



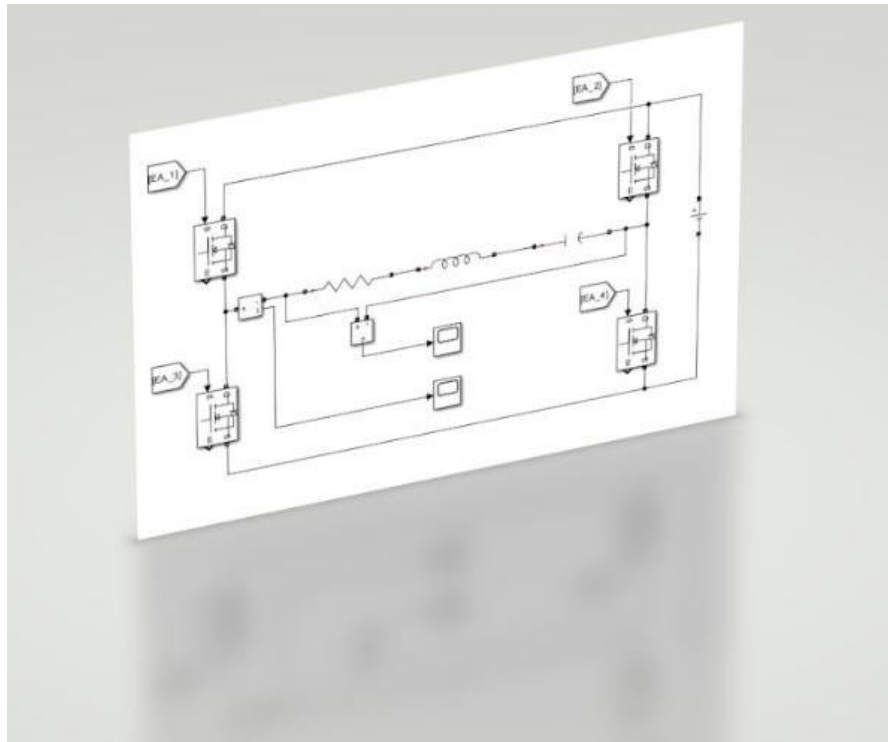
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

**Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.**



Φοιτητής: ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΠΛΑΚΑΣ

ΑΜ: 483212017083

Επιβλέπων Καθηγητής

ΤΣΑΚΙΡΙΔΗΣ ΟΔΥΣΣΕΑΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ ,2024

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*



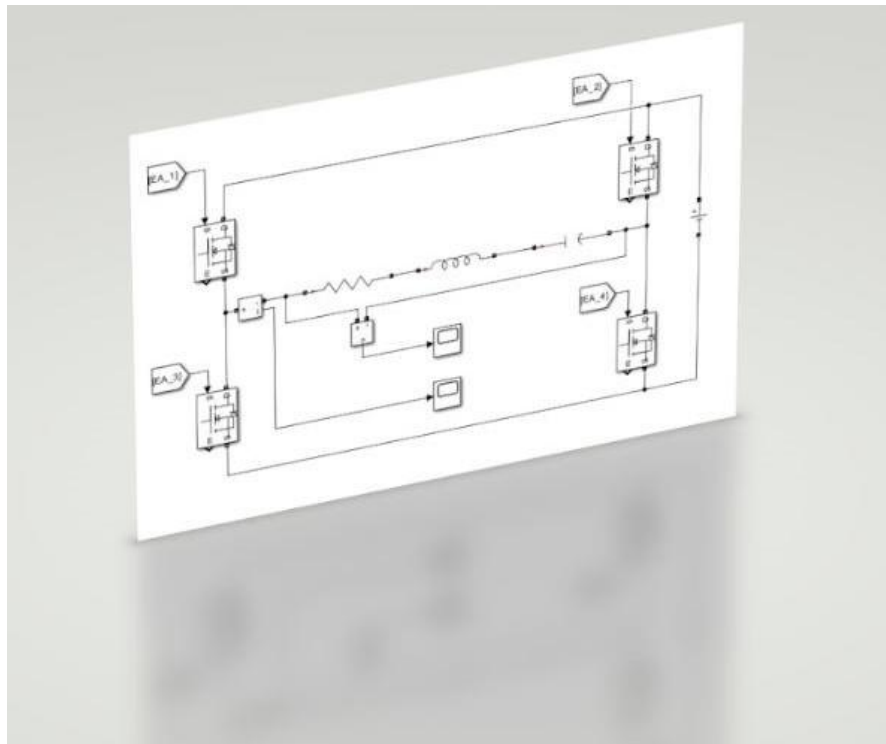
**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**FACULTY OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

**Optimization of pulse width modulation method (PWM) for inverter driving circuit in order to reduce the Voltage and current Total Harmonic Distortion (THD).**



**Student: SPYRIDON PLAKAS**

**Registration Number: 483212017083**

**Supervisor**

**TSAKIRIDIS ODYSSEFS**

**ASSISTANT PROFESSOR**

**ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER, 2024**

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσακιρίδης Οδυσσέας, Επίκουρος Καθηγητής	Φωτόπουλος Παναγιώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής	Γαλατά Σωτηρία, Επίκουρη Καθηγήτρια

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Σπυρίδων Πλάκας,  
Ιούλιος, 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σπυρίδων Πλάκας του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου 483212017083 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

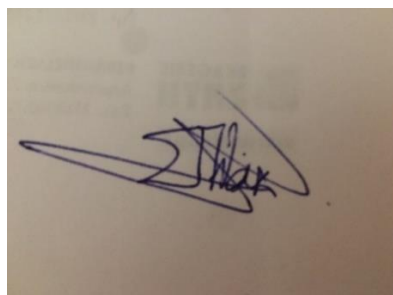
**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών, Σπυρίδων Πλάκας



*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στους αγαπημένους μου γονείς, Μαρία και Αντώνη , για την ατελείωτη αγάπη, την υποστήριξη και τις θυσίες τους. Η παρουσία σας και η εμπιστοσύνη σας σε μένα ήταν η κινητήριος δύναμη που με βοήθησε να ολοκληρώσω αυτό το έργο. Σας ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου.

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Με μεγάλη ευγνωμοσύνη, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Τσακίριδη Οδυσσέα, για την αδιάκοπη υποστήριξη και καθοδήγησή του. Επίσης, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αγάπη και την ενθάρρυνσή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη βοήθεια και την υποστήριξή σας, αυτό το έργο δεν θα ήταν δυνατό. Σας ευχαριστώ από καρδιάς.

## **Περίληψη**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation) για την οδήγηση αντιστροφέα (inverter), με στόχο τη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion) της τάσεως και του ρεύματος στην έξοδο του συστήματος. Συγκεκριμένα, γίνεται συγκριτική μελέτη της κλασικής μεθόδου διαμόρφωσης ημιτονοειδούς πλάτους παλμών (Sinosoidal PWM) και της προτεινόμενης καινοτόμου μεθόδου EAPWM (Equal Areas Pulse Width Modulation). Η εργασία περιλαμβάνει αναλυτική θεωρητική ανασκόπηση των βασικών αρχών λειτουργίας των αντιστροφέων και των τεχνικών PWM, εστιάζοντας στις αδυναμίες της μεθόδου SPWM όσον αφορά την αρμονική παραμόρφωση. Ακολούθως, περιγράφεται η διαδικασία ανάπτυξης της μεθόδου EAPWM, η οποία ρυθμίζει δυναμικά το εύρος των παλμών ώστε να επιτυγχάνονται ίσες περιοχές, βελτιστοποιώντας έτσι την απόδοση. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η EAPWM μειώνει σημαντικά την THD, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και στην αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων που χρησιμοποιούν οι αντιστροφέες. Συμπερασματικά, η μέθοδος EAPWM αποδεικνύεται αποτελεσματικότερη από την SPWM και ανοίγει -ίσως- δρόμους για τη βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος.

## **Λέξεις – κλειδιά**

Αντιστροφέας , Μετατροπέας πηγής τάσης (VSI) , Διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM), Ολική αρμονική παραμόρφωση (THD), Ημιτονοειδής διαμόρφωση πλάτους παλμού (SPWM), Ίσες περιοχές Διαμόρφωση πλάτους παλμού (EAPWM), MATLAB, Simulink.

## **Abstract**

This thesis examines the optimization of the Pulse Width Modulation (PWM) method for inverter driving, aiming to reduce the Total Harmonic Distortion (THD) of output voltage and current. Specifically, a comparative study is conducted between the classical Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) method and the proposed innovative Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM) method. The thesis includes a detailed theoretical review of the basic principles of inverter operation and PWM techniques, focusing on the weaknesses of the SPWM method regarding harmonic distortion. Subsequently, the development process of the EAPWM method is described, which dynamically adjusts the pulse width to achieve equal areas, thereby optimizing performance. Experimental results show that EAPWM significantly reduces THD, thus contributing to improved power quality and increased efficiency of systems using inverters. In conclusion, the EAPWM method proves to be more effective than SPWM and opens -maybe- new pathways for the improvement of power electronics.

## **Keywords**

Inverter , Voltage Source Inverter (VSI) , Pulse width modulation (PWM) , Total Harmonic Distortion (THD), Sinusoidal- Pulse width modulation (SPWM) , Equal areas Pulse width modulation (EAPWM), MATLAB, Simulink.



## Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων .....	11
Κατάλογος Εικόνων.....	11
Αλφαβητικό Ευρετήριο .....	13
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Εισαγωγή.....</b>	<b>14</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	14
1.2 Σκοπός και στόχοι .....	14
1.3 Μεθοδολογία .....	15
1.4 Καινοτομία .....	16
1.5 Δομή.....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Αντιστροφείς (Inverters DC-AC).....</b>	<b>18</b>
2.1 Εισαγωγή στους αντιστροφείς .....	18
2.2 Αντιστροφείς Πηγής Τάσης (Voltage Source Inverter) .....	18
2.3 Ανάλυση μονοφασικών αντιστροφέων .....	19
2.3.1 Μονοφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας .....	19
2.3.2 Μονοφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας .....	20
2.4 Ημιαγωγοί ισχύος.....	21
2.4.1 Θυρίστορ (Thyristor) : .....	22
2.4.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) .....	23
2.4.3 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) .....	23
2.5 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation).....	24
2.5.1 Ιστορικά το PWM .....	24
2.5.2 Ορισμός PWM.....	24
2.5.3 Ανάγκη για PWM .....	24
2.6 Έλεγχος τάσης μονοφασικού αντιστροφέα με τεχνική P.W.M. ....	26
2.7 Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier transform) - FFT .....	28
2.8 Ολική αρμονική παραμόρφωση (Total harmonic distortion) -THDv .....	29
2.9 Αρμονικές (Harmonics).....	30
2.9.1 Επιπτώσεις αρμονικών στα δίκτυα.....	31
2.9.2 Επιπτώσεις στα φορτία .....	33
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Μέθοδοι Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM).....</b>	<b>35</b>
3.1 Γενικά PWM .....	35
3.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών με βάση τα διακριτά διανύσματα τάσης (SVPWM).....	36
3.2.1 SVPWM και βελτιστοποιημένη SVPWM (PWM διανύσματος χώρου) .....	38
3.3 Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και SPWM.....	39
3.3.1 Τεχνική παλμοδότησης PWM – Pulse Width Modulation (Διαμόρφωση εύρους παλμών). ....	40
3.3.2 Τεχνική παλμοδότησης SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation (Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών) . ....	41
3.3.3 Τεχνική παλμοδότησης HCC – Hysteresis Current Control (Έλεγχος βρόχου υστέρησης).....	42
3.4 Διαμόρφωση πλάτους ημιτονοειδούς παλμού (SPWM) .....	43
3.4.1 Έλεγχος τάσης μονοφασικού αντιστροφέα με τεχνική S.P.W.M.....	44
3.4.2 Αρμονικές σε Unipolar και Bipolar SPWM .....	48
3.4.2 Εφαρμογή της SPWM σε λογισμικό Simulink.....	50
3.4.3 Διαμόρφωση πλάτους ημιτονοειδούς παλμού (SPWM) και οι αρμονικές της.....	56
3.4.4 Αρμονικό περιεχόμενο σε SPWM .....	56
3.5 Διαφορές μεθόδων SVPWM ME SPWM : .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Διαμόρφωση Εύρους Παλμών ίσων περιοχών – Equal Areas PWM (EAPWM) .....</b>	<b>63</b>
4.1 Γενικά.....	63

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

<b>4.2 Εξισώσεις EAPWM .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3 Υπολογισμός ολικής αρμονικής παραμόρφωσης.....</b>	<b>65</b>
<b>4.4 Πειραματικά αποτελέσματα.....</b>	<b>66</b>
4.4.1 Υλοποιώντας μέσω Matlab.....	66
4.4.2 Υλοποιώντας μέσω Simulink.....	74
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα .....</b>	<b>80</b>
5.1 Σύγκριση ως προς την υπολογιστική προσπάθεια.....	80
5.2 Σύγκριση ως προς ολική αρμονική παραμόρφωση (THD) .....	80
5.3 Σύγκριση ως προς την αρμονική τάξη.....	80
5.4 Σύγκριση ως προς τη συχνότητα μεταγωγής (στους διακόπτες-Mosfet).....	80
5.5 Γενικά .....	80
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....</b>	<b>83</b>
<b>Σύμβολα - Ονοματολογία.....</b>	<b>85</b>
<b>Κώδικας – MATLAB .....</b>	<b>86</b>

## **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 3.1 , Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVrwm (πηγή : (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

Πίνακας 3.2 Αρμονικές για SPWM ( Πηγή : Μανίας κεφάλαιο 6 , Αντιστροφείς)

Πίνακας 3.3, Διαφορές Sprwm με SVrwm

Πίνακας 4.1, Ενδεικτικά-τελικά αποτελέσματα της μεθόδου EAPWM για διαφορετικούς αριθμούς παλμών

## **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 2.1, Inverter Huawei σε φ/β πάρκο

Εικόνα 2.2, Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας

Εικόνα 2.3, Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με πηγή τάσης

Εικόνα 2.4, Ημιαγωγοί ισχύος (Πηγή Μανίας Στέφανος , ηλεκτρονικά ισχύος )

Εικόνα 2.5, Κυματομορφή σήματος αναφοράς και φέροντος

Εικόνα 2.6, Κυματομορφές παλμών οδήγησης S1,S2,S3 και S4 αντίστοιχα

Εικόνα 2.7, Τάση εξόδου αντιστροφέα

Εικόνα 2.8, Αρμονικές στο πεδίο του χρόνου

Εικόνα 2.9, Αρμονικές στο πεδίο της συχνότητας

Εικόνα 2.10, Ροή του ρεύματος τρίτης αρμονικής σε ένα 3φ σύστημα

Εικόνα 3.1, Διαμόρφωση διανυσμάτων SVPWM (πηγή : (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

Εικόνα 3.2, Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8

Εικόνα 3.3, Μονοφασικός αντιστροφέας τύπου γέφυρας α) χωρίς φίλτρο, β) με φίλτρο

Εικόνα 3.4, PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση χωρίς φίλτρο

Εικόνα 3.5, PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο α) μέτρια διακοπτική συχνότητα, β) υψηλή διακοπτική συχνότητα.

Εικόνα 3.6, Δημιουργία παλμών στην sPWM για πλάτος ανορθωμένου ημιτόνου α) 0,5 και β) 0,8.

Εικόνα 3.7, SPWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο για διακοπτική συχνότητα α) 1kHz και β) 10kHz.

Εικόνα 3.8, Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής παλμοδότησης HCC

Εικόνα 3.9, α) SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς και φέροντος β ) SPWM Κυματομορφές παλμών

Εικόνα 3.10, Αρμονικές στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 3.11, Αρμονικές στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Εικόνα 3.12, Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα Unipolar\_SPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του Unipolar\_SPWM

Εικόνα 3.13, Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς & φέροντος και κυματομορφές παλμών

Εικόνα 3.14, Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές τάσης εξόδου

Εικόνα 3.15, Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Εικόνα 3.16, Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα Bipolar\_SPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του Bipolar\_SPWM

Εικόνα 3.17, Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς & φέροντος και κυματομορφές παλμών

Εικόνα 3.18, Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές τάσης εξόδου

Εικόνα 3.19, Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Εικόνα 3.20, Αρμονικές τάσης στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 3.21, Αρμονικές ρεύματος στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 3.22, Αρμονικές τάσης στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 3.23, Αρμονικές ρεύματος στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 4.1, Προσέγγιση του ημιτονοειδούς σήματος τάσης (διακεκομμένη καμπύλη) με ευθύγραμμα τμήματα (κουκκίδες)

Εικόνα 4.2, Δημιουργία ακριβούς παλμού EAPWM-απεικόνιση EAPWM (Πηγή : [24] )

Εικόνα 4.3, Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=3$  και  $f_s=300\text{Hz}$

Εικόνα 4.4, Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=3$  και  $f_s=300\text{Hz}$

Εικόνα 4.5, Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=5$  και  $f_s=500\text{Hz}$

Εικόνα 4.6, Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=5$  και  $f_s=500\text{Hz}$

Εικόνα 4.7, Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=11$  και  $f_s=1100\text{Hz}$

Εικόνα 4.8, Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=11$  και  $f_s=1100\text{Hz}$

Εικόνα 4.9, Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=21$  και  $f_s=2100\text{Hz}$

Εικόνα 4.10, Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=21$  και  $f_s=2100\text{Hz}$

Εικόνα 4.11, Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα EAPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του EAPWM

Εικόνα 4.12, Περιβάλλον Simulink για EAPWM, Κυματομορφές τάσης εξόδου

Εικόνα 4.13, Περιβάλλον Simulink για EAPWM, Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Εικόνα 4.14, Περιβάλλον Simulink για EAPWM, Κυματομορφές κυμάτων & κυματομορφές παλμών

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Εικόνα 4.15 α,β, Αρμονικές τάσης στην ΕΑΡPWM, χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Εικόνα 4.16 α,β, Αρμονικές ρεύματος στην ΕΑΡPWM, χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

## **Αλφαβητικό Ευρετήριο**

IEEE: The Institute for Electrical and Electronics Engineers

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> Εισαγωγή**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση αντιστροφέα (inverter), με κύριο στόχο τη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσεως και του ρεύματος στην έξοδο του συστήματος. Η αυξημένη χρήση των αντιστροφέων σε πλήθος εφαρμογών, όπως στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στα ηλεκτρικά οχήματα, καθιστά την αποτελεσματική τους λειτουργία κρίσιμη για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και της συνολικής αποδοτικότητας των συστημάτων.

Οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή συνεχούς ρεύματος (Direct Current) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (Alternating Current), και η ποιότητα της εξόδου τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μέθοδο PWM που χρησιμοποιείται. Η κλασική μέθοδος διαμόρφωσης ημιτονοειδούς πλάτους παλμών (SPWM) είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω της απλότητας και της αποδοτικότητάς της. Ωστόσο, η SPWM παρουσιάζει αδυναμίες όσον αφορά την αρμονική παραμόρφωση, η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, προτείνεται και αναπτύσσεται η μέθοδος Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM), η οποία στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας της εξόδου των αντιστροφέων. Η μέθοδος EAPWM διαφέρει από την παραδοσιακή SPWM καθώς προσαρμόζει δυναμικά το εύρος των παλμών για την επίτευξη ίσων περιοχών, μειώνοντας έτσι την ολική αρμονική παραμόρφωση (THD).

Η εισαγωγή της μεθόδου EAPWM αποτελεί μια σημαντική καινοτομία στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να μειώσει σημαντικά την THD, προσφέροντας βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και υψηλότερη αποδοτικότητα. Στο επόμενο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί μια λεπτομερής θεωρητική ανασκόπηση των βασικών αρχών λειτουργίας των αντιστροφέων και των διαφόρων τεχνικών PWM, καθώς και η λεπτομερής περιγραφή της ανάπτυξης και των χαρακτηριστικών της μεθόδου EAPWM.

### **1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση αντιστροφέα (inverter), με σκοπό τη μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου. Στόχος είναι η συγκριτική μελέτη της παραδοσιακής μεθόδου Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) και της νέας μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM), η οποία προτείνεται και αναπτύσσεται στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Η έρευνα περιλαμβάνει θεωρητική ανάλυση και εξομοιώσεις και για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας και των πλεονεκτημάτων της μεθόδου EAPWM σε σχέση με την SPWM, εστιάζοντας κυρίως στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στις εξόδους των αντιστροφέων.

### **1.2 Σκοπός και στόχοι**

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση αντιστροφέα (inverter) με στόχο τη σημαντική μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσεως και του ρεύματος στην έξοδο. Η εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη μιας νέας μεθόδου, της Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM), η οποία θα προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την κλασική μέθοδο Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM).

#### Στόχοι

- Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας:

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

- Διερεύνηση των βασικών αρχών λειτουργίας των αντιστροφέων και των διαφόρων τεχνικών PWM.
- Κατανόηση των περιορισμών και των αδυναμιών της μεθόδου SPWM.
  - Ανάπτυξη της Μεθόδου EAPWM:
- Σχεδιασμός και υλοποίηση της μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM).
- Δυναμική προσαρμογή του εύρους των παλμών για την επίτευξη ίσων περιοχών, με στόχο τη μείωση της THD.
  - Εξομοιώσεις και Πειραματική Επαλήθευση:
- Διεξαγωγή εξομοιώσεων για την αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου EAPWM.
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο SPWM, με έμφαση στη μείωση της THD και στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος.
  - Πειραματική Αξιολόγηση:
- Δοκιμή της μεθόδου EAPWM σε περιβάλλον Matlab και Simulink .
- Μέτρηση και ανάλυση της THD στην έξοδο του αντιστροφέα (Simulink) για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της νέας μεθόδου.
  - Σύγκριση και Αξιολόγηση:
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων της EAPWM με την SPWM σε διάφορα σενάρια λειτουργίας.
- Αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών της προτεινόμενης μεθόδου.

Με την ολοκλήρωση αυτών των στόχων, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στη βελτίωση της τεχνολογίας των αντιστροφέων, παρέχοντας μια καινοτόμο λύση για τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης και την αύξηση της αποδοτικότητας των συστημάτων ηλεκτρονικής ισχύος.

### **1.3 Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη διπλωματική αυτή συνδυάζει θεωρητική ανάλυση, εξομοιώσεις και πειραματική επαλήθευση με χρήση των εργαλείων MATLAB και Simulink. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για τις βασικές αρχές λειτουργίας των αντιστροφέων και των διαφόρων μεθόδων PWM, με έμφαση στην ανάλυση των περιορισμών της μεθόδου SPWM. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η νέα μέθοδος EAPWM σε περιβάλλον MATLAB για τη δυναμική προσαρμογή του εύρους των παλμών με στόχο την ελαχιστοποίηση της THD. Η μεθοδολογία περιελάμβανε τη σχεδίαση, την υλοποίηση και την επαλήθευση της EAPWM μέσω εξομοιώσεων στο Simulink, χρησιμοποιώντας μοντέλο αντιστροφέα που εξομοιώθηκε στο περιβάλλον του Simulink. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις εξομοιώσεις για την επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου και την αξιολόγηση των πλεονεκτημάτων της έναντι της SPWM. Με αυτόν τον συνδυασμό θεωρητικής ανάλυσης και εξομοίωσης (προσομοιώσεων), η διπλωματική εργασία παρέχει μια πλήρη και σφαιρική προσέγγιση για την ανάπτυξη και βελτιστοποίηση της μεθόδου EAPWM για την οδήγηση αντιστροφέων, συμβάλλοντας έτσι στην πρόοδο της τεχνολογίας ηλεκτρονικής ισχύος και τη βελτίωση της απόδοσης ενεργειακών συστημάτων.

## **1.4 Καινοτομία**

Η κύρια καινοτομία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM) για την οδήγηση αντιστροφέων. Η μέθοδος αυτή προτείνεται ως εναλλακτική στην παραδοσιακή μέθοδο Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης (THD) στις εξόδους των αντιστροφέων. Η EAPWM διακρίνεται για την ικανότητά της να διαμορφώνει τους παλμούς με τρόπο που εξασφαλίζει ίσες περιοχές κάτω από το καμπύλη της εξόδου της τάσης, έτσι ώστε να μειώνεται σημαντικά η επιθυμητή αρμονική παραμόρφωση και να βελτιώνεται η απόδοση του αντιστροφέα. Η επιλογή και η ανάπτυξη της EAPWM αποτελεί καινοτόμο προσέγγιση στον τομέα της ηλεκτρονικής ισχύος, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την επίτευξη υψηλότερης απόδοσης και αποτελεσματικότητας στις εφαρμογές αντιστροφέα. Με την επιτυχημένη εφαρμογή και αξιολόγηση της EAPWM, η διπλωματική αυτή συμβάλλει στην πρόοδο της τεχνολογίας αντιστροφέων και αποτελεί σημαντική πρόταση για τη βελτίωση των ηλεκτρικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας σε διάφορους βιομηχανικούς και εμπορικούς τομείς.

## **1.5 Δομή**

Η διπλωματική εργασία ακολουθεί την παρακάτω δομή για την κατανόηση, ανάλυση και εφαρμογή της μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM) για την οδήγηση αντιστροφέων, με έμφαση στη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης στις εξόδους τους:

### **1. Εισαγωγή**

#### **2. Θεωρητική Ανάλυση**

- Εισαγωγή στην τεχνολογία των αντιστροφέων και της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).
- Ανάγκη για την ανάπτυξη νέων μεθόδων PWM για τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος.

#### **3. Ανάπτυξη της Μεθόδου SPWM**

- Ανάλυση της μεθόδου Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM).
- Περιγραφή των προβλημάτων και των περιορισμών της SPWM.

#### **4. Ανάπτυξη της Μεθόδου EAPWM - εξομοιώσεις**

- Περιγραφή και ανάλυση της μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM).
- Σχεδιασμός της μεθόδου σε περιβάλλον MATLAB και Simulink.
- Εκτέλεση εξομοιώσεων στο Simulink για την αξιολόγηση της απόδοσης της EAPWM.

#### **5. Συμπεράσματα**

- Σύγκριση της EAPWM με την SPWM ως προς τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης και την αποδοτικότητα.
- Τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και των ευρημάτων της εργασίας.
- Προτάσεις για μελλοντικές έρευνες και εφαρμογές της EAPWM.

#### **6. Παραρτήματα**



*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

- Τεχνικές λεπτομέρειες, περισσότερα δεδομένα και αναλυτικές προδιαγραφές των εξομοιώσεων

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Αντιστροφείς (Inverters DC-AC)**

### **2.1 Εισαγωγή στους αντιστροφείς**

Με την ανακάλυψη του εναλλασσόμενου ρεύματος και την εισαγωγή των ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, προέκυψε η ανάγκη για έλεγχο της τιμής της τάσης και της συχνότητας. Αυτό έγινε για να ελέγχουμε πιο αποτελεσματικά και οικονομικά τους ηλεκτρικούς κινητήρες και τις ηλεκτρικές συσκευές γενικότερα. Η λύση σε αυτή την ανάγκη ήρθε με την εφεύρεση του αντιστροφέα. Οι αντιστροφείς έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη τάση ή ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα και τάση. Χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, κυρίως στον έλεγχο ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς η ταχύτητά τους συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα. Επιπλέον, τους συναντάμε σε συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, όπου μετατρέπουν την DC τάση των ηλιακών πάνελ σε AC για σύνδεση με το δίκτυο, σε ενεργά φίλτρα για μείωση των αρμονικών και βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος, σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS) και σε συστήματα ενεργής αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Εκτός από αυτές τις εφαρμογές, οι αντιστροφείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Οι αντιστροφείς μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει εκείνους που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (VSI, Voltage Source Inverter). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (CSI, Current Source Inverter).

Επιπλέον, αυτές οι δύο κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν περαιτέρω σε μονοφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία ημιγέφυρας, μονοφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας και τριφασικούς αντιστροφείς με συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας. Αυτές οι υποκατηγορίες θα αναλυθούν σε επόμενο στάδιο. [1]

### **2.2 Αντιστροφείς Πηγής Τάσης (Voltage Source Inverter)**

Ο αντιστροφέας πηγής τάσης (VSI) τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης, η οποία ιδανικά θεωρείται ότι έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση. Η τάση της πηγής μπορεί να είναι είτε σταθερή είτε μεταβλητή και συνήθως προέρχεται από φωτοβολταϊκά συστήματα, συσσωρευτές ή, κυρίως, από την ανορθωμένη τάση του δικτύου ηλεκτρισμού. Η έξοδος του αντιστροφέα με πηγή VSI χαρακτηρίζεται ως πηγή τάσης. Από την άλλη πλευρά, ο αντιστροφέας πηγής ρεύματος (CSI) τροφοδοτείται από μια μεταβλητή πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία ιδανικά θεωρείται ότι έχει άπειρη εσωτερική αντίσταση. Οι αντιστροφείς με πηγή CSI έχουν τα χαρακτηριστικά πηγής ρεύματος και χρησιμοποιούνται κυρίως για τον έλεγχο και την κίνηση ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος πολύ μεγάλης ισχύος. Σε όλους τους αντιστροφείς υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας της τάσης εξόδου, ενώ ο έλεγχος της τιμής της τάσης μπορεί να γίνει είτε μέσω των παλμών που ελέγχουν τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα είτε εξωτερικά με τον έλεγχο της DC τάσης τροφοδοσίας.

Ο αντιστροφέας είναι μια σημαντική ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε άλλη. Στην περίπτωση του VSI, αυτό σημαίνει τη μετατροπή ενός σταθερού επιπέδου συνεχούς τάσης (DC) σε μια εναλλασσόμενη τάση (AC). Αυτό είναι χρήσιμο, για παράδειγμα, σε εφαρμογές όπως η οδήγηση κινητήρων AC, η τροφοδοσία AC φορτίων, και η μετατροπή ενέργειας. Το κύριο πλεονέκτημα του VSI είναι η ικανότητά του να παράγει μια σταθερή τάση εξόδου, ελέγχοντας τη συχνότητα και το πλάτος του σήματος. Αυτό του επιτρέπει να προσαρμόζεται εύκολα σε διάφορες απαιτήσεις φορτίου και εφαρμογές. Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή κινητήρα AC, ο VSI μπορεί να ρυθμίσει την τάση και τη συχνότητα του σήματος για να ελέγξει την ταχύτητα και την ισχύ του κινητήρα. Οι VSI χρησιμοποιούνται επίσης σε εφαρμογές όπως μετατροπείς ενέργειας, συστήματα διανομής ισχύος, συσκευές διάνιξης πυλών και άλλα. Σε πολλές από αυτές τις

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

εφαρμογές, η απόδοση, η ακρίβεια και η αξιοπιστία του VSI είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος. Τέλος, σύμφωνα με τον Kharjule στο [2], στις βιομηχανικές αγορές, ο VSI έχει αποδειχθεί πιο αποδοτικός, πιο αξιόπιστος και έχει τη γρηγορότερη δυναμική απόκριση σε σχέση με έναν CSI.



Εικόνα 2.1 Inverter Huawei σε φ/β πάρκο

## 2.3 Ανάλυση μονοφασικών αντιστροφέων

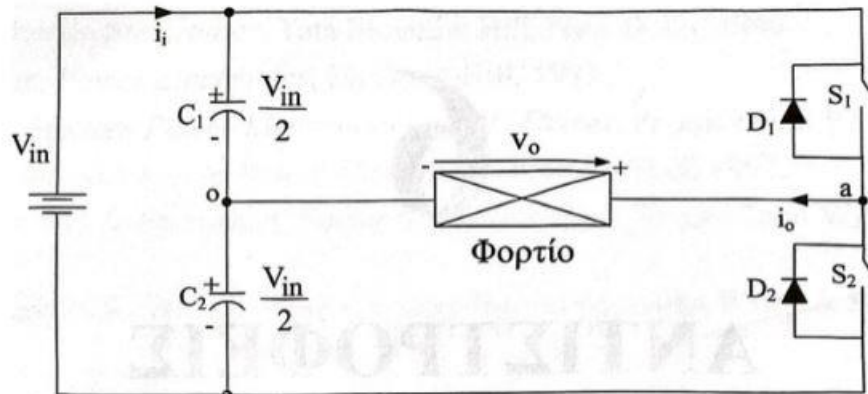
### 2.3.1 Μονοφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

Η τάση εξόδου  $V_o$  μονοφασικού αντιστροφέα είναι ένας τετραγωνικός παλμός δύο επιπέδων με συγκεκριμένο πλάτος  $\pm \frac{V_{in}}{2}$ . Η ρύθμιση της τάσης στον μονοφασικό αντιστροφέα ημιγέφυρας επιτυγχάνεται με την εναλλαγή των χρονικών διαστημάτων αγωγής των ημιαγωγικών διακοπών S1 και S2. Οι ημιαγωγικοί διακόπτες μπορεί να είναι IGBT, MOSFET, διπολικά τρανζίστορ κ.λπ., ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, και ελέγχονται από παλμούς οδήγησης που προέρχονται από κυκλώματα ελέγχου. Ανάλογα με την τάση και το ρεύμα εξόδου του φορτίου, προκύπτουν οι εξής διαδρομές:

1. Όταν η τάση και το ρεύμα εξόδου είναι θετικά, άγει το ημιαγωγικό στοιχείο S1, και η ροή ενέργειας είναι από την πηγή εισόδου προς το φορτίο.
2. Όταν η τάση εξόδου είναι θετική αλλά το ρεύμα αρνητικό, άγει η δίοδος D1. Η ροή ενέργειας είναι από το φορτίο προς την πηγή.
3. Όταν η τάση και το ρεύμα εξόδου είναι αρνητικά, άγει το ημιαγωγικό στοιχείο S2, και η ροή ενέργειας είναι από την πηγή εισόδου προς το φορτίο.
4. Όταν η τάση εξόδου είναι αρνητική αλλά το ρεύμα θετικό, άγει η δίοδος D2. Η ροή ενέργειας είναι από το φορτίο προς την πηγή.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Οι δίοδοι τοποθετούνται αντιπαράλληλα με τα ημιαγωγικά στοιχεία που λειτουργούν ως ηλεκτρονικοί διακόπτες και ονομάζονται δίοδοι ελεύθερης διέλευσης. Αυτές οι δίοδοι επιτρέπουν την αμφίπλευρη ροή ενέργειας στον αντιστροφέα, δηλαδή τόσο από την πηγή προς το φορτίο όσο και αντίστροφα.



Εικόνα 2.2, Μονοφασικός αντιστροφέας ημιγέφυρας

### 2.3.2 Μονοφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας

Ο μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας παρουσιάζει τρία σημαντικά μειονεκτήματα: απαιτεί δύο πυκνωτές μέσης λήψης, δεν μπορεί να δημιουργήσει τάση εξόδου με διαστήματα μηδενικής τάσης για μη ωμικά φορτία, και το πλάτος της τάσης εξόδου είναι αποκλειστικά  $\pm \frac{V_{in}}{2}$ . Επιπλέον, υπάρχει μη ισοκαταμερισμός της τάσης στα άκρα των πυκνωτών. Για την αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων σχεδιάστηκε ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας, ο οποίος δεν παρουσιάζει αυτά τα προβλήματα. Στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας, οι παλμοί που οδηγούν τα ημιαγωγικά στοιχεία S1 είναι ίδιοι με αυτούς του S4 και οι παλμοί που οδηγούν τα S2 είναι ίδιοι με αυτούς του S3. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα είναι εναλλασσόμενη με εύρος  $\pm V_{in}$ . Παρακάτω παρουσιάζεται το κύκλωμα του αντιστροφέα, οι κυματομορφές των παλμών οδήγησης, η τάση και το ρεύμα εξόδου. Αναλυτικά, ο τρόπος λειτουργίας του αντιστροφέα με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας είναι ο εξής (υποθέτουμε ότι υπάρχει φίλτρο στην έξοδο που παρέχει ημιτονοειδές ρεύμα εξόδου):

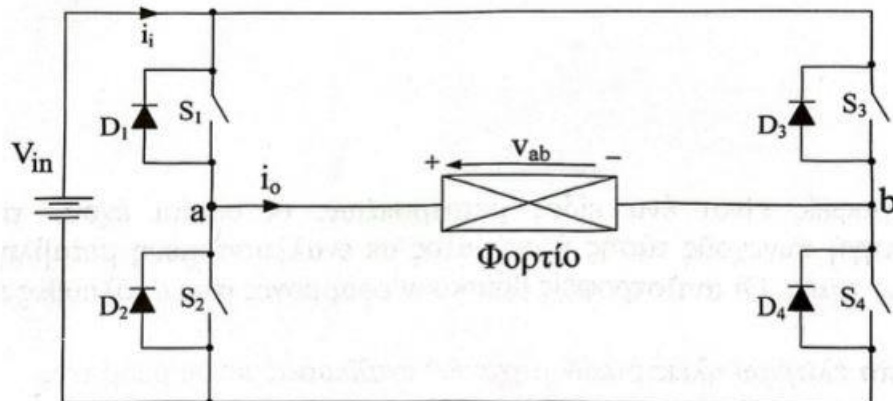
1. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου είναι θετικά, άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία S1 και S4, με αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς να ρέει από την πηγή προς το φορτίο. Σε αυτή τη φάση, ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας.
2. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου είναι αρνητικά, άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία S2 και S3, με αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς να ρέει από την πηγή προς το φορτίο. Σε αυτή τη φάση, ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας.
3. Όταν η τάση εξόδου είναι μηδενική ενώ το ρεύμα είναι θετικό, άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγικών στοιχείων S4 – D2 ή S1 – D3. Έτσι υπάρχει ροή ρεύματος προς το φορτίο, χωρίς μεταφορά ενέργειας από την πηγή. Αυτή η φάση ονομάζεται φάση ελεύθερης διέλευσης.
4. Όταν η τάση εξόδου είναι μηδενική ενώ το ρεύμα είναι αρνητικό, άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγικών στοιχείων S3 – D1 ή S2 – D4, δημιουργώντας ροή ρεύματος προς το φορτίο, με το ρεύμα να είναι ανακυκλούμενο, και ο αντιστροφέας λειτουργεί σε φάση ελεύθερης διέλευσης.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

5. Όταν η τάση εξόδου είναι θετική αλλά το ρεύμα είναι αρνητικό, άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία D1 και D4. Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργός ισχύς ρέει από το φορτίο προς την πηγή, και ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ανόρθωση.

6. Όταν η τάση εξόδου είναι αρνητική αλλά το ρεύμα είναι θετικό, άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία D2 και D3. Εδώ, η ενεργός ισχύς ρέει από το φορτίο προς την πηγή, και ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ανόρθωση.

Συνοψίζοντας, ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας μπορεί να λειτουργήσει και στα δύο τεταρτημόρια. Εκτός από την οδήγηση και τον έλεγχο ενός κινητήρα AC, έχει τη δυνατότητα να επιστρέφει ενέργεια στην πηγή τροφοδοσίας του, όπως κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής πέδησης ενός ηλεκτρικού οχήματος, όπου μπορεί να φορτίσει τις μπαταρίες του οχήματος. [3]

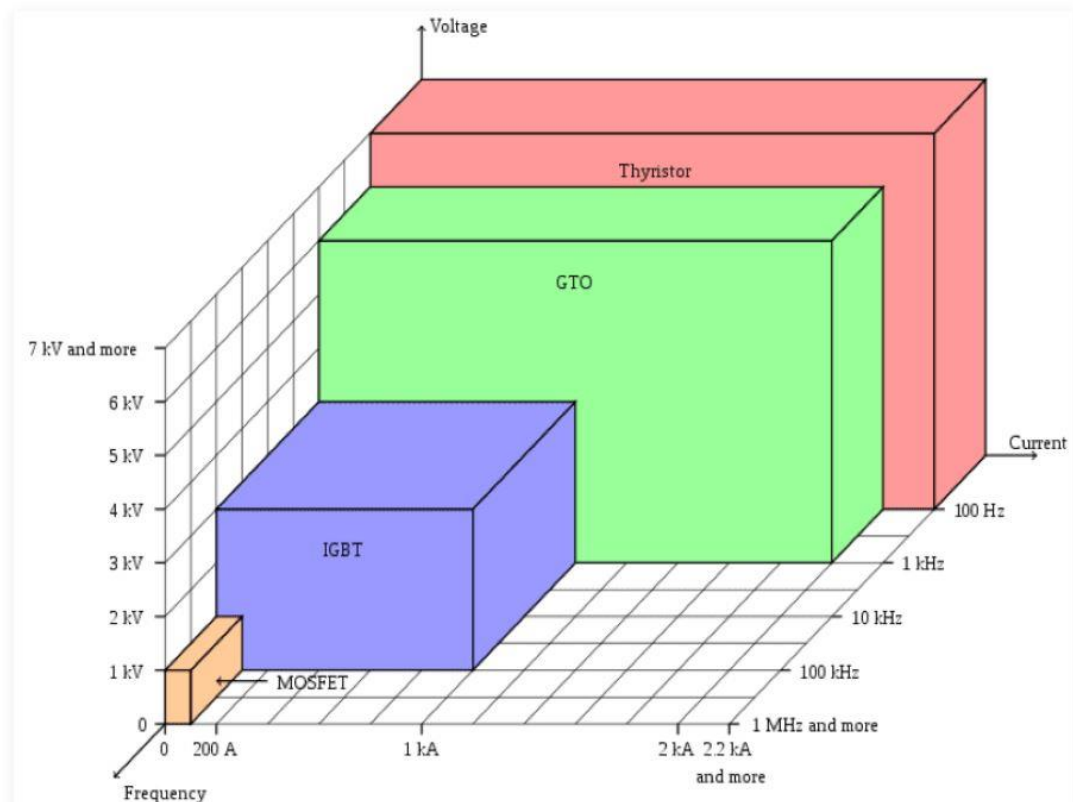


Εικόνα 2.3 Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με πηγή τάσης

## 2.4 Ημιαγωγοί ισχύος

Τα θυρίστορ, IGBT ( Insulated Gate Bipolar Transistor), και MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor ) είναι είδη ημιαγωγών διακοπών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά κυκλώματα για την διαχείριση και τον έλεγχο της ισχύος. Κάθε τύπος διακόπτη έχει τα δικά του χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, καθιστώντας τους κατάλληλους για διαφορετικές εφαρμογές [4] . Η βασική ιδιότητα είναι ότι χρειάζονται ένα σήμα στο gate για να ‘αφήσουν’ τη ροή από το drain στο source (από πάνω προς τα κάτω , σα διακόπτης )

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 2.4 , Ημιαγωγοί ισχύος (Πηγή Μανίας Στέφανος , ηλεκτρονικά ισχύος )

#### 2.4.1 Θυρίστορ (Thyristor) :

Τα θυρίστορ (Thyristor) είναι ημιαγωγοί διακόπτες που χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Ένα κοινό είδος θυρίστορ είναι το SCR (Silicon Controlled Rectifier).

Χαρακτηριστικά και Λειτουργία:

- Δομή: Τα θυρίστορ έχουν τέσσερις στρώσεις ημιαγωγών (PNPN).
- Έλεγχος: Ενεργοποιούνται (on) με την εφαρμογή μιας θετικής τάσης στο πύλη (gate) σε σχέση με την κάθοδο (cathode). Απενεργοποιούνται (off) μόνο όταν η ροή του ρεύματος μειωθεί κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο (latching current).
- Χρήση: Χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος όπως έλεγχοι κινητήρων, διακόπτες ισχύος και μετατροπείς AC/DC.

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή αντοχή σε τάση και ρεύμα.
- Αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες (περιβάλλοντα) .

Μειονεκτήματα:

- Δυσκολία απενεργοποίησης, απαιτείται μείωση του ρεύματος στο μηδέν.
- Χαμηλή ταχύτητα διακοπής.

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

#### **2.4.2 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)**

Τα IGBT είναι συνδυασμός των χαρακτηριστικών των MOSFET και των BJT (Bipolar Junction Transistor), προσφέροντας υψηλή τάση και υψηλή απόδοση.

-Χαρακτηριστικά και Λειτουργία:

- Δομή: Έχουν μια δομή πύλης που μοιάζει με MOSFET και ένα μέρος ισχύος που μοιάζει με BJT.
- Έλεγχος: Ελέγχονται μέσω της τάσης της πύλης (gate) όπως τα MOSFET, αλλά έχουν την ικανότητα να χειρίζονται μεγαλύτερα ρεύματα όπως τα BJT.
- Χρήση: Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι μετατροπείς τάσης, οι ηλεκτροκινητήρες και τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή αποδοτικότητα και δυνατότητα χειρισμού υψηλών τάσεων και ρευμάτων.
- Γρήγορη διακοπή και εύκολη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση.

Μειονεκτήματα:

- Πολύπλοκη δομή που μπορεί να αυξήσει το κόστος.
- Ευαισθησία σε υπερτάσεις

#### **2.4.3 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)**

Τα MOSFET είναι ημιαγωγοί διακόπτες που χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές συνεχούς ρεύματος (DC) και υψηλής συχνότητας λόγω της υψηλής ταχύτητας και της αποδοτικότητάς τους.

Χαρακτηριστικά και Λειτουργία:

- Δομή: Έχουν ένα κανάλι που ελέγχεται από μια πύλη με μεταλλικό οξείδιο.
- Έλεγχος: Ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται μέσω της τάσης της πύλης (gate) σε σχέση με την πηγή (source).
- Χρήση: Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι τροφοδοσίες DC, τα ενισχυτικά ισχύος, και τα ρυθμιστικά τάσης.

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή ταχύτητα διακοπής και χαμηλή κατανάλωση ισχύος στην πύλη.
- Χαμηλή αντίσταση κατά τη λειτουργία, που οδηγεί σε μειωμένες απώλειες ισχύος.

Μειονεκτήματα:

- Ευαισθησία σε υπερτάσεις και στατικές εκφορτίσεις.
- Χαμηλότερη αντοχή σε τάσεις και ρεύματα σε σχέση με τα thyristor και τα IGBT.

Καταλήγοντας, τα thyristor, τα IGBT και τα MOSFET είναι κρίσιμα στοιχεία στην ηλεκτρονική και την ηλεκτρολογική μηχανική, προσφέροντας λύσεις για διαφορετικές ανάγκες ελέγχου και διαχείρισης ισχύος. Η

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

επιλογή του κατάλληλου διακόπτη εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, όπως η τάση, το ρεύμα, η ταχύτητα διακοπής και η αποδοτικότητα.

## **2.5 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation)**

### **2.5.1 Ιστορικά το PWM**

Η ατμομηχανή Corliss, που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1849, αποτέλεσε σημαντική καινοτομία στην τεχνολογία ατμομηχανών, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) για τον έλεγχο της βαλβίδας εισαγωγής ατμού και έναν φυγόκεντρο ρυθμιστή για αυτόματη ανάδραση. Στις ραπτομηχανές, ο έλεγχος της ισχύος γινόταν παραδοσιακά μέσω ρεοστάτη, ο οποίος ήταν αναποτελεσματικός λόγω απωλειών ενέργειας ως θερμότητα. Το PWM αναδείχθηκε ως αποδοτική λύση για τη ρύθμιση ισχύος, εφαρμόζοντας γρήγορη εναλλαγή μεταξύ πλήρους ενεργοποίησης και απενεργοποίησης, ελαχιστοποιώντας τις θερμικές απώλειες. Από τη δεκαετία του 1940, το PWM χρησιμοποιήθηκε για τη μείωση θορύβου σε soundtracks ταινιών και τη δεκαετία του 1960 εφαρμόστηκε σε ενισχυτές και κινητήρες AC. Παρά τη μακρόχρονη χρήση μεταβλητών κινητήρων, η τεχνολογία PWM παρείχε μια πιο αποδοτική και συμπαγή λύση για τον έλεγχο ισχύος σε διάφορες εφαρμογές. [9]

### **2.5.2 Ορισμός PWM**

Το Pulse Width Modulation (PWM) είναι μια τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτρονική και την ηλεκτρική μηχανική. Στην ουσία, το PWM επιτρέπει την προσαρμογή της μέσης ισχύος που παρέχεται σε ένα φορτίο (όπως ένας κινητήρας ή μια λυχνία) μέσω της ρύθμισης της αναλογίας μεταξύ του χρόνου που είναι ενεργοποιημένο το σήμα (on time) και του χρόνου που είναι απενεργοποιημένο (off time).

Κατά το PWM, το σήμα που παράγεται έχει μια σταθερή περίοδο, αλλά η διάρκεια του χρόνου που το σήμα είναι σε υψηλό επίπεδο (on) συγκρίνεται με τη συνολική περίοδο. Αυτή η αναλογία του on time προς τη συνολική περίοδο, γνωστή ως κύκλος εργασίας (duty cycle), καθορίζει τη μέση τιμή του σήματος.

Η χρήση του PWM επιτρέπει τον έλεγχο της ισχύος που παρέχεται σε μια φορτία με μικρότερες απώλειες ενέργειας σε σύγκριση με άλλες μεθόδους ελέγχου. Επιπλέον, μπορεί να παράγει μια μεγάλη ποικιλία των επιθυμητών ισχυρών και σημάτων εξόδου.

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές, όπως ελεγκτές κινητήρων, μετατροπείς ισχύος, συσκευές επικοινωνίας και άλλες. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος της ισχύος ή του φορτίου, όπως στα συστήματα μοτέρ, τα φωτιστικά σώματα LED και άλλα.

### **2.5.3 Ανάγκη για PWM**

Αναλυτικότερα, οι λόγοι και οι εφαρμογές που οδήγησαν στη δημιουργία και τη χρήση της τεχνολογίας PWM (Pulse Width Modulation - Διαμόρφωση Εύρους Παλμών) φαίνονται παρακάτω .

#### **1. Αποτελεσματική Ρύθμιση Ισχύος**

Το PWM επιτρέπει τη ρύθμιση της μέσης ισχύος που παρέχεται σε ένα ηλεκτρικό φορτίο, όπως ένας κινητήρας ή μια λάμπα LED, με εξαιρετικά αποδοτικό τρόπο. Σε σύγκριση με την αναλογική ρύθμιση, όπου η ισχύς ρυθμίζεται μεταβάλλοντας συνεχώς την τάση ή το ρεύμα, το PWM χρησιμοποιεί παλμούς σταθερής τάσης με μεταβαλλόμενη διάρκεια. Έτσι, οι απώλειες ενέργειας είναι ελάχιστες, καθώς τα στοιχεία διακόπτης (π.χ., τρανζίστορ) βρίσκονται είτε σε πλήρη αγωγιμότητα είτε σε πλήρη διακοπή, αποφεύγοντας ενδιάμεσες καταστάσεις που προκαλούν θερμικές απώλειες.



*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

## 2. Ακριβής Έλεγχος Θέσης και Ταχύτητας

Στα συστήματα ελέγχου κινητήρων, το PWM χρησιμοποιείται για την ακριβή ρύθμιση της θέσης και της ταχύτητας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC) και των σερβοκινητήρων. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη μεταβολή της μέσης τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα, ελέγχοντας την ταχύτητα περιστροφής με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, ο έλεγχος θέσης σε σερβοκινητήρες επιτυγχάνεται με υψηλή ακρίβεια λόγω της δυνατότητας ακριβούς ρύθμισης του εύρους των παλμών.

## 3. Εφαρμογή σε Ευρύ Φάσμα Συσκευών

Η τεχνολογία PWM έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς της ηλεκτρονικής και των ηλεκτρολογικών συστημάτων:

- Φωτισμός LED: Χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της φωτεινότητας των LED. Με το PWM, η φωτεινότητα ρυθμίζεται μεταβάλλοντας το λόγο του χρόνου που το LED είναι αναμμένο σε σχέση με το χρόνο που είναι σβηστό.
- Τροφοδοτικά και Inverters: Στα τροφοδοτικά, το PWM χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τάσης εξόδου. Στους inverters, το PWM χρησιμοποιείται για τη μετατροπή συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, με την επιθυμητή συχνότητα και μορφή κύματος.
- Ήχος και Επικοινωνίες: Συστήματα ήχου και επικοινωνιών χρησιμοποιούν το PWM για τη διαμόρφωση σήματος και την αποστολή δεδομένων.

## 4. Μειωμένες Απώλειες Ισχύος

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ρύθμισης ισχύος, όπως οι γραμμικοί ρυθμιστές τάσης, έχουν μεγάλες απώλειες ενέργειας λόγω των θερμικών απωλειών που δημιουργούνται κατά τη μεταβολή της τάσης ή του ρεύματος. Με το PWM, οι διακόπτες ισχύος (όπως τα MOSFET) λειτουργούν σε δύο καταστάσεις: πλήρης αγωγιμότητα (on) ή πλήρης αποκοπή (off). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας ελαχιστοποιεί τις απώλειες, αφού οι διακόπτες δεν βρίσκονται ποτέ σε ενδιάμεσες καταστάσεις που δημιουργούν θερμικές απώλειες.

## 5. Βελτιωμένη Απόδοση και Ευελιξία

Το PWM προσφέρει υψηλή απόδοση και ευελιξία στα ηλεκτρονικά συστήματα. Η ευελιξία έγκειται στην ικανότητα να προσαρμόζεται σε διάφορες εφαρμογές με απλές αλλαγές στις παραμέτρους των παλμών (όπως η συχνότητα και το εύρος). Για παράδειγμα:

- Ελεγκτές Ταχύτητας Κινητήρων: Μπορούν να ρυθμίσουν την ταχύτητα περιστροφής κινητήρων DC και AC μέσω του PWM.
- Φορτιστές Μπαταριών: Η τεχνολογία PWM χρησιμοποιείται για την αποτελεσματική φόρτιση μπαταριών, παρέχοντας σταθερό και ελεγχόμενο ρεύμα φόρτισης.
- Ηλεκτρονικά Συστήματα Ελέγχου: Πολλές μικροελεγκτές και μικροεπεξεργαστές ενσωματώνουν PWM για την παροχή ακριβούς ελέγχου σε διάφορα περιφερειακά.

## 2.6 Έλεγχος τάσης μονοφασικού αντιστροφέα με τεχνική P.W.M.

Για να ελέγξουμε την έξοδο ενός αντιστροφέα, πρέπει να ρυθμίσουμε κατάλληλα τους παλμούς ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπών. Όπως είδαμε, μία από τις βασικές τεχνικές ελέγχου είναι η Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (Single Pulse Width Modulation, P.W.M.), όπου η τάση εξόδου ελέγχεται μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών. Τα βήματα για τον έλεγχο της τεχνικής PWM είναι τα εξής:

- Δημιουργία Κυματομορφών:

Για την παραγωγή παλμών ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπών, τα κυκλώματα ελέγχου δημιουργούν μια ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς και μια τριγωνική κυματομορφή φέροντος σήματος. Οι κυματομορφές αυτές πρέπει να είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους και έχουν τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

-  $A_r$  = Πλάτος κυματομορφής ημιτονοειδούς σήματος (σήμα αναφοράς)

-  $A_c$  = Πλάτος κυματομορφής φέροντος σήματος

-  $T_c = \frac{1}{f_c}$  = Περίοδος κυματομορφής φέροντος σήματος

-  $T_r = \frac{1}{f_r}$  = Περίοδος κυματομορφής σήματος αναφοράς

-  $m_a$  = Συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους =  $\frac{A_r}{A_c}$

-  $m_f$  = Συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας =  $\frac{T_r}{T_c} = \frac{f_c}{f_r}$

Για τη δημιουργία των παλμών, ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  πρέπει να είναι ίσος με ένα, ώστε το σήμα αναφοράς και το φέρον σήμα να έχουν την ίδια συχνότητα. Επίσης, τα σήματα πρέπει να είναι συγχρονισμένα για να παραμένουν σταθερά τα σημεία τομής τους όταν οι τιμές  $m_f$  και  $m_a$  είναι σταθερές.

- Συγκριτής και Σήμα Ελέγχου :

Αφού δημιουργηθούν οι δύο κυματομορφές και πληρούν τις παραπάνω συνθήκες, εφαρμόζονται στην είσοδο ενός τελεστικού ενισχυτή που λειτουργεί ως συγκριτής. Η έξοδος του συγκριτή παράγει ένα σήμα ελέγχου E, το οποίο οδηγεί τους ημιαγωγικούς διακόπτες S1, S2, S3, S4 του αντιστροφέα. Όταν  $V_r > V_c$ , ο S1 λειτουργεί ως κλειστός διακόπτης και ο S2 ως ανοιχτός, και αντίστροφα όταν  $V_r < V_c$ . Οι παλμοί που οδηγούν τους διακόπτες S3 και S4 δημιουργούνται από ένα άλλο κύκλωμα συγκριτή που συγκρίνει το ημιτονικό σήμα αναφοράς με τη γείωση, με παλμούς σταθερού εύρους στις 180°.

- Ρύθμιση Πλάτους Παλμών:

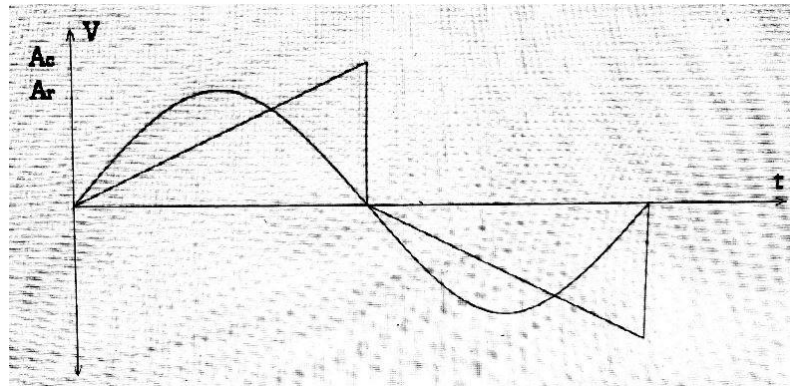
Το σήμα ελέγχου E εξαρτάται από τα σημεία τομής των δύο συγκρινόμενων κυματομορφών. Με την αυξομείωση του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $m_a$  (δηλαδή του λόγου του πλάτους της ημιτονικής προς την τριγωνική κυματομορφή), αλλάζει η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του συγκριτή και του ημιτονικού σήματος αναφοράς. Αυτό μεταβάλλει το εύρος του θετικού και του αρνητικού παλμού της τάσης εξόδου, επιτρέποντας τον έλεγχο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

- Ρύθμιση Συχνότητας Τάσης:

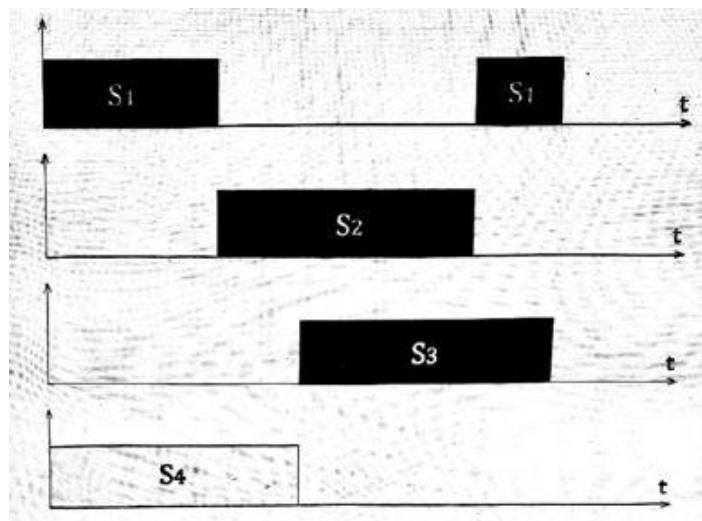
Με την αυξομείωση της συχνότητας του σήματος αναφοράς, μεταβάλλεται και η συχνότητα της τάσης εξόδου του συγκριτή, επιτρέποντας τον έλεγχο της συχνότητας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

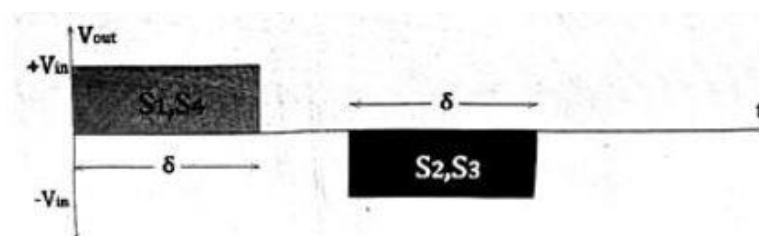
Συνοψίζοντας, με τον έλεγχο του σήματος αναφοράς ελέγχεται η RMS τιμή της τάσης και της συχνότητας του αντιστροφέα, και γι' αυτό το σήμα εξόδου του συγκριτή ονομάζεται σήμα ελέγχου.



Εικόνα 2.5 Κυματομορφή σήματος αναφοράς και φέροντος



Εικόνα 2.6, Κυματομορφές παλμών οδήγησης S1, S2, S3 και S4 αντίστοιχα



Εικόνα 2.7, Τάση εξόδου αντιστροφέα

## 2.7 Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier transform) - FFT

Ο FFT (Fast Fourier Transform) είναι ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας. Συγκεκριμένα, λειτουργεί αναλύοντας το σήμα σε διάφορες συχνότητες, επιτρέποντας την αναγνώριση των διαφόρων συχνοτήτων που αποτελούν το σήμα. Η σχέση μεταξύ του FFT και του PWM και του VSI είναι η εξής:

1. PWM (Pulse Width Modulation): Η τεχνική PWM παράγει ένα σήμα μετρικής τάσης από ένα σήμα δυαδικού (on-off). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ισχύος που παρέχεται σε ένα φορτίο. Μέσω του FFT, μπορεί να αναλυθεί το φάσμα συχνοτήτων του PWM σήματος, προσφέροντας πληροφορίες για τις συχνότητες των αρμονικών και των παραμορφώσεων που περιέχει το σήμα.

2. VSI (Voltage Source Inverter): Ένας VSI παράγει μια εναλλασσόμενη τάση εξόδου. Με τη χρήση του FFT, η έξοδος του VSI μπορεί να αναλυθεί στο πεδίο της συχνότητας, παρέχοντας πληροφορίες για τις συχνότητες των αρμονικών και των παραμορφώσεων στο σήμα τάσης.

Με άλλα λόγια, ο FFT επιτρέπει να γίνει μελέτη για τη συχνοτική σύνθεση των σημάτων που παράγονται από τεχνικές όπως το PWM και το VSI, βοηθώντας να γίνει κατανόηση και ανάλυση για την απόδοση και τη συμπεριφορά τους.

$$V_n = \sum_{i=0}^{N-1} V_i e^{-j\left(\frac{2\pi n}{N}\right)i}$$

όπου , ο δείκτης n παίρνει τις τιμές 0,1,2,3 ...N-1

Δηλαδή με τον FFT , αν υπάρχουν N δείγματα μέτρησης ενός αναλογικού σήματος, βρίσκονται οι N (αντίστοιχες ) ημιτονοειδής συνιστώσες του .

Με βάση την κυματομορφή που απεικονίζεται στην εικόνα 1.7 , η οποία δείχνει την κυματομορφή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, υπολογίζεται με ακρίβεια η τιμή του πλάτους της τάσης εξόδου χρησιμοποιώντας τις σειρές Fourier. Επομένως:

$$V_o = \sum_{n=1,2,3...v}^{\infty} a_n \times \cos(n\omega t) + \sum_{n=1,2,3...v}^{\infty} b_n \times \cos(n\omega t)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{in} \times \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{in} \times \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

Όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου  $V_{out}$ , και n είναι η τάξη της αρμονικής συνιστώσας (1,2,3,4,...,v).

Από την εικόνα 1.7 , η τάση  $V_o$  είναι περιττή συνάρτηση με συμμετρία  $\frac{1}{4}$  κύματος, και οι συντελεστές απ είναι μηδέν, με τους άρτιους συντελεστές της παραπάνω σχέσης της τάσης εξόδου να είναι μηδενικοί. Επομένως, η σχέση της τάσης εξόδου γίνεται:

$$V_o = \sum_{n=1,2,3...v}^{\infty} b_n \times \sin(n\omega t)$$

Όπου για το  $b_n$  ισχύει ότι (με  $\delta$  να είναι το εύρος των παλμών της τάσης εξόδου):

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} V_{out} \times \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{8}{2\pi} \int_{\pi-\delta/2}^{\pi/2} V_{in} \times \sin(n\omega t) d(\omega t)$$

$$= \frac{4V_{in}}{n\pi} [-\cos n\frac{\pi}{2} + \cos n(\frac{\pi-\delta}{2})] = \frac{4V_{in}}{n\pi} [-\cos n\frac{\pi}{2} + (\cos \frac{n\pi}{2} \times \cos \frac{n\delta}{2} + \sin \frac{n\pi}{2} \times \sin \frac{n\delta}{2})]$$

$$= \frac{4V_{in}}{n\pi} \times \sin \frac{n\delta}{2}$$

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Έτσι, καταλήγει στη σχέση του πλάτους της τάσης εξόδου που ισχύει ότι:

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{in}}{n\pi} \times \left(\frac{n\delta}{2}\right) \times \sin(n\omega t)$$

Ενώ η σχέση του πλάτους τάσης εξόδου για την θεμελιώδη αρμονική είναι:

$$V_o = \frac{4V_{in}}{\pi} \times \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Η ενεργός τιμή (RMS) της τάσης εξόδου του μονοφασικού αντιστροφέα με έλεγχο PWM είναι:

$$\begin{aligned} V_o &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_o^2 d(\omega t) \right]^{1/2} \\ &= \sqrt{\left[ \frac{1}{2\pi} \times \left( \int_{\pi-\delta/2}^{\pi+\delta/2} V_{in}^2 d(\omega t) + \int_{3\pi-\delta/2}^{3\pi+\delta/2} (-V_{in})^2 d(\omega t) \right) \right]} \\ &= V_{in} \times \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \end{aligned}$$

## 2.8 Ολική αρμονική παραμόρφωση (Total harmonic distortion) -THDv

Το THDv (Total Harmonic Distortion of Voltage) είναι ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για να αξιολογήσει το επίπεδο των αρμονικών που περιέχονται σε ένα σήμα τάσης. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και σε εφαρμογές όπου η ποιότητα της τάσης είναι κρίσιμη, όπως στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και σε ασύγχρονους μετατροπείς.

Η THDv μετρά το σύνολο των αρμονικών που περιέχονται σε ένα σήμα τάσης και εκφράζεται συνήθως ως ποσοστό της αρχικής τάσης. Συνήθως, υπολογίζεται ως η αναλογία της ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των αρμονικών συνιστωσών της τάσης προς την τιμή της θεμελιώδους συχνότητας:

$$THDv = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

Όπου :

- $V_1$  είναι η τιμή της θεμελιώδης συχνότητας
- $V_2, V_3, \dots, V_n$  είναι οι τιμές των αρμονικών συνιστωσών

Το THDv δίνει μια ενιαία μέτρηση της ποιότητας της τάσης ενός συστήματος, καθώς μια υψηλή τιμή του υποδεικνύει την παρουσία πολλών αρμονικών σε σχέση με την θεμελιώδη συχνότητα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως θερμοκρασία, παραμόρφωση σήματος και απώλειες ενέργειας σε εξαρτήματα του συστήματος. Οι αρμονικές συνιστώσες προκαλούνται συνήθως από τη μη γραμμική συμπεριφορά των συσκευών στο σύστημα, όπως συσκευές ελέγχου φορτίου, αντιστροφείς, και ηλεκτρονικά φορτία. Με την ανάλυση του THDv, μπορεί να γίνει καλύτερος σχεδιασμός και έλεγχος του συστήματος για να μειωθούν αυτές οι αρμονικές και να βελτιωθεί η ποιότητα της τάσης. Σύμφωνα με τη σχέση που δίνει το πλάτος της τάσης εξόδου, βλέπουμε ότι η κυματομορφή της τάσης περιλαμβάνει όχι μόνο τη θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα αλλά και άλλες  $n$  ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Αυτές οι ανώτερες αρμονικές είναι ανεπιθύμητες και πρέπει να μειωθούν ή, ακόμα καλύτερα, να εξαλειφθούν. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων φίλτρων, ώστε η τάση εξόδου του αντιστροφέα να είναι όσο το δυνατόν πιο καθαρή ημιτονική κυματομορφή. Σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές, ο συντελεστής Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, T.H.D. factor) της κυματομορφής εξόδου πρέπει να είναι κάτω από 5%. Ο

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

συντελεστής αυτός αποτελεί μέτρο της ποιότητας της εναλλασσόμενης τάσης και ρεύματος του αντιστροφέα και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{THD}_v \% = \frac{1}{V_{o,1}} \times \sqrt{\sum_{n=3.5.7\dots v}^{\infty} (V_{o,n})^2} \times 100 = \frac{1}{V_{o,1}} \times \sqrt{\sum_{n=3.5.7\dots v}^{\infty} (V_{o,n})^2} \times 100$$

## 2.9 Αρμονικές (Harmonics)

Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι τριφασικά, παράγοντας τριφασική ημιτονοειδή τάση. Αυτή μεταφέρεται με την ίδια μορφή, αλλά σε διαφορετικά επίπεδα τάσης, έως τους καταναλωτές. Για τις κατηγορίες των ηλεκτρικών φορτίων, υπάρχουν τα γραμμικά π.χ., ωμικές αντιστάσεις, πηνία, πυκνωτές, AC κινητήρες, απορροφούν ημιτονοειδή ρεύματα και τα μη γραμμικά φορτία: π.χ., VFDs, SMPS, ανορθωτές, UPS, ηλεκτρονικές συσκευές, απορροφούν ρεύματα που δεν είναι ημιτονοειδή και περιέχουν αρμονικές συνιστώσες. (Υπάρχουν σε όλα τα ΜΗ γραμμικά φορτία μερικά κάποια εκ των οποίων είναι τα inverter . Τα ρεύματα λειτουργίας αυτών περιέχουν αρμονικές συνιστώσες . ) Οι αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργίες σε ηλεκτρικά φορτία και δίκτυα. Πρέπει να προσδιοριστούν με μετρήσεις και να περιοριστούν με κατάλληλες διατάξεις, όπως φίλτρα ή πιο σύνθετους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.[7] Οι αρμονικές συνιστώσες προσδιορίζονται μέσω ανάλυσης Fourier της κυματομορφής και είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις με συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας της κυματομορφής. Αν η κυματομορφή είναι περιοδική συνάρτηση DC, η ανάλυση περιλαμβάνει και σταθερή συνιστώσα. Η γενική μορφή της ανάλυσης Fourier είναι:

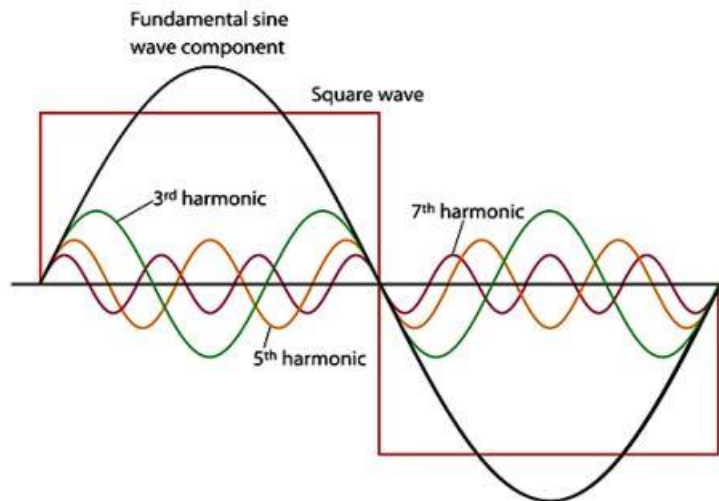
$$x = A_0 + A_n \sin(\omega t - \varphi_n)$$

όπου:

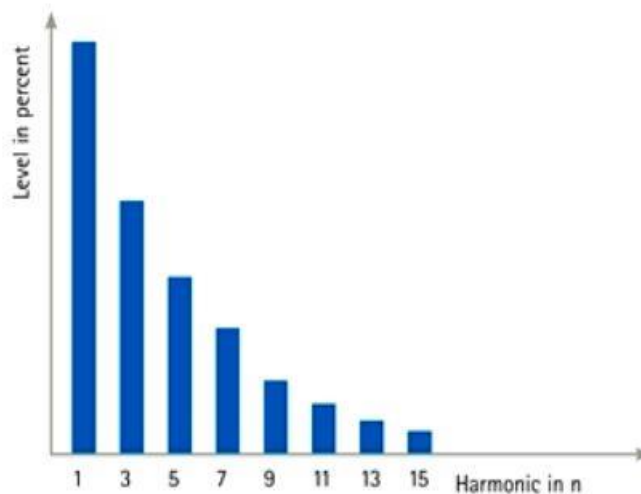
- $A_0$ : DC συνιστώσα
- $n$ : ακέραιος  $>0$ , τάξη της αρμονικής
- $n=1$ : θεμελιώδης συνιστώσα
- $A_n$ : πλάτος της αρμονικής
- $\varphi_n$ : διαφορά φάσης μεταξύ θεμελιώδους και αρμονικής συνιστώσας

Για τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η θεμελιώδης συχνότητα είναι 50 Hz (ή 60 Hz). Οι αρμονικές συνιστώσες διακρίνονται σε περιττές αρμονικές (5η, 7η, 11η,...), άρτιες αρμονικές (2η, 4η, 6η,...) και τριπλές αρμονικές (3η, 9η, 15η,...), που είναι περιττές και πολλαπλάσια του 3. Τέλος, όπως αναφέρει και ο Rodríguez, J. R στο [8] οι νέοι κανονισμοί επιβάλλουν αυστηρότερα όρια στις αρμονικές ρεύματος που εγγέονται από μετατροπείς ισχύος που επιτυγχάνονται με ανορθωτές με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) .

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 2.8 , Αρμονικές στο πεδίο του χρόνου



Εικόνα 2.9 , Αρμονικές στο πεδίο της συχνότητας

### 2.9.1 Επιπτώσεις αρμονικών στα δίκτυα

Η διακοπτική λειτουργία των διάφορων ηλεκτρονικών διατάξεων ισχύος (μη γραμμικά φορτία) οδηγεί στην απορρόφηση μη ημιτονοειδών ρευμάτων από τα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (AC δίκτυα). Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στα φορτία μόνο με τη θεμελιώδη συχνότητα των δικτύων, δηλαδή 50 ή 60 Hz. Ωστόσο, τα μη γραμμικά φορτία μετατρέπουν ένα μέρος της απορροφούμενης ισχύος σε ισχύ υψηλότερων συχνοτήτων, την οποία επιστρέφουν πίσω στο δίκτυο, λειτουργώντας ως γεννήτριες αρμονικών. Η αρμονική ισχύς είναι άεργη και ονομάζεται ισχύς παραμόρφωσης (Distortion Power). [11]

Τα μη γραμμικά φορτία, απορροφώντας μη ημιτονοειδή ρεύματα, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στις εταιρείες που διαχειρίζονται την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

- Παραμόρφωση της εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης που παράγουν οι εναλλακτήρες. Ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξομοιωθεί με το ισοδύναμο κατά Thevenin. Ένα φορτίο που τραβά ένα ρεύμα  $i$  θα προκαλέσει πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση της πηγής  $R+jX$ , με αποτέλεσμα η τάση  $u$  να διαφέρει από την τάση τροφοδοσίας  $V\sin(\omega t)$ .

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Η τιμή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου διαφέρει για κάθε αρμονική συχνότητα, οπότε η τάση V θα περιέχει αρμονικές συνιστώσες τάσης (Voltage Distortion). Εάν άλλα ηλεκτρικά φορτία μέσα στην ίδια εγκατάσταση ή σε άλλες εγκαταστάσεις τροφοδοτούνται από αυτό το σημείο κοινής σύνδεσης (PCC), θα λάβουν μία μη ημιτονοειδή τάση.

- Σημαντική αύξηση των θερμικών απωλειών στους μετασχηματιστές. Για παράδειγμα, μετασχηματιστές που τροφοδοτούν εγκαταστάσεις με συσκευές γραφείου (όπως υπολογιστές και εκτυπωτές) με 80% THDI εμφανίζουν περίπου 250% αυξημένες απώλειες σε σύγκριση με τη λειτουργία τους με γραμμικά φορτία που καταναλώνουν το ίδιο ενεργό ρεύμα. Οι θερμικές απώλειες αυξάνονται εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου (skin effect), ιδιαίτερα όταν η συχνότητα των αρμονικών υπερβαίνει τα 300 Hz.

- Η υπερθέρμανση των μετασχηματιστών μειώνει τη διάρκεια ζωής τους λόγω ταχύτερης γήρανσης των μονώσεων.

- Αυξημένες θερμικές απώλειες στις γραμμές μεταφοράς λόγω του φαινομένου Joule, καθώς και του επιδερμικού φαινομένου.

- Αυξημένες θερμικές απώλειες στους εναλλακτήρες των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- Σημαντική υπερφόρτωση του ουδέτερου αγωγού σε τριφασικό σύστημα 4 αγωγών. Καθώς προστατεύονται μόνο οι 3 φάσεις, αυτό μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε ανάφλεξη του ουδέτερου αγωγού. Σε ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων, οι άρτιες αρμονικές είναι απύσες, οπότε η ρύπανση του δικτύου οφείλεται στις περιττές αρμονικές, κυρίως στις τριπλές αρμονικές τάξης 3m (όπου m=1,3,5...). Αυτές οι αρμονικές είναι όλες σε φάση μεταξύ τους, προκαλώντας τη ροή του ρεύματος τριπλής αρμονικής μόνο σε συστήματα 4 αγωγών, όπως σε αστέρα με ουδέτερο.

$$I_{a(3m)} = I_{sin} 3m\omega t$$

$$I_{b(3m)} = I_{sin} [3m(\omega t - \frac{2\pi}{3})] = I_{sin} 3m\omega t$$

$$I_{c(3m)} = I_{sin} [3m(\omega t + \frac{2\pi}{3})] = I_{sin} 3m\omega t$$

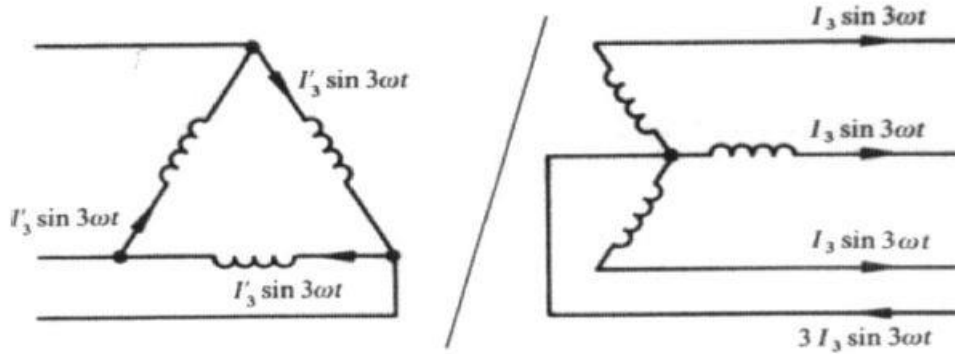
Άρα γίνεται η κατάληξη ότι :  $I_{a(3m)} = I_{b(3m)} = I_{c(3m)}$

Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα του ουδέτερου αγωγού είναι τριπλάσιο από τα ρεύματα σε κάθε γραμμή. Οι μετασχηματιστές διανομής, συνήθως Δ/Υ τεσσάρων αγωγών, τροφοδοτούν και τριφασικά και μονοφασικά φορτία, με τα ρεύματα της τρίτης αρμονικής να κυκλοφορούν στα τυλίγματα τριγώνου μέσης τάσης του μετασχηματιστή χωρίς να εμφανίζονται στις γραμμές.

- Σε δίκτυα χαμηλής τάσης τεσσάρων αγωγών (3Φ+N), λόγω των ασύμμετρων φορτίων, τα μη γραμμικά φορτία που παράγουν τριπλές αρμονικές χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή. Το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του ουδέτερου αγωγού είναι συχνό σε μεγάλα κτίρια γραφείων και νοσοκομεία που λειτουργούν με μονοφασικά μη γραμμικά φορτία .



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 2.10 , Ροή του ρεύματος τρίτης αρμονικής σε ένα 3φ σύστημα

- Η διείδυση αρμονικών στο δίκτυο από το φορτίο εξαρτάται από την αντίδραση των διαφόρων εξαρτημάτων του συστήματος σε κάθε αρμονική συχνότητα. Οι πυκνωτές που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος απορροφούν αρμονικά ρεύματα λόγω της χωρητικής τους αντίδρασης, η οποία μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας. Αν οι πυκνωτές δεν προστατευθούν, μπορεί να καταστραφούν από υπερφόρτωση. [12]
- Συνθήκες χαμηλού συντελεστή ισχύος λόγω της άεργης ισχύος των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος.
- Άλλα προβλήματα που προκύπτουν από την ύπαρξη αρμονικών είναι η δημιουργία φαινομένων συντονισμού σε συγκεκριμένες αρμονικές συχνότητες, που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στο συγχρονισμό των παλμών για την έναυση των θυρίστωρ στους ελεγχόμενους ανορθωτές (φαινόμενο Zitter) και στο φωτισμό με την αυξομείωση της φωτεινής έντασης (φαινόμενο Flicker).
- Σφάλματα στα όργανα μετρήσεων.
- Στιγμαίεις υπερτάσεις.

### 2.9.2 Επιπτώσεις στα φορτία

Κάθε φορτίο που τροφοδοτείται με DC τάση από μια ανορθωτική διάταξη προκαλεί αρμονικές συνιστώσες στην τάση λειτουργίας του. Όταν η ανορθωτική διάταξη είναι ελεγχόμενη, οι αρμονικές συνιστώσες στην τάση εξόδου είναι ακόμα περισσότερες. [13]

Η παρουσία αρμονικών συνιστωσών στην τάση δημιουργεί αυξημένες αρμονικές στο ρεύμα του φορτίου. Επιπλέον, το φορτίο παρουσιάζει από μόνο του αρμονικές συνιστώσες λόγω της φύσης του, καθώς δεν υπάρχει απειροελαχίστη αυτεπαγωγή στα πηνία του. Τα φορτία που απαιτούν AC τάση από έναν αντιστροφέα DC/AC δημιουργούν αρμονικές συνιστώσες λόγω της διακοπτικής λειτουργίας των ημιαγωγών.

- Οι επιπτώσεις στα φορτία περιλαμβάνουν αυξημένες θερμικές απώλειες. Αυτές διακρίνονται σε απώλειες χαλκού στα πηνία και απώλειες σιδήρου στους πυρήνες των πηνίων. Οι απώλειες σιδήρου είναι ανάλογες με τη συχνότητα των τάσεων. Επομένως, οι αρμονικές συνιστώσες προκαλούν αύξηση των θερμικών απωλειών στα πηνία και στους πυρήνες, καθώς συνδέονται με τη συχνότητα των ρευμάτων. Και οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από τη συχνότητα, ιδιαίτερα για συχνότητες μεγαλύτερες των 300 Hz, λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Αυτές οι αυξημένες θερμικές απώλειες οδηγούν σε μείωση της απόδοσης και της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.

- Η μείωση της ονομαστικής ισχύος κατά τη λειτουργία των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων οφείλεται, εκτός από τις αυξημένες αρμονικές θερμικές απωλειών, και στη μείωση της ονομαστικής ροπής λόγω των αρμονικών συνιστωσών. Η επίδραση των αρμονικών καθορίζεται από τη διαδοχή τους σε σχέση με τη

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

θεμελιώδη συνιστώσα. Μια αρμονική τάξης  $(3n-1)$ , όπου  $n=2,4,6,\dots$ , παρουσιάζει αντίθετη (αρνητική) διαδοχή από τη θεμελιώδη συνιστώσα (negative sequence), με αποτέλεσμα οι ροπές αυτών των αρμονικών συνιστωσών να αναιρούν τη φορά περιστροφής του κινητήρα. Η διαδοχή προκύπτει από την αλλαγή του προσήμου της διαφοράς φάσης μιας αρμονικής από αυτή της θεμελιώδους. Για παράδειγμα, αν  $n=2$ , η 5η αρμονική εκφράζεται ως εξής:

$$I_{a5} = I_{s5} \sin 5\omega t$$

$$I_{b5} = I_{s5} \sin[5(\omega t - 2\pi/3)] = I_{s5} \sin(5\omega t + 2\pi/3)$$

$$I_{c5} = I_{s5} \sin[5(\omega t + 2\pi/3)] = I_{s5} \sin(5\omega t - 2\pi/3)$$

Αντίθετα, οι αρμονικές τάξης  $(3n+1)$ , όπου  $n=2,4,6,\dots$ , έχουν την ίδια διαδοχή με τη θεμελιώδη συνιστώσα (positive sequence), και δεν προκαλούν προβλήματα στην κίνηση του κινητήρα.

- Ο ακουστικός θόρυβος λειτουργίας των μηχανών οφείλεται σε μικροδονήσεις των υλικών των πυρήνων των πηνίων. Στα συστήματα AC, ο θόρυβος είναι πιο έντονος λόγω της υψηλής (συχνοτικής) διακοπτικής λειτουργίας των IGBTs του PWM αντιστροφέα. Για να περιοριστεί ο θόρυβος, αύξηση της διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα μπορεί να βοηθήσει. Για παράδειγμα, αύξηση της διακοπτικής συχνότητας από 3 kHz σε 12 kHz μπορεί να περιορίσει τον ακουστικό θόρυβο.

- Η μείωση του χρόνου ζωής των ρουλεμάν οφείλεται στην υπερθέρμανσή τους από τις αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος που περνά από το δρομέα των μηχανών επαγωγικού τύπου. Συνήθης πρακτική είναι η χρήση μονωμένων ρουλεμάν σε αυτές τις μηχανές, που προορίζονται να λειτουργήσουν με ρυθμιστές στροφών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Μέθοδοι Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM)**

### **3.1 Γενικά PWM**

Οι μέθοδοι PWM (Pulse Width Modulation) είναι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σήματος εξόδου με επιθυμητή μέση τιμή (π.χ. τάση ή ρεύμα) μέσω της ρύθμισης της διάρκειας του on-time (ενεργοποιημένη περίοδος) του σήματος. Η διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για τον έλεγχο της ισχύος σε ηλεκτρονικές συσκευές, ειδικά για εφαρμογές στον έλεγχο κινητήρων, τη ρύθμιση φωτισμού LED και την παραγωγή σημάτων.

Ανάμεσα στις πιο κοινές μεθόδους PWM είναι :

#### **1. PWM σταθερής συχνότητας**

Στη PWM σταθερής συχνότητας, η περίοδος του σήματος (ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος) διατηρείται σταθερή. Η παρεχόμενη ισχύς ελέγχεται μεταβάλλοντας τον κύκλο λειτουργίας, ο οποίος είναι η αναλογία του χρόνου που το σήμα είναι υψηλό (on) σε σχέση με το χαμηλό (off). Όσο αφορά τη διαμόρφωση κύκλου λειτουργίας, είναι η απλούστερη μορφή PWM. Σαν το γρήγορο άναμμα και αμέσως μετά το γρήγορο σβήσιμο σε ένα φως. Ρυθμίζοντας πόσο χρόνο παραμένει το φως αναμμένο έναντι του σβηστού σε κάθε κύκλο, μπορεί να γίνει έλεγχος της φωτεινότητας. Σχετικά με τη διαμόρφωση PWM με διόρθωση φάσης, αυτή η μέθοδος ρυθμίζει τον κύκλο λειτουργίας συμμετρικά γύρω από το μέσο της περιόδου, εξασφαλίζοντας συνεπή χρονισμό και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές όπου ο ακριβής χρονισμός είναι ζωτικής σημασίας.

#### **2. PWM μεταβλητής συχνότητας**

Σε αυτή τη μέθοδο, τόσο η συχνότητα (πόσο γρήγορα επαναλαμβάνονται οι κύκλοι) όσο και ο κύκλος λειτουργίας μπορούν να μεταβληθούν. Αυτό είναι χρήσιμο σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπου η αλλαγή της συχνότητας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση ή την αποδοτικότητα.

#### **3. Ημιτονοειδής PWM (SPWM)**

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως στον έλεγχο κινητήρων και στην παραγωγή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο κύκλος λειτουργίας διαμορφώνεται για να δημιουργηθεί μια έξοδος που κατά μέσο όρο αντιστοιχεί σε μια ημιτονοειδή κυματομορφή, η οποία είναι ομαλή και αποτελεσματική για τον έλεγχο του κινητήρα. Έδω έχουμε δύο βασικές κατηγορίες την μονοπολική (Unipolar) SPWM (χρησιμοποιεί ένα μόνο κύμα για τη δημιουργία του σήματος PWM) και τη διπολική (Bipolar) SPWM [χρησιμοποιεί δύο κύματα, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερη απόδοση με λιγότερες αρμονικές (ανεπιθύμητες συχνότητες)]. Αυτή η μέθοδος θα αναλυθεί περαιτέρω.

#### **4. Διανυσματικό PWM (SVPWM)**

Η SVPWM είναι πιο προηγμένη και χρησιμοποιείται σε τριφασικούς μετατροπείς. Δημιουργεί τις απαραίτητες τάσεις εξόδου διαμορφώνοντας διανύσματα σε ένα δισδιάστατο χώρο, βελτιστοποιώντας τη μεταγωγή και μειώνοντας τις ανεπιθύμητες συχνότητες.

#### **5. Διαμόρφωση Δέλτα-Σίγμα (DSM)**

Στην DSM, η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής εξόδου και της πραγματικής εξόδου ενσωματώνεται συνεχώς και χρησιμοποιείται για την προσαρμογή του σήματος PWM. Αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά ακριβής και χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας, όπως ο ψηφιακός ήχος και ο ακριβής έλεγχος κινητήρων.

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

## 6. Τυχαία PWM

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη μεταβολή των χρόνων μεταγωγής ή του κύκλου λειτουργίας με ψευδο-τυχαίο τρόπο. Με την εξάπλωση του φάσματος των παραγόμενων συχνοτήτων, μειώνει τον θόρυβο και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, κάτι που είναι σημαντικό σε ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές.

## 7. Έλεγχος υστέρησης ή Bang-Bang

Αυτή η απλή μέθοδος περιλαμβάνει την ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του σήματος PWM όταν η έξοδος αποκλίνει από την επιθυμητή τιμή κατά ένα ορισμένο ποσό. Είναι σαν ένας θερμοστάτης που ενεργοποιεί και απενεργοποιεί μια θερμάστρα για να διατηρήσει ένα εύρος θερμοκρασίας. Είναι αποτελεσματική για ορισμένους τύπους ελέγχου κινητήρων.

## 8. Ασυνεχής PWM (DPWM)

Στην DPWM, μία ή περισσότερες φάσεις του μετατροπέα απενεργοποιούνται σκόπιμα κατά τη διάρκεια ορισμένων χρονικών διαστημάτων για να μειωθούν οι απώλειες μεταγωγής, καθιστώντας την αποτελεσματική για εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως οι βιομηχανικοί κινητήρες.

## 9. Διαμόρφωση πυκνότητας παλμών (PDM)

Η PDM είναι παρόμοια με την PWM, αλλά μεταβάλλει την πυκνότητα των παλμών για τον έλεγχο της μέσης ισχύος. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές ψηφιακού ήχου για τη διατήρηση της ποιότητας του ήχου.

Ορισμένες πρακτικές εφαρμογές των παραπάνω μεθόδων είναι ο έλεγχος κινητήρων όπου διανυσματικά PWM χρησιμοποιούνται συνήθως επειδή παρέχουν ομαλό και αποτελεσματικό έλεγχο, το dimming LED όπου PWM σταθερής συχνότητας και PWM μεταβλητής συχνότητας χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της φωτεινότητας χωρίς 'τρεμόπαιγμα'. Ακόμη, τροφοδοτικά είτε σταθερής είτε μεταβλητής συχνότητας PWM χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης και τη βελτίωση της απόδοσης. Τέλος για την παραγωγή σήματος, εκεί η PWM σταθερής συχνότητας και ημιτονοειδής PWM χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ακριβών κυματομορφών. Ωστόσο, κάθε μέθοδος PWM έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και επιλέγεται με βάση τις συγκεκριμένες ανάγκες της εφαρμογής, όπως η απαιτούμενη ακρίβεια, η απόδοση και ο τύπος του φορτίου που ελέγχεται.

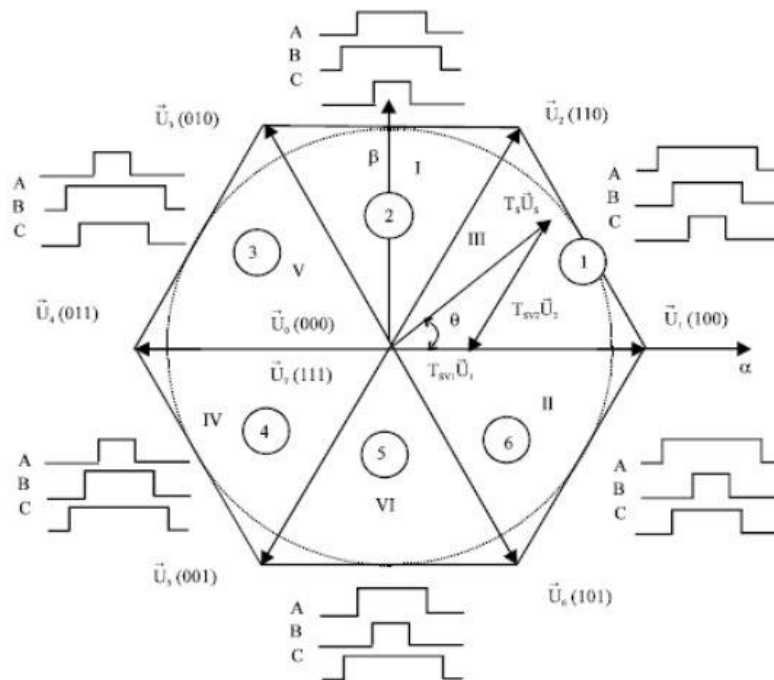
## 3.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών με βάση τα διακριτά διανύσματα τάσης (SVPWM)

Η Space Vector Pulse Width Modulation (SPWM) είναι μια προηγμένη μέθοδος PWM που χρησιμοποιείται ευρέως σε αντιστροφέις τάσης (inverters) για τον έλεγχο της τάσης εξόδου. Η SVPWM λειτουργεί βασισμένη σε μια πολύπλοκη μαθηματική τεχνική που επιτρέπει τη δημιουργία ενός ή περισσότερων διανυσμάτων τάσης (vectors) στον χώρο των φασορών. Αυτά τα διανύσματα χρησιμοποιούνται για να παράγουν ένα συνεχές και ομαλό σήμα τάσης εξόδου με μεταβλητό πλάτος παλμών. Η βασική ιδέα πίσω από την SVPWM είναι να χρησιμοποιήσει μια σειρά από σήματα παλμών υψηλής συχνότητας για να προσεγγίσει την επιθυμητή τάση εξόδου. Αυτά τα σήματα παράγονται με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμά τους να δίνει την επιθυμητή τάση και οι μεταβολές της διάρκειας των παλμών να ελέγχουν το μέγεθος της τάσης. Τα πλεονεκτήματα της SVPWM περιλαμβάνουν υψηλό βαθμό ακρίβειας στον έλεγχο της τάσης εξόδου, χαμηλό THD (Total Harmonic Distortion), μικρό κύκλο εργασίας και χαμηλές απώλειες ισχύος. Ωστόσο, η υψηλή πολυπλοκότητα των αλγορίθμων υπολογισμού και η ανάγκη για υψηλή συχνότητα επεξεργασίας καθιστούν την υλοποίησή της πιο προηγμένη από άλλες μεθόδους PWM. Η διανυσματική διαμόρφωση διαστήματος (Space Vector Modulation, SVM) είναι μια τεχνική έλεγχου του πλάτους παλμού (PWM). Χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει εναλλασσόμενα ρεύματα (AC) σε κυματομορφές, κυρίως για την οδήγηση τριφασικών εναλλασσόμενων

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

κινητήρων σε διάφορες ταχύτητες συνεχούς ρεύματος μέσω ενισχυτών. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της SVM που απαιτούν διαφορετικά επίπεδα ποιότητας και υπολογιστικής ικανότητας. Ένας σημαντικός τομέας έρευνας είναι η μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, THD) που προκαλείται από τη γρήγορη εναλλαγή, ένα σύνηθες φαινόμενο σε αυτούς τους αλγόριθμους.

Ένας τριφασικός μετατροπέας μετατρέπει μια παροχή συνεχούς ρεύματος (DC) σε τρεις εξόδους μέσω μιας σειράς διακοπών, οι οποίες μπορούν να συνδεθούν σε έναν τριφασικό κινητήρα. Οι διακόπτες πρέπει να ελέγχονται έτσι ώστε να μην ενεργοποιούνται ταυτόχρονα δύο διακόπτες στο ίδιο σημείο, ώστε να αποφεύγεται το βραχυκύκλωμα της παροχής DC. Έτσι, υπάρχουν οκτώ πιθανά διανύσματα μεταγωγής για τον μετατροπέα, V0 έως V7, με έξι ενεργά διανύσματα και δύο μηδενικά διανύσματα. [5]



Εικόνα 3.1 , Διαμόρφωση διανυσμάτων SVPWM (πηγή : (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Διανύσματα	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
$V_0$ (000)	0	0	0
$V_1$ (100)	$+V_{DC}$	0	$-V_{DC}$
$V_2$ (110)	0	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$
$V_3$ (010)	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$	0
$V_4$ (011)	$-V_{DC}$	0	$+V_{DC}$
$V_5$ (001)	0	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$
$V_6$ (101)	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$	0
$V_7$ (000)	0	0	0

Πίνακας 3.1 , Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVrwm (πηγή : (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

### 3.2.1 SVPWM και βελτιστοποιημένη SVPWM (PWM διανύσματος χώρου)

Στην παρούσα διπλωματική παρουσιάζονται μόνο οι βασικές αρχές της διαμόρφωσης διανύσματος χώρου (SVM) και της βελτιστοποιημένης διαμόρφωσης διανύσματος χώρου. Δεδομένου ότι οι ανησυχίες του παρόντος έργου είναι περισσότερο σταθμισμένες σε μονοφασικούς αντιστροφείς πηγής τάσης, η παρούσα διατριβή δεν θα επεκταθεί σε τριφασικές τεχνικές πηγής τάσης και πηγής ρεύματος.

Η διανυσματική διαμόρφωση χώρου εμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 προτείνοντας μια εναλλακτική μέθοδο προσδιορισμού του πλάτους των διακοπτικών παλμών. Υποστηρίχθηκε ότι προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της φυσικής και της PWM με κανονική δειγματοληψία όσον αφορά την ευκολία υλοποίησης και την απόδοση [14, 15, 16]. Η κύρια τροποποίηση και τελικά το σημαντικότερο πλεονέκτημα της SVM είναι ο ρητός προσδιορισμός της τοποθέτησης των παλμών ως πρόσθετου βαθμού ελευθερίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιτευχθούν κέρδη αρμονικής απόδοσης. Η μόνη διαφορά της SVM με την PWM κανονικής δειγματοληψίας είναι η θέση των μηδενικών (ανενεργών) διανυσμάτων χώρου μέσα σε κάθε μισή περίοδο φέροντος.

Στην PWM με κανονική δειγματοληψία αυτά τα μηδενικά διανύσματα δεν έχουν καμία δυνατότητα μεταβολής, δεδομένου ότι προβλέπονται από τον ορισμό του αλγορίθμου που δίνεται. Στο SVM αυτά τα διανύσματα χώρου αφήνονται απροσδιόριστα δίνοντας την ευκαιρία να τα χειριστούν προς όφελος των αρμονικών. Το συμβατικό SVM κεντράρει τα ενεργά διανύσματα χώρου και διαχωρίζει εξίσου τα υπόλοιπα μηδενικά (ανενεργά) διανύσματα χώρου. Η βελτιστοποιημένη διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου ανακατανέμει τη θέση των ανενεργών διανυσμάτων χώρου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα βελτιστοποιώντας τις περιόδους μεταγωγής.

Στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί γενικοί αλγόριθμοι για τη βελτιστοποίηση του αρμονικού περιεχομένου για τους μετατροπείς ισχύος στο πλαίσιο της SVM. Η σχέση μεταξύ της τριφασικής PWM με βάση το φορέα και της SVM έχει αναλυθεί από τους Keliang Zhou και Danwei Wang στο [17].

Όλες οι σχέσεις μεταξύ των μεθόδων έδειξαν ότι μια γενική πλατφόρμα μπορεί να παρασχεθεί όχι μόνο για την υλοποίηση του μετασχηματισμού μεταξύ PWM με βάση το φέρον και διαμόρφωσης διανύσματος χώρου, αλλά και για την ανάπτυξη διαμορφωτών PWM διαφορετικών επιδόσεων. Οι Jian Sun και Horst Grotstollen στο [18] μελέτησαν τη σχέση μεταξύ της βελτιστοποιημένης SVM και των τεχνικών κανονικής δειγματοληψίας δείχνοντας ότι ο επιμερισμός του χρόνου μηδενικού διανύσματος μεταξύ δύο μηδενικών διανυσμάτων (για την SVM) και οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας που προστίθενται στα κύματα διαμόρφωσης (στην PWM κανονικής δειγματοληψίας) αντιπροσωπεύουν έναν σημαντικό βαθμό ελευθερίας που μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης κάθε μεθόδου διαμόρφωσης όσον αφορά την παραμόρφωση αρμονικού ρεύματος και/ή τις απώλειες μεταγωγής.

Μια ανάλυση της SVM PWM με φυσική δειγματοληψία στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης πραγματοποιήθηκε στο [19], αποδεικνύοντας ότι η SVM PWM με φυσική δειγματοληψία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στην περιοχή υποδιαμόρφωσης αλλά και στην περιοχή υπερδιαμόρφωσης. Στο [20] οι ερευνητές χρησιμοποίησαν γενικούς αλγόριθμους για τη βελτιστοποίηση της SVM με στόχο την ελαχιστοποίηση της απαίτησης φιλτραρίσματος μέσω της μείωσης των πιο σημαντικών αρμονικών, ενώ παράλληλα συμμορφώνονται με τα διαθέσιμα πρότυπα για την ποιότητα της κυματομορφής τάσης. Η SVM σε τοπολογία αντιστροφών τριών σκελών δεν μπορεί να χειριστεί το ρεύμα ουδέτερου, οπότε το 1993 προτάθηκε μια τοπολογία τεσσάρων σκελών [21] για την επίλυση αυτού του προβλήματος με την προσθήκη ενός ουδέτερου σκέλους. Η τριδιάστατη SVPWM που χρησιμοποιείται σε τριφασική τοπολογία τεσσάρων ποδιών προτάθηκε για πρώτη φορά το 1997 [22].

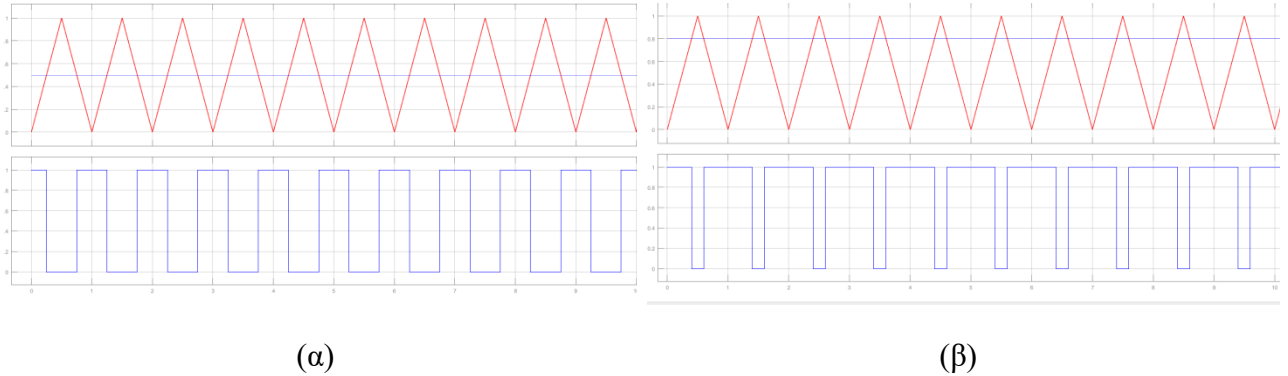
### **3.3 Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και SPWM**

Οι αντιστροφείς που λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες (όπου τα ημιαγωγικά τους στοιχεία ανάβουν και σβήνουν μία φορά ανά περίοδο της τάσης εξόδου) συχνά παράγουν ρεύμα και τάση χαμηλής ποιότητας. Αυτό μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά των καταναλωτών ή του δικτύου, ειδικά αν ο αντιστροφέας παρέχει ισχύ στο δίκτυο. Για τη βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος εξόδου σε αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας, χρησιμοποιούνταν μεγάλα και δαπανηρά φίλτρα. Ωστόσο, αυτά τα φίλτρα συχνά προκαλούσαν επιπλέον προβλήματα, όπως ταλαντώσεις, υποαρμονικές και αύξηση απωλειών. Στις σύγχρονες εφαρμογές, είναι απαραίτητη η δυνατότητα ανεξάρτητης μεταβολής της τάσης και της συχνότητας εξόδου του αντιστροφέα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο έλεγχος τάσης-συχνότητας (V/f) σε ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας. Για αυτούς τους λόγους (ποιότητα τάσης-ρεύματος και έλεγχος V/f), αναπτύχθηκαν οι αντιστροφείς υψηλής συχνότητας. Στους αντιστροφείς αυτούς, τα ημιαγωγικά στοιχεία ανάβουν και σβήνουν πολλές φορές κατά τη διάρκεια μιας περιόδου της τάσης φορτίου ή δικτύου. Τέτοιοι αντιστροφείς είναι πλέον εφικτοί, καθώς έχουν δημιουργηθεί ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος εξαναγκασμένης σβέσης, όπως τα IGBT και MOSFET, που λειτουργούν σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες. Για την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων των αντιστροφών υψηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Οι πιο διαδεδομένες είναι η PWM (Pulse Width Modulation), η SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) και η HCC (Hysteresis Current Control). Φυσικά, υπάρχουν πολλές ακόμη τεχνικές παλμοδότησης που χρησιμοποιούνται ευρέως, ανάλογα με την εφαρμογή. Ωστόσο, οι τρεις προαναφερθείσες είναι βασικές τεχνικές, στις οποίες στηρίζονται πολλές από τις υπόλοιπες.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

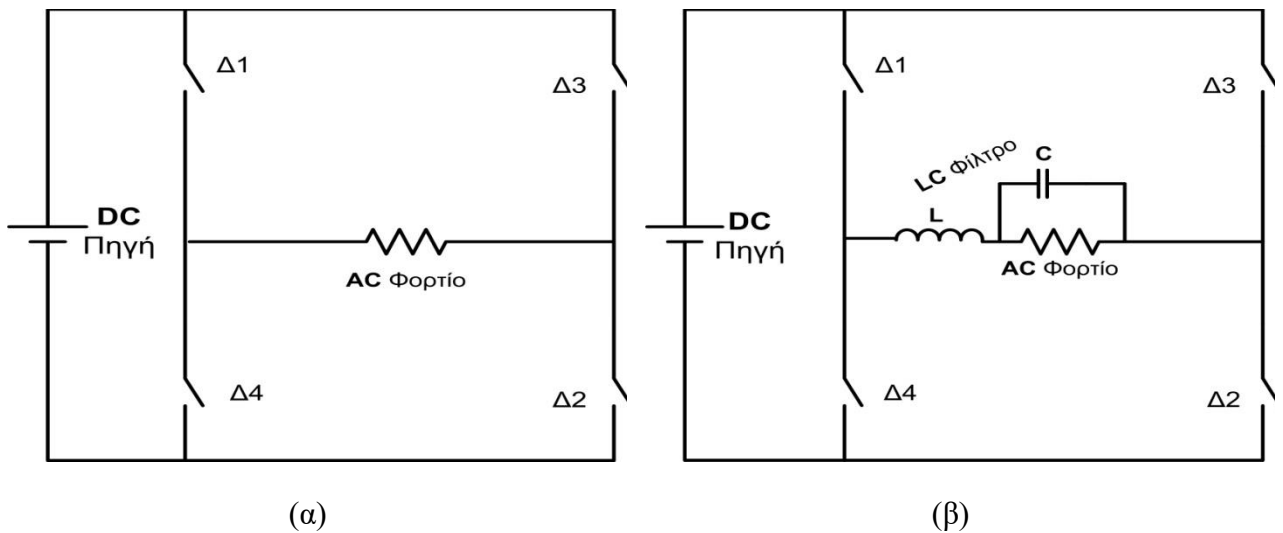
### 3.3.1 Τεχνική παλμοδότησης PWM – Pulse Width Modulation (Διαμόρφωση εύρους παλμών)

Στην τεχνική αυτή, οι παλμοί δημιουργούνται συγκρίνοντας ένα τριγωνικό σήμα συγκεκριμένης συχνότητας με ένα σήμα DC (βλ. Εικόνα 3.2 ). Από αυτή τη σύγκριση προκύπτουν παλμοί σταθερού πλάτους με συχνότητα ίση με εκείνη του τριγωνικού σήματος. Το πλάτος του σήματος DC μπορεί να κυμαίνεται από το μηδέν έως το πλάτος του τριγωνικού σήματος, προκαλώντας έτσι τη μεταβολή του πλάτους των παλμών.



Εικόνα 3.2 : Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8

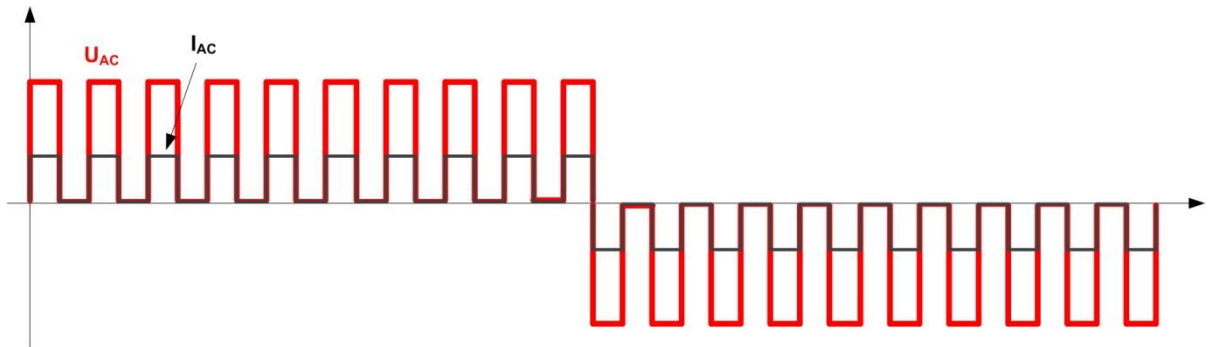
Από αυτούς τους παλμούς, οι μισοί οδηγούν το ένα ζεύγος της γέφυρας του μονοφασικού αντιστροφέα (Εικόνα 3.3, Δ1 και Δ2), ενώ οι υπόλοιποι οδηγούν το άλλο ζεύγος (Εικόνα 3.3, Δ3 και Δ4). Έτσι, η τάση και το ρεύμα του φορτίου παίρνουν τις κυματομορφές της εικόνας 3.4 . Όταν αυξάνεται το πλάτος των παλμών, αυξάνεται και η τάση του φορτίου, λόγω της αύξησης του εμβαδού. Εάν αυξηθεί ο αριθμός των παλμών που άγει το κάθε ζεύγος (π.χ. Εικόνα 3.3, Δ1 – Δ2 ή Δ3 - Δ4), αυξάνεται η περίοδος της τάσης του φορτίου, δηλαδή μειώνεται η συχνότητα  $f$ .



Εικόνα 3.3, Μονοφασικός αντιστροφέας τύπου γέφυρας α) χωρίς φίλτρο, β) με φίλτρο

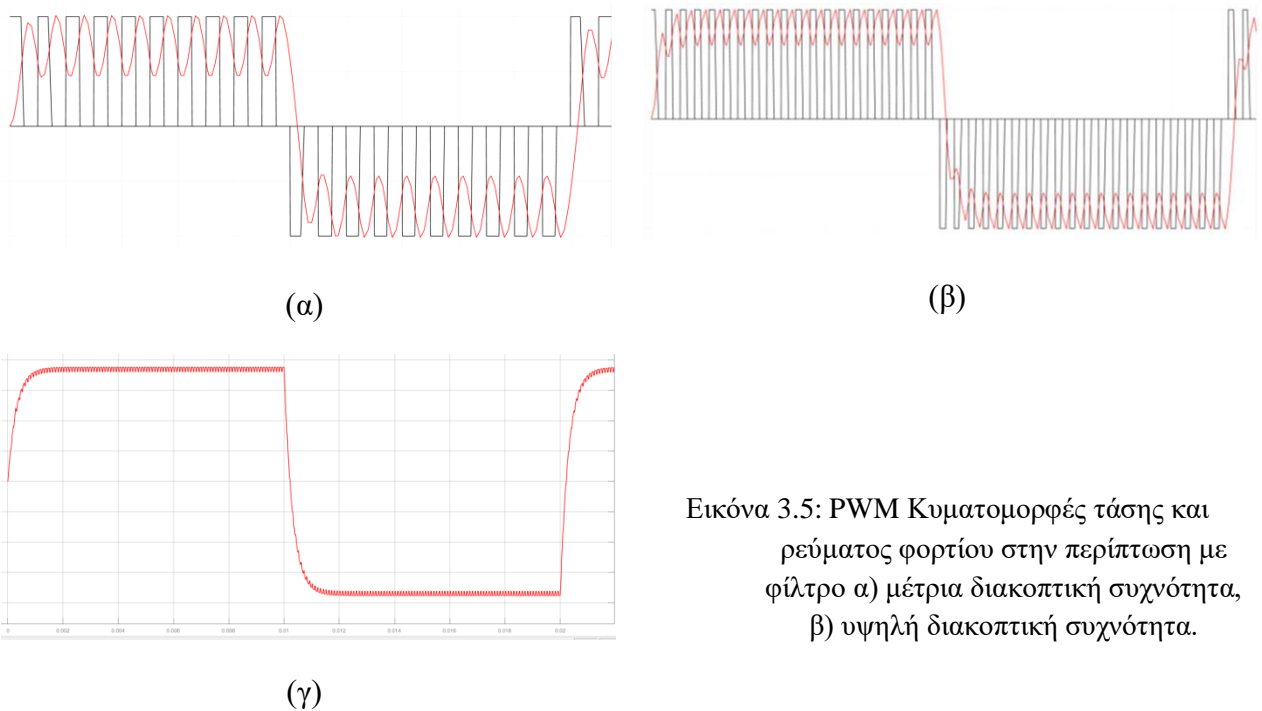


Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 3.4, PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση χωρίς φίλτρο

Εάν τοποθετηθεί ένα απλό και σχετικά μικρό φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα (π.χ. L-C κατωδιαβατό, Εικόνα 3.3 β), η κυματομορφή του ρεύματος βελτιώνεται (Εικόνα 3.5). Όσο αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα των παλμών ή το μέγεθος του φίλτρου, τόσο καλύτερη γίνεται η κυματομορφή του ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να επιτύχουμε ποιοτική κυματομορφή και ταυτόχρονα να μεταβάλουμε την τάση και τη συχνότητα του φορτίου.

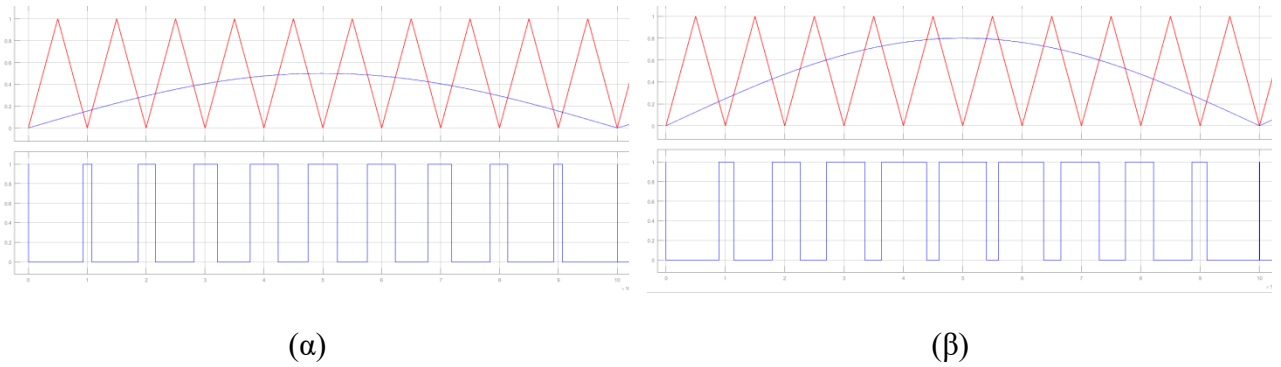


Εικόνα 3.5: PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο α) μέτρια διακοπτική συχνότητα, β) υψηλή διακοπτική συχνότητα.

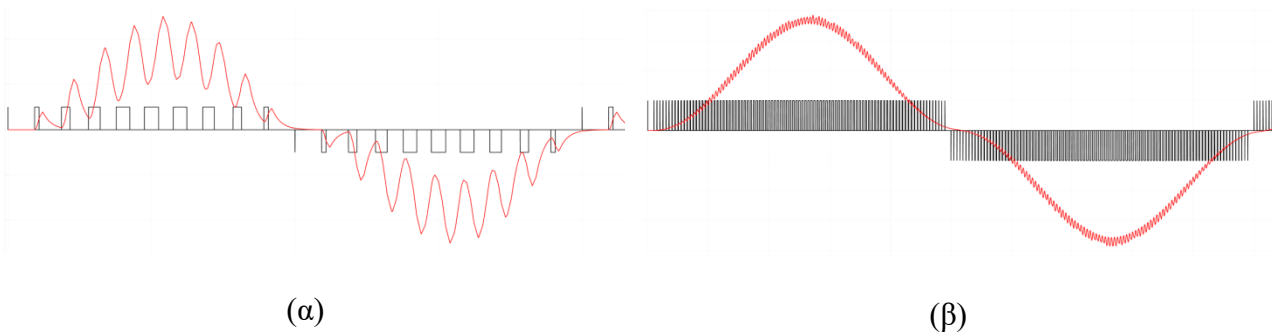
### 3.3.2 Τεχνική παλμοδότησης SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation (Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών)

Σε αυτή την τεχνική, οι παλμοί δημιουργούνται όπως στην PWM, με τη διαφορά ότι το σήμα DC αναφοράς αντικαθίσταται από ένα ανορθωμένο ημίτονο (Εικόνα 3.6). Η σύγκριση του τριγωνικού σήματος με το ημιτονοειδές σήμα παράγει παλμούς μεταβαλλόμενου πλάτους μέσα στην ημιπερίοδο (όπου ημιπερίοδος είναι το ένα μέρος του ανορθωμένου ημιτόνου, δηλαδή "το ένα βουνό"). Ο παλμός μέγιστου πλάτους εμφανίζεται στο μέσο της ημιπεριόδου, ενώ στα άκρα εμφανίζονται παλμοί ελάχιστου πλάτους. Έτσι, αν υπάρχει φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα, το ρεύμα λαμβάνει σχεδόν ημιτονοειδή μορφή (Εικόνα 3.7). Από τη σύγκριση των εικόνων, γίνεται φανερό ότι η SPWM υπερτερεί της απλής PWM.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



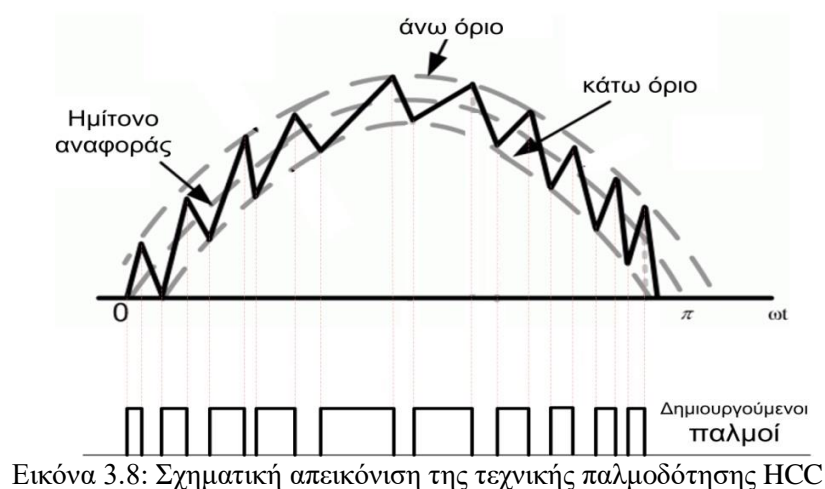
Εικόνα 3.6, Δημιουργία παλμών στην SPWM για πλάτος ανορθωμένου ημιτόνου α) 0,5 και β) 0,8.



Εικόνα 3.7: SPWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο για διακοπτική συχνότητα α) 1kHz και β) 10kHz

### 3.3.3 Τεχνική παλμοδότησης HCC – Hysteresis Current Control (Έλεγχος βρόχου υστέρησης)

Σε αυτή την τεχνική, ορίζονται ανώτερα και κατώτερα όρια με ημιτονοειδή μορφή. Όταν το ρεύμα φτάσει στο κατώτερο όριο, ο αντιστροφέας ενεργοποιείται, ενώ όταν φτάσει στο ανώτερο όριο, ο αντιστροφέας απενεργοποιείται (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής παλμοδότησης HCC

### **3.4 Διαμόρφωση πλάτους ημιτονοειδούς παλμού (SPWM)**

Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM) είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή σημάτων PWM, ιδίως σε εφαρμογές που αφορούν κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και μετατροπείς. Η SPWM είναι μια τεχνική όπου το πλάτος κάθε παλμού μεταβάλλεται με ημιτονοειδή τρόπο, παράγοντας ένα σήμα PWM του οποίου η μέση τιμή ακολουθεί μια ημιτονοειδή κυματομορφή.

Η λειτουργία της βασίζεται σε δυο βασικά κύματα :

- Ημιτονοειδές κύμα αναφοράς:

Ως σήμα αναφοράς χρησιμοποιείται ένα ημιτονοειδές κύμα χαμηλής συχνότητας, το οποίο συνήθως αντιπροσωπεύει την επιθυμητή τάση ή ρεύμα εξόδου.

- Κύμα φορέα:

Ένα τριγωνικό ή πριονωτό κύμα υψηλής συχνότητας χρησιμεύει ως φέρον σήμα.

Το σήμα διαμόρφωσης (σήμα αναφοράς) είναι ένα ημιτονοειδές κύμα και συγκρίνεται με το τριγωνικό φέρον κύμα υψηλής συχνότητας για τη δημιουργία του σήματος PWM.

Το ημιτονοειδές κύμα αναφοράς συγκρίνεται συνεχώς με το φέρον κύμα. Όταν το ημιτονοειδές κύμα αναφοράς είναι υψηλότερο από το κύμα φορέα, η έξοδος PWM είναι υψηλή (on), διαφορετικά είναι χαμηλή (off). Στην έξοδο, το αποτέλεσμα είναι ένα σήμα PWM του οποίου ο κύκλος λειτουργίας μεταβάλλεται σε ημιτονοειδές μοτίβο, δημιουργώντας ουσιαστικά μια κυματομορφή που μπορεί να φιλτραριστεί για να προσεγγίσει μια ημιτονοειδή έξοδο. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα της είναι αρχικά, η μείωση των αρμονικών στο σήμα εξόδου, γεγονός που είναι επωφελές για εφαρμογές όπως οι κινητήρες και οι μετατροπείς όπου είναι επιθυμητή μια καθαρή ημιτονοειδής κυματομορφή. Επιπλέον, παρέχει αποτελεσματικό έλεγχο της ισχύος και ομαλή λειτουργία των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Ορισμένες πρακτικές εφαρμογές της είναι, σε κινητήρες (E.P.) μεταβλητής συχνότητας (VFD) για τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Επίσης, σε αντιστροφείς (DC-AC) για τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε ημιτονοειδή τάση εναλλασσόμενου ρεύματος, που συνήθως συναντάται σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ηλιακοί μετατροπείς. Ακόμα, σε συστήματα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS) για την παραγωγή σταθερής εξόδου εναλλασσόμενου ρεύματος από μια είσοδο συνεχούς ρεύματος. Εφαρμογές σε ηλεκτρονική συναντάμε σε μικροελεγκτές και DSP. Η SPWM μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση μικροελεγκτών ή επεξεργαστών ψηφιακού σήματος (DSP), οι οποίοι παράγουν τα απαιτούμενα κύματα αναφοράς και φέροντος και εκτελούν τη σύγκριση για την παραγωγή του σήματος PWM. Τέλος σε αναλογικά κυκλώματα. Σε απλούστερα ή παλαιότερα συστήματα, η SPWM μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση αναλογικών στοιχείων, όπως λειτουργικοί ενισχυτές και συγκριτές.

Το σήμα PWM παράγεται με τη σύγκριση του ημιτονοειδούς κύματος και του τριγωνικού κύματος. Απλούστερα, η SPWM συγκρίνει ένα ημίτονο με ένα τριγωνικό σήμα. Εκεί που τέμνονται (σημείο τομής) γίνεται η σύγκριση και παράγεται ο παλμός έτσι προκύπτει ένα 'σμήνος' παλμών όπου στο κέντρο του ημιτόνου (90 μοίρες) πάντα είναι ο πιο πλατύς παλμός και μοιράζονται οι υπόλοιποι αριστερά και δεξιά του κεντρικού (αναλογικός τρόπος). Συμπερασματικά, η SPWM είναι μια ισχυρή τεχνική που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές που απαιτούν αποτελεσματικό και ομαλό έλεγχο της ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ικανότητά της να μειώνει τις αρμονικές και να παρέχει μια καθαρή ημιτονοειδή έξοδο την καθιστά προτιμώμενη επιλογή σε κινητήρες, μετατροπείς και συστήματα τροφοδοσίας όπως αναφέραμε.

### 3.4.1 Έλεγχος τάσης μονοφασικού αντιστροφέα με τεχνική S.P.W.M.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τεχνική PWM δημιουργεί στην έξοδο του αντιστροφέα έναν εναλλασσόμενο παλμό τετραγωνικής μορφής, ο οποίος περιέχει τη θεμελιώδη αρμονική συνιστώσα και διάφορες ανώτερες αρμονικές συνιστώσες που είναι ανεπιθύμητες. Για το λόγο αυτό, το διεθνές πρότυπο IEEE-519 ορίζει ότι η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) πρέπει να είναι  $\leq 5\%$ . Συνεπώς, είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα για να περιοριστούν οι ανώτερες αρμονικές. Ωστόσο, η χρήση της τεχνικής PWM απαιτεί φίλτρα που είναι ακριβά, βαριά και μεγάλου μεγέθους, λόγω της σχεδιάσής τους βάσει της συχνότητας της βασικής αρμονικής του αντιστροφέα. Αυτό το πρόβλημα οδήγησε στην ανάπτυξη της τεχνικής Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM), η οποία επιτρέπει τη σχεδίαση μικρότερων και φθηνότερων φίλτρων, καθώς η βασική αρμονική είναι συχνά υψηλότερη, όπως π.χ. η 27η αρμονική. Η τεχνική SPWM θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω.

Για να ελέγξουμε την έξοδο ενός αντιστροφέα, πρέπει να ρυθμίσουμε σωστά τους παλμούς ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπών. Μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι η Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (SPWM). Η τεχνική SPWM για τους μονοφασικούς αντιστροφέες βασίζεται στις εξής αρχές:

1. Για την παραγωγή των παλμών οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών, χρησιμοποιούνται δύο ημιτονικά σήματα με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , γνωστά ως σήματα αναφοράς, καθώς και ένα τριγωνικό σήμα που ονομάζεται φέρον σήμα. Αυτά τα τρία σήματα πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των σημάτων είναι:

- $A_r$ : Το πλάτος της κυματομορφής του ημιτονοειδούς σήματος (σήμα αναφοράς)
- $A_c$ : Το πλάτος της κυματομορφής του φέροντος σήματος
- $T_c$ :  $\frac{1}{f_c}$ , η περίοδος της κυματομορφής του φέροντος σήματος
- $T_r$ :  $\frac{1}{f_r}$ , η περίοδος της κυματομορφής του σήματος αναφοράς
- $ma$ : Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους, που είναι το πηλίκιο  $\frac{A_r}{A_c}$
- $mf$ : Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας, που είναι το πηλίκιο  $\frac{T_r}{T_c}$  ή  $\frac{f_c}{f_r}$

2. Η συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα καθορίζεται από τη συχνότητα  $f_r$  του σήματος αναφοράς.

3. Η συχνότητα διακοπής των ημιαγωγικών διακοπών και η συχνότητα των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών καθορίζεται από τη συχνότητα  $f_c$  του φέροντος σήματος.

4. Μετά τη δημιουργία των τριών σημάτων από τη γεννήτρια, αυτά εφαρμόζονται στις εισόδους των συγκριτών. Στην έξοδο των συγκριτών παράγονται τα σήματα που ελέγχουν τα ημιαγωγικά στοιχεία. Όταν το  $A_r$  είναι μεγαλύτερο από το  $A_c$  για ένα μικρό χρονικό διάστημα  $dt$ , η τάση εξόδου του συγκριτή είναι λογικό 1, ενώ όταν το  $A_r$  είναι μικρότερο από το  $A_c$  για το ίδιο χρονικό διάστημα  $dt$ , η τάση εξόδου του συγκριτή είναι λογικό 0. Τα σημεία τομής του φέροντος σήματος με τα σήματα αναφοράς καθορίζονται από τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $ma$ . Ο αριθμός των παλμών οδήγησης για κάθε χρονικό διάστημα μιας περιόδου καθορίζεται από τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $mf$ .

Για τους μονοφασικούς αντιστροφείς που εφαρμόζουν την τεχνική SPWM, ισχύουν τα εξής:

Κανονικοποιημένα (ως προς $V_{in}/2$ ) πλάτη των αρμονικών συνιστωσών της φασικής τάσης εξόδου $V_{ao}$ του μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας που κάνει χρήση της τεχνικής ελέγχου SPWM (όταν $f_c > f_r$ )					
ma	0.2	0.4	0.6	0.8	1
Αρμονική συνιστώσα	Κανονικοποιημένη τιμή (ως προς τη τάση εξόδου $V_{in}/2$ ) πλάτους της αρμονικής συνιστώσας της φασικής τάσης του αντιστροφέα, $V_{ao}$				
Θεμελιώδης	0.2	0.4	0.6	0.8	1
mf	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
mf±2	0.016	0.061	0.131	0.22	0.318
mf±4	0	0	0	0	0.018
2mf±1	0.19	0.326	0.37	0.314	0.181
2mf±3	0	0.024	0.071	0.139	0.212
2mf±5	0	0	0	0.013	0.033
3mf	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
3mf±2	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062

Πίνακας 3.2 Αρμονικές για SPWM ( Πηγή : Μανιάς κεφάλαιο 6 , Αντιστροφείς)

Το πλάτος της φασικής τάσης και της πολικής τάσης της θεμελιώδους αρμονικής του αντιστροφέα εξαρτάται από τον συντελεστή ma, όπως φαίνεται από:

$$V_{ao,1} = V_{bo,1} = \frac{V_{in} \times m_a}{2}$$

$$V_{ab,1} = V_{ao,1} - V_{bo,1} = V_{ao,1} - (-V_{ao,1}) = 2 V_{ao,1} = V_{in} \times m_a$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την τεχνική SPWM η βασική αρμονική συνιστώσα μετατοπίζεται σε πολύ υψηλότερες συχνότητες, με αποτέλεσμα και οι υπόλοιπες αρμονικές να μετατοπίζονται επίσης σε υψηλότερες τιμές. Αυτό καθιστά το φίλτρο εξόδου πολύ μικρότερο. Δεδομένου ότι ο συντελεστής mf είναι η κανονικοποιημένη τιμή της διακοπτικής συχνότητας  $f_c$ , οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της φασικής τάσης εμφανίζονται γύρω από τις τιμές mf, 2mf, 3mf, 4mf κ.ο.κ. Για την πολική τάση του αντιστροφέα, οι ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται γύρω από τις τιμές 2mf, 4mf, 6mf, 8mf κ.ο.κ. Η τάξη και το πλάτος της κυρίαρχης ανώτερης αρμονικής συνιστώσας (dominant harmonic component, d) της πολικής τάσης είναι  $d = 2mf - 3$ .

Για να αποφευχθεί η εισαγωγή υποαρμονικών στην τάση εξόδου του αντιστροφέα, ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας mf επιλέγεται να είναι περιττός αριθμός, ώστε οι αρμονικές συνιστώσες να έχουν περιττές ή ακέραιες τιμές. Υποαρμονικές ορίζονται οι αρμονικές συνιστώσες των οποίων η τάξη δεν είναι ακέραιος πολλαπλάσιος της θεμελιώδους αρμονικής.

Η κυρίαρχη αρμονική συνιστώσα είναι η πρώτη αρμονική συνιστώσα μετά τη θεμελιώδη, της οποίας το πλάτος υπερβαίνει το 3% της θεμελιώδους. Παράλληλα, παρουσιάζει τον μέγιστο συντελεστή παραμόρφωσης (Distortion Factor,  $D_n\%$ ) σε σχέση με τις άλλες γειτονικές αρμονικές συνιστώσες. Οι ανώτερες αρμονικές συνιστώσες των οποίων το πλάτος δεν υπερβαίνει το 3% του πλάτους της θεμελιώδους συνιστώσας θεωρούνται αμελητέες. Ο συντελεστής παραμόρφωσης ορίζεται ως εξής:

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

$$D_n\% = 100 \times \left( \frac{V_{ab,n}}{n^2} \right)$$

Όπου ισχύει ότι:  $V_{ab,n}$  = πλάτος της νιοστής αρμονικής συνιστώσας πολικής τάσης εξόδου.

$n$  = τάξη της αρμονικής συνιστώσας

Η τάση και το ρεύμα του αντιστροφέα σε σχέση με τη διακοπτική συνάρτηση  $S(\omega t)$  προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις. Η συνάρτηση  $S(\omega t)$  καθορίζει τους παλμούς ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπών.

$$V_o = V_{in} \times S(\omega t) \text{ και}$$

$$I_{in} = I_o \times S(\omega t)$$

$$S(\omega t) = m_a \times \sin(\omega t) + \sum_{n=d}^{\infty} A_n \times \sin(n\omega t) = \sum_{n=1,3,5,\dots,\nu}^{\infty} A_n \times \sin(n\omega t)$$

$$V_o(\omega t) = V_{in} \times m_a \times \sin(\omega t) + V_{in} \sum_{n=d}^{\infty} A_n \times \sin(n\omega t)$$

$$I_o(\omega t) = \frac{V_o(\omega t)}{Z_o} = \frac{V_{in} m_a}{Z_{o,1}} \sin(\omega t + \varphi_{V_o, I_o}) + V_{in} \sum_{n=d}^{\infty} \frac{A_n}{Z_{o,n}} \sin(n\omega t + \varphi_{nV_o, nI_o}) =$$

$$= B_1 \sin(\omega t + \varphi_{V_o, I_o}) + \sum_{n=d}^{\infty} B_n \times \sin(n\omega t + \varphi_{nV_o, nI_o})$$

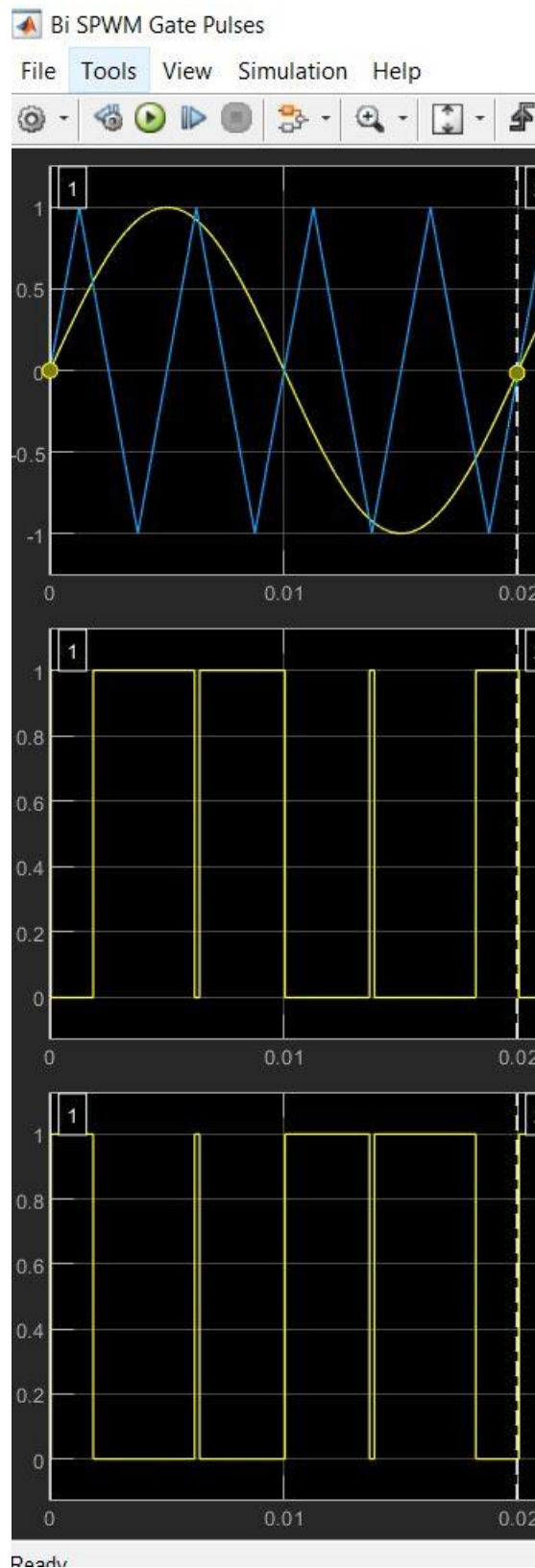
Όπου  $B_1$  είναι το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος εξόδου,  $\varphi_{V_o, I_o}$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων αρμονικών συνιστωσών τάσης και ρεύματος της  $n$ -οστής συνιστώσας,  $\varphi_{nV_o, nI_o}$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης και του ρεύματος εξόδου,  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, και  $A_n$  είναι το πλάτος της  $n$ -οστής αρμονικής συνιστώσας της διακοπτικής συνάρτησης  $S(\omega t)$ .

$$I_{in}(\omega t) =$$

$$\frac{m_a B_1}{2} \cos(\varphi_{V_o, I_o}) + \frac{m_a B_1}{2} \cos(2\omega t + \varphi_{V_o, I_o}) + B_1 \sin(\omega t + \varphi_{V_o, I_o}) \times \sum_{n=d}^{\infty} A_n \times \sin(n\omega t) + \sum_{n=d}^{\infty} \sum_{k=d}^{\infty} B_n A_k \sin(n\omega t + \varphi_{nV_o, nI_o}) \times \sin(k\omega t)$$

Κατά τη σχεδίαση των κυματομορφών των σημάτων αναφοράς και φέροντος, πρέπει να διασφαλίζεται ότι ο συντελεστής  $m_a$  κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Εάν υπερβούμε αυτό το όριο, προκύπτει το φαινόμενο της υπερδιαμόρφωσης (Overmodulation), δηλαδή όταν το σήμα αναφοράς έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το πλάτος των παλμών του φέροντος σήματος. Τότε οι τριγωνικοί παλμοί δεν τέμνονται σε αρκετά σημεία, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται λανθασμένοι παλμοί οδήγησης για την τεχνική SPWM.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 3.9 α) SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς και φέροντος β) SPWM Κυματομορφές παλμών

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

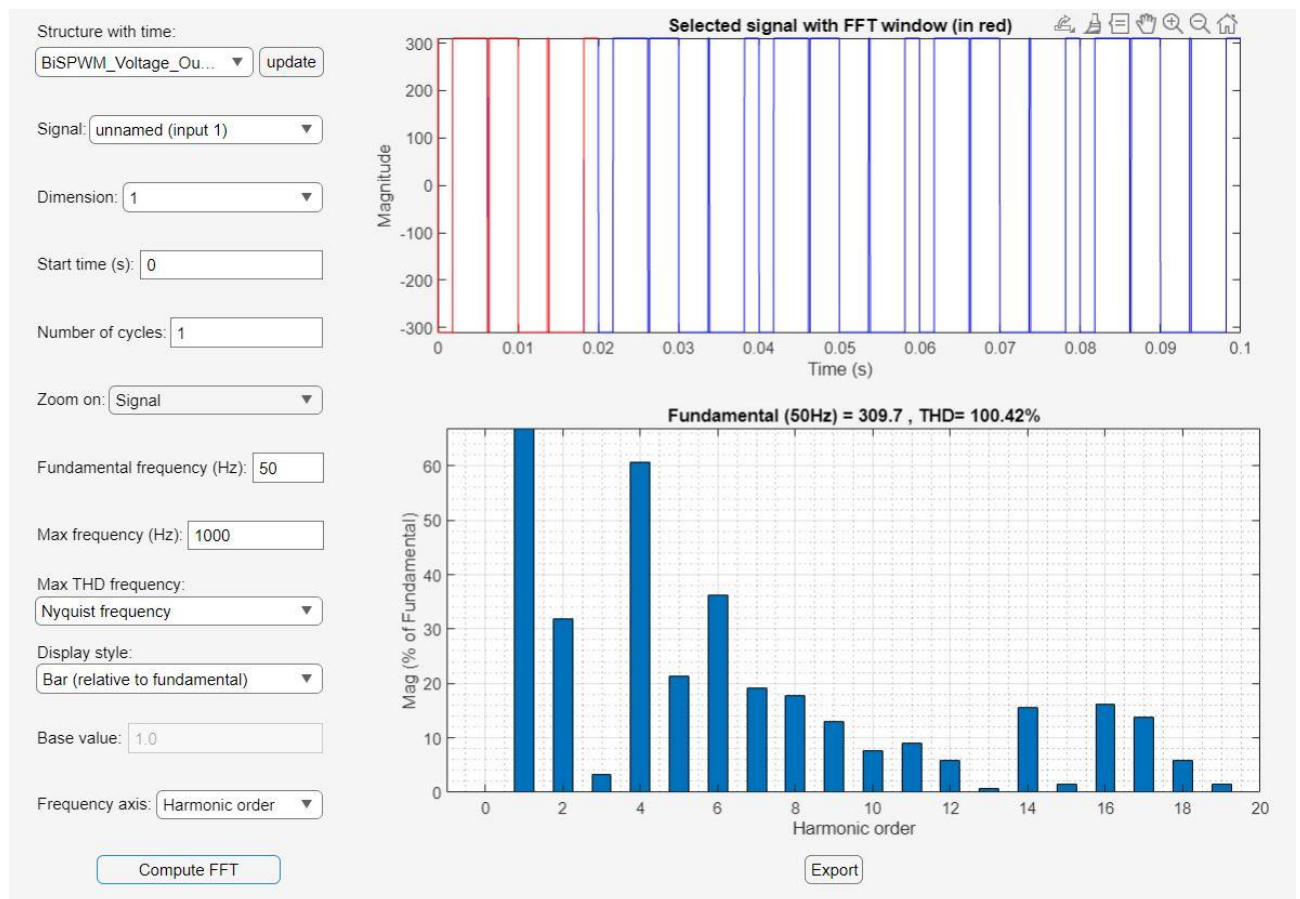
### 3.4.2 Αρμονικές σε Unipolar και Bipolar SPWM

Τα μεγέθη των αρμονικών διαφέρουν στη μονοπολική και διπολική ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM) λόγω των διαφορετικών στρατηγικών μεταγωγής και των χαρακτηριστικών κυματομορφής που προκύπτουν από κάθε μέθοδο.

BIPOLAR : Διπολική ημιτονοειδής PWM:

- Στη διπολική PWM, η τάση εξόδου εναλλάσσεται μεταξύ θετικών και αρνητικών τάσεων συνεχούς ρεύματος διαύλου (+Vdc και -Vdc ).
- Η κυματομορφή της τάσης εξόδου έχει ένα μοτίβο μεταγωγής υψηλής συχνότητας που διαμορφώνει άμεσα την πλήρη τάση του διαύλου DC.
- Οι σημαντικές αρμονικές μετατοπίζονται συνήθως στο διπλάσιο της συχνότητας μεταγωγής ( $2f_c$ ) και στα ζυγά πολλαπλάσιά της (π.χ.  $4f_c$ ,  $6f_c$  κ.λπ.).

Το αρμονικό περιεχόμενο επικεντρώνεται σε μεγάλο βαθμό γύρω από τη συχνότητα μεταγωγής και τις περιττές αρμονικές της, γεγονός που οδηγεί σε ευρύτερη κατανομή της αρμονικής ενέργειας. Αναλυτικότερα φαίνεται στην εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10 Αρμονικές στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

UNIPOLAR : Μονοπολική ημιτονοειδής PWM:

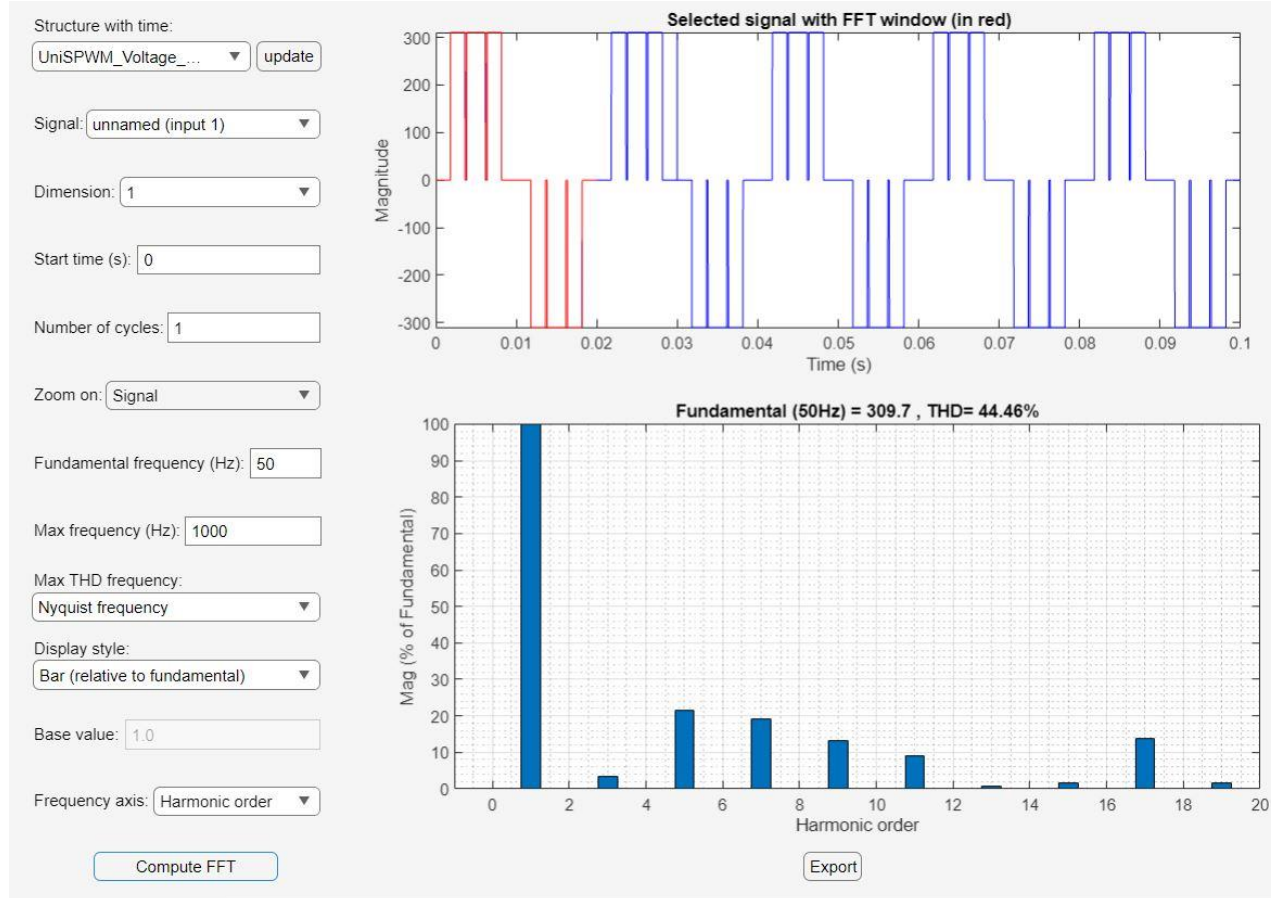
- Στη μονοπολική PWM, κάθε σκέλος του αντιστροφέα μεταστρέφεται ανεξάρτητα. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι είτε θετική, είτε αρνητική, είτε μηδενική, μειώνοντας ουσιαστικά στο μισό την εναλλαγή τάσης από κορυφή σε κορυφή για κάθε σκέλος σε σύγκριση με τη διπολική PWM.



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

- Αυτή η τεχνική έχει ως αποτέλεσμα την εναλλαγή της κυματομορφής της τάσης εξόδου μεταξύ 0, +Vdc , και -Vdc με πιο ελεγχόμενο τρόπο, μειώνοντας έτσι την πραγματική συχνότητα μεταγωγής για κάθε σκέλος.
- Αυτή η μέθοδος παράγει σημαντικές αρμονικές στη συχνότητα μεταγωγής ( $f_c$ ) και τα περιττά πολλαπλάσιά της (π.χ.  $3f_c$ ,  $5f_c$ , κ.λπ.).
- Με τη μετατόπιση των κύριων αρμονικών σε υψηλότερες συχνότητες, η μονοπολική PWM μειώνει το αρμονικό περιεχόμενο χαμηλής συχνότητας, το οποίο είναι συχνά πιο δύσκολο να φιλτραρισθεί.

Αναλυτικότερα φαίνεται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11 Αρμονικές στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Οι διαφορές στα αρμονικά μεγέθη, που θα εντοπίστηκαν παραπάνω στα σχήματα , της unipolar και bipolar είναι :

1. Σχήμα μεταγωγής και συχνότητα:
  - Η διπολική PWM διαμορφώνει απευθείας την πλήρη τάση του διαύλου DC, οδηγώντας σε ισχυρότερες αρμονικές συνιστώσες στη συχνότητα μεταγωγής και στις περιττές αρμονικές της.
  - Η μονοπολική PWM διαμορφώνει κάθε μισό της τάσης του διαύλου DC ανεξάρτητα, διπλασιάζοντας ουσιαστικά τη συχνότητα μεταγωγής και ωθώντας τις σημαντικές αρμονικές σε υψηλότερες συχνότητες.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

2. Συμμετρία κυματομορφής:

- Η διπολική PWM κυματομορφή είναι λιγότερο συμμετρική, με αποτέλεσμα πιο εμφανείς αρμονικές χαμηλότερης τάξης.
- Η μονοπολική PWM επωφελείται από την καλύτερη συμμετρία και την ακύρωση των αρμονικών λόγω της αντίθεσης φάσης της μεταγωγής σε κάθε σκέλος, μειώνοντας έτσι τις αρμονικές χαμηλότερης τάξης.

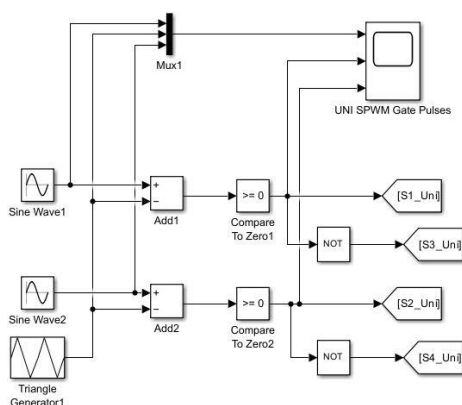
3. Επίπεδα τάσης:

- Η πλήρης εναλλαγή τάσης της διπολικής PWM εισάγει περισσότερη αρμονική ενέργεια στη συχνότητα μεταγωγής.
- Η μερική εναλλαγή τάσης της μονοπολικής PWM σε κάθε σκέλος μειώνει την αρμονική ενέργεια στις χαμηλότερες συχνότητες και την αυξάνει στις υψηλότερες συχνότητες λόγω των συνδυασμένων διακοπτικών ενεργειών.

Συνοπτικά, οι διαφορές στις αρμονικές μεταξύ της μονοπολικής και της διπολικής PWM οφείλονται κυρίως στις διαφορετικές στρατηγικές μεταγωγής και στις προκύπτουσες κυματομορφές τάσης. Η μονοπολική PWM μετατοπίζει τις σημαντικές αρμονικές σε υψηλότερες συχνότητες, γεγονός που καθιστά ευκολότερο το φιλτράρισμά τους, με αποτέλεσμα χαμηλότερη συνολική αρμονική παραμόρφωση στο σήμα εξόδου.

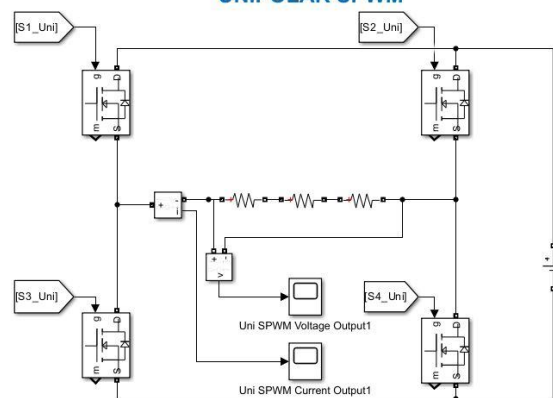
### 3.4.2 Εφαρμογή της SPWM σε λογισμικό Simulink

Unipolar Spwm :



a)

#### UNIPOLAR SPWM



b)

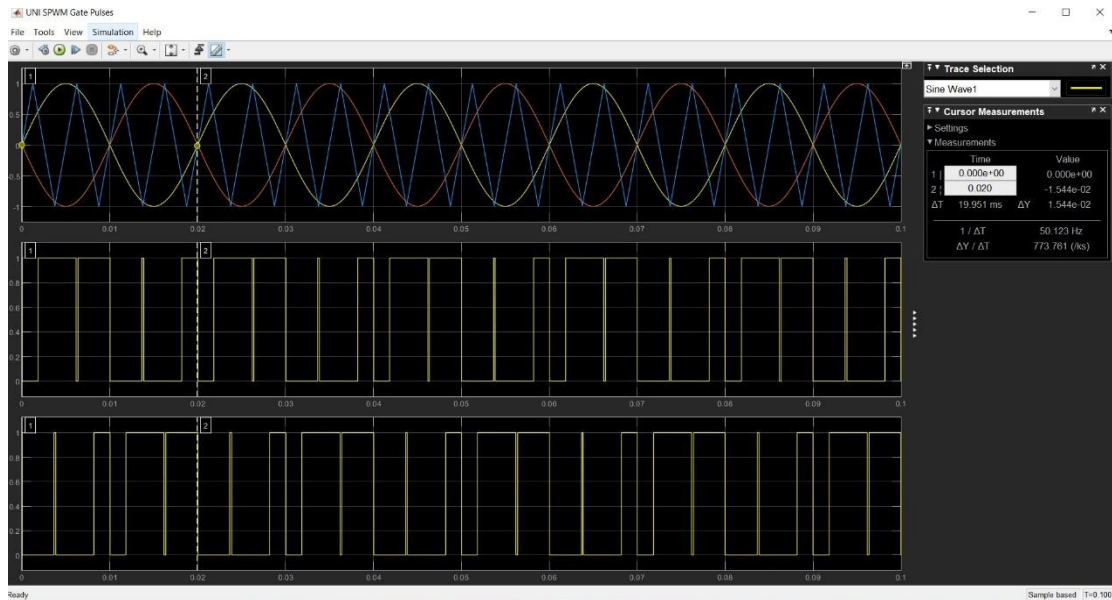
Εικόνα 3.12 Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα Unipolar\_SPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του Unipolar\_SPWM

Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα κύκλωμα για τη δημιουργία Unipolar SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation). Στο αριστερό μέρος, δύο ημιτονικά κύματα (Sine Wave 1 και Sine Wave 2) συγκρίνονται με ένα

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

τριγωνικό κύμα για τη δημιουργία των παλμών SPWM, που δίνονται στους διακόπτες του κυκλώματος (S1, S2, S3, S4). Στο δεξί μέρος, οι διακόπτες αυτοί συνδέονται σε ένα κύκλωμα γέφυρας για την παραγωγή εξόδου τάσης και ρεύματος SPWM.

Στο block του UNI\_SPWM και οι παλμοί στα αντίστοιχα gates παρουσιάζονται στο πεδίο του χρόνου ως εξής:

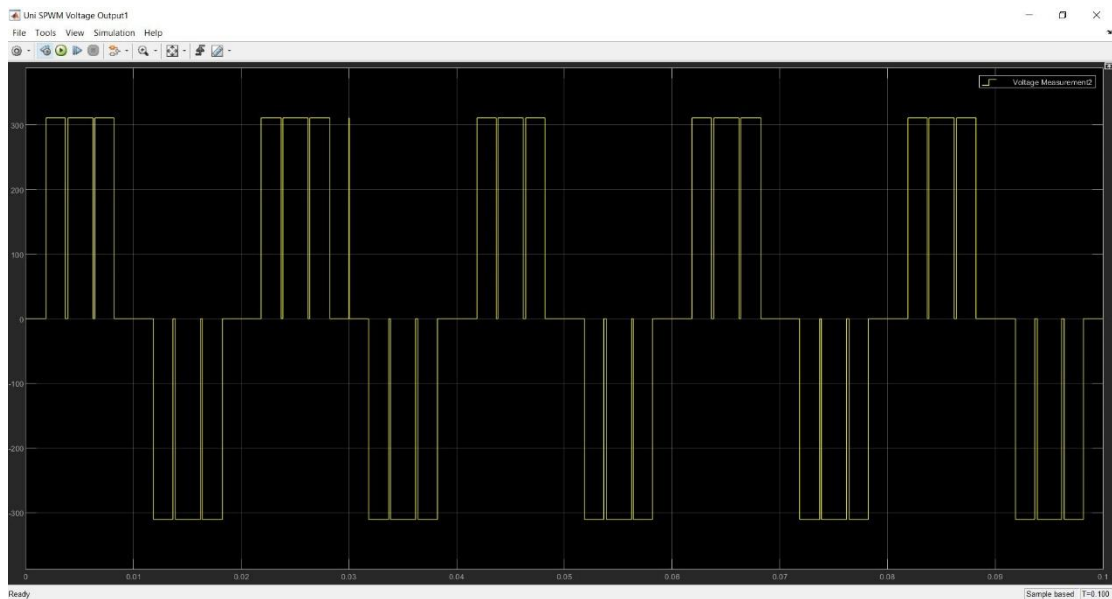


Εικόνα 3.13 Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς & φέροντος και κυματομορφές παλμών

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την εξομοίωση ενός συστήματος Unipolar SPWM. Στο πάνω μέρος φαίνονται δύο ημιτονικά κύματα (προφανώς για κάθε ημιγέφυρα του κυκλώματος) που χρησιμοποιούνται ως κύματα αναφοράς. Στα δύο κάτω διαγράμματα εμφανίζονται οι αντίστοιχες πύλες των διακοπών με παλμούς PWM, οι οποίοι δημιουργούνται από τη σύγκριση των ημιτονικών κυμάτων με ένα τριγωνικό. Αυτοί οι παλμοί ελέγχουν τη λειτουργία των διακοπών του inverter.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

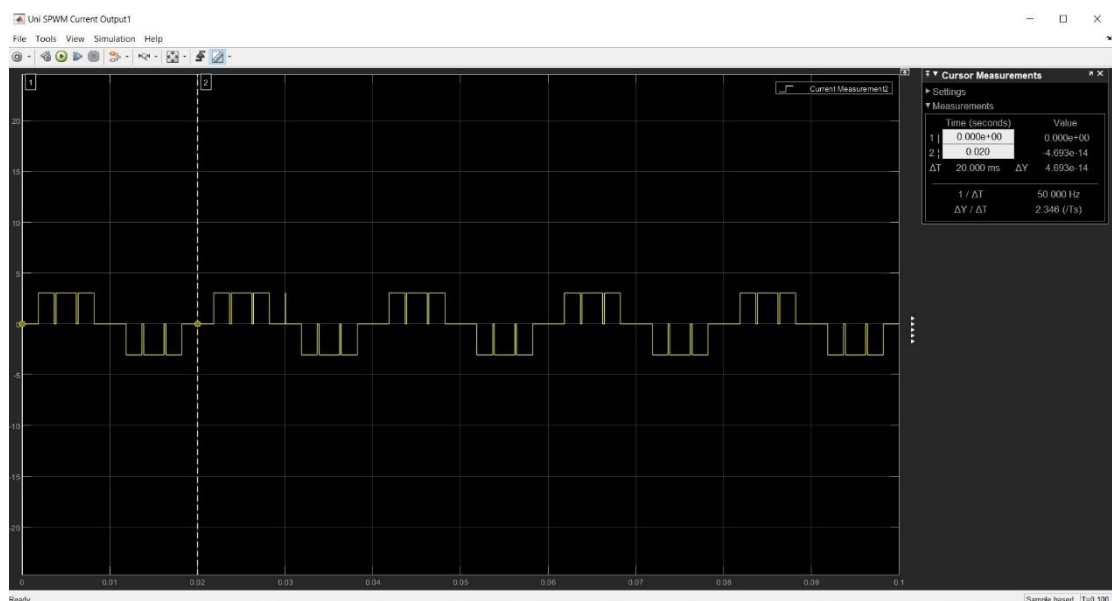
Η τάση εξόδου (voltage output) μέσω του scope παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου, στο παρακάτω:



Εικόνα 3.14 Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές τάσης εξόδου

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα Unipolar SPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, όπως συνηθίζεται σε συστήματα SPWM. Οι πολλαπλοί παλμοί ανά ημιπερίοδο δημιουργούνται από τη σύγκριση του ημιτονικού κύματος αναφοράς με το τριγωνικό κύμα, και εξυπηρετούν τη μείωση των αρμονικών και τον έλεγχο της εξόδου του inverter.

Το ρεύμα εξόδου (current output) μέσω του scope παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου, στο παρακάτω:



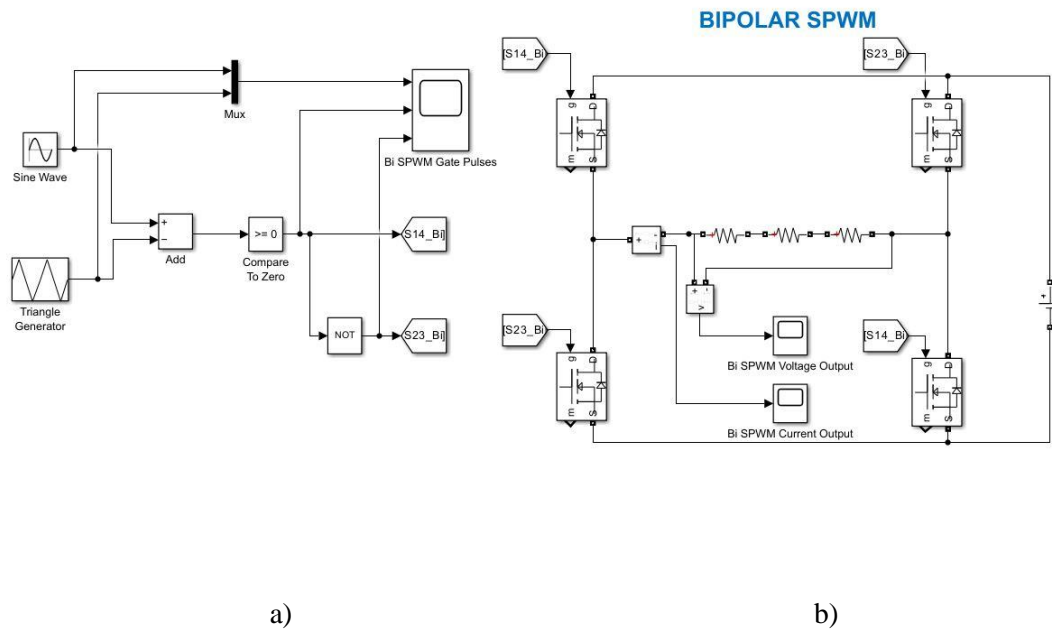
Εικόνα 3.15 Περιβάλλον Simulink για Unipolar\_SPWM Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την έξοδο ρεύματος ενός συστήματος Unipolar SPWM. Η κυματομορφή του ρεύματος δείχνει την τυπική μορφή ενός διαμορφωμένου σήματος SPWM με εναλλαγές μικρών παλμών γύρω από το μηδέν, που αντιστοιχούν στην εναλλασσόμενη τάση του inverter. Οι πολλαπλοί παλμοί ανά ημιπερίοδο

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

εξυπηρετούν τον έλεγχο του ρεύματος και τη μείωση των αρμονικών στη συνολική έξοδο. Η συχνότητα του σήματος είναι στα 50 Hz, όπως φαίνεται από τις μετρήσεις.

Bipolar Spwm .:

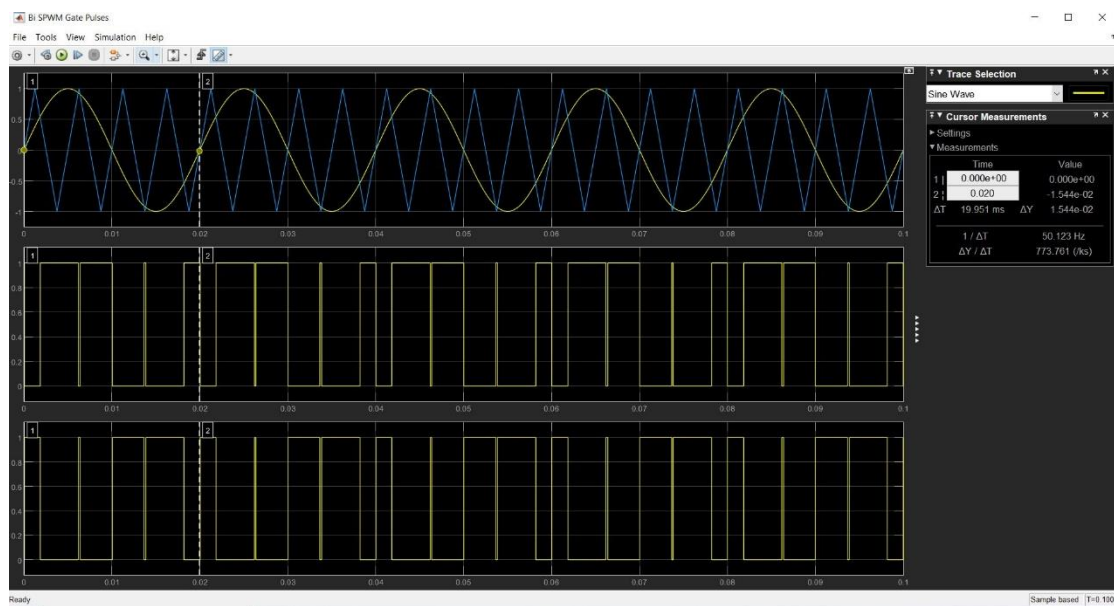


Εικόνα 3.16 Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα Bipolar\_SPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του Bipolar\_SPWM

Η παραπάνω εικόνα δείχνει ένα κύκλωμα για τη δημιουργία Bipolar SPWM. Στο αριστερό μέρος, ένα ημιτονικό κύμα (Sine Wave 1) συγκρίνεται με ένα τριγωνικό κύμα για τη δημιουργία των παλμών SPWM, που δίνονται στους διακόπτες του κυκλώματος (S1, S2, S3, S4). Στο δεξί μέρος, οι διακόπτες αυτοί συνδέονται σε ένα κύκλωμα γέφυρας για την παραγωγή εξόδου τάσης και ρεύματος SPWM.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Οι παλμοί του BI\_SPWM και χρόνοι στα αντίστοιχα gates στο πεδίο του χρόνου, παρουσιάζονται ως:



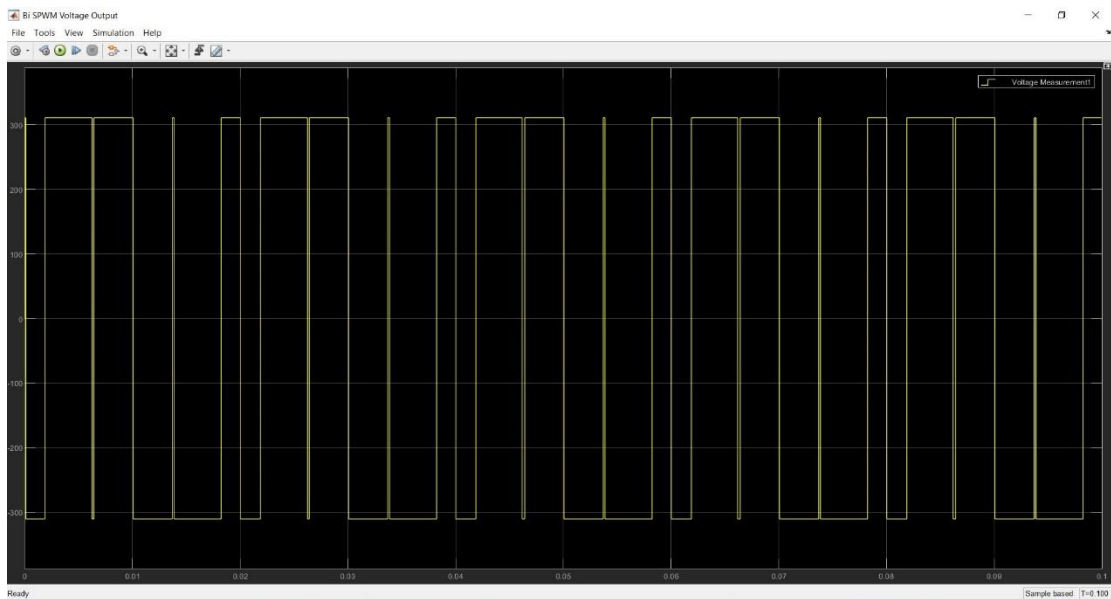
Εικόνα 3.17 Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές κυμάτων αναφοράς & φέροντος και κυματομορφές παλμών

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την εξομοίωση ενός συστήματος Bipolar SPWM. Στο πάνω μέρος φαίνεται ένα ημιτονικό κύμα που χρησιμοποιείται ως κύμα αναφοράς και ένα τριγωνικό κύμα που χρησιμοποιείται ως κύμα φέροντος. Στα δύο κάτω διαγράμματα εμφανίζονται οι αντίστοιχες πύλες των διακοπών με παλμούς PWM, οι οποίοι δημιουργούνται από τη σύγκριση του ημιτονικού κύματος με το τριγωνικό. Αυτοί οι παλμοί ελέγχουν τη λειτουργία των διακοπών του inverter.



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

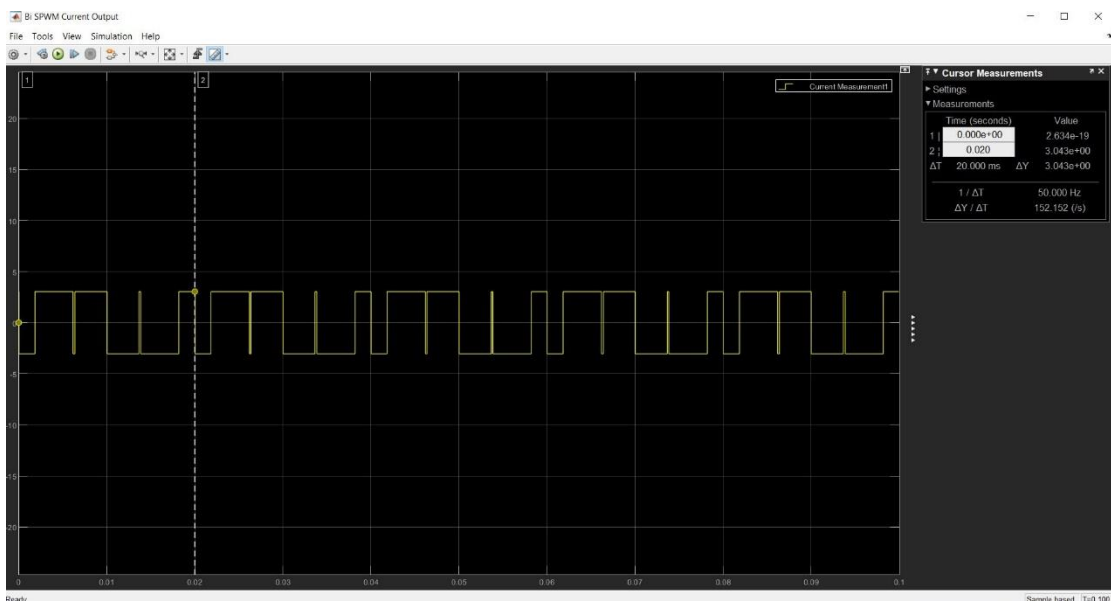
Η τάση εξόδου (voltage output) μέσω του scope παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου, στο παρακάτω:



Εικόνα 3.18 Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές τάσης εξόδου

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα Bipolar SPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών με συμμετρικά παλμικά μοτίβα, τα οποία εναλλάσσονται σε κάθε ημιπερίοδο. Αυτή η διάταξη είναι χαρακτηριστική για bipolar διαμόρφωση πλάτους παλμών (SPWM), όπου η έξοδος εναλλάσσεται συνεχώς μεταξύ των θετικών και αρνητικών επιπέδων τάσης, χωρίς ενδιάμεσες καταστάσεις μηδενικής τάσης, μειώνοντας την περιεκτικότητα αρμονικών στην έξοδο.

Το ρεύμα εξόδου (current output) μέσω του scope παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου στο παρακάτω :



Εικόνα 3.19 Περιβάλλον Simulink για Bipolar\_SPWM Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την έξοδο ρεύματος από ένα σύστημα Bipolar SPWM. Η κυματομορφή δείχνει την εναλλαγή του ρεύματος σε ταχυπαλμική μορφή γύρω από το μηδέν, με συμμετρικούς παλμούς. Οι παλμοί αντιστοιχούν στη διαμόρφωση πλάτους παλμών (SPWM), όπου το ρεύμα εναλλάσσεται μεταξύ

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

θετικών και αρνητικών τιμών, ακολουθώντας την έξοδο τάσης του bipolar inverter. Η συχνότητα του σήματος παραμένει στα 50 Hz, όπως υποδεικνύεται από τις μετρήσεις.

### **3.4.3 Διαμόρφωση πλάτους ημιτονοειδούς παλμού (SPWM) και οι αρμονικές της**

Όπως είδαμε η τεχνική SPWM περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του κύκλου λειτουργίας ενός φέροντος κύματος υψηλής συχνότητας (συνήθως τριγωνικό ή πριονωτό) με βάση ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς. Για τη δημιουργία μιας SPWM, παράγονται σήματα αναφοράς, δηλαδή δύο ημιτονοειδή σήματα με διαφορά φάσης  $180^\circ$  (βλέπε Εικόνα 3.13 , Unipolar) και σήματα φέροντος , δηλαδή ένα τριγωνικό ( ή πριονωτό) κύμα υψηλής συχνότητας. Για τη σύγκρισή τους, τα σήματα αναφοράς συγκρίνονται με το φέρον σήμα χρησιμοποιώντας συγκριτές. Όταν το σήμα αναφοράς ( $A_r$ ) είναι μεγαλύτερο από το σήμα φορέα ( $A_c$ ), η έξοδος του συγκριτή είναι υψηλή (λογικό 1). Όταν το σήμα αναφοράς ( $A_r$ ) είναι μικρότερο από το σήμα φορέα ( $A_c$ ), η έξοδος του συγκριτή είναι χαμηλή (λογικό 0). Τέλος, η έξοδος των συγκριτών παράγει τους παλμούς PWM που ελέγχουν τους ημιαγωγικούς διακόπτες στον αντιστροφέα και προκύπτει η τελική παραγωγή παλμών .

### **3.4.4 Αρμονικό περιεχόμενο σε SPWM**

Στην SPWM, η κυματομορφή της τάσης εξόδου αποτελείται από τη θεμελιώδη συχνότητα και τις αρμονικές. Το κλειδί για την κατανόηση του πού εμφανίζονται οι αρμονικές έγκειται στη σχέση μεταξύ της φέρουσας συχνότητας και της συχνότητας διαμόρφωσης. Οι αρμονικές είναι ανεπιθύμητες συνιστώσες συχνότητας που παραμορφώνουν την κυματομορφή εξόδου. Η τεχνική SPWM αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση αυτών των αρμονικών, ιδίως των χαμηλής τάξης, για την παραγωγή μιας πιο ομαλής εξόδου.

Βασικές έννοιες:

- Θεμελιώδης συχνότητα (Θεμελιώδης συνιστώσα): Η θεμελιώδης συχνότητα ( $f_r$ ) είναι η συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς.
- Φέρουσα συχνότητα (συχνότητα μεταγωγής): Η φέρουσα συχνότητα ( $f_c$ ) είναι η συχνότητα της τριγωνικής ή πριονωτής κυματομορφής υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση.

Αρμονική κατανομή / φάσμα:

Οι αρμονικές εμφανίζονται σε ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας του φέροντος σήματος ( $f_c$ ) και επηρεάζονται από τον δείκτη διαμόρφωσης ( $m_a$ ).

Η τεχνική SPWM τείνει να ωθεί τις σημαντικές αρμονικές συνιστώσες σε συχνότητες γύρω από τη συχνότητα φορέα και τα πολλαπλάσιά της. Οι αρμονικές σε ένα σήμα SPWM εμφανίζονται κυρίως στη φέρουσα συχνότητα ( $f_c$ ) και σε πλευρικές ζώνες γύρω από αυτήν. Αυτές οι πλευρικές ζώνες δημιουργούνται στην  $f_c \pm n f_r$ , όπου το  $n$  είναι ακέραιος αριθμός. Οι αρμονικές ανώτερης τάξης εμφανίζονται γύρω από πολλαπλάσια της φέρουσας συχνότητας ( $2f_c$ ,  $3f_c$  κ.λπ.).

Θέσεις αρμονικών:

Θεμελιώδης συνιστώσα: Εμφανίζεται στο  $f_r$ .

Αρμονικές συχνότητας φέροντος: Εμφανίζονται στις  $f_c$ ,  $2f_c$ ,  $3f_c$  κ.λπ.

Πλευρικές ζώνες: Εμφανίζονται γύρω από κάθε πολλαπλάσιο της φέρουσας συχνότητας ως

$f_c \pm n f_r$ ,  $2f_c \pm n f_r$ ,  $3f_c \pm n f_r$ , κ.λπ.

Βλέποντας ένα παράδειγμα , θα γίνει καλύτερη κατανόηση:



*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

fr (θεμελιώδης συχνότητα): 50 Hz

fc (συχνότητα φέροντος): 1000 Hz

Οι αρμονικές συχνότητες θα βρίσκονται στις εξής θέσεις:

Θεμελιώδης: 50 Hz

Αρμονικές φέροντος:

1000 Hz (fc)

2000 Hz (2\*fc)

3000 Hz (3\*fc)

Συχνότητες πλευρικών ζωνών γύρω από τις συχνότητες φορέα:

1000 Hz  $\pm$  50 Hz (950 Hz και 1050 Hz)

2000 Hz  $\pm$  50 Hz (1950 Hz και 2050 Hz)

3000 Hz  $\pm$  50 Hz (2950 Hz και 3050 Hz)

Παρακάτω παρατηρούνται οι αρμονικές με σαφήνεια. Εκτελώντας έναν μετασχηματισμό Fourier στο σήμα SPWM, σχεδιάζεται το φάσμα συχνοτήτων.

Στο διάγραμμα του φάσματος συχνοτήτων, παρατηρείται:

Μια κορυφή στη θεμελιώδη συχνότητα (50 Hz).

Αιχμές στη συχνότητα του φορέα (1000 Hz) και στις αρμονικές του (2000 Hz, 3000 Hz κ.λπ.).

Πλευρικές ζώνες γύρω από κάθε αρμονική της φέρουσας συχνότητας (950 Hz, 1050 Hz, 1950 Hz, 2050 Hz κ.λπ.).

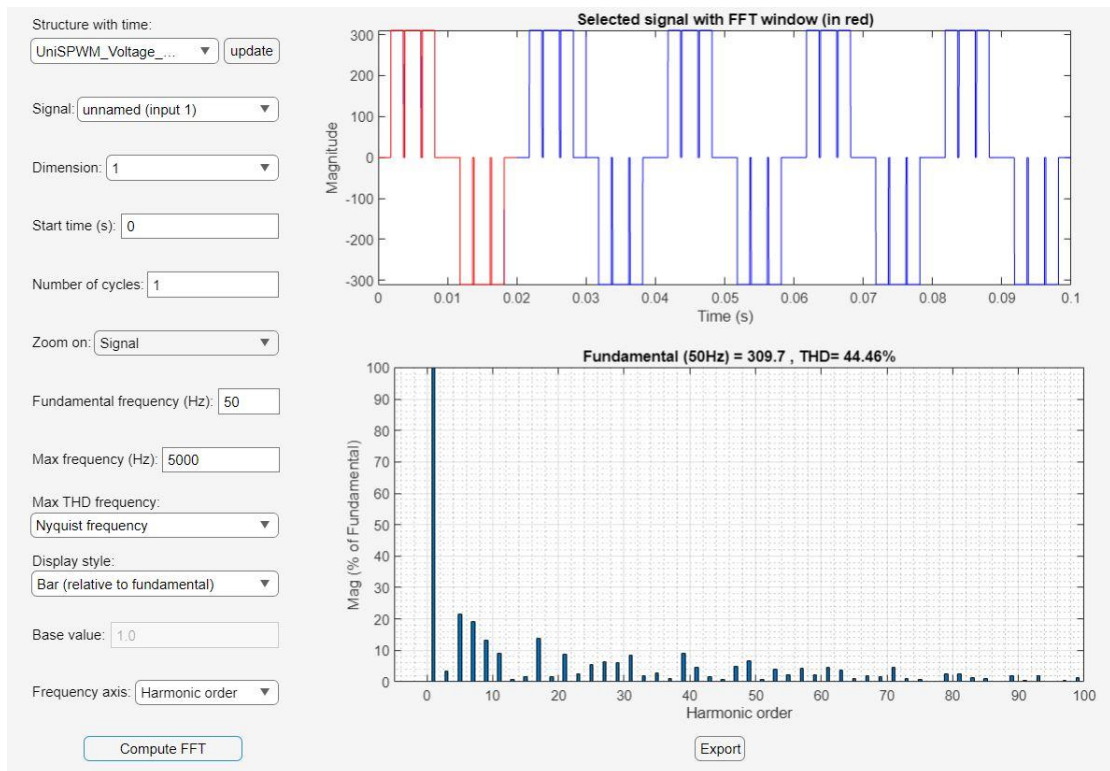
Με την κατανόηση της κατανομής των αρμονικών στην SPWM, μπορείτε να σχεδιάσετε καλύτερα φίλτρα για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων αρμονικών και τη βελτίωση της ποιότητας της κυματομορφής εξόδου.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Μέσω του Simulink και του εργαλείου FFT analyzer βλέπουμε τους χρόνους στο πεδίο των συχνοτήτων για :

- Unipolar spwm

Τάση εξόδου και αρμονικές στο πεδίο των συχνοτήτων:

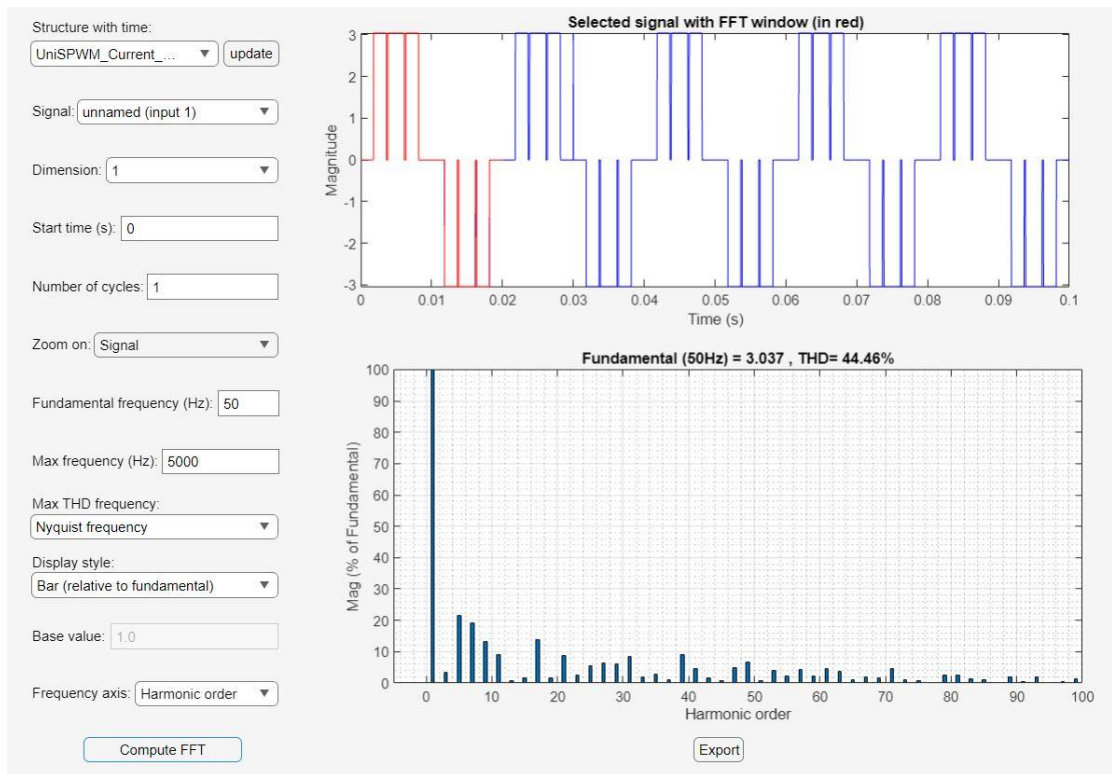


Εικόνα 3.20 Αρμονικές τάσης στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την ανάλυση FFT για σήμα τάσης από ένα σύστημα Unipolar SPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με το θεμελιώδες στα 50 Hz και συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 44.46%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Ρεύμα εξόδου και αρμονικές στο πεδίο των συχνοτήτων :



Εικόνα 3.21 Αρμονικές ρεύματος στην Unipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

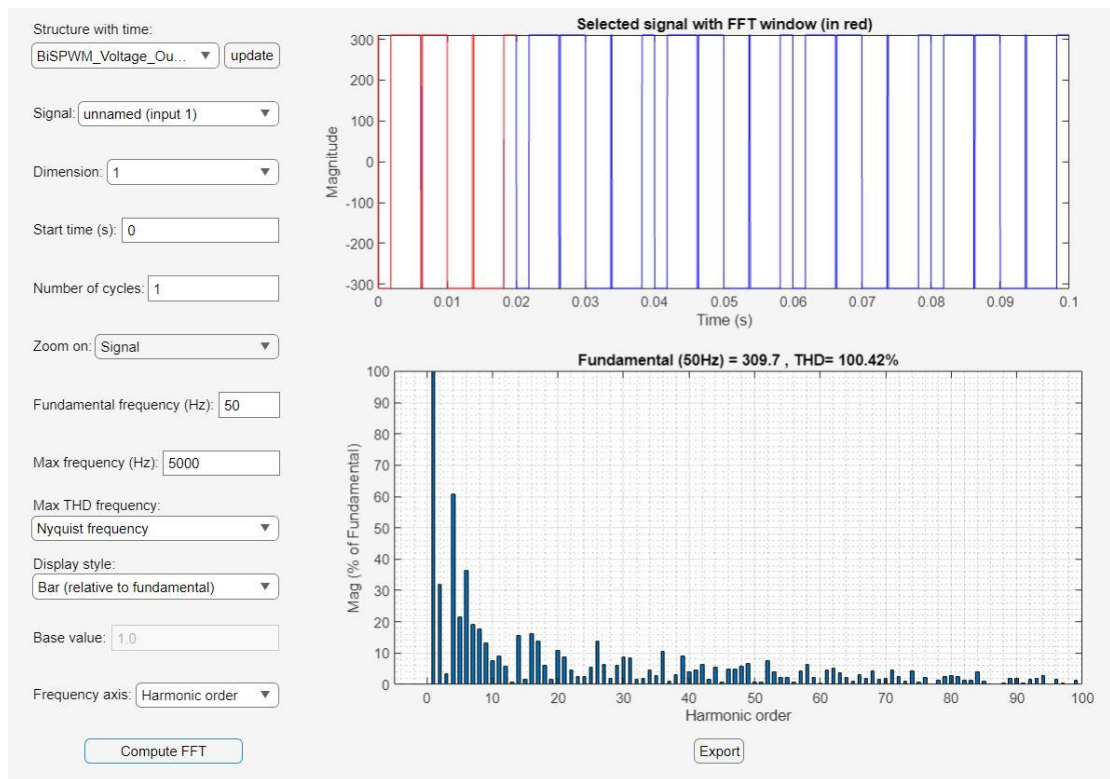
Η παραπάνω εικόνα δείχνει την ανάλυση FFT για σήμα ρεύματος από ένα σύστημα Unipolar SPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με το θεμελιώδες στα 50 Hz και συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 44.46%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Αντίστοιχα μέσω του FFT analyzer, για :

- Bipolar spwm .

Τάση εξόδου και αρμονικές στο πεδίο των συχνοτήτων :

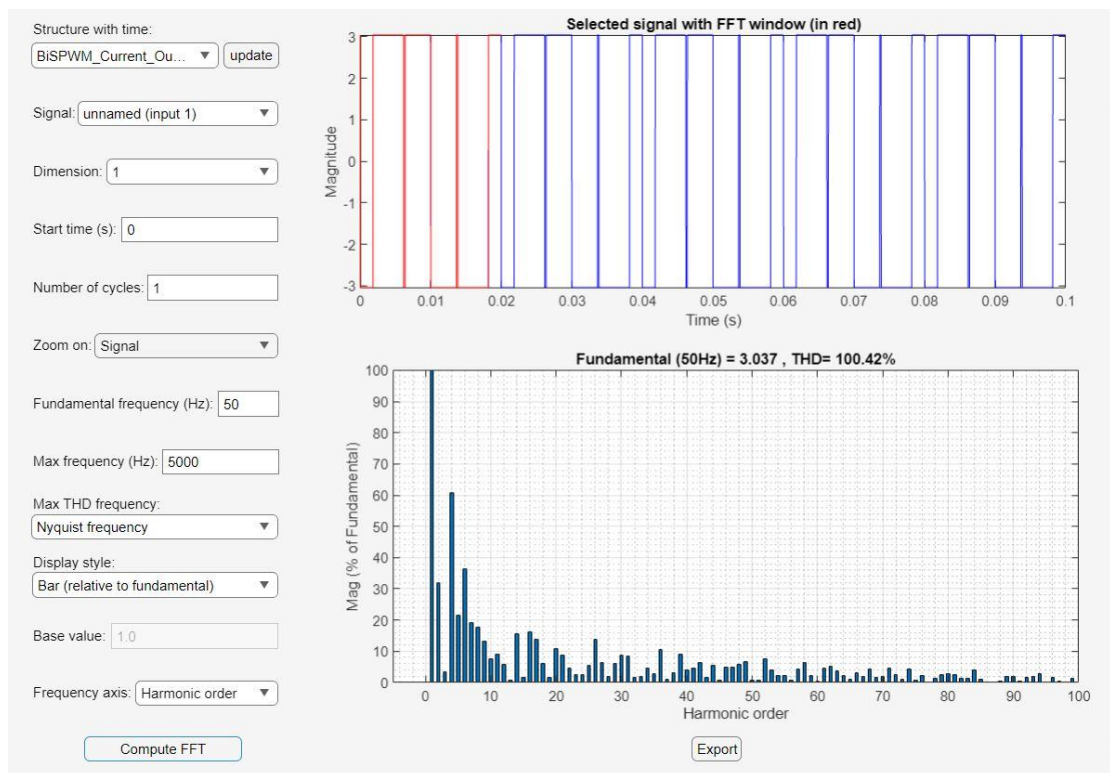


Εικόνα 3.22 Αρμονικές τάσης στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την ανάλυση FFT για σήμα τάσης από ένα σύστημα Bipolar SPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με το θεμελιώδες στα 50 Hz και συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 100.42%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Ρεύμα εξόδου και αρμονικές στο πεδίο των συχνοτήτων :



Εικόνα 3.23 Αρμονικές ρεύματος στην Bipolar\_SPWM χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την ανάλυση FFT για σήμα ρεύματος από ένα σύστημα Bipolar SPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με το θεμελιώδες στα 50 Hz και συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 100.42%.

### 3.5 Διαφορές μεθόδων SVPWM ME SPWM :

Η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM) και η διαμόρφωση εύρους παλμών διανύσματος χώρου (SVPWM) είναι δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές για τη δημιουργία σημάτων διαμόρφωσης εύρους παλμών σε μετατροπείς, ιδίως για εφαρμογές ελέγχου κινητήρων. Ακολουθεί μια λεπτομερής σύγκριση αυτών των δύο μεθόδων. Η βασική αρχή για την SPWM είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί ημιτονοειδή σήματα αναφοράς σε σύγκριση με ένα τριγωνικό φέρον κύμα υψηλής συχνότητας. Στην έξοδό της παράγει σήματα PWM συγκρίνοντας το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς με το τριγωνικό φέρον κύμα, με αποτέλεσμα ένα σήμα PWM που ακολουθεί την ημιτονοειδή κυματομορφή. Αντίθετα η SVPWM είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί μια προσέγγιση διανύσματος χώρου για τη σύνθεση της επιθυμητής τάσης εξόδου. Στην έξοδό της υπολογίζει απευθείας τις απαιτούμενες καταστάσεις μεταγωγής για την προσέγγιση του διανύσματος αναφοράς, δημιουργώντας ένα πιο αποδοτικό και αποτελεσματικό σχήμα διαμόρφωσης. Όσο αφορά τη στρατηγική διαμόρφωσης της SPWM, σαν σήματα αναφοράς έχει ημιτονοειδή σήματα (ένα για κάθε φάση) και σαν σήμα φέροντος έχει τριγωνική( ή πριονωτή) κυματομορφή. Επίσης, στην μεταγωγή της, διαμορφώνει τους διακόπτες με βάση τη σύγκριση των σημάτων αναφοράς και φέροντος. Αντίθετα η SVPWM σαν σήμα αναφοράς χρησιμοποιεί διανυσματική αναπαράσταση της τάσης αναφοράς σε διδιάστατο επίπεδο και στα διανύσματα χώρου χωρίζει το επίπεδο σε τομείς και χρησιμοποιεί τα τρία πλησιέστερα διανύσματα για να σχηματίσει το επιθυμητό διάνυσμα. Για την εναλλαγή, καθορίζει τους χρόνους (εναλλαγής) για τα διανύσματα ώστε να προσεγγίζεται βέλτιστα το διάνυσμα αναφοράς. Σε αποδοτικότητα και, γενικά, σε απόδοση η SPWM,

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

παράγει περισσότερες αρμονικές στη συχνότητα μεταγωγής και στα πολλαπλάσιά της και αξιοποιεί περίπου το 78,5% της τάσης του διαύλου DC. Αντίθετα η SVPWM παράγει λιγότερες αρμονικές και καλύτερη απόδοση αρμονικών λόγω βέλτιστης μεταγωγής και αξιοποιεί περίπου το 90,6% της τάσης του διαύλου DC, παρέχοντας υψηλότερη απόδοση. Για τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος, η SPWM στην πρώτη ακολουθεί την ημιτονοειδή αναφορά, παράγοντας μια πιο απλή ημιτονοειδή έξοδο ενώ η κυματομορφή ρεύματος μπορεί να είναι λιγότερο ομαλή λόγω υψηλότερου αρμονικού περιεχομένου. Για την SVPWM, η κυματομορφή εξόδου οδηγεί σε μια κυματομορφή που προσεγγίζει περισσότερο την ημιτονοειδή αναφορά, με λιγότερη αρμονική παραμόρφωση ενώ η κυματομορφή ρεύματος (τρέχουσα) είναι τυπικά πιο ομαλή και πιο κοντά στην ιδανική ημιτονοειδή μορφή. Στον έλεγχο και στην πολυπλοκότητα προφανώς η SPWM είναι πιο εύκολη στον έλεγχο και την κατανόηση, κατάλληλη για απλούστερες εφαρμογές και έχει χαμηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Αντίθετα η SVPWM προσφέρει μεγαλύτερο έλεγχο της κυματομορφής εξόδου, ιδίως σε τριφασικά συστήματα αλλά έχει υψηλότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα λόγω της ανάγκης για υπολογισμούς διανυσμάτων χώρου.

Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές συναντάμε την SPWM, αφού πολύ συχνά χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η απλότητα είναι το κλειδί, όπως οι βασικές κινητήριες μονάδες και τα τροφοδοτικά. Ενώ η SVPWM προτιμάται σε εφαρμογές υψηλών επιδόσεων που απαιτούν αποδοτικό και ακριβή έλεγχο, όπως προηγμένες μονάδες κίνησης κινητήρων και μετατροπείς ηλεκτρικών οχημάτων.

Χαρακτηριστικό	SPWM	SVPWM
Βασική Αρχή	Ημιτονοειδές σήμα αναφοράς + τριγωνικό φέρον σήμα	Προσέγγιση διανυσματικού χώρου
Στρατηγική Διαμόρφωσης	Διακόπτης βασισμένος σε σύγκριση	Υπολογισμός διανυσματικού χώρου
Αποδοτικότητα	Χαμηλότερη (78.5% αξιοποίηση τάσης του DC)	Υψηλότερη (90.6% αξιοποίηση τάσης του DC)
Αρμονικές	Υψηλότερες αρμονικές	Χαμηλότερες αρμονικές
Αξιοποίηση Τάσης	Χαμηλότερη	Υψηλότερη
Πολυπλοκότητα	Χαμηλότερη πολυπλοκότητα	Υψηλότερη πολυπλοκότητα
Εφαρμογές	Απλοί κινητήρες, τροφοδοτικά	Κινητήρες υψηλής απόδοσης, ηλεκτρικά οχήματα

Πίνακας 3.3, Διαφορές Spwm με Svwm

Συμπερασματικά, ενώ η SPWM είναι απλούστερη και ευκολότερη στην υλοποίηση, η SVPWM παρέχει καλύτερες επιδόσεις όσον αφορά την απόδοση και τη μείωση των αρμονικών, καθιστώντας την κατάλληλη για πιο απαιτητικές εφαρμογές.

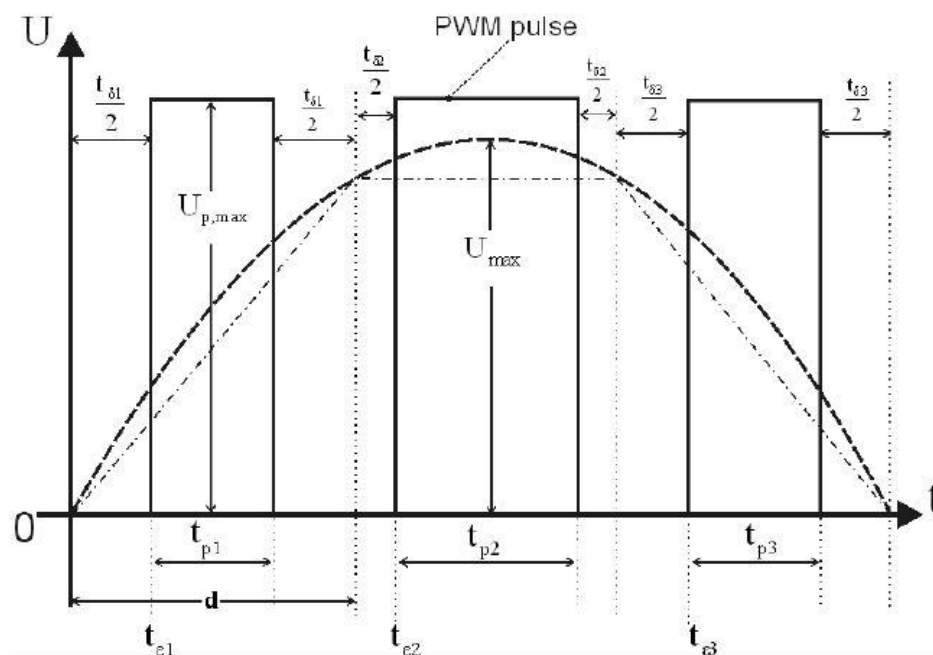
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : Διαμόρφωση Εύρους Παλμών ίσων περιοχών – Equal Areas PWM (EAPWM)

### 4.1 Γενικά

Το EAPWM (Equal Areas Pulse Width Modulation) είναι μια μέθοδος PWM που χρησιμοποιεί το θεώρημα των ίσων εμβαδών για να προσδιορίσει τα πλάτη των παλμών. Η βασική ιδέα είναι να εξασφαλιστεί ότι η επιφάνεια κάτω από το σήμα PWM είναι ίση για κάθε περίοδο, ανεξάρτητα από την τιμή του επιθυμητού σήματος εξόδου. Κατά τον υπολογισμό των πλάτων των παλμών στο EAPWM, χρησιμοποιούνται αναλυτικές εξισώσεις που εξασφαλίζουν την ισορροπία των εμβαδών των παλμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός σήματος PWM με μειωμένη αρμονική περιεκτικότητα και βελτιωμένη ποιότητα εξόδου. Το EAPWM παρέχει έναν απλό και αποδοτικό τρόπο για τον έλεγχο του σήματος PWM χωρίς την ανάγκη για πολύπλοκους υπολογισμούς ή περίπλοκες μεθόδους. Επίσης, επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ακρίβειας ελέγχου και χαμηλής αρμονικής περιεκτικότητας στο σήμα εξόδου.

Το EAPWM είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα εξόδου, όπως σε αντιστροφείς τάσης για κινητήρες AC ή σε ηλιακούς μετατροπείς.

Ένα ημιτονοειδές σήμα τάσης μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας ευθύγραμμα τμήματα που ορίζουν διαστήματα με διάρκεια,  $d$ .



Εικόνα 4.1 , Προσέγγιση του ημιτονοειδούς σήματος τάσης (διακεκομμένη καμπύλη) με ευθύγραμμα τμήματα (κουκκίδες)

### 4.2 Εξισώσεις EAPWM

Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για την παραγωγή ακριβών παλμών EAPWM . Στο EAPWM θα μελετηθούν μόνο περιττοί αριθμοί ανά μισό κύκλο . Ο λόγος για αυτό είναι ότι εφόσον η μέγιστη αναγκαιότητα για το πλάτος απαιτείται στο μέσο του ημιτονοειδούς κύματος ( $\pi/2$  και  $3\pi/2$  ), τότε ο κεντρικός παλμός πρέπει να υπάρχει στον παλμό PWM για να παράγει το απαραίτητο πλάτος . Χρησιμοποιώντας το σχήμα 2 και

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

υποθέτοντας ότι το μισό ημιτονοειδές σήμα μπορεί να χωριστεί σε πέντε ίσα διαστήματα (με διάρκεια  $d$ ), ο ενεργός χρόνος παλμού  $t_p$  (δηλαδή  $t_{p2}$  για το 2<sup>ο</sup> διάστημα) μπορεί να βρεθεί, ξεκινώντας με την υπόθεση ότι η περιοχή του παλμού (που ορίζεται από σημεία ABCD) πρέπει να είναι ίση με την περιοχή που ορίζεται από τα σημεία EFGH. Έτσι, χρησιμοποιώντας τα ολοκληρώματα των περιοχών:

Θα πρέπει να είναι ίσα τα δυο εμβαδά:

$$E_{ABCD} = E_{EFGH}$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\omega \times t_{p2} \times U_{pmax} = \int_{\omega d}^{2\omega d} U_{max} \times \sin(\omega t) d\omega t$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης οδηγεί σε:

$$t_{p2} = \frac{U_{max}}{\omega \times U_{max}} \times (\cos \omega d - \cos 2\omega d)$$

Σε γενικευμένη μορφή, ο χρόνος ενεργού παλμού  $t_p$  σε  $J$  διάστημα θα είναι:

$$t_{pJ} = \frac{U_{max}}{\omega \times U_{max}} \times \{ \cos[(J-1) \times \omega d] - \cos(J\omega d) \}$$

όπου  $J$  εκφράζει τον αριθμό των διαστημάτων (ή ισοδύναμα τον αριθμό παλμών  $A_p$ ) που αντιστοιχεί σε μισή περίοδο  $T/2$ . Έτσι,  $A_p$  και  $d$  σχετίζονται ως εξής:

$$A_p = \frac{0.5T}{d}$$

Στη συνέχεια η συχνότητα μεταγωγής σε έναν πλήρη θεμελιώδη κύκλο υπολογίζεται ως:

$$f_s = \frac{1}{d} = \frac{2A_p}{T}$$

[Εξισώσεις χρόνου:

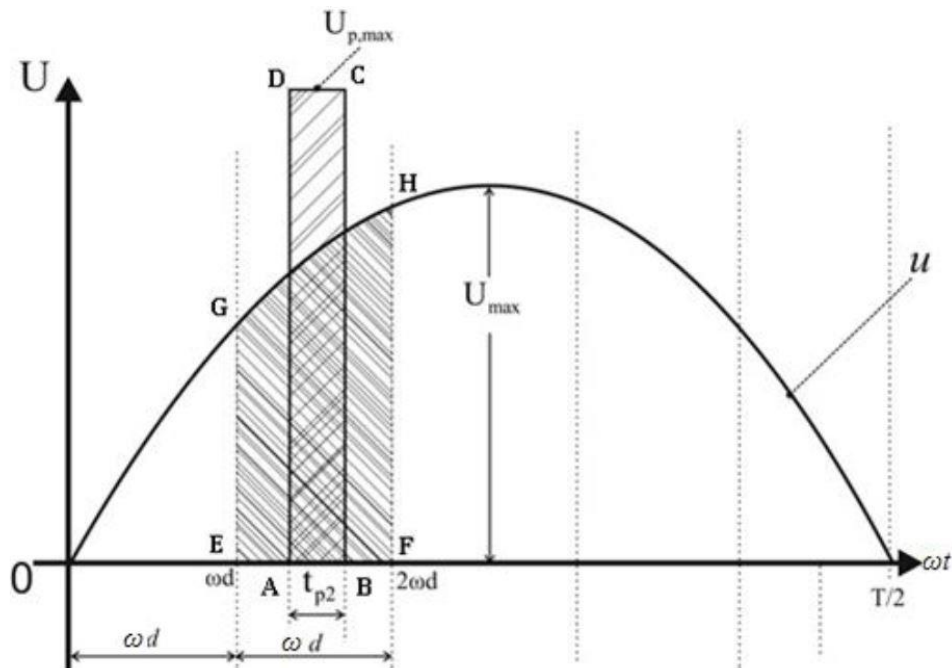
$$\text{Αρχή ή έναυση: } t_{eJ} = (J-1) \times d + \frac{1}{2} \times (d - t_{pJ})$$

$$\text{Έναυση και σβέση κάθε παλμού: } t_k = t_{eJ} + \left[ \frac{1+(-1)^k}{2} \right] \times t_{pJ}$$

Ωστόσο, η συχνότητα μεταγωγής φάσης σε ασυνεχή σχήματα PWM διαμορφώνεται μόνο στο 50% του βασικού κύκλου (εδώ μπορεί να εκφραστεί ως  $f_p = \frac{A_p}{T}$  αφού μόνο ένα σκέλος φάσης διαμορφώνεται). Ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας ορίζεται ως  $m_f = \frac{f_s}{f_1}$  και ο λόγος διαμόρφωσης πλάτους ορίζεται ως  $m_a = \frac{U_{max}}{U_{pmax}}$ . Για ένα,  $A_p$ , υπάρχει κεντρικός παλμός στις θέσεις  $T/4$ ,  $3T/4$ ,  $5T/4$ ,  $7T/4$  κλπ όπου υπάρχουν στα πλάγια  $(A_p - 1)/2$  συμμετρικοί παλμοί. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε  $t_{pJ}$  (ενεργός χρόνος) και  $t_{eJ}$  (χρόνος έναυσης) αντίστοιχα. [23]



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 4.2 , Δημιουργία ακριβούς παλμού EAPWM-απεικόνιση EAPWM (Πηγή : [24] )

### 4.3 Υπολογισμός ολικής αρμονικής παραμόρφωσης

Η ολική αρμονική παραμόρφωση της τάσης εκράζεται (ποσοστό) με την ακόλουθη έκφραση :

$$THD_v = 100 \sqrt{\left(\frac{U_{rms}}{U_{1,rms}}\right)^2 - 1}$$

Για να υπολογίσουμε το THD<sub>v</sub> πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή rms του παλμικού συστήματος, U<sub>rms</sub> καθώς και την τιμή rms της 1<sup>ης</sup> αρμονικής παλμικής εκκίνησης, U<sub>1,rms</sub>. Για U<sub>rms</sub> με A<sub>p</sub>=3 :

$$U_{rms} = U_{dc} \sqrt{\frac{2}{T}(2tp1 + tp2)}$$

Για A<sub>p</sub>= 5 :

$$U_{rms} = U_{dc} \sqrt{\frac{2}{T}(2tp1 + 2tp2 + tp3)}$$

Από το [25] παρατηρούμε ότι ο Πατεράκης καταλήγει στο παρακάτω :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=3,5,7...}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}$$

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

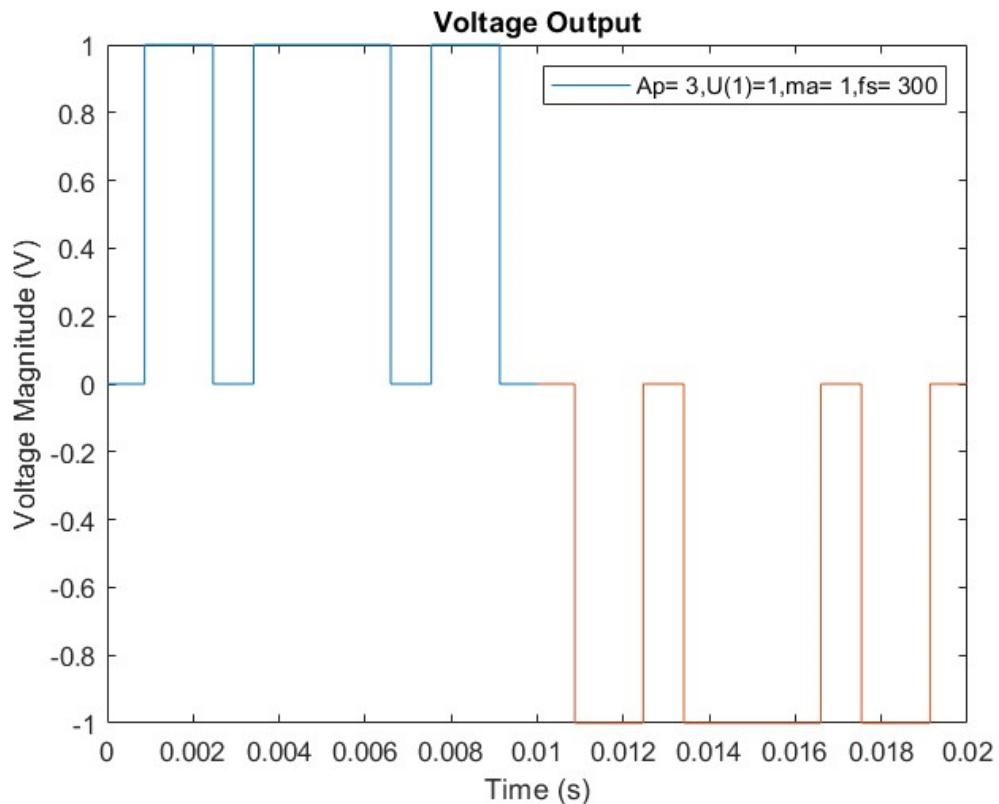
## 4.4 Πειραματικά αποτελέσματα

### 4.4.1 Υλοποιώντας μέσω Matlab

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και υλοποιώντας τον κώδικα στο MATLAB βλέπουμε τις εξής κυματομορφές :

Για  $A_p = 3$

Η τάση εξόδου είναι :

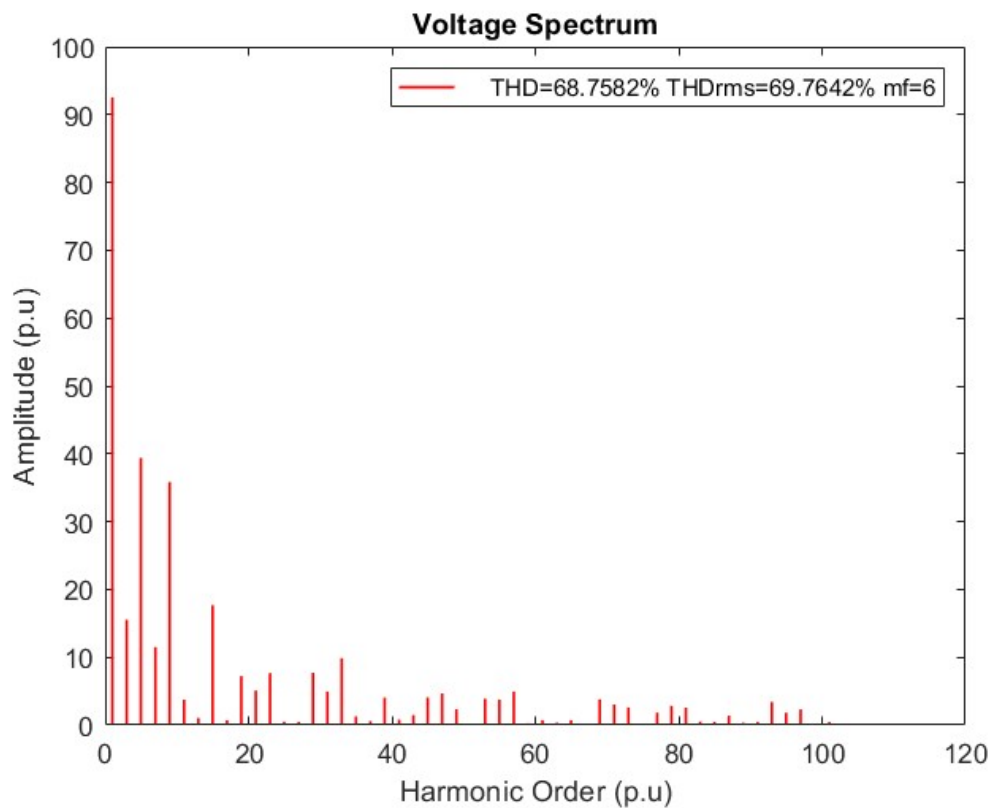


Εικόνα 4.3 , Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=3$  και  $f_s=300\text{Hz}$

Η εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών. Όπως φαίνεται ο αριθμός των παλμών είναι 3 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 300Hz. .

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Το αντίστοιχο THD , όπως βλέπουμε 69,76% :



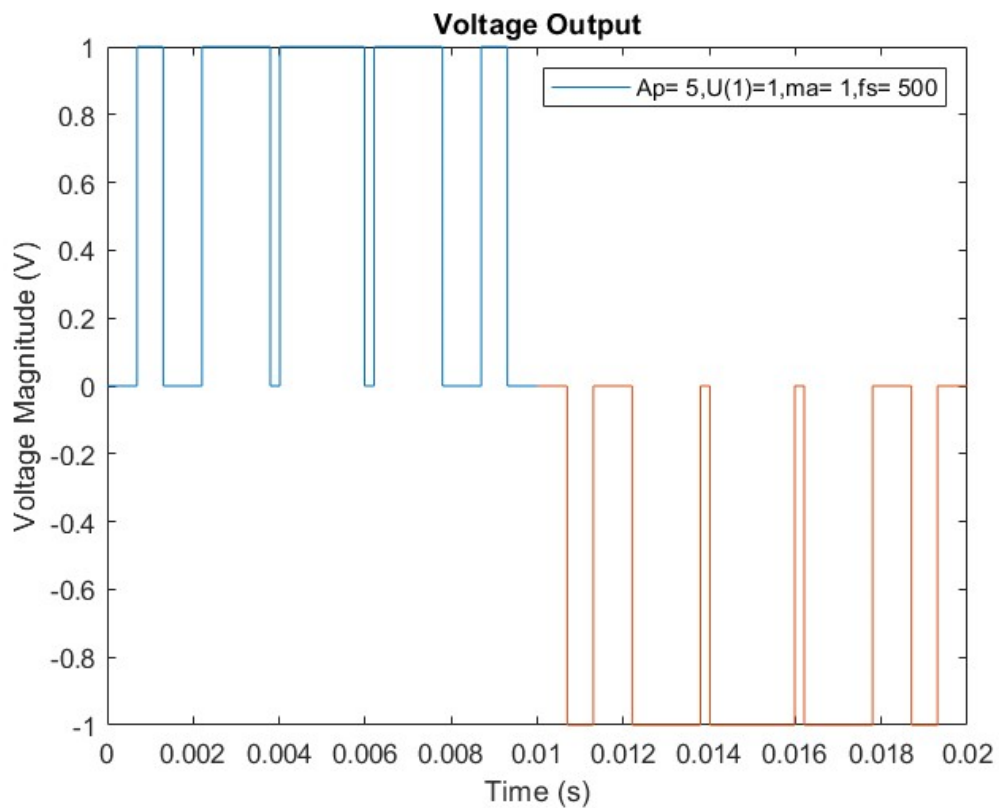
Εικόνα 4.4 , Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=3$  και  $f_s=300\text{Hz}$

Το διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών στην μέθοδο EAPWM. Όπως παραπάνω ο αριθμός των παλμών είναι 3 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 300Hz. Με το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 69.76%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Για  $A_p = 5$

Η τάση εξόδου είναι :

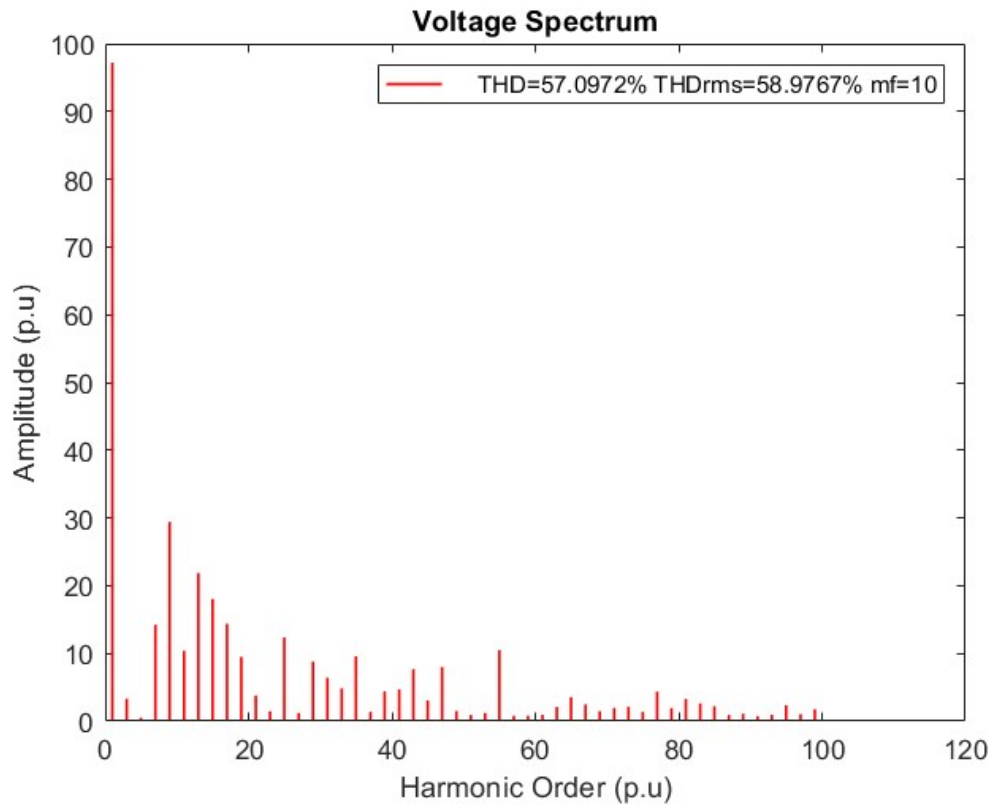


Εικόνα 4.5 , Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=5$  και  $f_s=500\text{Hz}$

Η εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών. Όπως φαίνεται ο αριθμός των παλμών είναι 5 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 500Hz. .

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Το αντίστοιχο THD όπως βλέπουμε 58,97% :



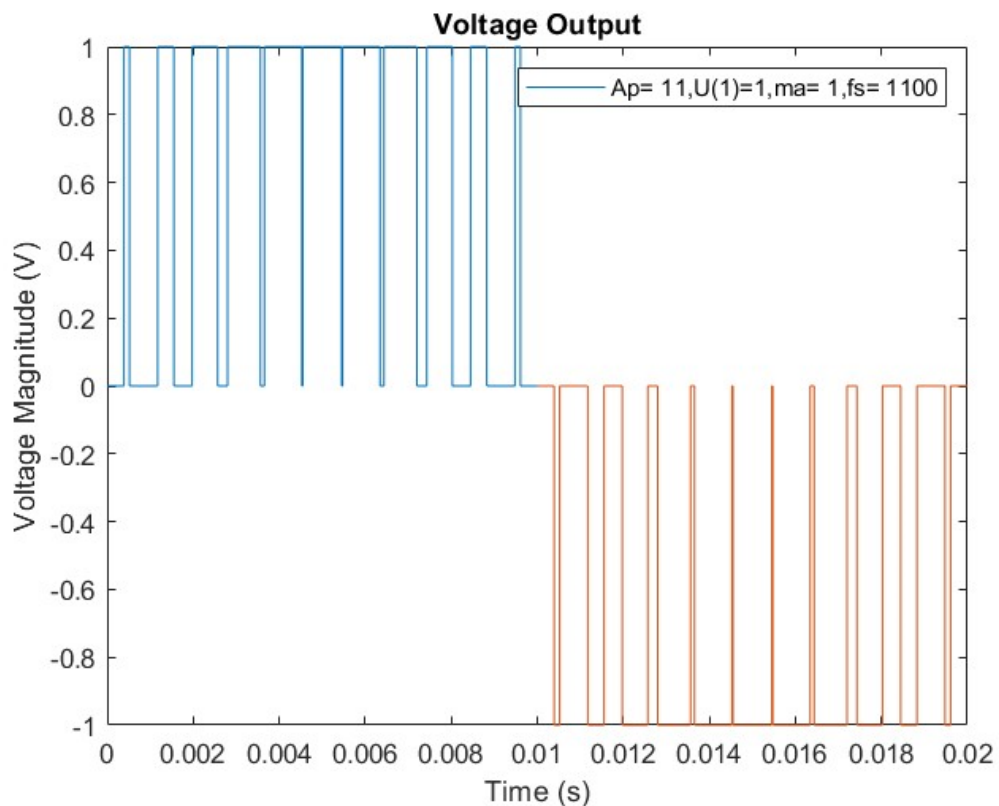
Εικόνα 4.6 , Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=5$  και  $f_s=500\text{Hz}$

Το διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών στην μέθοδο EAPWM. Όπως παραπάνω ο αριθμός των παλμών είναι 5 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 500Hz. Με το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 58,97%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Για  $A_p = 11$

Η τάση εξόδου είναι :

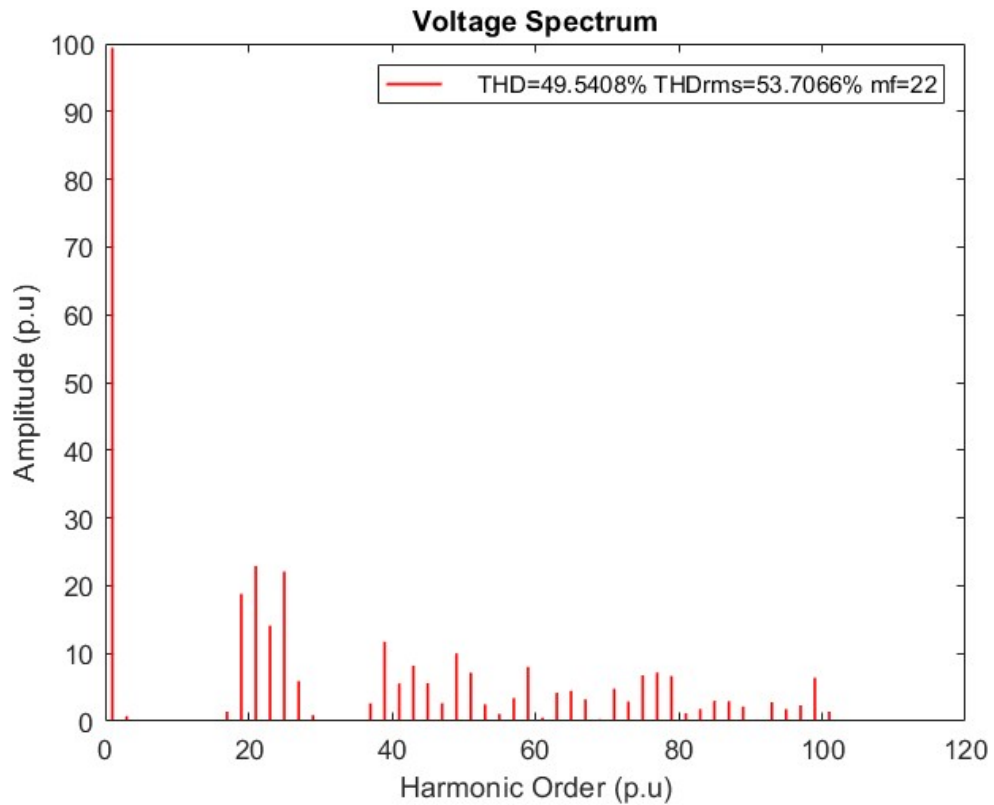


Εικόνα 4.7 , Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=11$  και  $f_s=1100\text{Hz}$

Η εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών. Όπως φαίνεται ο αριθμός των παλμών είναι 11 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 1100Hz. .

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Το αντίστοιχο THD όπως βλέπουμε 53,70% :



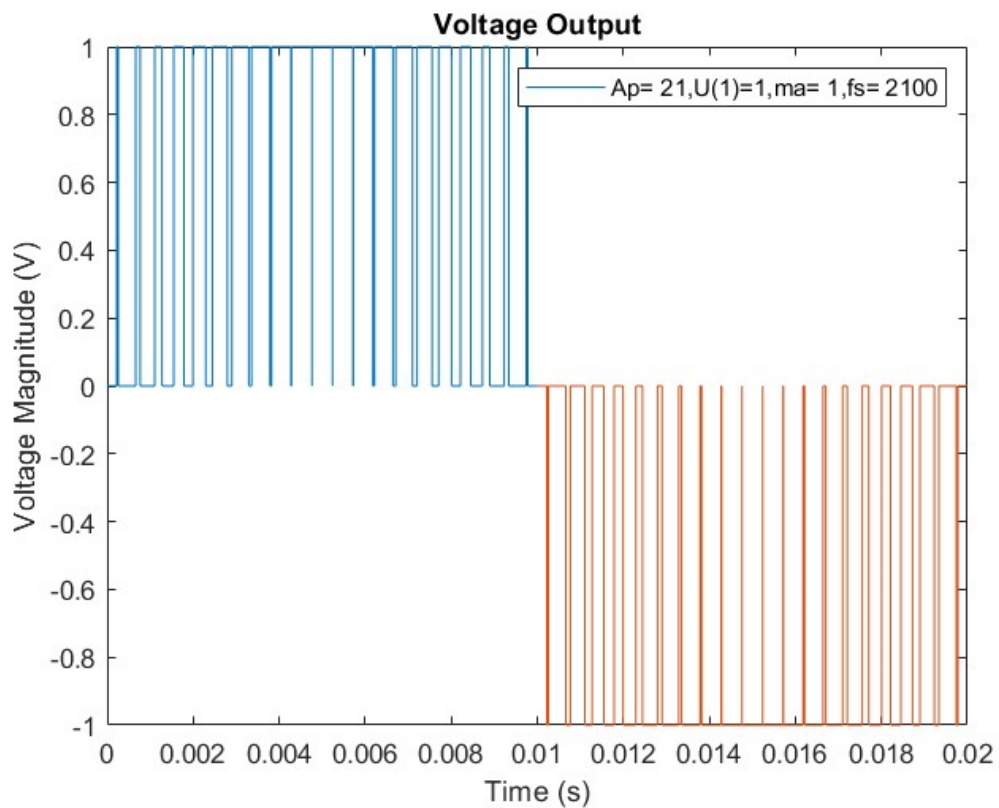
Εικόνα 4.8 , Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=11$  και  $f_s=1100\text{Hz}$

Το διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών στην μέθοδο EAPWM. Όπως παραπάνω ο αριθμός των παλμών είναι 11 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 1100Hz. Με το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 53,70%.

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Για  $A_p = 21$

Η τάση εξόδου είναι :



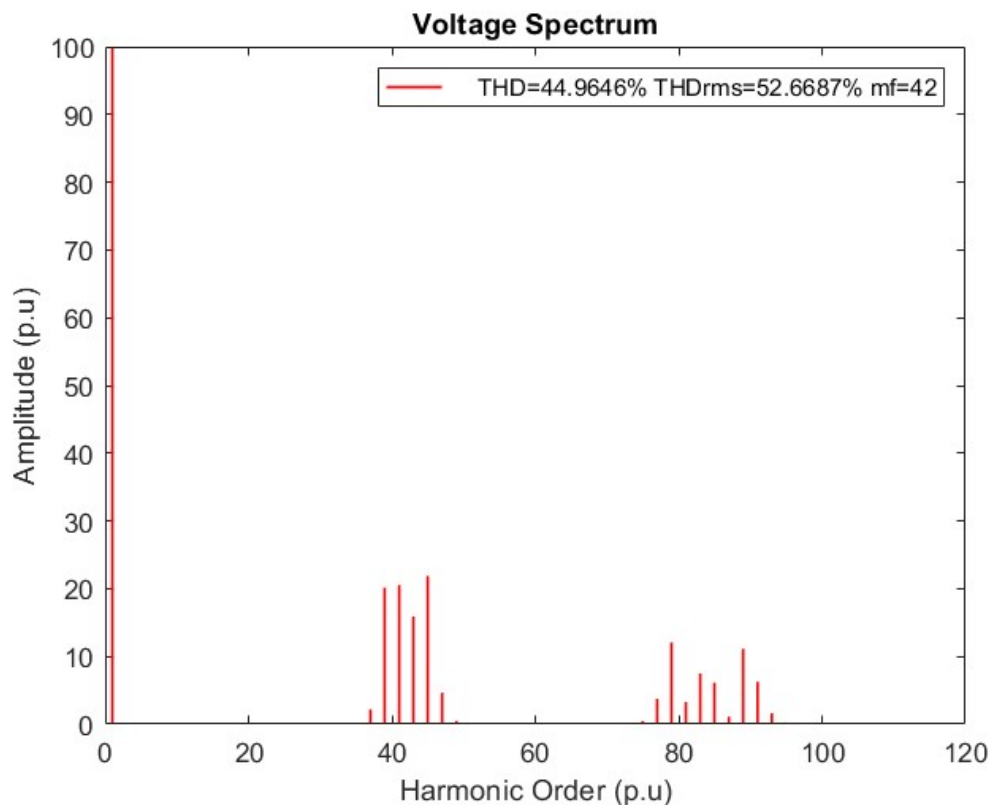
Εικόνα 4.9 , Περιβάλλον MATLAB : Κυματομορφές τάσης εξόδου για :  $A_p=21$  και  $f_s=2100\text{Hz}$

Η εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών. Όπως φαίνεται ο αριθμός των παλμών είναι 21 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 2100Hz. .



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Το αντίστοιχο THD όπως βλέπουμε 52,66% ::



Εικόνα 4.10 , Περιβάλλον MATLAB : THD - Αρμονικές για :  $A_p=21$  και  $f_s=2100\text{Hz}$

Το διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών στην μέθοδο EAPWM. Όπως παραπάνω ο αριθμός των παλμών είναι 21 ενώ η συχνότητα μεταγωγής είναι στα 2100Hz. Με το συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 52,66%.

Συμπερασματικά, είναι εμφανές ότι όσο μεγαλώνω τον αριθμό των παλμών ( $A_p$ ) ( άρα μεγαλώνω και την συχνότητα μεταγωγής [ $f_s$ ] ) μειώνεται η αρμονική παραμόρφωση (THD). Φαίνεται να πετυχαίνεται ο 'στόχος', που είναι να μειωθεί το THD, οπότε ένα μεγάλο θετικό της διαδικασίας καλύπτεται .

Παρακάτω βλέπουμε τελικά τον πίνακα με τα διαφορετικά  $A_p$ :

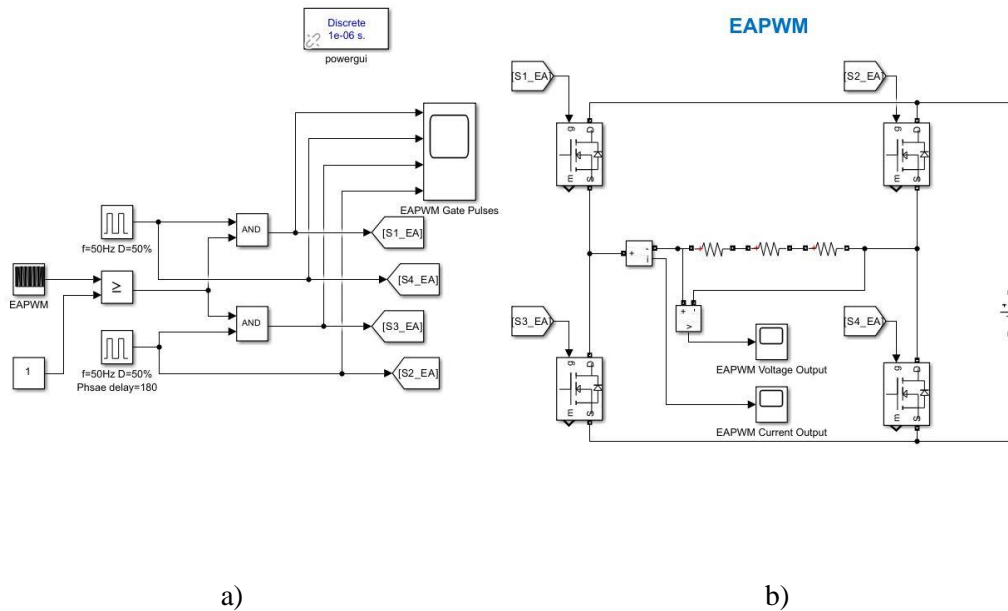
$A_p$	THD(%)	ma	$f_s$
3	69.76	1	300
5	58.97	1	500
11	53.7	1	1100
<b>21</b>	<b>52.66</b>	<b>1</b>	<b>2100</b>

Πίνακας 4.1, Ενδεικτικά-τελικά αποτελέσματα της μεθόδου EAPWM για διαφορετικούς αριθμούς παλμών

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

#### 4.4.2 Υλοποιώντας μέσω Simulink

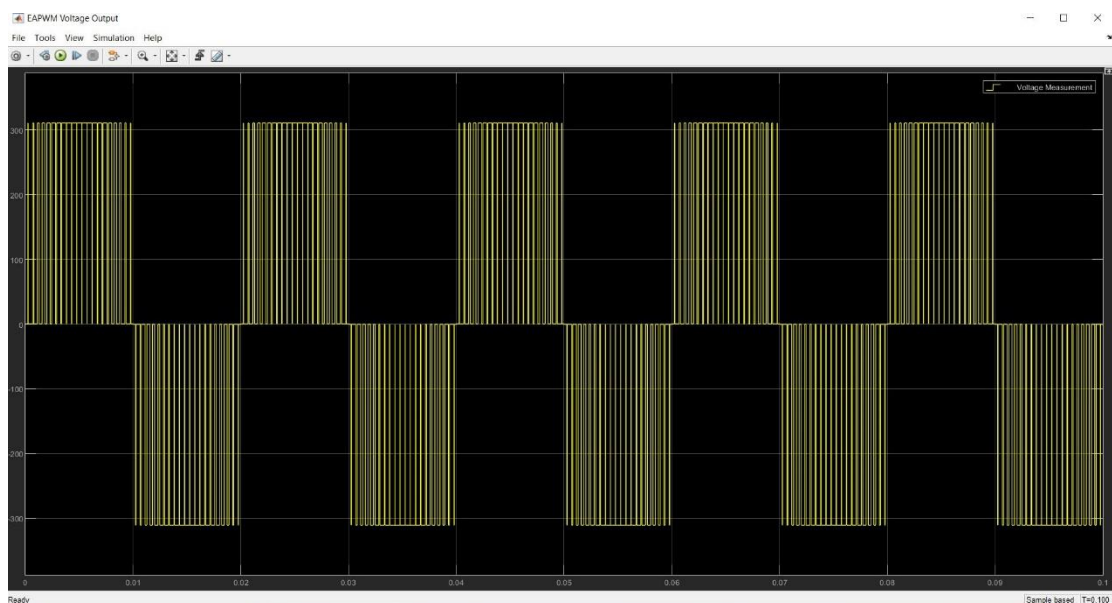
Υλοποιώντας τα αντίστοιχα κυκλώματα στο Simulink αρχικά για το κύκλωμα του EAPWM (αριστερά βλέπουμε το κύκλωμα του EAPWM , ενώ δεξιά ο Inverter στον οποίο γίνονται οι εφαρμογές ) :



Εικόνα 4.11 Περιβάλλον Simulink a) για κύκλωμα EAPWM b) Ο αντίστοιχος inverter στον οποίο γίνεται εφαρμογή του EAPWM

Η εικόνα δείχνει ένα κύκλωμα για τη δημιουργία EAPWM. Στο αριστερό μέρος, ένα κύμα που έχει υλοποιηθεί μέσω του κώδικα του Matlab, για τη δημιουργία των παλμών EAPWM, που δίνονται στους διακόπτες του κυκλώματος (S1, S2, S3, S4). Στο δεξί μέρος, οι διακόπτες αυτοί συνδέονται σε ένα κύκλωμα γέφυρας για την παραγωγή εξόδου τάσης και ρεύματος EAPWM.

Η τάση εξόδου (voltage output) μέσω του score παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου, στο παρακάτω :

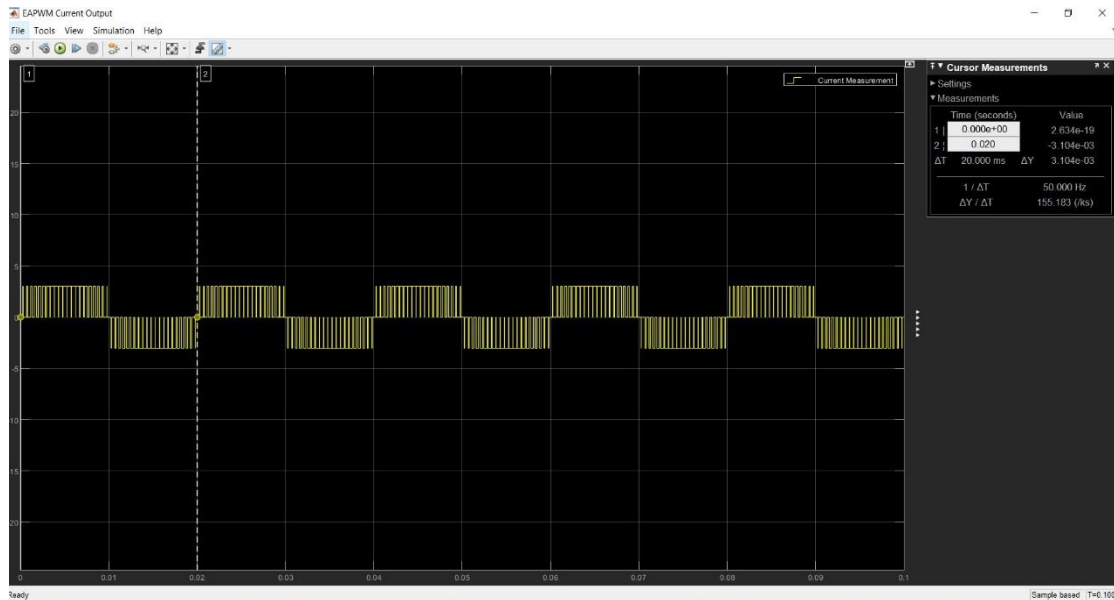


Εικόνα 4.12 Περιβάλλον Simulink για EAPWM, Κυματομορφές τάσης εξόδου

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την έξοδο τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Η κυματομορφή παρουσιάζει χαρακτηριστικές μεταβολές πολικότητας, με εναλλαγή της τάσης μεταξύ θετικών και αρνητικών τιμών, όπως συνηθίζεται σε συστήματα PWM. Οι πολλαπλοί παλμοί ανά ημιπερίοδο εξυπηρετούν τη μείωση των αρμονικών και τον έλεγχο της εξόδου του inverter.

Το ρεύμα εξόδου (current output) μέσω του scope παρουσιάζεται στο πεδίο του χρόνου, στο παρακάτω :

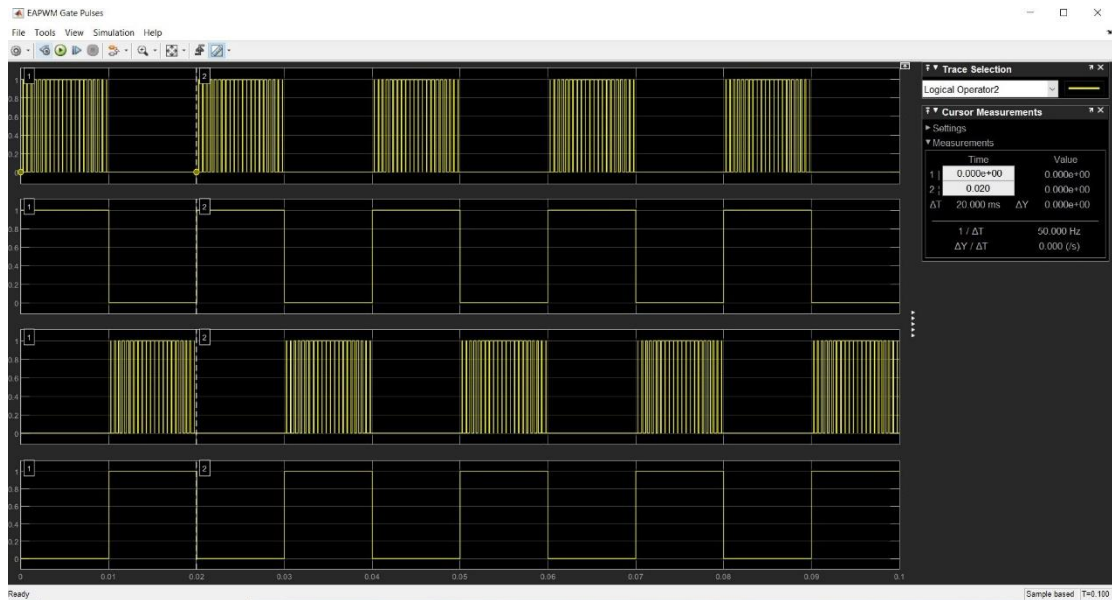


Εικόνα 4.13 Περιβάλλον Simulink για EAPWM , Κυματομορφές ρεύματος εξόδου

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την έξοδο ρεύματος ενός συστήματος EAPWM. Η κυματομορφή του ρεύματος δείχνει την τυπική μορφή ενός διαμορφωμένου σήματος PWM με εναλλαγές μικρών παλμών γύρω από το μηδέν, που αντιστοιχούν στην εναλλασσόμενη τάση του inverter. Οι πολλαπλοί παλμοί ανά ημιπερίοδο εξυπηρετούν τον έλεγχο του ρεύματος και τη μείωση των αρμονικών στη συνολική έξοδο. Η συχνότητα του σήματος είναι στα 50 Hz, όπως φαίνεται από τις μετρήσεις.

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

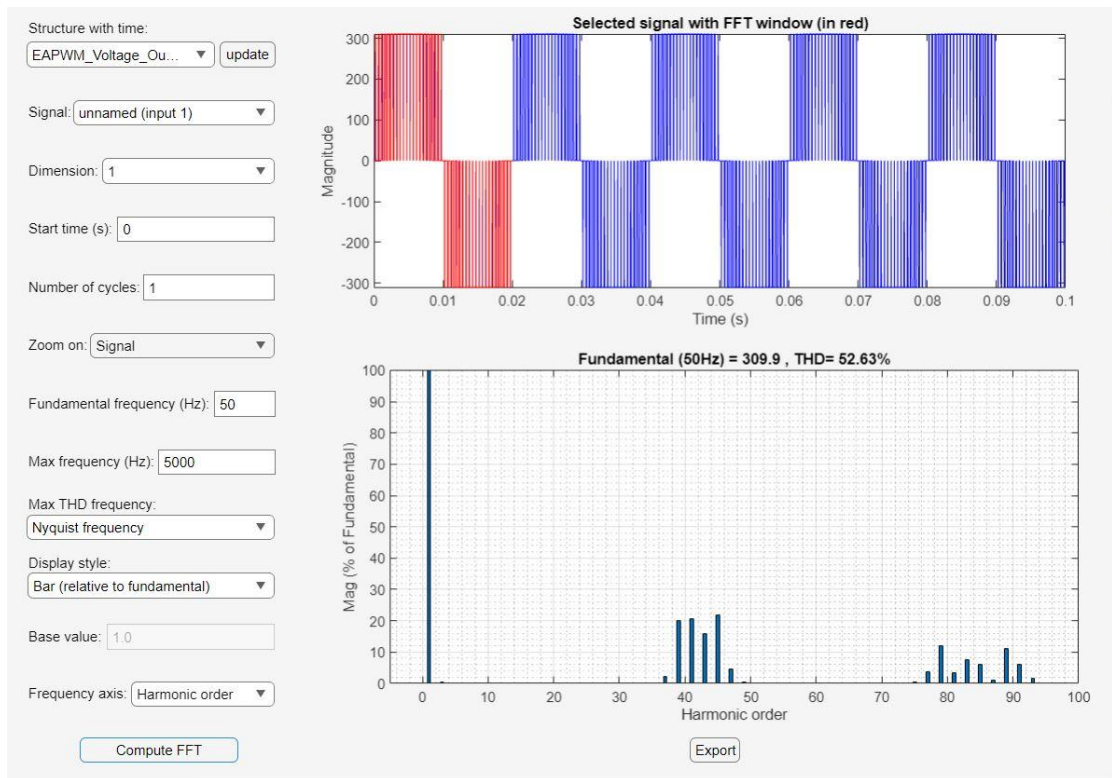
Από τον κώδικα του MATLAB δίνω του χρόνους [ySim , xSim ] στο block του EAPWM και οι παλμοί στα αντίστοιχα gates μου παρουσιάζονται ως : Οι παλμοί του BI\_SPWM και χρόνοι στα αντίστοιχα gates παρουσιάζονται στο πεδίο του χρόνου, ως :



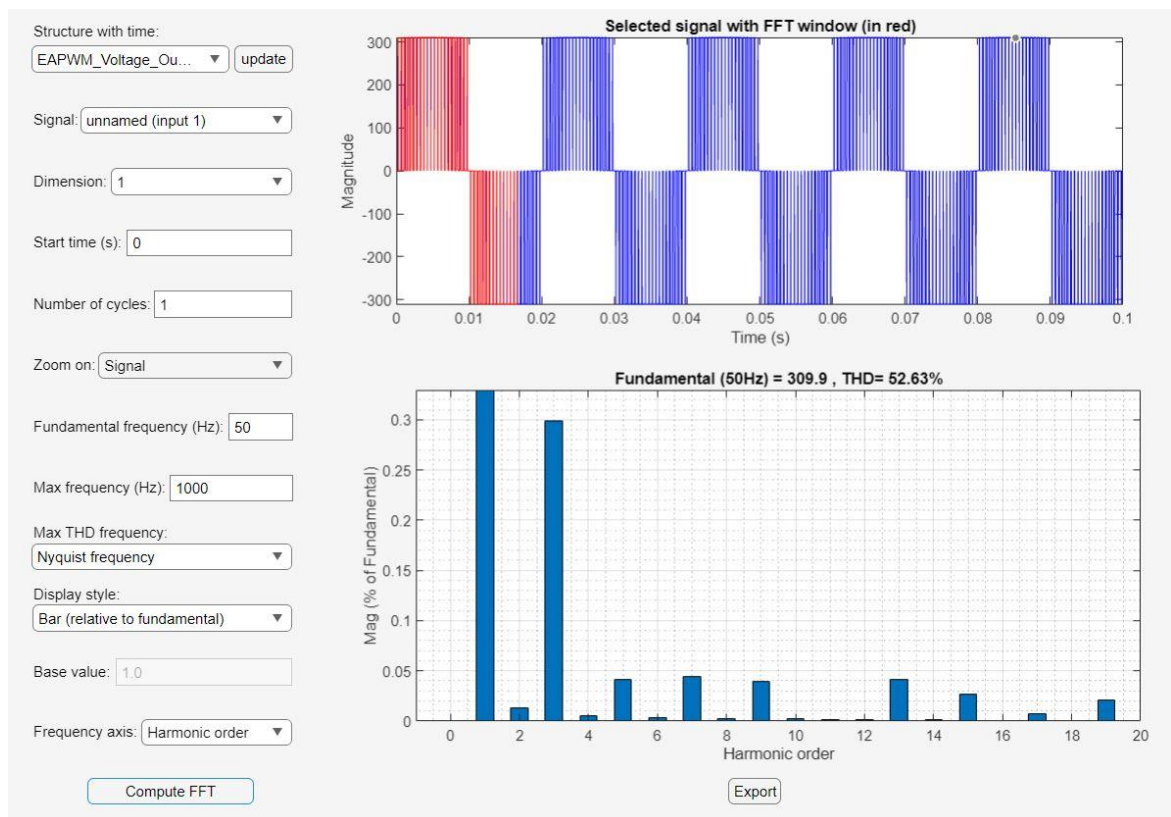
Εικόνα 4.14 Περιβάλλον Simulink για EAPWM, Κυματομορφές κυμάτων & κυματομορφές παλμών

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Κάνοντας FFT analyze στο EAPWM voltage output :



Εικόνα 4.15 Αρμονικές τάσης στην EAPWM, χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink

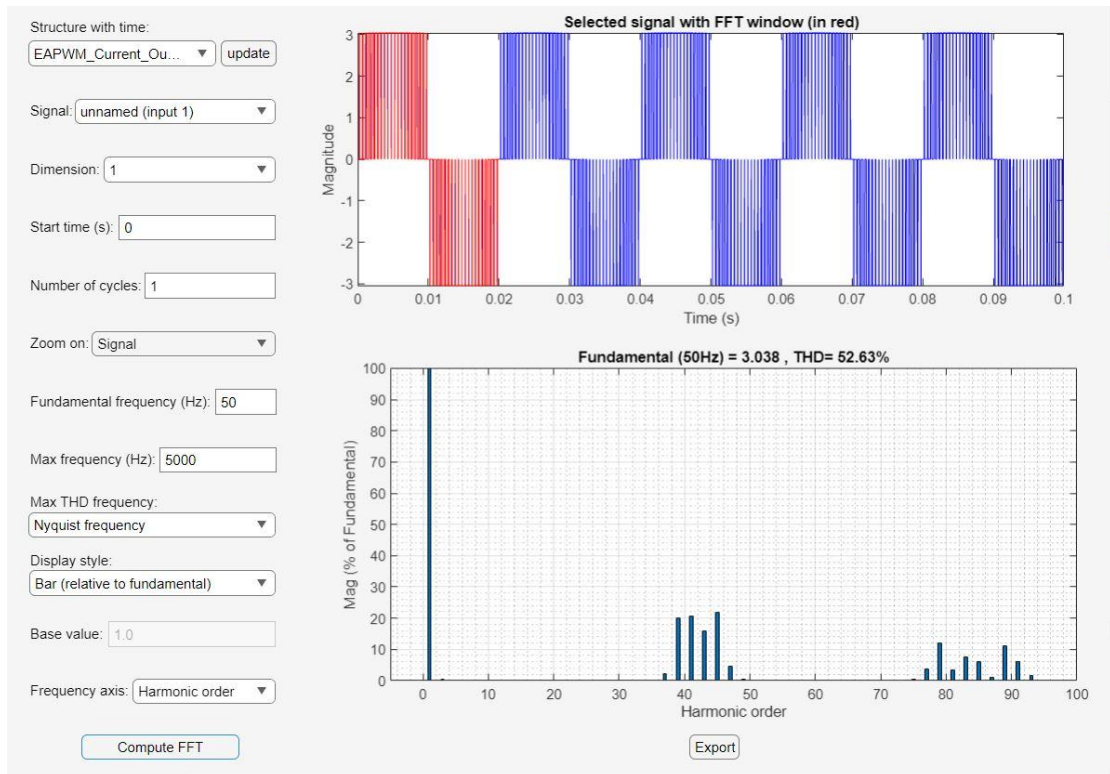


Εικόνα 4.15 β

Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.

Οι δυο παραπάνω εικόνες δείχνουν την ανάλυση FFT για σήμα τάσης από ένα σύστημα EAPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 52.63%.

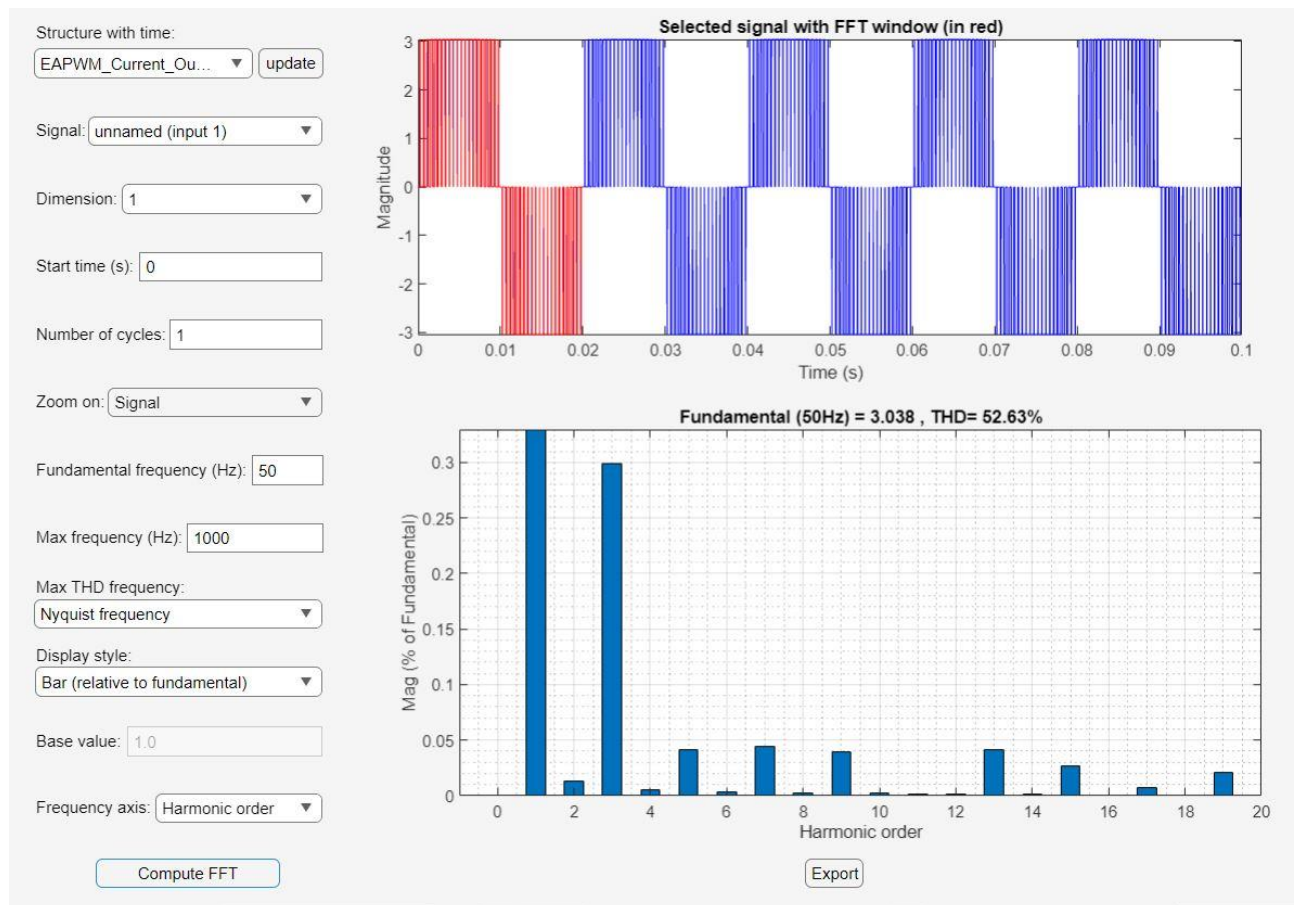
Κάνοντας FFT analyze στο EAPWM current output :



Εικόνα 4.16 α, Αρμονικές ρεύματος στην EAPWM, χρησιμοποιώντας το FFT analyzer του Simulink



Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.



Εικόνα 4.16 β

Οι δυο παραπάνω εικόνες δείχνουν την ανάλυση FFT για σήμα ρεύματος από ένα σύστημα EAPWM. Το επάνω διάγραμμα απεικονίζει το επιλεγμένο σήμα στον χρόνο, με κόκκινη ένδειξη για το παράθυρο ανάλυσης. Το κάτω διάγραμμα δείχνει το φάσμα αρμονικών με συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) 52.63%.

Άρα επαληθεύω :

Παρατηρούμε ότι είναι πολύ κοντά το THD<sub>rms</sub> που έβγαλα στο MATLAB = 52.66%, με αυτό που βγάξω στο Simulink 52.63 % . Άρα, η πειραματική διαδικασία μέσω Simulink επαληθεύεται . Όσο αφορά τις αρμονικές, βλέπουμε ότι εμφανίζονται πολύ πιο 'πίσω' (γύρω στις 40) (Εικόνα 4.16 α) και γενικά ξέρουμε ότι όσο πιο μακριά εμφανίζονται οι αρμονικές τόσο πιο μικρό – οικονομικό το φίλτρο που θα χρειαστεί για να τις περιορίσει. Συμπερασματικά η διαδικασία για την μείωση του THD φαίνεται να αποδίδει.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα**

### **5.1 Σύγκριση ως προς την υπολογιστική προσπάθεια**

Η PWM ίσης περιοχής είναι απλούστερη από άποψη υπολογιστικής προσπάθειας σε σύγκριση με την ημιτονοειδή PWM. Στην Equal Area PWM, τα πλάτη παλμών υπολογίζονται ώστε να διασφαλίζεται ότι η περιοχή κάτω από κάθε παλμό αντιστοιχεί στην περιοχή κάτω από την επιθυμητή κυματομορφή για κάθε περίοδο μεταγωγής. Αυτό απαιτεί λιγότερους υπολογισμούς σε σύγκριση με την ημιτονοειδή PWM, όπου τα πλάτη παλμών προσδιορίζονται συγκρίνοντας μια ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς με ένα τριγωνικό φορέα υψηλής συχνότητας. Η μονοπολική ημιτονοειδής PWM απαιτεί τους διπλάσιους υπολογισμούς από τη διπολική ημιτονοειδή PWM, καθώς διακόπτει κάθε σκέλος του αντιστροφέα ανεξάρτητα.

### **5.2 Σύγκριση ως προς ολική αρμονική παραμόρφωση (THD)**

Η SPWM οδηγεί γενικά σε χαμηλότερη συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) σε σύγκριση με την EAPWM. Μεταξύ των μεθόδων ημιτονοειδούς PWM, η μονοπολική PWM τείνει να παράγει χαμηλότερη THD από τη διπολική PWM επειδή προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία στη μεταγωγή και καλύτερη ακύρωση των αρμονικών. Η Equal Area PWM, αν και απλούστερη, τείνει να έχει υψηλότερο THD επειδή το μοτίβο παλμού δεν προσεγγίζει τόσο στενά την επιθυμητή ημιτονοειδή κυματομορφή (απομακρύνεται - αποκλίνει από την θεμελιώδη).

### **5.3 Σύγκριση ως προς την αρμονική τάξη**

Οι αρμονικές τάξεις σε αυτές τις μεθόδους ποικίλλουν. Στη διπολική ημιτονοειδή PWM, οι πρωτογενείς αρμονικές εμφανίζονται στη συχνότητα μεταγωγής και στα πολλαπλάσιά της (π.χ.  $2f_c$ ,  $4f_c$  κ.λπ.). Στη μονοπολική ημιτονοειδή PWM, σημαντικές αρμονικές υπάρχουν στο διπλάσιο της συχνότητας μεταγωγής (π.χ.  $3f_c$ ,  $5f_c$  κ.λπ.), μειώνοντας τις αρμονικές χαμηλότερης τάξης. Η PWM ίσης περιοχής τείνει να έχει αρμονικές που εξαρτώνται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή και το φορτίο, με αποτέλεσμα συχνά πιο απρόβλεπτο αρμονικό περιεχόμενο σε σύγκριση με τις πιο δομημένες αρμονικές που παρατηρούνται στην ημιτονοειδή PWM.

Συνοπτικά, η ημιτονοειδής PWM (ιδίως η μονοπολική) είναι πιο εντατική από υπολογιστική άποψη, αλλά παρέχει χαμηλότερη THD και πιο προβλέψιμες αρμονικές τάξεις σε σύγκριση με την Equal Area PWM, η οποία είναι απλούστερη αλλά οδηγεί σε υψηλότερη THD και λιγότερο προβλέψιμο αρμονικό περιεχόμενο.

### **5.4 Σύγκριση ως προς τη συχνότητα μεταγωγής (στους διακόπτες-Mosfet)**

Η σύγκριση της Equal Area PWM (EAPWM), της μονοπολικής και της διπολικής ημιτονοειδούς PWM επηρεάζει τη συχνότητα μεταγωγής στα MOSFET και κατ' επέκταση την απόδοση του αντιστροφέα. Στην EAPWM, η συχνότητα μεταγωγής είναι μεταβλητή και συχνά χαμηλότερη, καθώς προσαρμόζεται στα πλάτη των παλμών. Στη μονοπολική PWM, η συχνότητα εξόδου είναι 2 φορές η συχνότητα του φορέα ( $f_c$ ), οδηγώντας σε καλύτερη ποιότητα εξόδου αλλά αυξημένες απώλειες στα MOSFET. Στη διπολική PWM, η συχνότητα εξόδου είναι ίση με το  $f_c$ , απαιτώντας περισσότερο φιλτράρισμα λόγω εντονότερων αρμονικών.

### **5.5 Γενικά**

Η ανάπτυξη και η χρήση του PWM έχει προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην αποτελεσματική διαχείριση και έλεγχο της ισχύος σε ποικίλες εφαρμογές. Η υψηλή αποδοτικότητα, η ακρίβεια και η ευελιξία της τεχνολογίας το καθιστούν ουσιαστικό εργαλείο για τους σύγχρονους μηχανικούς και ηλεκτρονικούς σχεδιαστές.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και αξιολόγηση της μεθόδου Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM) για την οδήγηση αντιστροφέων, με στόχο τη μείωση της ολικής



*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσεως και του ρεύματος στην έξοδο. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη θεωρητική ανάλυση και τις εξομοιώσεις στο MATLAB / Simulink είναι τα εξής:

#### 1. Αποτελεσματικότητα της Μεθόδου EAPWM:

- Η μέθοδος EAPWM αποδείχθηκε αποτελεσματικότερη από την παραδοσιακή μέθοδο Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) στη μείωση της THD. Η δυναμική προσαρμογή του εύρους των παλμών ώστε να επιτυγχάνονται ίσες περιοχές συνέβαλε στη σημαντική μείωση των αρμονικών στη τάση και το ρεύμα της εξόδου του αντιστροφέα.

#### 2. Βελτίωση της Ποιότητας Ισχύος:

- Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η EAPWM παρέχει βελτιωμένη ποιότητα ισχύος σε σύγκριση με την SPWM. Η μείωση των αρμονικών παραμορφώσεων βελτιώνει την αποδοτικότητα των συστημάτων που χρησιμοποιούν αντιστροφείς και συμβάλλει στη μακροχρόνια αξιοπιστία τους.

#### 3. Εξομοιώσεις και Επαλήθευση:

- Οι εξομοιώσεις στο MATLAB και το Simulink επιβεβαίωσαν την θεωρητική ανάλυση της EAPWM και παρείχαν ένα ισχυρό εργαλείο για τη σχεδίαση και την αξιολόγηση της μεθόδου.

#### 4. Συγκριτική Αξιολόγηση με την SPWM:

- Η σύγκριση της EAPWM με την SPWM έδειξε ότι η νέα μέθοδος υπερέχει σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η EAPWM κατάφερε να μειώσει την THD ανά περιπτώσεις, ενώ η SPWM παρουσίασε μεγαλύτερη αρμονική παραμόρφωση, ειδικά σε υψηλότερες συχνότητες.

#### 5. Εφαρμογές και Προοπτικές:

- Η εφαρμογή της μεθόδου EAPWM δείχνει τις προοπτικές της για ευρεία χρήση σε διάφορους τομείς, όπως τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα και άλλες εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ποιότητα ισχύος. Η EAPWM μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στη μείωση των απωλειών στα ηλεκτρονικά ισχύος.

#### 6. Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα:

- Η περαιτέρω βελτίωση και προσαρμογή της μεθόδου EAPWM μπορεί να περιλαμβάνει την εφαρμογή της σε άλλες τοπολογίες αντιστροφέων και τη διερεύνηση της απόδοσής της σε διαφορετικά περιβάλλοντα και εφαρμογές. Επιπλέον, η ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέπουν την αυτόματη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της EAPWM θα μπορούσε να ενισχύσει ακόμη περισσότερο την αποδοτικότητά της.

- Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενσωματωμένων συστημάτων με μικροεπεξεργαστές, που θα εφαρμόζουν την EAPWM, (Ανάπτυξη Ενσωματωμένων Συστημάτων με Μικροεπεξεργαστές) φαίνεται να είναι μια ακόμη εφαρμογή με θετικές προοπτικές. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, όπως τα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα και τα έξυπνα δίκτυα, προσφέροντας βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και απόδοση. Η ενσωμάτωση της EAPWM σε συστήματα ελεγχόμενα από μικροεπεξεργαστές θα επιτρέψει τη δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, τη χρήση ευφύων ελεγκτών για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη λειτουργία της μεθόδου σε διάφορες τοπολογίες αντιστροφέων, προσφέροντας βελτιωμένη ποιότητα ισχύος και αποδοτικότητα σε διάφορες εφαρμογές.

Αναλύοντας και συγκρίνοντας εκτενέστερα τα αποτελέσματα της παραπάνω εργασίας γίνεται η παρατήρηση πως κάθε μέθοδος εμφανίζει μια αρμονική 'υπογραφή' που είναι διαφορετική. Συγκρίνοντας, τις μεθόδους

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

ΕΑΡPWM, SPWM UNIPOLAR και SPWM BIPOLAR υπολογίζεται και εμφανίζεται η συνολική αρμονική παραμόρφωση της κάθε μιας μεθόδου, συμπερασματικά στα παρακάτω.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Στέφανος Ν. Μανιάς, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, 3η έκδοση, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 2020
- [2] Kharjule, S. (2015, October). Voltage source inverter. In 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (pp. 537-542). IEEE.
- [3] Ιωάννης Σαρρής, Μελέτη και Κατασκευή Τριφασικού Αντιστροφέα για τον Έλεγχο Τριφασικού Επαγωγικού Κινητήρα, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο δυτικής Αττικής, 2020
- [4] Cooper, J. A., Tamaki, T., Walden, G. G., Sui, Y., Wang, S. R., & Wang, X. (2009, December). Power MOSFETs, IGBTs, and thyristors in SiC: Optimization, experimental results, and theoretical performance. In 2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) (pp. 1-4). IEEE.
- [5] Αντωνιάδης, Ν. (2022). Συστήματα ελέγχου σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς μαγνητικής ροής, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο δυτικής αττικής
- [6] Yu, Z., Mohammed, A., & Panahi, I. (1997). A review of three PWM techniques. Proceedings of the 1997 American Control Conference
- [7] Baggini, A., & Hanzelka, Z. (2008). Voltage and current harmonics. *Handbook of Power Quality*, 228-229.
- [8] Rodríguez, J. R., Dixon, J. W., Espinoza, J. R., Pontt, J., & Lezana, P. (2005). PWM regenerative rectifiers: State of the art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(1), 5-22.
- [9] Casablanca, R. (2023). *Study and development of an Electronic Power Converter for Electrical Vehicle based on General Time Multiplexing (GTM)* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [10] Boost, M. A., & Ziogas, P. D. (1988). State-of-the-art carrier PWM techniques: A critical evaluation. *IEEE transactions on industry applications*, 24(2), 271-280.
- [11] Harmonics, P. S. (1983). Power system harmonics: an overview. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (8), 2455-2460.
- [12] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2004). *Power system harmonics*. John Wiley & Sons.
- [13] Wagner, V. E., Balda, J. C., Griffith, D. C., Mceachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., ... & Jewell, W. T. (1993). Effects of harmonics on equipment. *IEEE transactions on power delivery*, 8(2), 672-680.
- [14] J. Holtz and S. Stadtfeld, "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source," in Conf Rec. IPEC Conf., Tokyo, 1983, pp. 1665-1675.
- [15] van der Broeck, H.W., Skudelny, H.-. & Stanke, G.V. 1988, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. 1, pp. 142-150.
- [16] Ogasawara, S., Akagi, H. & Nabae, A. 1990, "A novel PWM scheme of voltage source inverters based on space vector theory", Archiv für Elektrotechnik, vol. 74, no. 1, pp. 33-41.
- [17] Keliang Zhou and Danwei Wang, "Relationship between space-vector modulation and three-phase carrier-based PWM: a comprehensive analysis [three-phase inverters]," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 186-196, Feb 2002.

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

- [18] Jian Sun and H. Grotstollen, "Optimized space vector modulation and regular-sampled PWM: a reexamination," Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, San Diego, CA, 1996, pp. 956-963 vol.2.
- [19] Wang Cong and Lu Qiwei, "Analysis of naturally sampled space vector modulation PWM in overmodulation region," The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2004. IPEMC 2004., Xi'an, 2004, pp. 694-698 Vol.2
- [20] A. Mehrizi-Sani and S. Filizadeh, "An Optimized Space Vector Modulation Sequence for Improved Harmonic Performance," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 8, pp. 2894-2903, Aug. 2009
- [21] R. Zhang, D. Boroyevich, V. H. Prasad, H. C. Mao, F. C. Lee and S. Dubovsky, "A three-phase inverter with a neutral leg with space vector modulation," Proceedings of APEC 97 - Applied Power Electronics Conference, Atlanta, GA, 1997, pp. 857-863 vol.2.
- [22] J. I. Leon et al., "Three-Dimensional Feedforward Space Vector Modulation Applied to Multilevel Diode-Clamped Converters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 1, pp. 101-109, Jan. 2009
- [23] Nafpaktitis, D., Paterakis, F., Darwish, M., & Hloupis, G. (2016). The Equal Areas Pulse Width Modulation (EAPWM) Method: an alternative approach to programmed PWM schemes.
- [24] Paterakis, F. K., Nafpaktitis, D., Darwish, M., & Grigorios, K. E. (2018). A Modified Algorithm based on the Equal-Areas PWM for the Extend of Linear Operation of a Microprocessor-Controlled PWM-VSI.
- [25] Paterakis, F. K. (2016). *Development of alternative pulse width modulation methods for conventional and multilevel voltage source inverters* (Doctoral dissertation, Brunel University London).

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

## **Σύμβολα - Ονοματολογία**

E.P. = εναλλασσόμενο ρεύμα

THD = Total harmonic distortion ( ολική αρμονική παραμόρφωση )

$U_{p,max}$  = Μέγιστη τάση παλμού ( ορθογώνιο )  $= > U_{pmm}$

$U_{max}$  = Μέγιστη τάση ( καμπύλη )

$m_a$  = λόγος διαμόρφωσης πλάτους

$t_p$  = χρόνος διάρκειας του παλμού / ενεργός χρόνος

$t_s$  = ανενεργός χρόνος

$A_p$  = αριθμός των παλμών

$f_s$  = συχνότητα μεταγωγής σε έναν πλήρη θεμελιώδη κύκλο

$f_p$  = συχνότητα μεταγωγής σκέλους φάσης

$m_f$  = λόγος διαμόρφωσης συχνότητας

$m_a$  = λόγος διαμόρφωσης πλάτους

M= δείκτης διαμόρφωσης

$M_m$ =δείκτης βέλτιστης οριακής διαμόρφωσης

## Κώδικας – MATLAB

```
% Καθαρισμός περιβάλλοντος
clear
hold off

%Αρχικές παράμετροι
E=1;
DF= 1; %-duty factor
Ap=21;
f1=50;
T=1/f1;
d=(0.5)*T/Ap;
w=2*pi*f1;
Usmax=1*DF; %-setting the modulation ratio
%Up=1;
Umax=220*sqrt(2);
Udc=Umax;
fs=2*Ap/T;
mf=fs/(f1);
Up=1
m=(Usmax/Up);
ma=Up/Usmax; %-setting the modulation ratio

%Υπολογισμός χρόνου Διακοπών
t(1:E)=(asin(((1:E)-1)/E))/w;
t=[t 0.01-fliplr(t)];
%-----Calculation of Switching Instants-----
k=0;
for i=1:4*Ap

    g(i)=(1+2*i+(-1)^(i+1))/4;
    Tp(g(i))=(m/w)*(cos((g(i)-1)*w*d)-cos(g(i)*w*d));
    Te(g(i))=((g(i)-1)*d+(0.5)*(d-Tp(g(i)))));
    Tk(i)=Te(g(i))+((1+(-1)^i)/2)*abs(Tp(g(i)));

end

Tt=[];

for i=1:Ap
    Tt=[Tt Te(i)+abs(Tp(i))];
end

b=[];
U=[];

%-----Harmonic Calculation for FFT-----
for n=1:2:101
    for i=1:Ap
        e(i)=((-1)^i)*cos(n*w*Tk(i));
    end
    z=sum(e);
    b=[b abs((-4*Udc/(n*pi))*z)];
    U=b./sqrt(2);
    THD=100*sqrt(sum((b(2:end)/b(1)).^2));
    THDrms=100*sqrt((sqrt(2)*Umax/pi)*sqrt(Udc)/U(1)).^2-1);
end
%----- Printing harmonics spectrum (Amplitude p.u)-----
ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Σπυρίδων Πλάκας
```

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

```

figure(1)
temp1=((b./Udc)*100);
x=linspace(1,n,numel(b));
stem(x,temp1,'red','marker','none','linewidth',1);
temp2=['Ap=',num2str(Ap),' fs=',num2str(fs/1000),'kHz THD=',num2str(THD),'
U(1)=',num2str(U(1))];
temp3=[' THD=',num2str(THD),'% THDrms=',num2str(THDrms),'% mf=',num2str(mf)];
disp(temp3)
hold on
title 'Voltage Spectrum'
xlabel('Harmonic Order (p.u)')
ylabel('Amplitude (p.u)')
legend(temp3)

%----- Voltage output Print -----
x=[];
xSim=[];
y=[];
ySim=[];
ii=1;

for i=1:2*E-1
x=[x t(i)];
xSim=[xSim t(i)];
if i<=E
y=[y ((i-1)*Up)];
ySim=[ySim ((i-1)*Up)];
else
y=[y ((2*E-i-1)*Up)];
end

for u=1:Ap(i)
x=[x Te(ii) Te(ii) Tt(ii) Tt(ii)];
xSim=[xSim Te(ii) Tt(ii) ii*d];
ii=ii+1;
if i<=E
y=[y ((i-1)*Up) (i*Up) (i*Up) ((i-1)*Up)];
ySim=[ySim (i*Up) (i*Up) ((i-1)*Up)];
else
y=[y ((2*E-i-1)*Up) ((2*E-i)*Up) ((2*E-i)*Up) ((2*E-i-1)*Up)];
end
end
x=[x t(i+1)];
if i<=E
y=[y ((i-1)*Up)];
else
y=[y ((2*E-i-1)*Up)];
end
end

figure(2);
plot(x,y,x+0.01,-y);
temp2=['Ap= ',num2str(Ap),'U(1)=',num2str(Up(1)),'ma= ',num2str(ma),'fs=
',num2str(fs)];
title 'Voltage Output'
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage Magnitude (V)')
legend(temp2)
disp(temp2)

```

*Βελτιστοποίηση της μεθόδου διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) για την οδήγηση ενός αντιστροφέα (INVERTER) με σκοπό την μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσεως και του ρεύματος της εξόδου.*

```
xronos=Te %mono ayth h grammh allazei
figure(3);
stem(1:length(xronos),xronos);
temp2=['Ap= ',num2str(Ap),' ,U(1)=' ,num2str(Up(1)),' ,ma= ',num2str(ma),' ,fs=
',num2str(fs)];
title 'Firing Time'
xlabel('Length')
ylabel('Time')
legend(temp2)
disp(temp2)
```