



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Σύγκριση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος  
κατάλληλων για την βελτίωση της ποιότητας της  
τάσης και του ρεύματος δικτύου»**

του φοιτητή:

**Τονάρντο Ταχίρι**

**Αριθμός Μητρώου: 7749**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Κωνσταντίνος Γ. Γεωργάκας, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου

ΠΑΤΡΑ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2021

## **Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή**

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

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

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

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Γεωργάκα, για την πολύτιμη βοήθεια και την επιστημονική του καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την στήριξη και τη συμπαράσταση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Τονάρντο Ταχίρι

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα μελετηθούν δυο κλασικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος όταν χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό. Ο σκοπός είναι η βελτίωση της ποιότητας της τάσης και του ρεύματος δικτύου μεσώ του ελέγχου της ποσότητας ισχύος που απορροφούν οι μετατροπείς αυτοί. Οι συγκεκριμένοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς θα τροφοδοτήσουν ένα ωμικό φορτίο σε ένα μικροδίκτυο ή σε ένα αυτόνομο δίκτυο. Το συγκεκριμένο ωμικό φορτίο μπορεί να είναι ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνα. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς θα κάνουν έλεγχο της ποσότητας της ισχύος, ρυθμίζοντας την πτώση τάσης του δικτύου και ως επακόλουθο την τιμή της τάσης του δικτύου. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος και της τάσης όσων αφορά τις ανώτερες αρμόνικες, όπου υπάρχουν φόρτια τα οποία επιβαρύνουν με ανώτερες αρμόνικες το δίκτυο. Τα παραπάνω οφέλη συνδυάζονται με την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας καθιστώντας τον θερμοσίφωνα μια αποθήκη ενέργειας.

## **ABSTRACT**

In the current diploma thesis, two classic power electronic converters will be studied when they are used for the same purpose. The aim is to improve the quality of the grid voltage and current by controlling the amount of power absorbed by these converters. These converters will be supplying an ohmic load to a microgrid or a stand-alone grid. The specific resistive load may be an electric water heater. The electronic converters will control the power amount, adjusting the grid voltage drop and consequently the grid voltage value. They can also be used to improve the current and voltage quality in terms of high order harmonics, where there are loads burden the grid with high order harmonics. The above benefits are combined with the ability to store energy, making the water heater an energy store.

## ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στις μέρες μας η ηλεκτρική ενέργεια είναι κομμάτι της ζωής του ανθρώπου. Η συνεχόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας επιφέρει αυξανόμενες απαιτήσεις διαχείρισης της ενέργειας του δικτύου. Τα τελευταία χρόνια μελετάται η δυνατότητα διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας από τα φορτία με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Με τη βοήθεια αυτών μπορούμε να επέμβουμε στην κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος και να επηρεάσουμε την ποιότητα της τάσης και του ρεύματος.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετώνται δυο κλασικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος όταν χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό. Στόχος είναι η βελτίωση της ποιότητας της τάσης και του ρεύματος δικτύου μέσω του ελέγχου της ποσότητας ισχύος που απορροφούν οι μετατροπείς αυτοί. Οι συγκεκριμένοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς θα τροφοδοτήσουν ένα ωμικό φορτίο σε ένα μικροδίκτυο ή σε ένα αυτόνομο δίκτυο. Το συγκεκριμένο ωμικό φορτίο μπορεί να είναι ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνα. Οι μετατροπείς αυτοί θα κάνουν έλεγχο της ποσότητας της ισχύος, ρυθμίζοντας την πτώση τάσης του δικτύου και ως επακόλουθο την τιμή της τάσης του δικτύου. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος και της τάσης όσων αφορά τις ανώτερες αρμόνικες, όπου υπάρχουν φόρτια τα όποια επιβαρύνουν με ανώτερες αρμόνικες το δίκτυο. Τα παραπάνω οφέλη συνδυάζονται με την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας καθιστώντας τον θερμοσίφωνα ως μία αποθήκη ενέργειας.

Τα μέρη τα οποία θα αναπτυχθούν στην παρούσα πτυχιακή είναι τα εξής:

Στο πρώτο Κεφάλαιο περιγράφονται οι ηλεκτρικοί μετατροπείς ισχύος. Ποιο συγκεκριμένα οι δύο κλασικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος, ένας μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη (AC-AC) και ένας μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση (AC-DC). Στη συνέχεια περιγράφεται η τεχνική παλμοδότησης η οποία είναι η Ημιτονοειδής Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM). Τέλος, περιγράφεται η διαδικασία μείωσης των ανώτερων αρμονικών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μελετάται μέσω προσομοίωσης ο AC-AC μετατροπέας μαζί με τα υποσυστήματα του υπολογισμού της ενεργού τιμής της ισχύος, της παλμοδότησης, του υπολογισμού των αρμονικών μαζί με την κατασκευή του ημιτόνου αναφοράς. Επίσης, η τεχνική ελέγχου που δοκιμάζεται για την βελτίωση των ανώτερων αρμονικών.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται μέσω προσομοίωσης ο AC-DC μετατροπέας μαζί με τα απαραίτητα υποσυστήματα, όπως ο μετατροπέας του δεύτερου κεφαλαίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η αποδοτικότητα της τεχνικής ελέγχου για τη βελτίωση των αρμονικών και αναδεικνύεται ως καταλληλότερη μία τεχνική ελέγχου από τη βιβλιογραφία.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις συγκρίσεις.

Τονάρντο Ταχίρι

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	10
ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ .....	10
1.1. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	10
1.2. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και οι επιπτώσεις της λειτουργίας τους στην ποιότητα του ρεύματος.....	11
1.3. ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ .....	13
1.4. Γωνία $\phi_h$ ανωτέρων αρμονικών.....	15
1.5. Ανάγκη αυτομάτου ελέγχου .....	17
1.6. Τεχνική παλμοδότησης SPWM.....	20
1.7. Προτεινόμενη τεχνική στη βιβλιογραφία .....	21
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	23
Περιγραφή του μελετώμενου συστήματος .....	23
2.1. Εισαγωγή.....	23
2.2. Ανάγκη ελέγχου της ενεργού ισχύος.....	23
2.3. Ο έλεγχος της Ενεργού Ισχύος και η Δημιουργία των παλμών της τροποποιημένης SPWM σε περιβάλλον Simulink.....	26
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	31
Ανάδειξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος AC-AC ως συσκευή διόρθωσης Σ.Ι..	31
3.1. Εισαγωγή.....	31
3.2. Μελετώμενο Σύστημα – Σκοπός Πτυχιακής.....	31
3.3. Μετατροπέας Ισχύος AC/AC.....	32
3.4. Μπλοκ ελέγχου ενεργού ισχύος .....	33
3.5. Μπλοκ ελέγχου ανωτέρων αρμονικών .....	36
3.6. Αποτελέσματα .....	40
4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....	43
Εξομοίωση του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος AC-DC .....	43
4.1. Εισαγωγή.....	43
4.2. Μελετώμενο Σύστημα – Σκοπός Πτυχιακής.....	43
4.3. Μετατροπέας Ισχύος AC/DC.....	44
4.4. Μπλοκ ελέγχου ανωτέρων αρμονικών .....	45
4.5. Αποτελέσματα εξομοίωσης .....	45



<b>5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ.....</b>	<b>49</b>
<b>5.1. Σύγκριση των δυο μετατροπέων ισχύος με έλεγχο PI .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2. Σύγκριση των δυο διαφορετικών τεχνικών ελέγχου .....</b>	<b>49</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>53</b>

# 1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

### 1.1. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα κόμματι της ζωής του ανθρώπου. Οι ανάγκες των ανθρώπων είναι συνδεδεμένες με την ύπαρξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύστημα, που έχει εγκατεστημένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του συστήματος είναι να τροφοδοτεί τους καταναλωτές με ηλεκτρική ενέργεια. Το ΣΗΕ αποτελείται από τα εξής επιμέρους συστήματα:

- α) Σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος δηλαδή της εγκατάστασης οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.
- β) Υποσταθμούς οποίοι είναι οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, στις οποίες ανυψώνεται, ή υποβιβάζεται η τάση.
- γ) Γραμμές μεταφοράς δηλαδή είναι τα δίκτυα, τα οποία μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια από τους παραγωγούς στους υποσταθμούς.
- δ) Γραμμές διανομής είναι τα δίκτυα τα οποία διαμένουν την ηλεκτρική ενέργεια από τον υποσταθμό στους καταναλωτές.

Ωστόσο όμως λόγω της ραγδαίας αύξησης στην ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας υπήρξε μια στροφή προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγες ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτού του είδους η εξέλιξη έκανε τη χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος επιτακτική διότι, με την βοήθεια τους πλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ΑΠΕ.[1]

## 1.2. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος και οι επιπτώσεις της λειτουργίας τους στην ποιότητα του ρεύματος

Η αποστολή των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος με την ευρεία έννοια του όρου είναι η επεξεργασία και ο έλεγχος της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή τάσεων και ρευμάτων με βέλτιστα διαμορφωμένη μορφή, κατάλληλη για το χρησιμοποιούμενο φορτίο. Αυτή η τάση δημιουργεί ένα ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα. Η γωνία φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα εισόδου εξαρτάται από την τοπολογία, την παλμοδότηση του μετατροπέα ισχύος αλλά και από το φορτίο. Αν ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή τάσης, το ρεύμα εξόδου και η διαφορά φάσης ανάμεσα στο ρεύμα και την τάση εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Συνήθως, η έξοδος του μετατροπέα ισχύος συγκρίνεται με μια επιθυμητή τιμή εισόδου (είσοδο αναφοράς) και το μεταξύ τους σφάλμα ελαχιστοποιείται με τη βοήθεια ενός ελεγκτή.

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη. Ένας σημαντικός λόγος είναι η ευκολία ελέγχου. Αυτός ο έλεγχος εφαρμόζεται μέσω της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος με τη βοήθεια ενός μικροελεγκτή. Ένα πλήρες σύστημα ελέγχου αποτελείται συνήθως από αναλογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα και από ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (DSP) μέσω των οποίων γίνεται η παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος του μετατροπέα. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος έφεραν την επανάσταση στις εφαρμογές της ηλεκτρικής ενέργειας. Δε θα υπήρχε δυνατότητα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ αν δεν υπήρχαν οι μετατροπείς αυτοί. Επίσης, σημαντικός είναι ο ρόλος τους στην μείωση των αρμονικών στο δίκτυο μεταφοράς ενέργειας. Γενικά οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος βρίσκονται πλέον σχεδόν σε κάθε παράμετρο του ηλεκτρικού συστήματος. Κάποια παραδείγματα φαίνονται παρακάτω:

- Οικιακές (θέρμανση, ψύξη, μαγείρεμα, φωτισμός, εξοπλισμός Η/Υ)
- Βιομηχανικές (αντλίες, συμπιεστές, γερανογέφυρες, lasers, επαγωγική θέρμανση, συγκολλήσεις)

- Μεταφορές (ηλεκτροκίνητα οχήματα, ηλεκτρικά τρένα)
- Κοινωφελή συστήματα (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Μεταφορά υψηλής DC τάσης, μείωση αρμονικών)
- Τηλεπικοινωνίες (τροφοδοτικά ηλεκτρικών συσσωρευτών, τροφοδοτικά)

Οι βασικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος ταξινομούνται με βάση την τάση ή το ρεύμα εισόδου – εξόδου. Άρα είναι οι εξής:

- DC/DC
- DC/AC
- AC/AC
- AC/DC

Με την λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος πολλές φορές επηρεάζεται η κυματομορφή του ρεύματος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι αρμονικές στο δίκτυο. Επιπλέον, με την αύξηση του ρεύματος δημιουργείται πτώση τάσης στην εμπέδηση του δικτύου με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης. Στην περίπτωση που η τάση του δικτύου είναι αυξημένη (π.χ. λόγω μείωσης των φορτίων που τροφοδοτούνται την παρούσα χρονική στιγμή), μπορεί να μειωθεί με την επιτηδευμένη αύξηση φορτίων η χρήση των οποίων δεν είναι κρίσιμη. Αυτό μπορεί να συμβεί καθώς το φορτίο μας είναι ελαστικό. Δηλαδή, μπορεί να μπει και να βγει όταν απαιτείται, καθώς δεν είναι κρίσιμη η τροφοδοσία του. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί τον κεντρικό έλεγχο από το διαχειριστή του δικτύου. Επίσης, λόγω της εμπέδησης του δικτύου οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος δημιουργούν ανώτερες αρμονικές στην τάση με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας της τάσης του δικτύου στο σημείο σύνδεσης.[2]

Εμείς θα προσπαθήσουμε με την χρήση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος να περιορίσουμε τις αρμονικές του δικτύου. Η εργασία μας στηρίζεται στην τεχνική παλμοδοτηση που θα εφαρμοσθή στον μετατροπέα έτσι ώστε να περιορίζει τις αρμονικές.

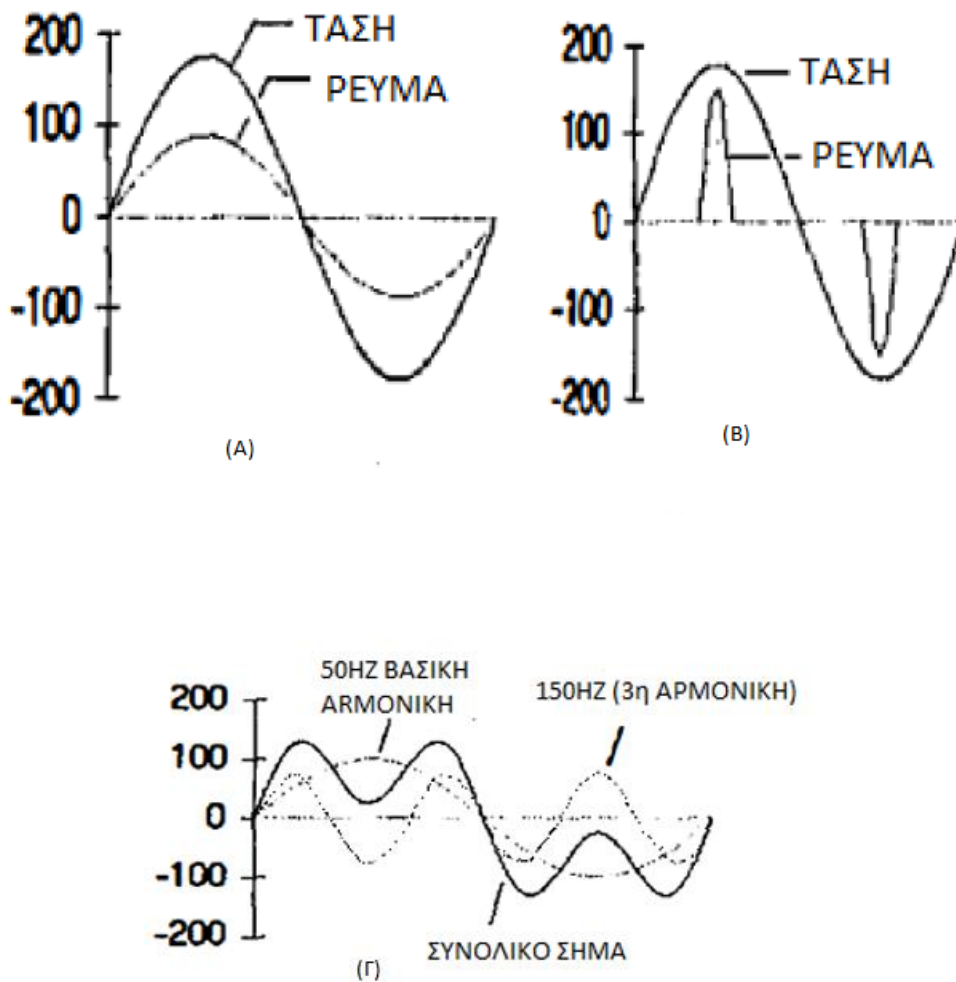
### 1.3. ΑΝΩΤΕΡΕΣ ΑΡΜΟΝΙΚΕΣ

Η ύπαρξη των αρμονικών στη τάση και το ρεύμα οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των μη γραμμικών φορτίων, όπου το ρεύμα έχει διαφορετική κυματομορφή από αυτήν της τάσης. Μέσω της τάσης και σε συνάρτηση με την ισχύ βραχυκυκλώσεως του δικτύου, οι αρμονικές δημιουργούν προβλήματα στα ηλεκτρικά φορτία.

Επόμενος, ένα περιοδικό σήμα ρεύματος το οποίο έχει απόκλιση από τη καθαρά ημιτονοειδή μορφή του ρεύματος, μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα σύνολο ημιτονοειδών κυματομορφών με συχνότητα ίση με την ακέραια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας. Η βασική συχνότητα είναι η συχνότητα της 1ης αρμονικής και λέγεται θεμελιώδης συχνότητα. Μια ημιτονοειδής κυματομορφή με ακέραια συχνότητα και φορές μεγαλύτερη από την θεμελιώδη ορίζεται ως και αρμονική διαταραχή. Αυτό όμως δημιουργεί προβλήματα στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας όπου παράγονται ανώτερες αρμονικές στην τάση του δικτύου.

Τα φορτία τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αρμονικές όταν απορροφούν ρεύμα με κυματομορφή διαφορετική από αυτή της τάσης είναι συνήθως φορτία που περιέχουν ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, αλλά και φορτία ανομοιόμορφα κατασκευασμένα όπως οι ηλεκτρικές μηχανές με ανομοιόμορφο τύλιγμα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φορτίων που αυξάνουν τις ανώτερες αρμονικές είναι: τα κλιματιστικά, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, οι φορτιστές μπαταριών, ο εξοπλισμός τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και γενικά το μεγαλύτερο μέρος των σύγχρονων φορτίων αλλά και γενικά το πλήθος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα προβλήματα που μπορούν να προκαλέσουν είναι η αύξηση των απωλειών στις γραμμές των δικτύων, των μετασχηματιστών, καθώς και η υπερδιαστασιολόγηση του δικτύου. Επίσης, εμφανίζονται υπερτάσεις ή βύθιση τάσης με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στις ηλεκτρονικές συσκευές. Ένα άλλο θέμα που μπορεί να προκύψει είναι ότι μη ημιτονοειδές ρεύμα δημιουργεί μη ημιτονοειδή τάση με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά φορτία καθώς και αύξηση των απωλειών των ηλεκτρικών μηχανών. Στην αύξηση των απωλειών του δικτύου συμβάλει και η καθυστέρηση του ρεύματος φορτίου ως προς την τάση. Όσο μεγαλύτερη

είναι αυτή, τόσο αυξάνεται η ενεργός τιμή του ρεύματος μέσω των γραμμών του δικτύου. Αυτό συμβάλει στην αύξηση των συνολικών απωλειών του δικτύου. Τόσο οι ανώτερες αρμονικές όσο και η καθυστέρηση του ρεύματος δικτύου ως προς την τάση αυξάνουν την άεργο ισχύ του δικτύου. Για να προσδιοριστεί το ποσοστό της ενεργού ως προς την φαινόμενη ισχύ, χρησιμοποιείται ως δείκτης ο συντελεστής ισχύος.



**Σχήμα 1.2:** Α. Τάση και ρεύμα χωρίς αρμονικές. Β. Ρεύμα με αρμονικές

Γ. συνολικό σήμα με ανώτερες αρμονικές [φυλλάδιο αρμονικών των κινητήριων συστημάτων].

Παραπάνω βλέπουμε στο σχήμα (Α) τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά χωρίς αρμονικές (Β) ρεύμα συμφασικό με την τάση με αρμονικές. Στις μέρες μας γίνεται μεγάλη

προσπάθεια μείωσης των ανωτέρων αρμονικών. Αυτή η μείωση μπορεί να επέλθει με, με τη χρήση παθητικών φίλτρων, με τη χρήση ενεργητικών φίλτρων αλλά και με συνδυασμό αυτών.

Παθητικά φίλτρα είναι κυκλώματα με επαγωγικές και χωρητικές διατάξεις (συνήθως), όπου εμφανίζουν το φαινόμενο συντονισμού σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Αυτά μπορούν να περιορίζουν τη διέλευση επιλεγμένων περιοχών συχνοτήτων.

Ενεργητικά φίλτρα είναι τα φίλτρα τα οποία χρησιμοποιούν κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος, με τα οποία καθορίζουν τη ζητούμενη κυματομορφή τάσης ή ρεύματος. Αυτά μπορούν να υλοποιηθούν είτε με επιπρόσθετο ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος (τοποθετημένο μόνο γι' αυτό το σκοπό), είτε με τη βελτίωση της παλμοδότησης του χρησιμοποιούμενου μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός πριν τη χρήση βελτιωμένων τεχνικών παλμοδότησης μπορεί να ήταν υπεύθυνος για την εμφάνιση αρμονικών, όμως τώρα χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ποιότητας του συνολικού ρεύματος ή τάσης του δικτύου.[2]

Στην παρούσα εργασία εμείς θα παλμοδοτήσουμε κατάλληλα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος ο οποίος τροφοδοτεί ένα ηλεκτρικό φορτίο. Ποιο συγκεκριμένα παλμοδοτούμε τον μετατροπέα με ένα σήμα το οποίο περιέχει την πληροφορία των αντίθετων αρμονικών που υπάρχουν στο δίκτυο έτσι ώστε, να εξαλειφθούν η ανώτερες αρμονικές του δικτύου αυτού.

#### 1.4. Γωνία $\phi_n$ ανωτέρων αρμονικών

Για να μπορέσουμε να βρούμε την γωνιά  $\alpha$  και το πλάτος μιας συγκεκριμένης αρμονικής, γίνεται με την βοήθεια της τεχνικής FFT δηλαδή, με ανάλυση Fourier. Αυτή παρουσιάζει ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο αποσυνθέτει μια συνάρτηση σε άθροισμα απείρων ημιτονοειδών συναρτήσεων όπως φαίνεται παρακάτω:

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t - \phi_n)$$

Όπου:

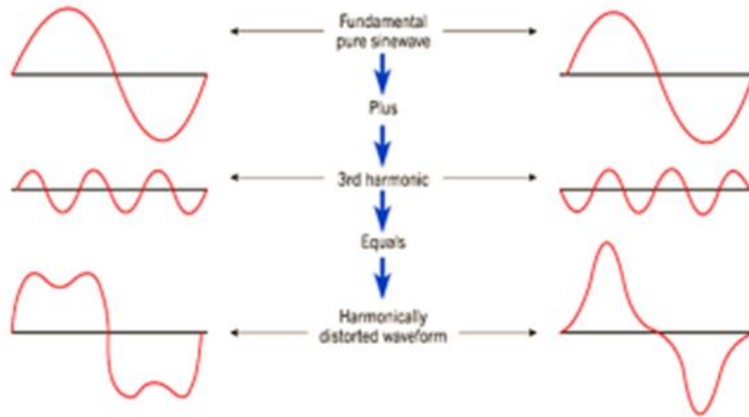
$A_0$ : DC συνιστώσα

$n$  : ακέραιος  $>0$ , τάξη συνιστώσα

$n=1$  : θεμελιώδης συνιστώσα

$A_n$ : πλάτος αρμονικής

$\phi_n$ : διαφορά φάσης μεταξύ θεμελιώδους και αρμονικής συνιστώσας

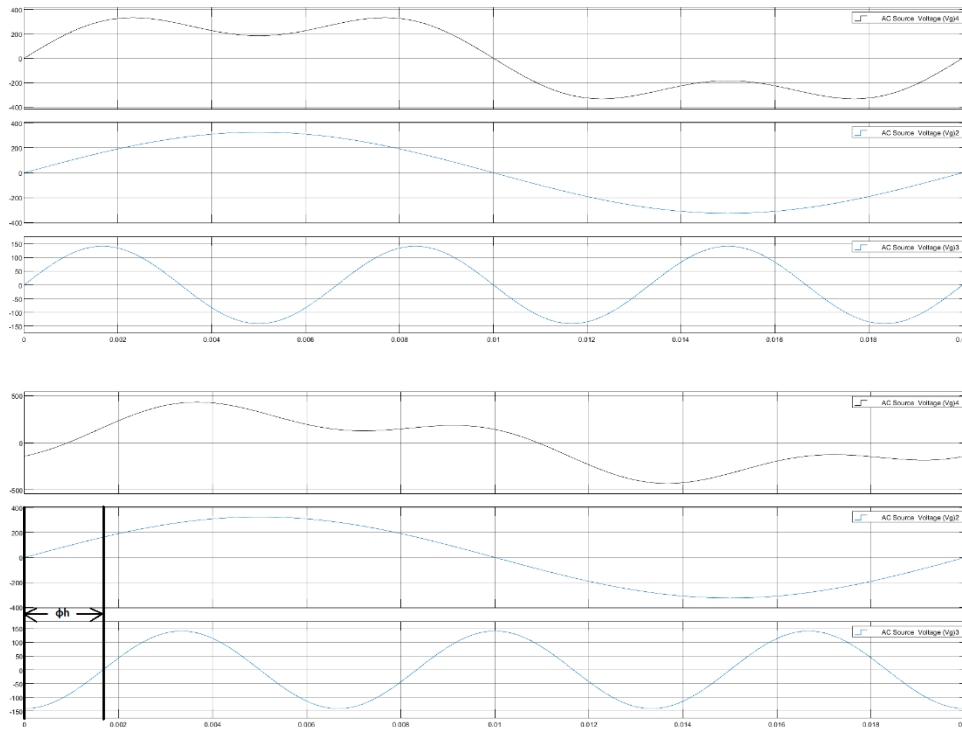


**Σχήμα 1.8:** Ανάλυση αρμονικών με Fourier [φυλλάδιο αρμονικών των κινητήριων συστημάτων].

Ο παραπάνω τύπος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την ανάλυση των αρμονικών. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται από την ανάλυση είναι οι γωνίες και τα πλάτη των αρμονικών. Γωνία  $\Phi_h$  είναι η γωνία μεταξύ κάπας τάξης αρμονικής (π.χ. 3<sup>η</sup> αρμονική) σε σχέση με την 1<sup>η</sup> αρμονική.

Οι ανώτερες αρμονικές του ρεύματος έχουν γωνιά ως προς την τάση της συγκεκριμένης συχνότητας και ως προς τη βασική αρμονική. Η γωνία αυτή συμβολίζεται με το σύμβολο « $\Phi_h$ » στο σχήμα 1.5.





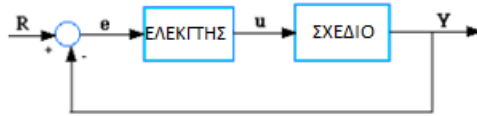
**Σχήμα 1.5:** Σχηματική επεξήγηση της γωνία  $\Phi_h$

Στο πρώτο γράφημα βλέπουμε το ρεύμα όπου έχει μια 3ή αρμονική η οποία είναι συμφασική με την θεμελιώδη αρμονική. Στο δεύτερο γράφημα υποψιαζόμαστε ότι η 3ή αρμονική έχει μια γωνία μεταξύ της θεμελιώδεις συνιστώσας όπου είναι 90 μοίρες. Η γωνία των αρμονικών μας ενδιαφέρει για την παλμοδοτήση όπου θα προσπαθήσουμε να την μηδενίσουμε . Για να το καταφέρουμε τον μηδενισμό των γωνιών και των πλατών των αρμονικών θα πρέπει κατασκευάσου με ένα κλειστό βρόγχο ανατροφοδότησης όπου θα κάνουμε εφαρμογή του αυτομάτου ελέγχου .[3]

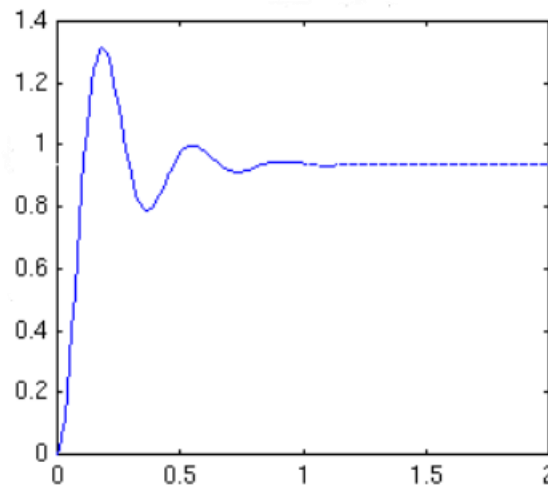
## 1.5. Ανάγκη αυτομάτου ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις μέρες μας, η ανάγκη για τον αυτόματο έλεγχο γίνεται όλο και πιο επιτακτική λόγω των νέων απαιτήσεων. Στην παρούσα εργασία τον αυτόματο έλεγχο το εφαρμόσαμε για να μπορέσουμε να έχουμε τον έλεγχο της ισχύος στην επιθυμητή τιμή, αλλά και να μπορέσουμε να έχουμε τον έλεγχο των γωνιών και των

πλατών των ανώτερων αρμονικών. Συγκεκριμένα δημιουργούμε το σήμα αναφοράς όπου η 1η αρμονική του σήματος αναφοράς εξαρτάται από την ισχύ που θέλουμε να καταναλώνει το σύστημα ενώ τα ανώτερα ημίτονα εξαρτιόνται από την εξάλειψη των αρμονικών . Ένα από τους πιο διαδομένους ελέγχους που δοκιμάστηκε είναι ο PI έλεγχος. Σ' αυτό τον έλεγχο συγκρίνεται το μέγεθος που ελέγχεται με ένα σήμα αναφοράς (στην επιθυμητή τιμή). Το σφάλμα που προκύπτει από την σύγκριση αυτή ανατροφοδοτεί τον ελεγκτή (σχ.1.9).[4]



**Σχήμα 1.9:** Μπλοκ Διάγραμμα του PI σύστημα ελέγχου



**Σχήμα 1.9:** Ένα σήμα u όπου ελέγχεται με PI έλεγχο [φυλλάδιο εργαστηρίου ΣΑΕ]

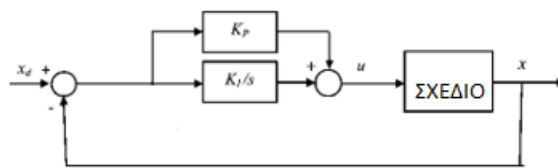
$$u = Kp \cdot e + Ki \cdot \int edt \quad (1)$$

Το σήμα αυτό, θα εκλεχθεί και θα προκύψει ένα νέο σήμα εξόδου (Y). Το σήμα (Y), χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του νέου σήματος σφάλματος (e). Ο ελεγκτής θα λάβει αυτό το νέο σήμα σφάλματος και θα ολοκληρώσει εκ νέου. Αν ο ελεγκτής καταφέρει να σταθεροποιήσει το σύστημα τότε το σφάλμα ελαχιστοποιείται και μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά μηδενικό.

Αυτός ο είδους ελεγκτής PI αποτελείται από δύο ελεγκτές τον αναλογικό (P), τον ολοκληρωτικό (I). Ο αναλογικός έλεγχος χρησιμοποιείται για τον αναλογικό ελεγκτή (Kp) όπου εξαλείφει το μόνιμο σφάλμα και βελτιώνει τον χρόνο ανόδου (σχ. 1.9 x = 0,3). Ο ολοκληρωτικός έλεγχος (Ki) εξαλείφει το σφάλμα σταθερής κατάστασης. Η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτής είναι:

$$K_p + \frac{K_I}{s} = \frac{K_p * s + K_I}{s} \quad (2)$$

Όπου e είναι το σφάλμα και u είναι το σήμα ελέγχου.



**Σχήμα 1.10:**PI σύστημα ελέγχου

Τα χαρακτηριστικά των ελεγκτών P και I

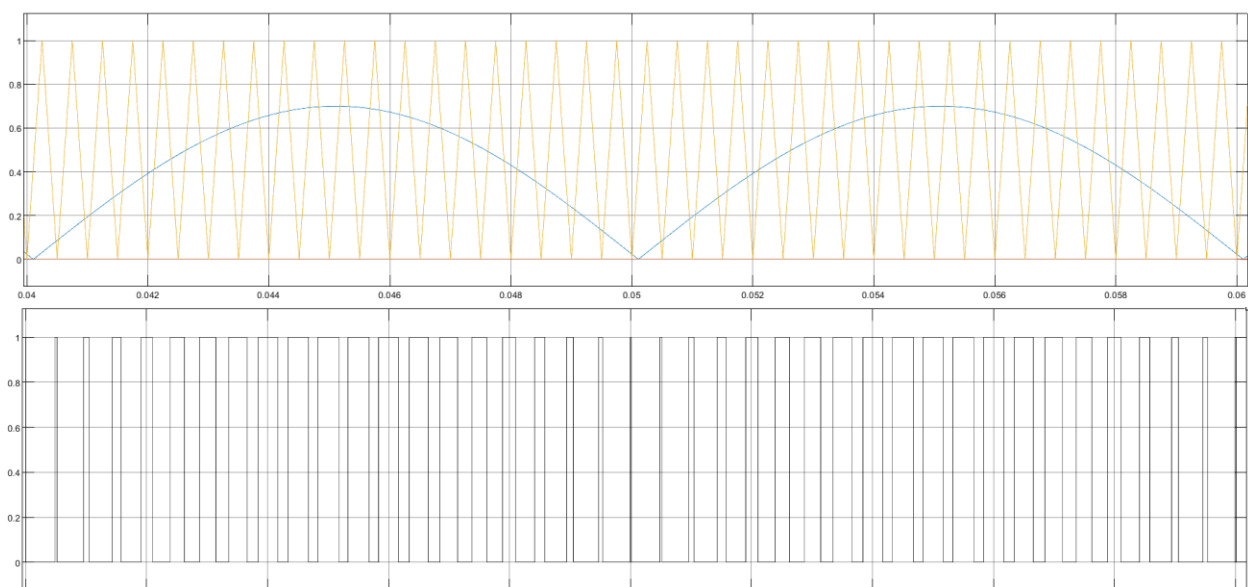
Αντίδραση Ελεγκτεί	Χρόνος Ανύψωσης	Υπερύψωση	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα
Kp	Μείωση	Αύξηση	Μικρή Αλλαγή	Μείωση
Ki	Μείωση	Αύξηση	Αύξηση	Εξάλειψη

**Πίνακας 1 :** Σημείωσης συστήματα αυτομάτου ελέγχου [φυλλάδιο εργαστήριου ΣΑΕ2]

## 1.6. Τεχνική παλμοδότησης SPWM

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα ο έλεγχος των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και κατ' επέκταση του ηλεκτρικού συστήματος, τις περισσότερες φορές γίνεται μεσώ της παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων. Μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές παλμοδότησης είναι η SPWM. Αυτή χρησιμοποιείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

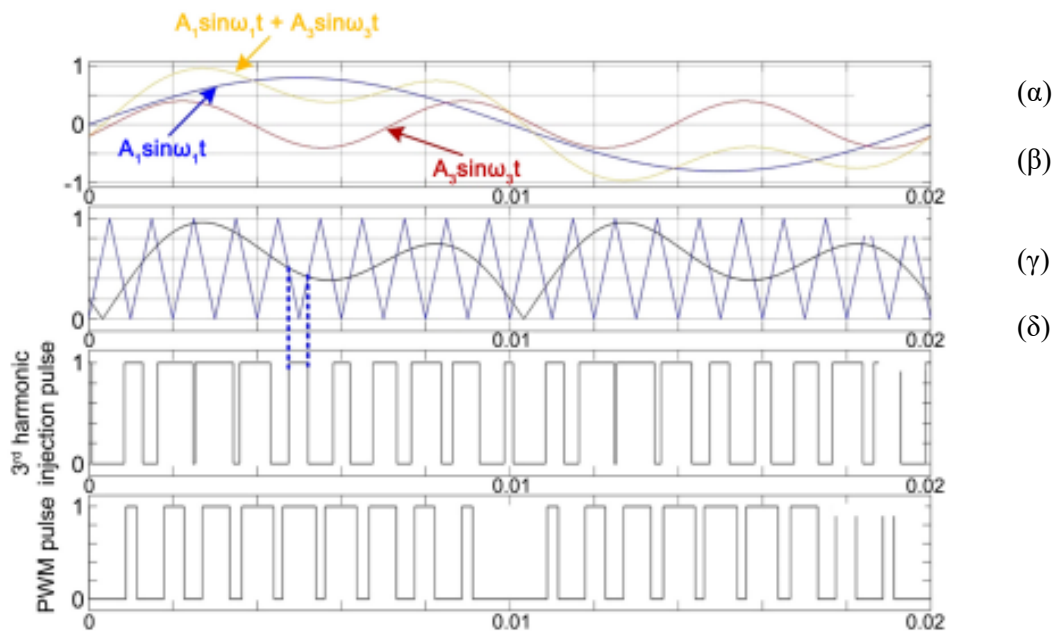
Η τεχνική παλμοδότησης SPWM δηλαδή, η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμού βασίζεται στην σύγκριση ενός ανορθωμένου ημιτόνου με ένα τριγωνικό σήμα. Με την τεχνική αυτή οι παλμοί μεταβάλλονται ανάλογα με το πλάτος του σήματος αναφοράς το οποίο είναι το ανορθωμένο ημίτονο. Έτσι, εμφανίζεται μέγιστη διάρκεια παλμού στη μέση της ημιπεριόδου και ελάχιστη στα άκρα της. Στο σχήμα 1.3 παρουσιάζονται οι κυματομορφές μέσω των οποίων δημιουργείται η παλμοσειρά.[6]



**Σχήμα 1.6:** Δημιουργία παλμών στην SPWM με πλάτος ανορθωμένου ημιτόνου 0,7 ως προς το μοναδιαίο τριγωνικό σήμα [Αποτέλεσμα εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά].

## 1.7. Προτεινόμενη τεχνική στη βιβλιογραφία

Η τεχνική παλμοδότησης που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία είναι μια τεχνική όπου μοιάζει με την SPWM μόνο που το τριγωνικό σήμα συγκρίνεται με ένα σήμα που περιέχει το άθροισμα πολλών ημιτόνων (σχ. 1.7α κίτρινο και 1.7β). Ένα στη βασική αρμονική και τα άλλα σε υψηλότερης τάξης αρμονικές. Αυτά στις υψηλότερης τάξης αρμονικές είναι αντίθετα ημίτονα προς τις αρμονικές που επιθυμούμε να εξαφανίσουμε. Ο παλμός που θα προκύψει από την σύγκριση θα είναι κατάλληλος να παλμοδοτήσει τα ημιαγωγικά στοιχεία με σκοπό η τάση ή το ρεύμα του δικτύου να γίνουν ημιτονοειδή (σχ. 1.7) [Smart Boilers: Grid Support Services from Non-Critical Loads, Panagis N. Vovos<sup>1</sup>, Konstantinos G. Georgakas<sup>2</sup>].



**Σχήμα 1.7:** Σχηματική επεξήγηση της προτεινόμενης τεχνικής παλμοδότησης.[3]

Στο παραπάνω σχήμα και συγκεκριμένα στο (γ) βλέπουμε τους παλμούς που δημιουργούνται με την προτεινόμενη τεχνική παλμοδότησης. Ενώ στην τέταρτη

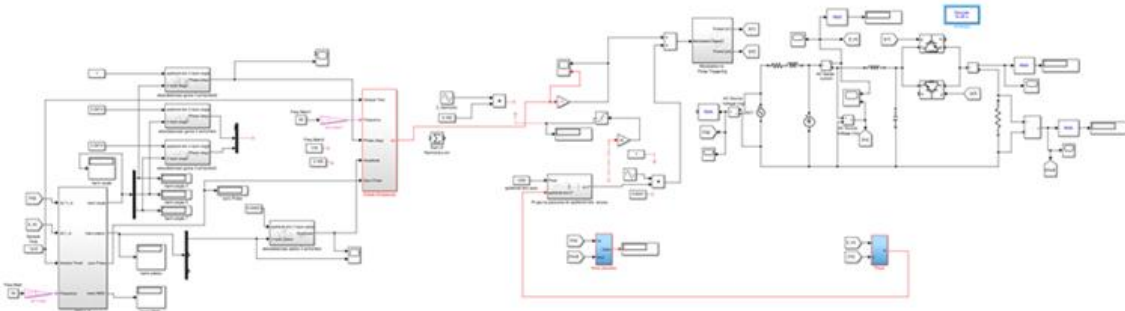
χαρακτηριστική είναι η παλμοσειρά που παράγεται από τη γνωστή SPWM. Όπως έχουμε αναφέρει και νωρίτερα, πολλές φορές με την SPWM εμφανίζονται ανώτερες αρμονικές. Ενώ με την «τροποποιημένη» SPWM μειώνονται ή και εξαφανίζονται. Από εδώ και πέρα η τεχνική αυτή θα αναφέρεται ως τροποποιημένη SPWM. Στην τεχνική αυτή πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε το σήμα αναφοράς θα πρέπει γνωρίζουμε την ακριβή θέση της εκάστοτε αρμονικής, δηλαδή την γωνία και το πλάτος της.[5]

## 2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Περιγραφή του μελετώμενου συστήματος

#### 2.1. Εισαγωγή

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εφαρμόζει την ιδέα της φθηνής αναβάθμισης ενός ηλεκτρικού λέβητα νερού, όπου θα ελέγχεται η ισχύς που θα απορροφά και θα παρέχει υπηρεσίες βελτίωσης της ποιότητας ισχύος του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η αναβάθμιση είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε κάθε οικιακή χρήση στο μέλλον. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την βελτίωση των αρμονικών του ρεύματος βασίζεται στην έγχυση των κατοπτρικών αρμονικών. Στην ουσία με τον συγκεκριμένο τρόπο μειώνουμε της ανώτερες αρμονικές όταν λειτουργεί ο λέβητας. Η μελέτη του παραπάνω συστήματος θα πραγματοποιηθεί μέσω εξομοίωσης με το λογισμικό Matlab/Simulink στιγμιότυπο του οποίου φαίνεται παρακάτω.

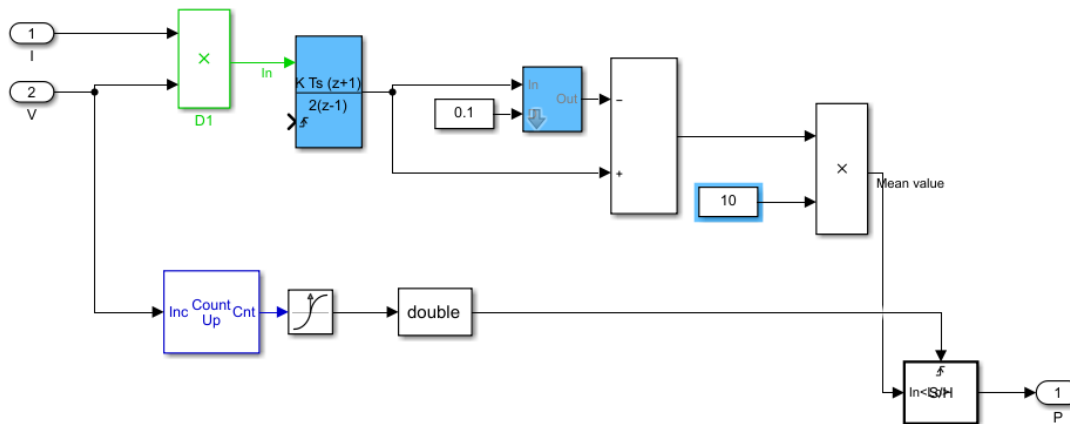


**Σχήμα 2.1** Το συνολικό μοντέλο εξομοίωσης της λειτουργίας του μετατροπέα μας.

#### 2.2. Ανάγκη ελέγχου της ενεργού ισχύος

Για να μπορέσουμε να κάνουμε τον έλεγχο της ενεργού ισχύος θα πρέπει να γνωρίζουμε την ισχύ που απορροφά το σύστημα από το δίκτυο. Επομένως κατασκευάζουμε ένα υποσύστημα το οποίο μετρά την ενεργό τιμή της ισχύος του συστήματος. Εφόσον όλοι γνωρίζουμε ότι ο τύπος της ισχύος είναι:

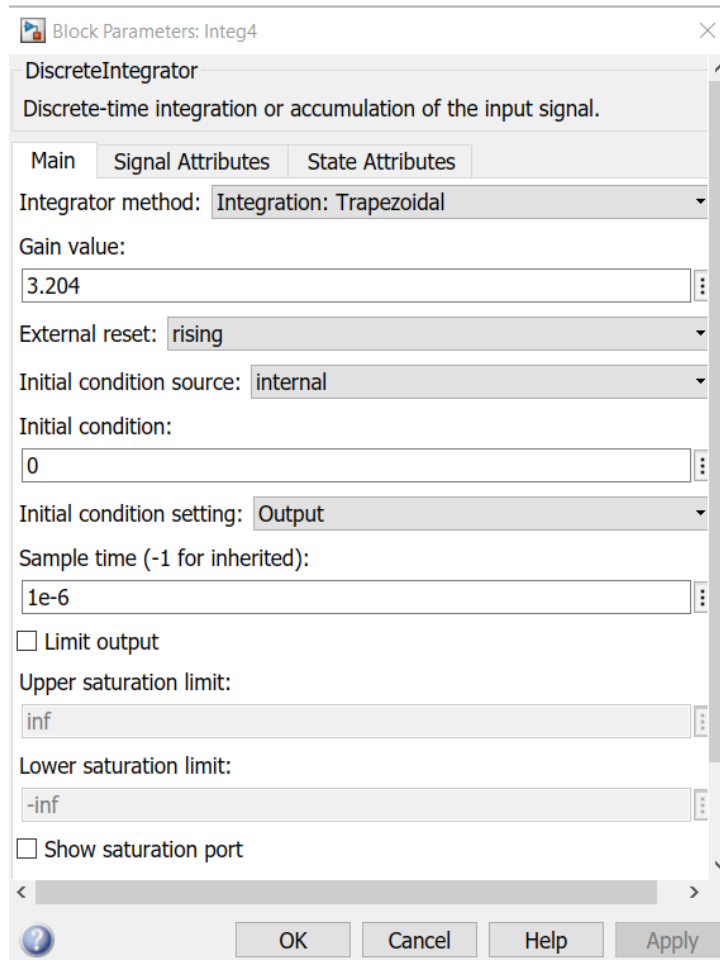
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (3)$$



**Σχήμα 2.1:** Υποσύστημα υπολογισμού ενεργού ισχύος.

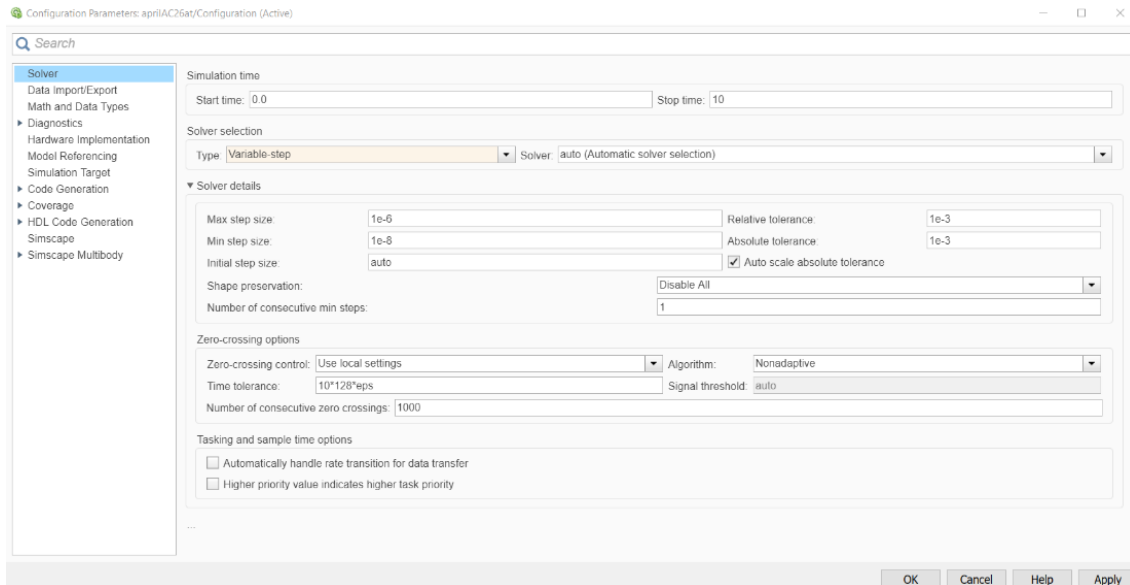
Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το υποσύστημα για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής της ισχύος που δέχεται ο μετατροπέας στην είσοδο του. Γνωρίζουμε από την θεωρία ότι για τον υπολογισμό της ισχύος της τάσης του δικτύου, τα όρια ολοκλήρωσης είναι τα 50 Hz. Όμως εμείς υπολογίζουμε την μέση τιμή του γινομένου τάσης επί ρεύματος κάθε πέντε περιόδους δηλαδή,  $5 \times 0,02 = 0,1s$ . Αυτό το κάναμε γιατί σε μία περίοδο 0,02s το σύστημα θα ήταν ασταθές. Οι παράμετροι του ολοκληρωτή φαίνονται παρακάτω.





**Σχήμα 2.2:** Παράμετροι του ολοκληρωτή.

Όμως για να μπορέσουμε να πλησιάσουμε το σύστημα περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιούμε την επίλυση του συστήματος σε διακριτό χρόνο (DISCRETE).

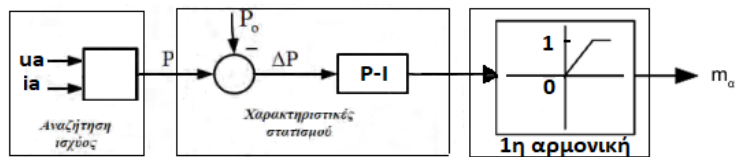


**Σχήμα 2.3:** Παράμετροι για τη κατασκευή του διακριτού χρόνου.

Αν είναι αναγκαίο, μπορούμε μέσω του σήματος παλμοδότησης, να αντισταθίσουμε και την άεργο ισχύ της βασικής αρμονικής. Όμως στην εργασία αυτή το φορτίο είναι μία ωμική αντίσταση. Άρα δεν απαιτείται τέτοια αντιστάθμιση.

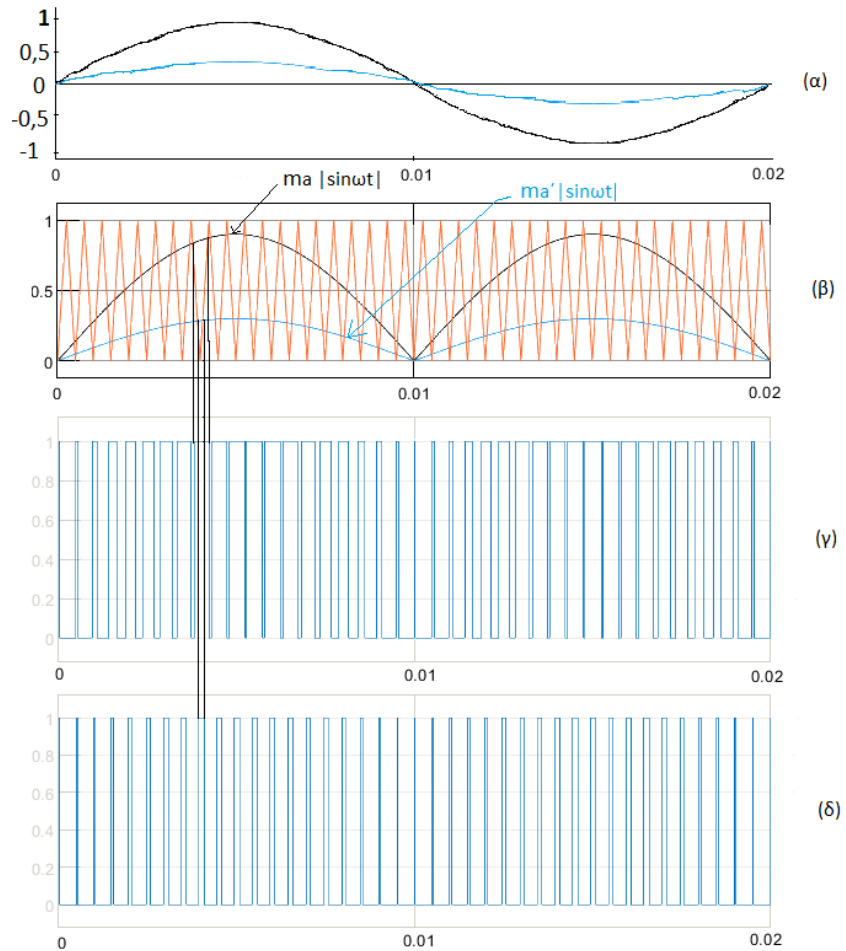
### **2.3. Ο έλεγχος της Ενεργού Ισχύος και η Δημιουργία των παλμών της τροποποιημένης SPWM σε περιβάλλον Simulink**

Καθώς υπολογίζουμε την ενεργό ισχύ, το επόμενο βήμα είναι να κατασκευαστεί ένας κλειστός βρόχος ελέγχου αυτής της ισχύος. Έτσι, πραγματοποιείται σύγκριση της επιθυμητής τιμής ισχύος με την μετρούμενη τιμή. Το σήμα όπου θα προκύπτει από την σύγκριση οδηγείται σε έναν PI ελεγκτή έτσι ώστε να μεταβληθεί το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής του ημίτονου του σήματος αναφοράς της τροποποιημένης SPWM.



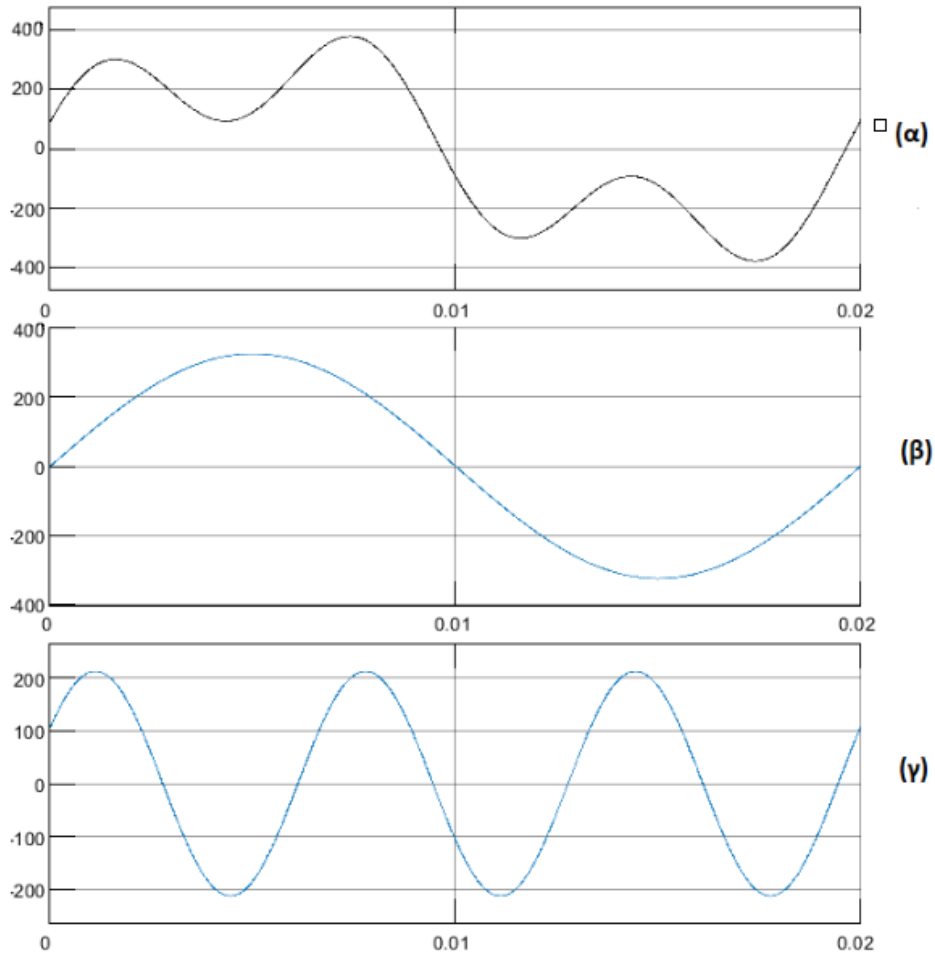
**Σχήμα 2.4.:**Έλεγχος της 1ης αρμονικής του σήματος αναφοράς.

Η τιμή ισχύος όπου θα καταναλώνει ο θερμοσίφοντας καθορίζεται από την διάρκεια των παλμών που θα παλμοδοτησουμε το IGBT. Στα παρακάτω γραφήματα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται οι παλμοί. Φαίνεται ότι οι παλμοί καθορίζονται από το πλάτος του ημιτόνου δηλαδή, όσο μεγαλώνουμε το πλάτος του ημιτόνου τόσο μεγαλώνει και η διάρκεια του παλμού . Η μεγαλύτερη τιμή ισχύος που θα μπορέσουμε να λάβουμε εμφανίζεται όταν το  $m_a > 1$ . Επομένως πρέπει να ισχύει  $m_a \leq 1$ . Στο σχήμα 2.5 παριστάνεται γραφικά ο τρόπος που μεταβάλλεται η ισχύς μέσω των παλμών



**Σχήμα 2.5.:** Ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται οι παλμοί [Αποτέλεσμα εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά].

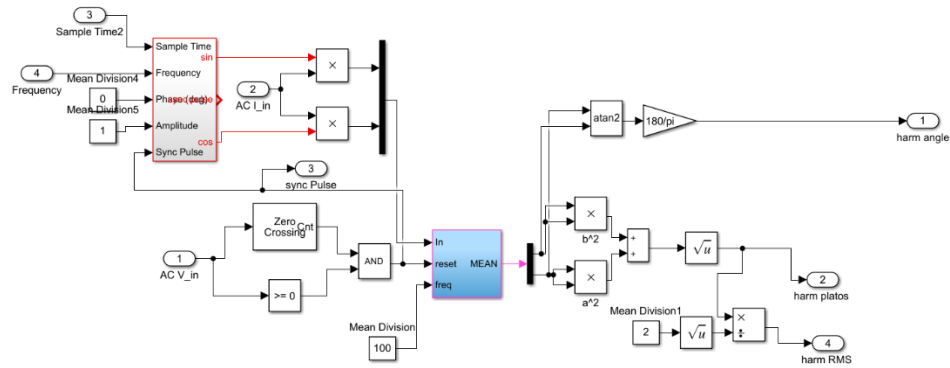
Αφού λάβουμε την επιθυμητή ισχύ που θέλουμε να καταναλώνει ο ηλεκτρικός θερμοσίφωνας το επόμενο βήμα είναι να περιορίσουμε τις αρμονικές του δικτύου. Στο σχήμα 2.6. (α) βλέπουμε μια συγκεκριμένη στιγμή της τάσης δικτύου, όπου παρατηρούμε ότι υπάρχει κάποια αρμονική (σχ. 2.5α).



**Σχήμα 2.5.:** Γραφική παράσταση της τάσης δικτύου (α), η οποία αποτελείται από τη θεμελιώδη αρμονική της τάσης (β), και την 3ή αρμονική της τάσης (γ). [Αποτέλεσμα εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά].

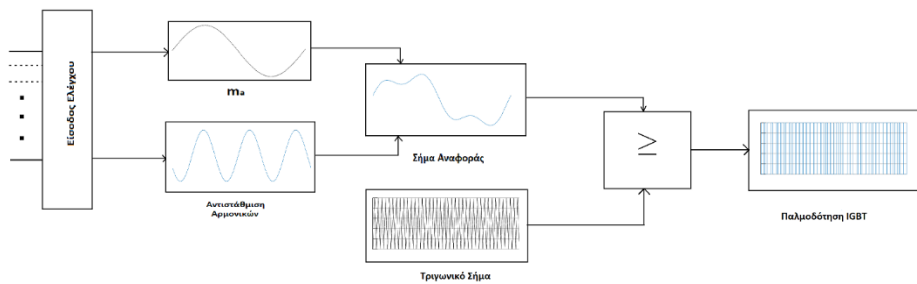
Για να γίνει δυνατή η μείωση των ανώτερων αρμονικών που επιθυμούμε να περιορίσουμε, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε το πλάτος και τη γωνία της εκάστοτε αρμονικής. Για το λόγο αυτό αναλύουμε κατά fourier. Η μαθηματική σχέση φαίνεται παρακάτω ενώ ο τρόπος που υλοποιείται σε περιβάλλον Simulink/Matlab παρουσιάζεται στο σχήμα 2.6.

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (4)$$



**Σχήμα 2.6.:** Υποσύστημα ανάλυσης FFT

Αφού λάβουμε την πληροφορία που χρειαζόμαστε τότε, δημιουργούμε ένα υποσύστημα το οποίο θα μπορεί να περιορίζει της ανώτερες αρμονικές. Ο τρόπος με τον οποίον προσπαθούμε να περιορίσουμε τις αρμονικές παρουσιάζεται νωρίτερα (σχ. 1.7) και βασίζεται στη δημιουργία καθρεπτικών ημιτόνων προς την αρμονική που επιθυμούμε να απαλείψουμε. Αν π.χ. επιθυμούμε να μειώσουμε την 3η αρμονική τότε, στο ημιτονοειδές σήμα της δημιουργίας της SPWM προσθέτουμε 3η αρμονική ανάλογου πλάτους και αντίθετης γωνίας. Σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω (σχ. 2.7).



**Σχήμα 2.7.:** Μπλοκ διάγραμμα της τροποποιημένης τεχνικής SPWM παλμοδότηση

### **3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ**

#### **Ανάδειξη του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος AC-AC ως συσκευή διόρθωσης Σ.Ι.**

##### **3.1. Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό ο μετατροπέας AC-AC θα τροφοδοτήσει ένα ηλεκτρικό θερμοσίφωνα και θα μελετηθεί η δυνατότητα τροφοδοσίας ενός τέτοιου φορτίου, με ταυτόχρονη μείωση των ανώτερων αρμονικών του δικτύου που είναι συνδεδεμένος.

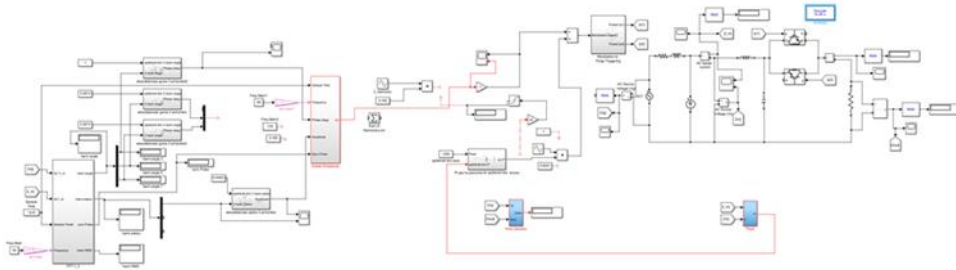
##### **3.2. Μελετώμενο Σύστημα – Σκοπός Πτυχιακής**

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, στην παρούσα ενότητα θα χρησιμοποιηθεί ο μετατροπέας AC-AC, για να επιχειρηθεί να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης και του ρεύματος δικτύου, μέσω του ελέγχου της ποσότητας ισχύος που απορροφά ο μετατροπέας αυτός. Με αυτόν τον μετατροπέα θα τροφοδοτηθεί ένα ωμικό φορτίο και συγκεκριμένα ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνα. Η ιδέα είναι η εξής: με τη μεταβολή της ισχύος του φορτίου μεταβάλλεται και το ρεύμα. Έτσι, η αύξηση του ρεύματος επιφέρει μείωση της τάσης δικτύου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπάρξει έλεγχος της τάσης εισόδου. Αυτό βέβαια μόνο στην περίπτωση που υπάρχει αυξημένη τάση. Όμως, αυξημένη τάση υπάρχει σε περιόδους μειωμένου φορτίου στο μετασχηματιστή μέσης ή υψηλής τάσης σε χαμηλή. Αυτό συμβαίνει σε χρονικές περιόδους χαμηλής ζήτησης. Ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνα μπορεί να λειτουργήσει σε αυτές τις ώρες, καθώς είναι μία μορφή αποθήκης ενέργειας και έχει τη δυνατότητα να θερμάνει το νερό όταν του ζητηθεί.

Ταυτόχρονα με τον έλεγχο της ισχύος ή της τάσης που περιγράφηκε παραπάνω, είναι δυνατόν να ελεγχθεί και η ποιότητα του ρεύματος ή της τάσης. Διότι, καθώς η ποσότητα του ρεύματος επηρεάζει την τιμή της τάσης (όπως προαναφέρθηκε), έτσι επηρεάζει και την ποιότητα. Δηλαδή, ένα ρεύμα με ανώτερες αρμονικές εισάγει ανώτερες αρμονικές στην τάση. Στην εργασία αυτή θα επιχειρηθεί να “ομαλοποιηθεί” η παραμορφωμένη τάση ή ρεύμα δικτύου με την δημιουργία αντίστροφης παραμόρφωσης. Άρα η βελτίωση του ρεύματος δικτύου είναι σημαντική για τη βελτίωση της αέργου ισχύος αλλά και ταυτόχρονα για τη βελτίωση της ποιότητας της τάσης.

Τα στάδια τα οποία ακολουθούνται για την υλοποίηση της εξομοίωσης θα αναλυθούν μέσω των παρακάτω υποσυστημάτων του προγράμματος Simulink. Βασική παράμετρος της εξομοίωσης είναι ότι πραγματοποιείται σε διακριτό χρόνο  $1e-6$ .

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το συνολικό σχηματικό της εξομοίωσης και στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί λεπτομερώς.

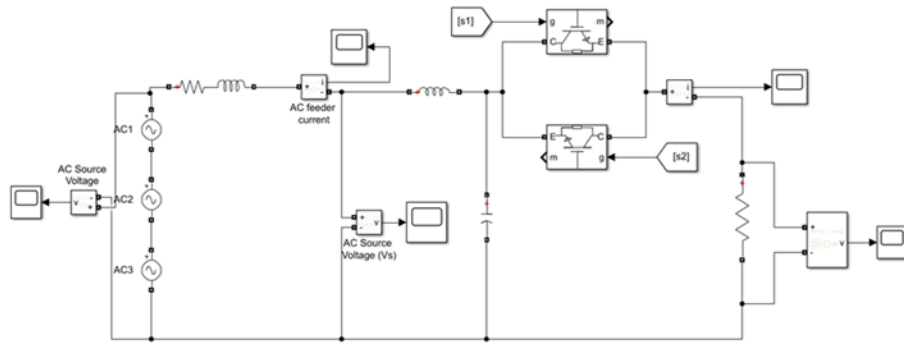


**Σχήμα 3.1** Το συνολικό μοντέλο εξομοίωσης της λειτουργίας του μετατροπέα μας.

### 3.3. Μετατροπέας Ισχύος AC/AC

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται ο μετατροπέας ισχύος (AC-AC controller) που δέχεται στην είσοδο του μια εναλλασσόμενη τάση και στην έξοδο προκύπτει μια εναλλασσόμενη τάση ίδιας συχνότητας μεταβαλλόμενης τάσης. Στη παρούσα ενότητα θα αναλυθεί ο πρώτος μετατροπέας δηλαδή, ο μονοφασικός μετατροπέας με δυο αντιπαράλληλα τρανζίστορ ισχύος (IGBT) κατάλληλος για την τροφοδοσία οικιακού θερμοσίφωνα. Το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του μετατροπέα είναι ένα ωμικό  $R=23\Omega$  όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.





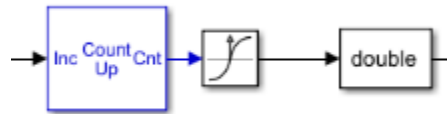
**Σχήμα 3.2.:** Μπλοκ διάγραμμα του μετατροπέα AC-AC.

Ωστόσο όμως για να προσομοιωθεί η πηγή έτσι ώστε να πλησιάζει τις πραγματικές τιμές του δικτύου (ωμικές απώλειες και σκέδαση), προστίθεται στην είσοδο του μετατροπέα ένα R-L φορτίο. Οι τιμές που τοποθετήθηκαν είναι  $R=0.1 \Omega$  ενώ το  $L=0.002717 \text{ H}$ . Επίσης τοποθετήθηκε και ένα L-C φίλτρο στην είσοδο του μετατροπέα για τη βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του μετατροπέα. Από τις εξομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν οι τιμές που θα επιλέχθηκαν για το φίλτρο L-C είναι  $L=8e-3 \text{ H}$  ενώ το  $C=1e-6 \text{ F}$ . Τα R-L και L-C τοποθετήθηκαν όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Οι ανώτερες αρμονικές που προσομοιώνουν αυτές που προϋπήρχαν στο σύστημα και επιχειρείται να εξουδετερωθούν εξομοιώνονται με τις πηγές σε σειρά όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2. Τοποθετούνται δηλαδή πηγές τάσης σε σειρά με την θεμελιώδη πηγή μας, είτε πηγές ρεύματος παράλληλα προς την θεμελιώδη πηγή. Στα block των πηγών οι ανώτερες αρμονικές επιλέγονται από την μεταβλητή n. Έτσι, οι συχνότητες ισούνται με  $f=n*50\text{Hz}$  όπου  $n>1$ , ενώ η θεμελιώδεις πηγή  $n=1$ .

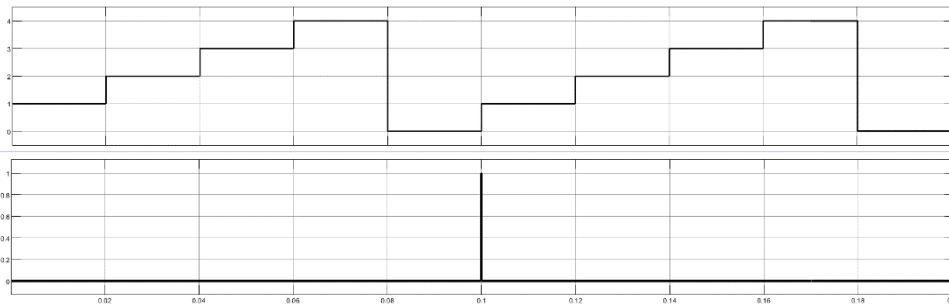
### 3.4. Μπλοκ ελέγχου ενεργού ισχύος

Για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος κατασκευάστηκε ένα σύστημα το οποίο μετρά την τιμή της. Ο τρόπος κατασκευής του συστήματος αυτού παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα (σχήμα 2.1.). Στην ουσία υπολογίζεται η μέση τιμή του γινομένου τάσης επί του

ρεύματος για κάθε περίοδο. Η περίοδος αυτή υπολογίζεται βρίσκοντας το μηδενισμό (zero crossing). Όπου εμφανίζεται μηδενισμός “χτυπάει” ένας παλμός (σχ. 3.4) και ξεκινάει να μετρά ο counter. Καθώς είναι γνωστό το σταθερό βήμα της εξομοίωσης, ο αριθμός του counter μετατρέπεται σε χρόνο άρα σε συχνότητα.

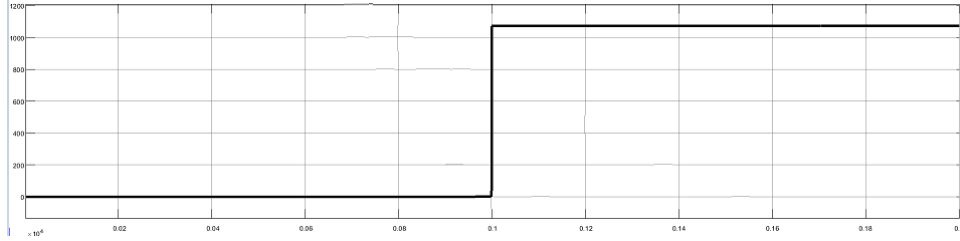


**Σχίμα 3.3.:** Μπλοκ zero crossing



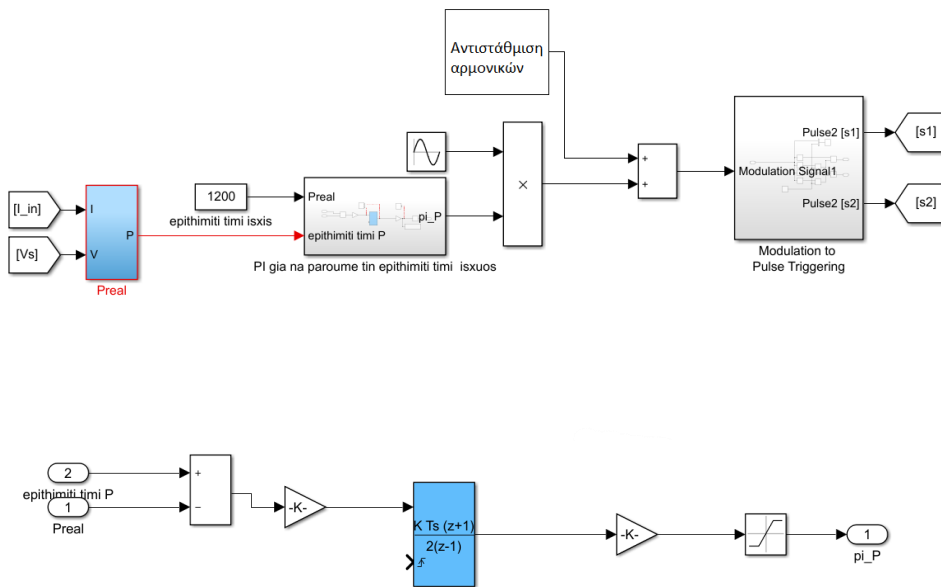
**Σχίμα 3.4:** Ενδεικτικό σχήμα της λειτουργίας του zero crossing

Η τιμή της ισχύος πρέπει να ανανεώνεται κάθε περίοδο. Αυτό γίνεται με ένα έτοιμο μπλοκ που υπάρχει στη βιβλιοθήκη του Simulink, το Sample and hold. Σε αυτό επιλέγουμε Rising edge και αυτό που κάνει είναι κρατάει την τελευταία τιμή που υπολογίσθηκε. Για να αναγνωρίζει το γεγονός όταν το Zero crossing είναι μηδέν, ρυθμίζεται κατάλληλα το Hit crossing offset βάζοντας την τιμή 0,1 και με direction rising. Στον counter πρέπει να επιλεγθει Maximum count ώστε σε περίπτωση σφάλματος του zero crossing να μη λάβει κάποια “τραγική” τιμή. Όλα τα άλλα που ακολουθούνται είναι όπως αναφέρθηκα στην υποενότητα 2.2. Παρακάτω φαίνεται ένα στιγμιότυπο της ισχύος όπου μας υπολογίζει το υποσύστημα που δημιουργήθηκε. Παρατηρούμε μια χρονοκαθυστέριση έως ότου πάρει την τιμή που είχε επιλεγθεί ως επιθυμητή. Αυτό ωφελείται από την καθυστέρηση του Zero Crossing. Αυτό βεβαίως είναι το ακραίο παράδειγμα κατά την έναρξη. Τότε, η μέτρηση ξεκινάει 20ms αργότερα. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στις μετρήσεις.



**Σχήμα 3.5.:** Στιγμιότυπο κατά τη μέτρηση της ενεργού ισχύος.

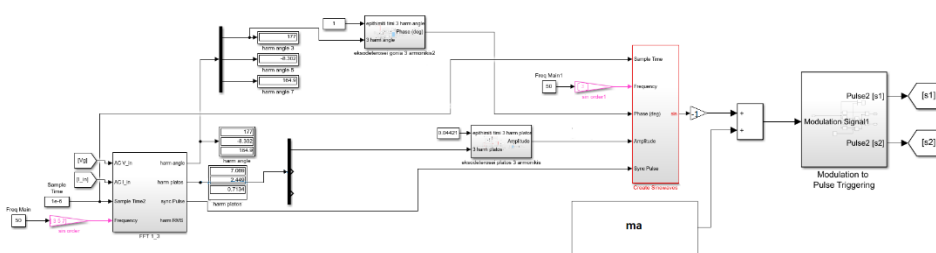
Για την πραγματοποίηση του ελέγχου της ενεργού ισχύος, παρακάτω παρουσιάζεται το μπλοκ διάγραμμα που εκτελεί τον έλεγχο της ισχύος. Για την υλοποίηση του ελέγχου μετράτε η ενεργός ισχύς, που ο μετατροπέας απορροφά από το δίκτυο και η τιμή αυτή αφαιρείται από την επιθυμητή τιμή εξάγοντας ένα σφάλμα. Στην συνέχεια το σφάλμα αυτό οδηγείται σε έναν ολοκληρωτή (Integrator). Η τιμή του Integrator επιλέχθηκε 3,24 και sample time  $1e-6$  (το βήμα λύσης στην εξομοίωση) ενώ του gain 0.01. Το σήμα το οποίο προκύπτει περιορίζεται μέσα σε κάποια όρια τα οποία κυμαίνονται από 0-1 (το μοναδιαίο ημίτονο). Το παραπάνω σήμα καθορίζει το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής του σήματος αναφοράς της τροποποιημένης SPWM. Μετά πολλαπλασιάζεται με ένα ημιονικό σήμα με πλάτος 1 και περίοδο 50 Hz μέσω του οποίου υλοποιείται ο έλεγχος της ενεργού ισχύος.



**Σχήμα 3.6.:** Υποσύστημα ελέγχου ενεργού τιμής ισχύος.

### 3.5. Μπλοκ ελέγχου ανωτέρων αρμονικών

Το μπλοκ ελέγχου ανωτέρων αρμονικών είναι ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από κάποια υποσυστήματα, τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους με σκοπό των περιορισμών των αρμονικών. Αυτό το σύστημα αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα: FFT, εύρεση γωνίας  $\phi_h$  των αρμονικών, μείωση πλάτους των αρμονικών και δημιουργία καθρεπτιζόμενων αρμονικών (σχήμα 3.7.). Αυτά τα υποσυστήματα θα αναλυθούν παρακάτω αναλυτικά.



Σχήμα 3.7.: Μπλοκ ελέγχου ανώτερων αρμονικών.

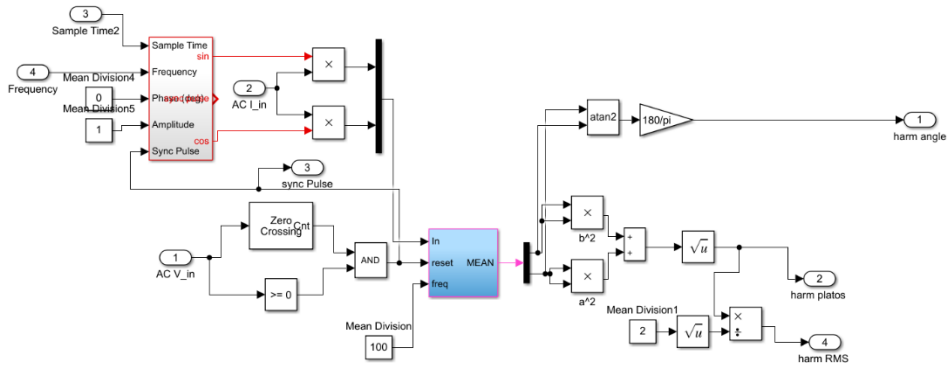
Για να κατασκευαστεί ο έλεγχος ο οποίος μειώνει τις ανώτερες αρμονικές, πρώτα απ' όλα θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα υποσύστημα το οποίο να βρίσκει το πλάτος και τη γωνία των ανώτερων αρμονικών που πρέπει να μειωθούν. Αυτό το επιτυγχάνεται με την FFT ανάλυση. Η λογική που εφαρμόστηκε βασίστηκε στη εφαρμογή των παρακάτω μαθηματικών σχέσεων [7]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (5)$$

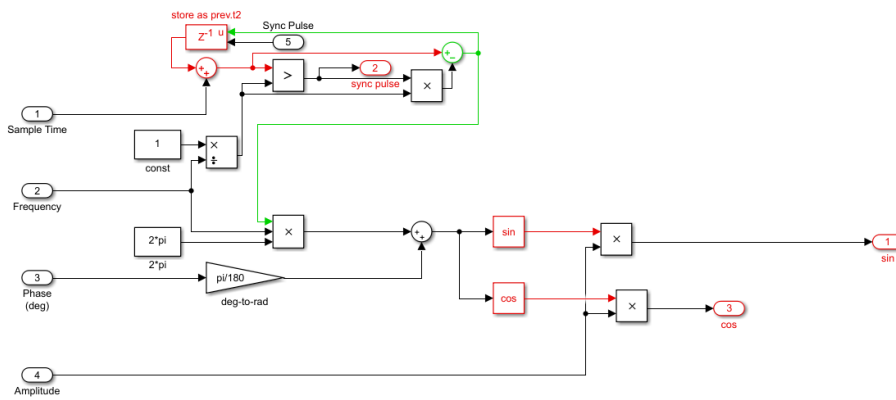
$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (7)$$

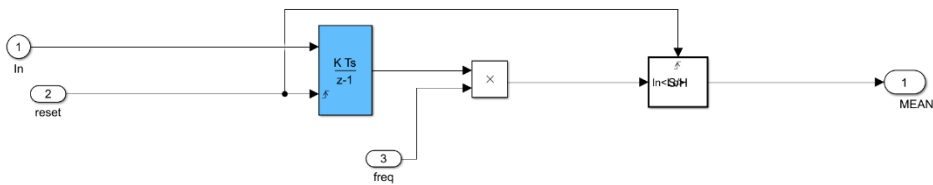
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (8)$$



(A)



(B)



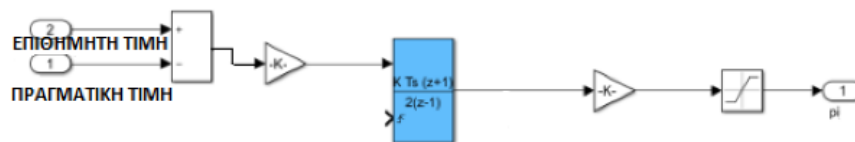
(Gamma)

Σχήμα 3.8.: Υποσύστημα ανάλυσης FFT

Στο σχήμα 3.8. (Gamma) φαίνεται η δημιουργία ενός ελεγχόμενου ημιτόνου, για να εφαρμοσθούν οι σχέσεις (5) - (8). Μετά, φαίνεται ο κατάλληλος ολοκληρωτής έτσι, ώστε

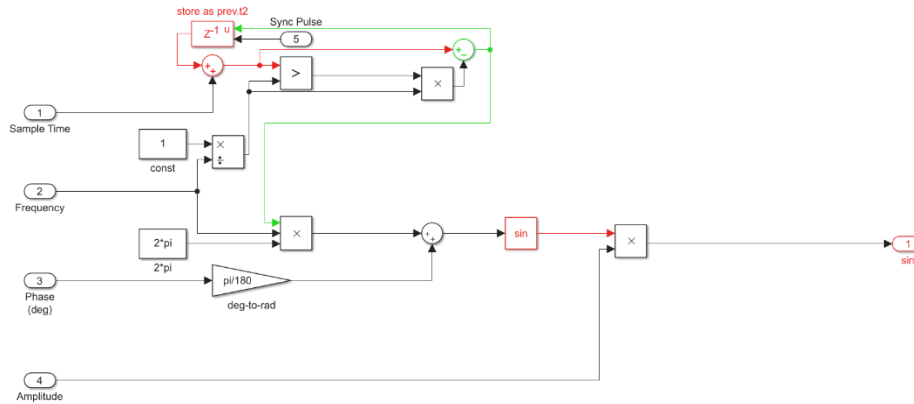
όταν φτάσει της τιμή της περιόδου δηλαδή τα 0,02s να εξάγει αποτέλεσμα (όπως εξηγήθηκε νωρίτερα).

Έχοντας τις τιμές από τα αποτελέσματα της FFT είναι δυνατόν πλέον να μειωθούν οι ανώτερες αρμονικές. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται ένα υποσύστημα το οποίο θα μειώνει το πλάτος των αρμονικών. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας υποσυστήματα το οποίο βρίσκει την γωνιά  $\alpha$  της αρμονικής σε σχέση με τη θεμελιώδη. Έχοντας τη γωνιά αυτή μπορεί να εφαρμοστεί πλέον ένας PI έλεγχος για την εκάστοτε αρμονική (βάζοντας ως επιθυμητή τιμή το μηδέν). Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για το πλάτος. Πρώτα δημιουργούνται αρμονικές για το σήμα αναφοράς, οι οποίες είναι καθρεπτιζόμενες των αρμονικών του ρεύματος του δικτύου και αθροίζονται στην θεμελιώδη αρμονική που ελέγχει την ισχύ. Άρα το πρώτο υποσύστημα που κατασκευάζεται είναι το υποσύστημα το οποίο δημιουργεί τη γωνιά των αρμονικών για το σήμα αναφοράς, έτσι ώστε οι αρμονικές να είναι καθρεπτιζόμενες δηλαδή, γωνίες που διαφέρουν κατά 180 μοίρες από τις αρμονικές του δικτύου. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου PI για την εύρεση της γωνιάς, όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Υστέρτα εφαρμόστηκε ο PI έλεγχος στο πλάτος των αρμονικών του σήματος αναφοράς (σχήμα 3.9.).



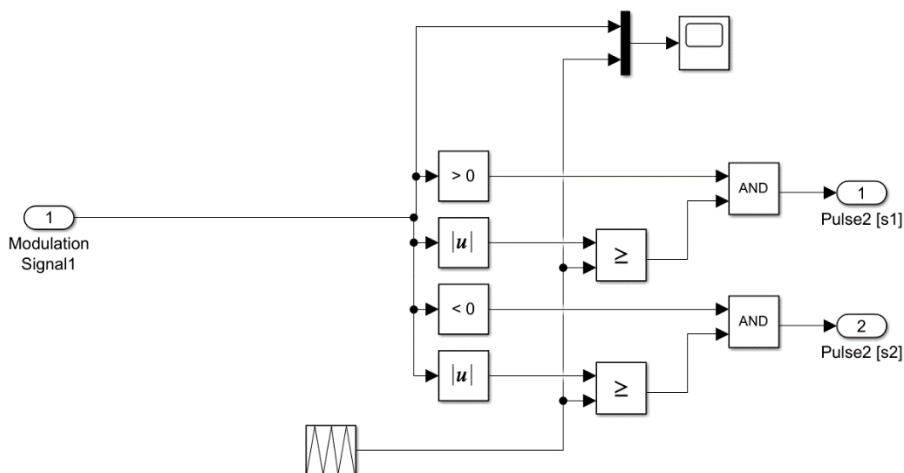
**Σχήμα 3.9.:** Το PI σύστημα αυτόματου ελέγχου.

Ο PI ελεγκτής που εφαρμόστηκε για την γωνία, είχε μεγαλύτερη τιμή ολοκλήρωσης συγκριτικά με τον ολοκλήρωτη του ελέγχου του πλάτους και αυτό γίνεται έτσι ώστε να μπορεί να βρίσκει πρώτα τη γωνία της αρμονικής και μετά να κάνει έλεγχο του πλάτους.



**Σχήμα 3.10.:** Δημιουργία των ημιτόνωντων ανώτερων αρμονικών μέσω του σήματος των παλμών ελέγχου.

Στο Σχήμα 3.10. φαίνεται η δημιουργία των καθρεπτιζόμενων ανώτερων αρμονικών του σήματος αναφοράς. Τα ημίτονα αυτά θα αθροιστούν σε εκείνο που δημιουργεί τον έλεγχο της βασικής αρμονικής (50 Hz) και τελικά θα οδηγηθούν στην παλμοδότηση του ημιαγωγικού στοιχείου (σχήμα 3.6.). Το σύνθετο αυτό σήμα (με το άθροισμα των ημιτόνων σε όλες τις συχνότητες π.χ. 50, + 150 + 250 Hz) συγκρίνεται με το τριγωνικό και σε συνδυασμό με κάποιες συνθήκες (π.χ. όταν το σήμα αναφοράς βρίσκεται στο πρώτο τεταρτημόριο έχει θετικές τιμές) παλμοδοτούνται τα IGBT (σχήμα 3.2.). Το υποσύστημα που περιέχει αυτές τις πληροφορίες φαίνεται στο σχήμα 3.11..



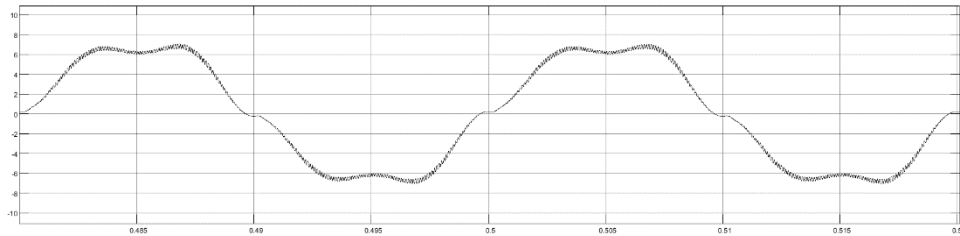
**Σχήμα 3.11.:** Υποσύστημα δημιουργίας παλμών.

Πίνακας τιμών των ολοκληρωτών σχήματος 3.9.

	GAIN VALUE ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΗ	1 GAIN ΑΡΙΣΤΕΡΑ	2 GAIN ΔΕΞΙΑ
ΙΣΧΥΟΣ	3,04	0,00000001	-100000
ΓΩΝΙΑΣ	1,047168	0.00001	100000
ΠΛΑΤΟΥΣ	0,05978260	0,001	-1000

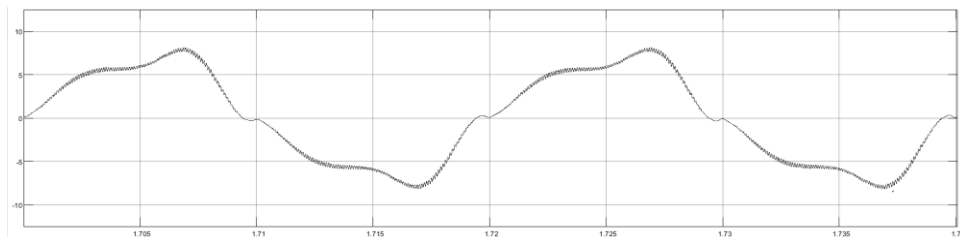
### 3.6. Αποτελέσματα

Παρακάτω βλέπουμε το ρεύμα του δικτύου όπου εφαρμόζεται στον μετατροπέα μας πριν να εφαρμόσουμε την τακτική για την μείωση των αρμονικών όπου συγκεκριμένα έχουμε τοποθετήσει την 3η αρμονική.



**Σχήμα 3.12.:** Ρεύμα του δικτύου πριν την προσπάθεια μείωσης αρμονικών

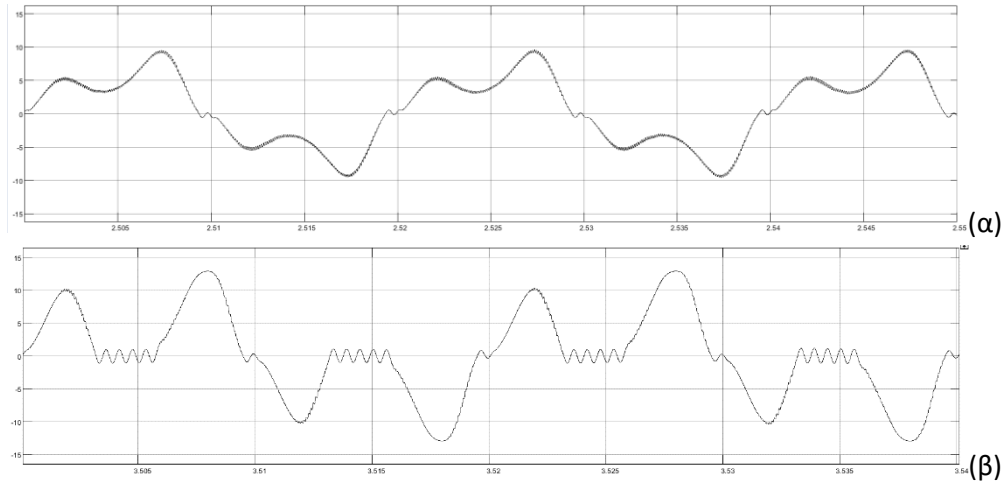
Μετα από την εφαρμογή της τακτικής για την μείωση των αρμονικών αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι το σύστημα γίνεται ασταθές με αποτέλεσμα να χειροτερεύουν οι αρμονικές. Αρχικά αυτό οφειλόταν στη λάθος αλληλουχία εύρεσης των τιμών της γωνίας, του πλάτους και της ισχύος. Γι' αυτό αλλάχθηκε η διαδοχή της εύρεσης των επιθυμητών τιμών ξεκινώντας από την εύρεση της ισχύος, την γωνία και μετά το πλάτος, διορθώνοντας συγχρόνως τις τιμές των ολοκληρωτών, με αυτόν τον τρόπο καταφέραμε να σταθεροποιήσουμε το σύστημα για ένα μικρό χρονικό διάστημα.



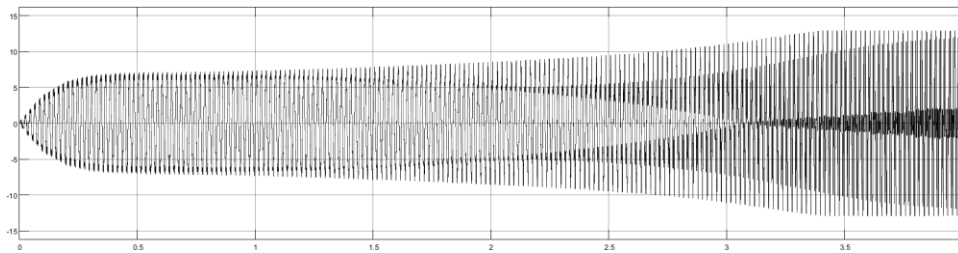
**Σχήμα 3.13.:** Ρεύμα του δικτύου με μια μικρή βελτίωση



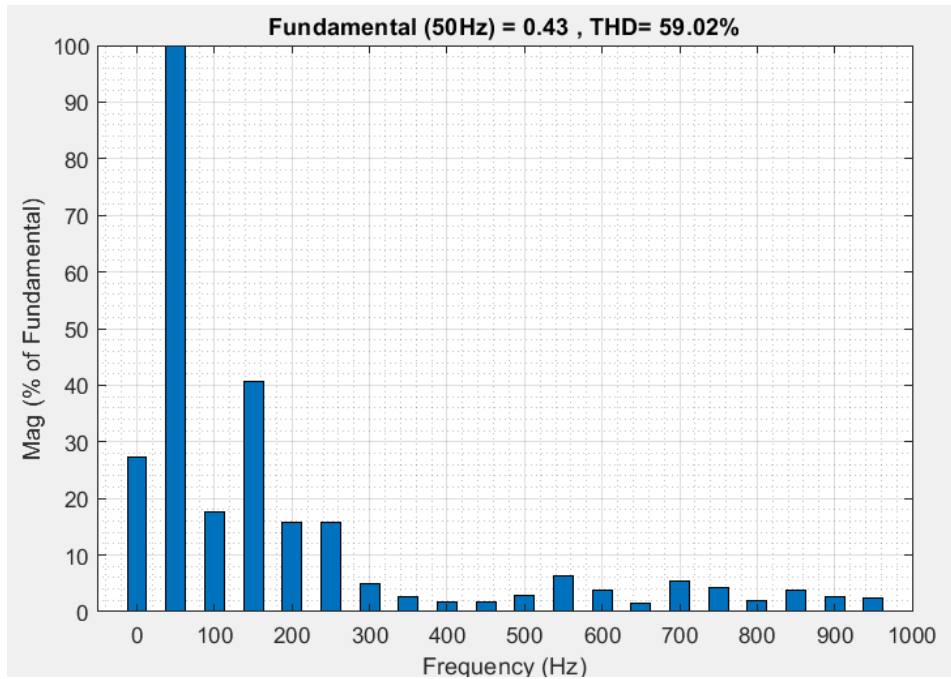
Ωστόσο όμως, μετά από λίγο σιγά -σιγά αλλοιώνεται το σήμα με αποτέλεσμα να έχουμε αύξηση αρμονικών κατά ένα μεγάλο ποσοστό και αυτό λόγω της λάθος εύρεσης της γωνίας, με αποτέλεσμα να απορροφά το σύστημα ρεύμα σε λάθος σημεία . Αυτό γίνεται ορατό και από την σύγκριση του σχήματος 3.12. και σχήματος 3.13. και το σχήματος 3.14.. Άρα το σύστημα γίνεται ασταθές.



**Σχήμα 3.14.:** Ρεύμα του δικτύου μετά την εφαρμογή του μετατροπέα όπου (α) μετά από 2,5 s ενώ (β) μετά 3,5 s.



**Σχήμα 3.15.:** Ρεύμα του δικτύου.



**Σχήμα 3.16.:** FFT ανάλυση των ανώτερων αρμονικών του ρεύματος.

Το συμπέρασμα είναι ότι με αυτό τον τρόπο με τον οποίο επιχειρείται να επιλυθεί το πρόβλημα, οδηγούμαστε σε ένα σύστημα ασταθές στην εύρεση των τιμών της γωνίας και έχει ως αποτέλεσμα να χειροτερεύει το ρεύμα του δικτύου μας αυτό το βλέπουμε και από την σύγκριση των σχημάτων 3.12 με 3.14 (β). Εδώ πρέπει να τονισθεί ότι δοκιμάστηκαν πολλές τιμές κέρδους στους ολοκληρωτές, με χειρότερα όμως αποτελέσματα. Επομένως ο τρόπος που επιχειρείται να λυθεί το πρόβλημα μας δεν είναι ο κατάλληλος. Ο σωστός τρόπος θα παρουσιασθεί στην 5 ενότητα.

## 4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### Εξομοίωση του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος AC-DC

#### 4.1. Εισαγωγή

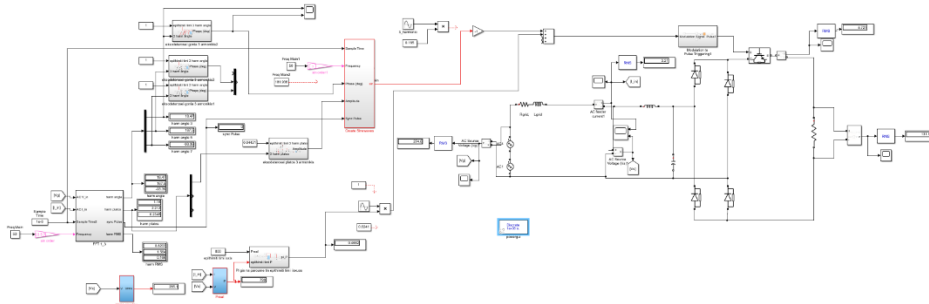
Στην ενότητα αυτήν η τεχνική παλμοδότησης που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, θα εφαρμοστεί σε έναν μετατροπέα AC-DC με φορτίο τον ίδιο ηλεκτρικό θερμοσίφωνα. Σκοπός είναι η σύγκριση των δύο μετατροπέων.

#### 4.2. Μελετώμενο Σύστημα – Σκοπός Πτυχιακής

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε η λειτουργία του μετατροπέα AC-AC στην προσπάθεια μείωσης των αρμονικών, στην παρούσα θα εξεταστεί η λειτουργία του μετατροπέα AC-DC για να επιχειρηθεί να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης και του ρεύματος δικτύου μέσω του ελέγχου της ποσότητας ισχύος που απορροφά ο μετατροπέας αυτός. Με αυτόν τον μετατροπέα θα τροφοδοτηθεί ένα ωμικό φορτίο και συγκεκριμένα ένας ηλεκτρικός θερμοσίφωνα. Η ιδέα είναι ίδια με τον προηγούμενο μετατροπέα της ενότητας 3.

Τα στάδια τα οποία ακολουθούνται για την υλοποίηση της εξομοίωσης θα αναλυθούν μέσω των παρακάτω υποσυστημάτων του προγράμματος Simulink. Βασική παράμετρος της εξομοίωσης είναι ότι πραγματοποιείται σε διακριτό χρόνο  $1e-6$ .

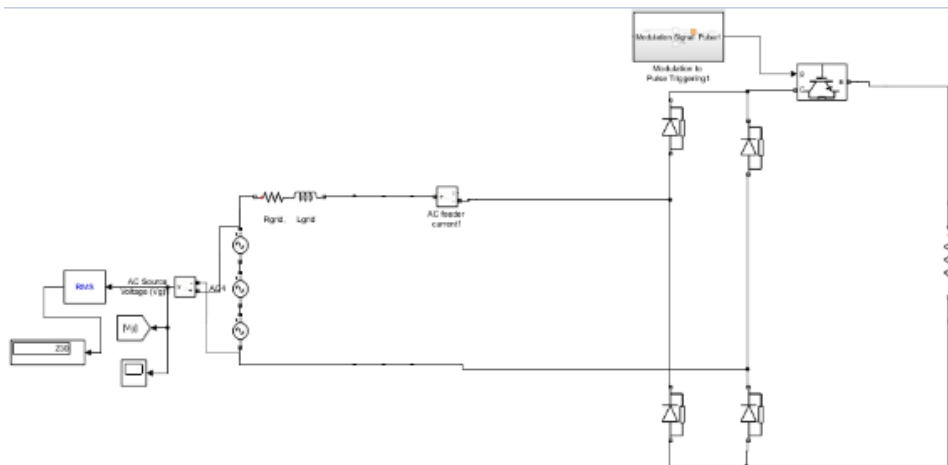
Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το συνολικό σχηματικό της εξομοίωσης και στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί λεπτομερώς.



**Σχήμα 3.1** Το συνολικό μοντέλο εξομοίωσης της λειτουργίας του μετατροπέα AC-DC.

### 4.3. Μετατροπέας Ισχύος AC/DC

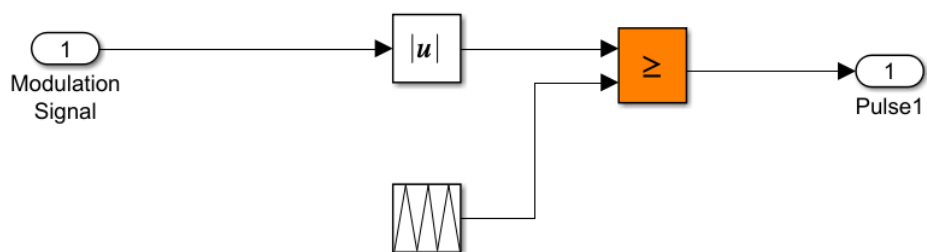
Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο μετατροπέας ισχύος (AC-DC controller) που δέχεται στην είσοδο του μια εναλλασσόμενη τάση και στην έξοδο προκύπτει μια συνεχής τάση. Στη παρούσα εργασία η ανόρθωση γίνεται με την βοήθεια της απλής μονοφασικής ανορθωτικής γέφυρας που αποτελείτε από τέσσερις διόδους και ο έλεγχος της συνεχούς τάσης γίνεται με την βοήθεια ενός τρανζίστορ ισχύος (IGBT) κατάλληλος για την τροφοδοσία οικιακού θερμοσίφωνα. Το φορτίο που έχουμε συνδέσει στην έξοδο του μετατροπέα είναι ένα ωμικό  $R=23\Omega$  όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.



**Σχήμα 4.2.:** Μπλοκ διάγραμμα του μετατροπέα AC-DC.

#### 4.4. Μπλοκ ελέγχου ανωτέρων αρμονικών

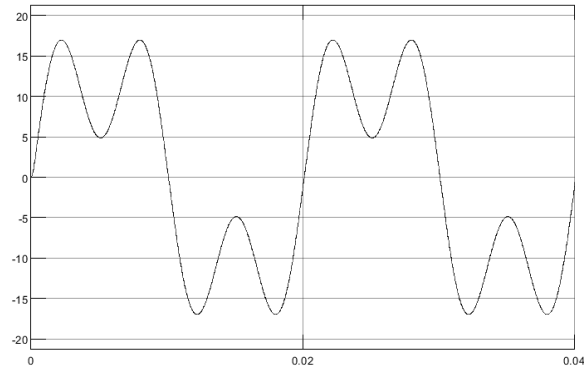
Ο έλεγχος των ανωτέρων αρμονικών πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως αναφερθήκαμε στην προηγούμενη ενότητα, το μόνο που διαφέρει είναι η τεχνική παλμοδότησης που εφαρμόζεται. Δηλαδή, αυτό που αλλάζει είναι το ότι δημιουργούμε παλμούς μόνο για ένα τρανζίστορ ισχύος .



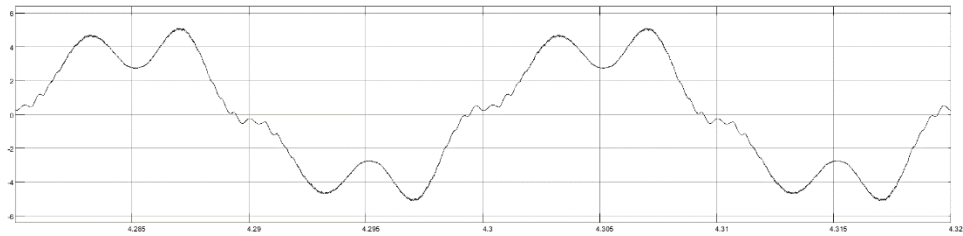
**Σχήμα 4.3.:** Υποσύστημα δημιουργίας παλμού.

#### 4.5. Αποτελέσματα εξομοίωσης

Παρακάτω βλέπουμε το ρεύμα του δικτύου πριν να ξεκινήσει το σύστημα να βελτιώνει τις αρμονικές του συστήματος. Στο σύστημα αυτό εμφανίζεται μια 3η αρμονική στην είσοδο και επιχειρούμε να την μειώσουμε κατά κάποιο βαθμό. Εδώ παρατηρούμε το ρεύμα του δικτύου πριν την εφαρμογή της τεχνικής για την μείωσή των αρμονικών.

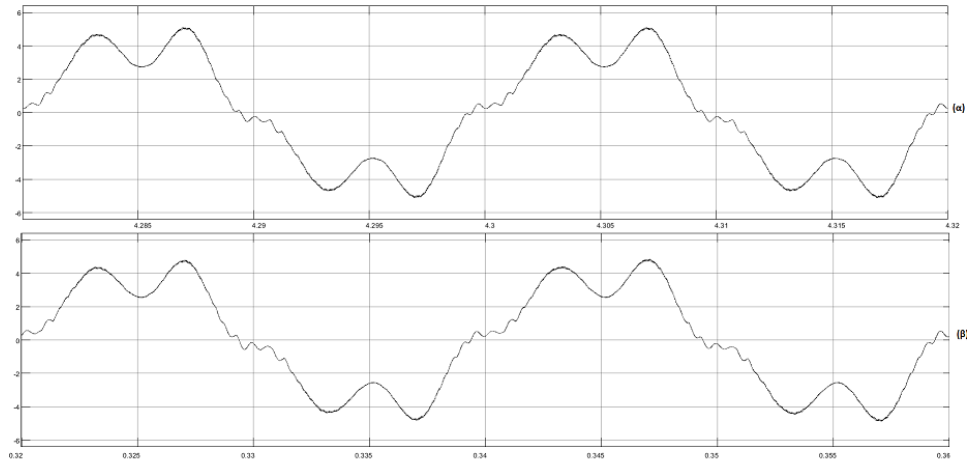


**Σχήμα 4.4.:** Ρεύμα του δικτύου πριν την προσπάθεια μείωσης αρμονικών

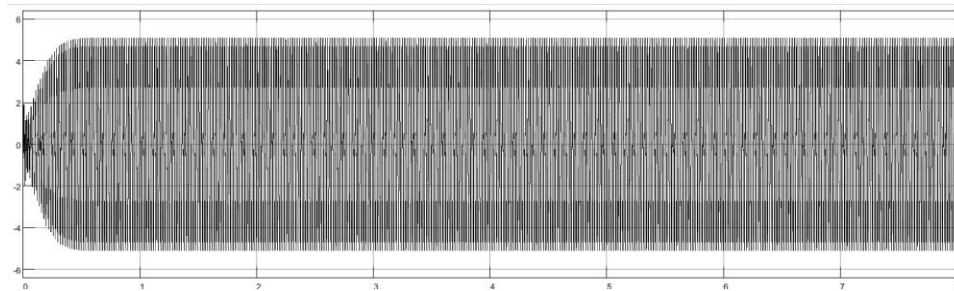


**Σχήμα 4.5.:** Ρεύμα δικτύου μετά από την εφαρμογή της τεχνικής, για την μείωση των αρμονικών

Αυτό το οποίο παρατηρήθηκε πάνω σε αυτόν το μετατροπέα είναι ότι δεν μπορέσαμε να πάρουμε κάποια βελτίωση του ρεύματος δικτύου αυτό το βλέπουμε και από την σύγκριση του σχήματος 4.4. και 4.5.. Παρακάτω βλέπουμε την μικρή βελτίωση της κυματομορφής όταν ξεκίνησε και μετά από 5s όταν σταθεροποιήθηκε.



**Σχήμα 4.6.:** Ρεύμα του δικτύου μετά την εφαρμογή του μετατροπέα όπου (α) μετά από 4 s ενώ (β) μετά 0,3 s.



**Σχήμα 4.6.:** Το ρεύμα δικτύου κατά τον έλεγχο.

Παραπάνω φαίνεται το ρεύμα δικτύου κατά τον έλεγχο, όπου κατασκευάστηκε το σύστημα κατάλληλα έτσι, ώστε να καθυστερήσει ένα χρονικό διάστημα μέχρι να πάρει την επιθυμητή τιμή η ισχύς. Αυτή η καθυστέρηση εφαρμόστηκε έτσι, ώστε το σύστημα να μην γίνει ασταθές. Ωστόσο όμως, αυτό που παρατηρήθηκε είναι ότι επάνω και σε αυτόν τον μετατροπέα δεν εμφανίζεται κάποια μεγάλη βελτίωση. Δηλαδή, οι τιμές των αρμονικών βελτιώνονται κατά ένα ποσό και μετά παραμένουν σταθερές. Αν μεταβληθούν οι τιμές των κερδών ολοκλήρωσης δηλαδή αν αυξάνονταν, τότε, το σύστημα θα γινόταν ασταθές επομένως η εφαρμογή του  $PI$  ελέγχου και εδώ μας οδηγεί σε άτοπο λόγο το ότι οι

μείωση των αρμονικών αργεί να γίνει. Στην παρακάτω παράγραφο θα αναλυθεί η κατάλληλη μέθοδος.



## 5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### 5.1. Σύγκριση των δυο μετατροπέων ισχύος με έλεγχο PI

Από τις εξομοιώσεις συμπεραίνεται ότι και στους δύο μετατροπείς τα συστήματα μπαίνουν σε αστάθεια. Ο λόγος είναι ότι όπως προσπαθεί ο έλεγχος να πετύχει την ζητούμενη ισχύ το σύστημα προσπαθεί να διορθώσει και την γωνία και συγχρόνως. Όμως, κατά την προσπάθεια να συγχρονιστεί βρίσκει λάθος τιμές γωνίας, με αποτέλεσμα το σύστημα να παλμοδοτεί σε λάθος σημεία. Δηλαδή, παλμοδοτεί σε σημεία τα οποία εμφανίζεται μια τοπική βύθιση της τάσης, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η τοπική βύθιση του ημιτόνου της. Αποτέλεσμα αυτού είναι το σύστημα να μην θυμίζει πλέον ημίτονο. Στην προσπάθεια να αναζητηθεί τρόπος εφαρμογής του PI ελέγχου, επιχειρήθηκε να αλλαχθούν τα κέρδη τόσο της εύρεσης της γωνίας όσο και του πλάτους (π.χ. γρήγορη εύρεση γωνίας αργή του πλάτους). Τελικά, το σύστημα δεν οδηγήθηκε σε λύση. Υπάρχει όμως τεχνική έλεγχου που δίνει εξαιρετικά αποτελέσματα. Αυτή παρουσιάζεται εν συντομία στην επόμενη παράγραφο διότι, είναι τεχνική η οποία έχει περιγράψει και χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένη βιβλιογραφία.

### 5.2. Σύγκριση των δυο διαφορετικών τεχνικών ελέγχου

Αφού λοιπόν στις δυο προηγούμενες ενότητες έγινε μια αναλυτική περιγραφή της προσπάθειας μείωσης των ανώτερων αρμονικών, βρεθήκαμε σε ένα σημείο το οποίο και οι δυο μετατροπείς έφερναν σε αστάθεια το σύστημα της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου. Πρώτα από όλα στην αρχή υπήρχε ένα θέμα με την εύρεσης της γωνίας  $\alpha$  της εκάστοτε αρμονικής όπου αυτό λύθηκε επιλέγοντας ένα γρηγορότερο χρόνο στον ολοκλήρωση σε σχέση με την εύρεση του πλάτους της εκάστοτε αρμονικής. Ύστερα δημιουργήθηκε ένα θέμα και με την εύρεση της ισχύος όπου και εκεί επιλέχθηκε μια μεγαλύτερη τιμή στο κέρδος του ολοκληρωτη σε σχέση με τον ολοκληρωτη της εύρεσης της γωνίας. Το αποτέλεσμα ήταν η γωνία  $\alpha$  να είχε γρήγορη εύρεση άλλα μετά από λίγο

είχε μόνιμη μεταβολή δηλαδή, μόνιμο σφάλμα με αποτέλεσμα να βρίσκουμε λάθος γωνία και να παλμοδοτούμε σε σημεία τα οποία χειροτέρευαν την τάση δικτύου. Ο μονός τρόπος επίλυσης του προβλήματος είναι με τον τρόπο με τον οποίο αναφέρεται στις βιβλιογραφικές αναφορές [3]. Σε αυτές παρουσιάζεται ένας κατάλληλος τρόπος ελέγχου της χρήσης κατοπτρικών αρμονικών, που περιγράφεται παρακάτω.

Η ιδέα αυτή στηρίζεται στην δημιουργία μιας σωστή διαμόρφωσης όπου θα οδηγήσει τον μετατροπέα στην απορρόφηση των αρμονικών του ρεύματος του δικτύου, με την δημιουργία μιας νέας κυματομορφής που περιέχει το κατάλληλο κατοπτρικό αρμονικό περιεχόμενο, με αποτέλεσμα την μείωση των αρμονικών της γραμμής. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια ανάλυση FFT του ρεύματος της γραμμής και συγχρόνως δημιουργούνται κατοπτρικές αρμονικές με κατάλληλη γωνία και ένα συγκεκριμένο πλάτος αυτής της παραμόρφωσης. Η διαφορά με τον έλεγχο που επιχειρήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας είναι ότι δεν αναζητείται βήμα - βήμα αλλά θεωρείται ότι είναι αυτή που δίνεται από την ανάλυση Fourier. Βεβαίως, η γωνία και το πλάτος είναι διαφορετικά (λίγο ή πολύ). Ο λόγος είναι ότι τόσο η διαμόρφωση sPWM όσο και τα παρασιτικά στοιχεία μεταξύ του μετατροπέα και του σημείου που πρέπει να διορθωθούν οι αρμονικές (που δεν είναι γνωστά) απαιτούν διαφορετικές τιμές γωνίας και πλάτους. Απλά μπορούμε να πούμε ότι η γωνία και το πλάτος στην πραγματικότητα δεν είναι εκεί, επειδή υπάρχουν υπάρχουν οι γραμμές του δικτύου και τα στοιχεία του μετατροπέα που κρύβονται. Άλλα εμείς παίρνουμε αυτά δεδομένα δηλαδή αρμονικές που έχουν την ίδια συχνότητα και πλάτος αλλά μετατόπιση φάσης  $180^\circ$  από αυτό, προστίθενται στο ημιτονικό κύμα κατά τη διαμόρφωση παραγωγής παλμών. Μετά ξαναγίνεται ανάλυση FFT και προστίθεται στην αρχική (ανακριβή) γωνία η νέα που έρχεται από την FFT. Δηλαδή, προκύπτει μια νέα γωνία  $b$  με ένα νέο πλάτος, όπου προστίθενται στο  $a$ , και δίνουν το  $c$ . Με αυτόν τον τρόπο εγκλωβίζουν τη γωνία της εκάστοτε αρμονικής. Αυτό το διατυπώνεται μαθηματικά όπως περιγράφεται παρακάτω.

$$h_A(t) = A \sin(2\pi f + a) \tag{9}$$

$$h_B(t) = B \sin(2\pi f + b) \tag{10}$$

$$h_C(t) = C \sin(2\pi f t + c) \quad (11)$$

$$h_A = A e^{ja} \quad (12)$$

$$h_B = B e^{jb} \quad (13)$$

$$h_C = C e^{jc} \quad (14)$$

Το αρμονικό περιεχόμενο εξόδου C υπολογίζεται με τη σχέση :

$$C e^{jc} = A e^{ja} + B e^{jb} \quad (15)$$

Επομένως, τα πλάτη A, B, C και οι γωνίες φάσης a, b, c σχετίζονται με το καθένα άλλο από τις εξισώσεις:

$$A \cos a + jA \sin a + B \cos b + jB \sin b = C \cos c + jC \sin c \quad (16)$$

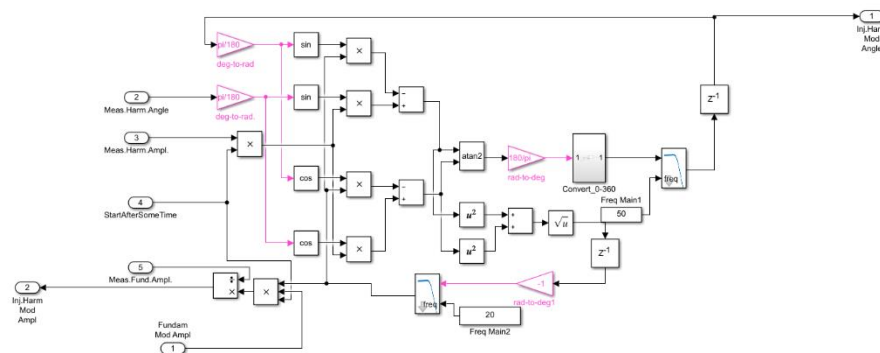
$$C \cos c = A \cos a + B \cos b \text{ and } C \sin c = A \sin a + B \sin b \quad (17)$$

Άρα λοιπόν το πλάτος και η γωνία υπολογίζεται :

$$a = \tan^{-1} \left[ \frac{(C \sin c - B \sin b)}{(C \cos c - B \cos b)} \right] \quad (18)$$

$$A = (C \cos c - B \cos b) / \cos a \quad (19)$$

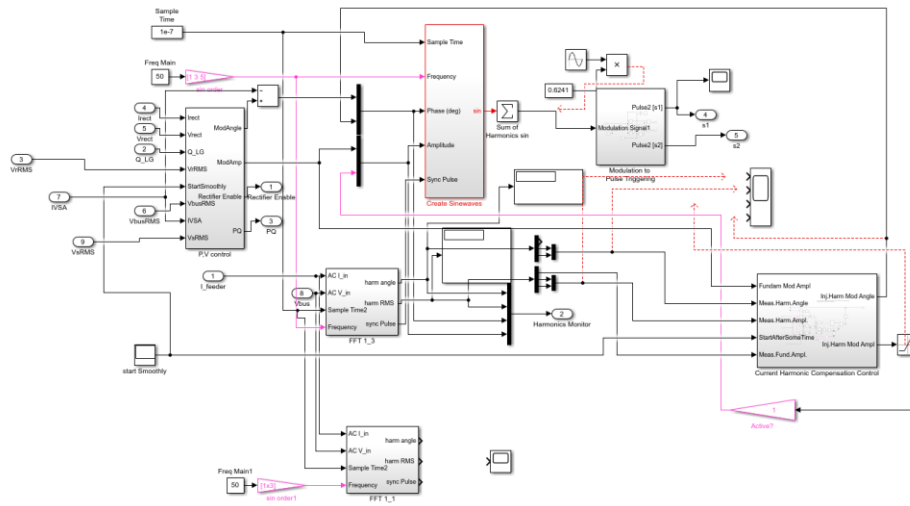
Υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου σε εξομοίωση [3]



**Σχήμα 5.1.:** Υποσύστημα για την δημιουργία των πλατών και γωνιών των αρμονικών.

Όπως αναφέρθηκε καινωρίτερα η διαφορά με την παρούσα εργασία είναι στην τεχνική ελέγχου α/β/γ και όχι στην τεχνική παλμοδότησης.

Παρακάτω βλέπουμε την σύνολό του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε:



**Σχήμα 5.2.:** Συνολικό σύστημα ελέγχου τάσης, ισχύος και περιορισμού αρμονικών

Συμπέρασμα ο πιο αξιόπιστος τρόπος είναι ο τρόπος του που παρουσιάζεται στην εργασία [3] όπου το σύστημα δεν γίνεται ασταθές σε αντίθεση με τον PI έλεγχο που επιχειρήθηκενωρίτερα στην εργασία.

## Βιβλιογραφία

- [1] Απόστολος Πολυζάκης, Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής; Ισχύος
- [2] Mohan Undeland Robbins, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, 3η Έκδοση
- [3] Panagis N. Vovos, Konstantinos G. Georgakas, Smart Boiler: Grid Support Services from Non-Critical Loads, ..... (2020)
- [4] Kiam Heong Ang, Gregory Chong, Student Member, PID Control System Analysis, Design, and Technology, IEEE, and Yun Li, Member, IEEE
- [5] Konstantinos G. Georgakas, Panagis N. Vovos, Member, IEEE, and Nicholas A. Vovos, Senior Member, IEEE, Harmonic Reduction Method for a Single-Phase DC-AC Converter Without an Output Filter
- [6] Sang-Hoon Kim, in Electric Motor Control, Pulse width modulation inverters, 2017
- [7][https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7\\_%CE%A6%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B9%CE%AD](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%85%CF%83%CE%B7_%CE%A6%CE%BF%CF%85%CF%81%CE%B9%CE%AD)