει όλο και μεγαλύτερο ποσοστό της άεργου ισχύος που χρειάζεται από τον μετατροπέα. Άρα ρυθμίζοντας τη γωνία του ρεύματος  $I_Q^*$ , καθορίζουμε από που θα πάρει το φορτίο την άεργο ισχύ που χρειάζεται.

Πίνακας 9.1 Άεργος ισχύ δικτύου - μετατροπέα για 710V

	0°	-10°	-20°	-30°
<b>Is</b>	1564Var	1131Var	674.8Var	130.1Var
<b>In</b>	-10.3Var	424.6Var	884Var	1432Var

Πίνακας 9.2 Άεργος ισχύ δικτύου - μετατροπέα για 720V

	0°	-10°	-20°	-30°
<b>Is</b>	1567Var	1132Var	655.3Var	142.7Var
<b>In</b>	-13.89Var	423.8Var	903.5Var	1419Var

Η παρούσα εργασία εστίασε στη μελέτη ενός αρχικού κυκλώματος μετατροπέα για τον έλεγχο της αμφίδρομης ροής της ισχύος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προσφέρουν εξαιρετική γνώση για τη λειτουργία και την απόδοση του συστήματος, όπως και για τις προκλήσεις που θα προκύψουν στη βελτίωση και την υλοποίηση του. Μια πολύ χρήσιμη αναβάθμιση του συστήματος, και συνεπώς μελλοντική μελέτη αυτού, είναι η αυτόματη ρύθμιση της άεργου ισχύος που στο κύκλωμα που μελετήθηκε, επιτεύχθηκε μέσω της χειροκίνητης ρύθμισης της γωνίας, για την παραγωγή των ρευμάτων αναφοράς  $I_{ABC}^*$ .

# Βιβλιογραφία

## Βιβλία

- [1] Ιορδάνης Κιοσκερίδης, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Εκδόσεις Τζιόλα 2008
- [2] Ιορδάνης Κιοσκερίδης, *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Ισχύος*, Εκδόσεις Τζιόλα 2017
- [3] Callister, William D. Jr. *Materials Science & Engineering – An Introduction: Sixth Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2003
- [4] Gibilisco Stan. *The Illustrated Dictionary of Electronics: Eighth Edition*, McGraw-Hill, Inc., 2001
- [5] Jespersen, Neil. *Chemistry: First Edition*, Barron's Educational Series, 1997
- [6] Linden, David. *Handbook of Batteries: Second Edition*, McGraw-Hill, Inc., 1995
- [7] Linden. David & Thomas B. Reddy. *Handbook of Batteries: Third Edition*, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2002
- [8] Nilsson, James W. *Electric Circuits: Third Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- [9] Ruben, Samuel. *The Evolution of Electric in Response to Industrial Needs*, Dorrance & Company, 1978
- [10] Tuck, Clive D. S. *Modern Battery Technology*, Ellis Horwood Limited, 1991
- [11] Van Schalkwijk, Walter A. & Bruno Scrosati. *Advances in Lithium-Ion Batteries* Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002
- [12] Van Vlack, Lawrence H. *Elements of Materials Science & Engineering: Sixth Edition*, Addison-Wesley Publishing Company, 1990
- [13] Vincent, Colin & Bruno Scrosati. *Modern Batteries: Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 1997

## Internet Site

- [1] [https://www.wikiwand.com/en/VRLA\\_battery](https://www.wikiwand.com/en/VRLA_battery)
- [2] [https://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/topic\\_intro.html](https://depts.washington.edu/matseed/batteries/MSE/topic_intro.html)
- [3] <https://www.cei.washington.edu/research/energy-storage/lithium-ion-battery/>
- [4] <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-ac-converters/pulse-width-modulation-techniques>
- [5] <https://testbook.com/physics/pulse-width-modulation>
- [6] <https://embeddedwala.com/Blogs/DigitalCommunication/pulse-width-modulation-an-introduction-and-applications>
- [7] <https://www.geeksforgeeks.org/pulse-width-modulation-pwm/>
- [8] <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>
- [9] <https://www.geeksforgeeks.org/proportional-integral-controller-control-system/>
- [10] <https://electronicscoach.com/proportional-integral-controller.html>
- [11] [https://www.tutorialspoint.com/digital\\_communication/digital\\_communication\\_delta\\_modulation.htm](https://www.tutorialspoint.com/digital_communication/digital_communication_delta_modulation.htm)
- [12] <https://testbook.com/physics/delta-modulation>
- [13] <https://circuitdigest.com/tutorial/different-types-of-inverters>

## Articles

- [1] <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>
- [2] <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>
- [3] <https://eepower.com/technical-articles/lead-acid-battery-basics/#>
- [4] <https://savree.com/en/encyclopedia/flooded-lead-acid-battery>
- [5] <https://ul.org/research/electrochemical-safety/getting-started-electrochemical-safety/what-are-lithium-ion>
- [6] <https://www.circuitbread.com/ee-faq/how-does-an-igbt-work-meaning-structure>, July 2023
- [7] <https://www.hinen.com/blogs/energy-storage/pwm-inverters>, July 2024
- [8] <https://www.tycorun.com/blogs/news/types-of-inverter?srltid=AfmBOopqyuEEbTHuJeLhNB7s4-11ZqnOGAHCdKJv80gZfyHQCGIaU3m#classification-by-output-waveform>, Oct 2023
- [9] <https://floriser.com/embedded-systems/3-phase-igbt-inverter-working-principles/>, Feb 2024