



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε..

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση Ενός Μετατροπέα DC / AC Με Πηγή
Αποθήκευσης Για Λειτουργία Ως Σύγχρονη Γεννήτρια

Κυζάκης Πρόδρομος Στέφανος Α.Μ.: 6544

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Ουρεΐλιδης Επίκουρος Καθηγητής

(Υπογραφή)

.....

ΚΥΖΑΚΗΣ ΠΡΟΔΡΟΜΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., Τ.Ε.Ι. ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

© 2023 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη συνειδητοποίηση των επιπτώσεων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή έχει καταστήσει αναγκαία την επίτευξη ενός πιο περιβαλλοντικά και οικολογικά βιώσιμου ενεργειακού εφοδιασμού. Σε αυτό το πλαίσιο, φαίνεται πως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν σήμερα μονόδρομο για την ενεργειακή ανεξάρτηση των χωρών από τα ορυκτά καύσιμα, την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος.

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη σε συνδυασμό με την σημαντική μείωση του κόστους έχει επιτρέψει την ενσωμάτωση χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητα. Τα οφέλη ως προς την εφαρμογή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο, προκύπτουν από την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας, καθώς και από την αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος, ειδικά σε δίκτυα με μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ενδεικτικά εφαρμόζονται, ώστε να προστατεύσουν σε περίπτωση ολικής ή μερικής απώλειας του δικτύου, σύντομης ή παρατεταμένης υπέρτασης ή υπότασης, έντονων καιρικών φαινομένων καθώς και έντονης αρμονικής παραμόρφωσης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, όπου η παραγωγή ενέργειας δεν είναι διαθέσιμη καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας, ώστε να αποθηκεύσουν ενέργεια και στη συνέχεια, να την επιστρέψουν στο δίκτυο.

Έχοντας υπόψη ότι τα ηλεκτρικά συστήματα βασίζονται μέχρι και σήμερα σε σύγχρονες γεννήτριες για να καθορίζουν την συχνότητα και την τάση, η μεγάλη διείσδυση των μη ελεγχόμενων ΑΠΕ ανατρέπει τον υπάρχοντα συμβατικό έλεγχό τους. Επομένως, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαταραχές στα ηλεκτρικά συστήματα, όπως προβλήματα συχνότητας, τάσης, έλλειψης ικανότητας εξάλειψης σφαλμάτων, προβλήματα αδράνειας, κτλ. Ως αποτέλεσμα, οι Διαχειριστές του Συστήματος επέβαλαν όρια στην ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Η παρούσα πτυχιακή προτείνει μια λύση σε αυτό το πρόβλημα με την τοποθέτηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με ελεγχόμενο μετατροπέα που να προσομοιώνουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας. Επομένως, δεν απαιτείται κάποια αλλαγή στη, υπάρχουσα λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκαν σε κατάλληλο πρόγραμμα προσομοίωσης.

Λέξεις κλειδιά: Αποθήκευση ενέργειας, προσομοίωση μετατροπέα DC/AC, αρμονικές, μετρήσεις.

ABSTRACT

The growing awareness of the impact of greenhouse gas emissions on global climate change has made it necessary to achieve a more environmentally and ecologically sustainable energy supply. In this context, it appears that renewable energy sources (RES) are nowadays a one-way street for the energy decoupling of countries from fossil fuels, for meeting growing energy needs and for protecting the environment.

Rapid technological development combined with significant cost reductions have made it possible to integrate the use of energy storage systems into various applications in everyday life. The benefits in terms of their application to the electricity grid arise from the uninterrupted supply of energy, as well as from the increased reliability of the system, especially in grids with high RES penetration. Indicatively, they are applied to protect in case of total loss or partly loss of the grid, short or prolonged overvoltage or undervoltage, severe weather events and strong harmonic distortion. They are also used in cases where power generation is not available throughout the day to store energy and then return it to the grid.

Taking into consideration that electrical systems rely until now on synchronous generators to determine frequency and voltage, the significant penetration of uncontrollable RES has changed dramatically the existing control. Therefore, significant disturbances have been observed in power systems, such as frequency, voltage, lack of fault clearing capability, inertia problems, etc. As a result, the System Operators imposed limits on the development of RES.

This thesis proposes a solution to this problem by proposing the installation of energy storage systems with controllable converter, which emulates the operation of synchronous generators. Therefore, no change in the conventional operation of the electrical system is required. The results of this study are conducted in a proper simulation environment.

Keywords: Energy storage, DC/AC converter simulation, harmonics, measurements.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Κωνσταντίνο Ουρειλίδη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την ανάθεση ενός τόσο επίκαιρου και ενδιαφέροντος θέματος. Τον ευχαριστώ επίσης για την καθοδήγηση καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για όλη την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κοζάνης για τις γνώσεις, τις συμβουλές και τις εμπειρίες που μου μετέδωσαν όλα αυτά τα χρόνια σπουδών.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω αυτήν την πτυχιακή εργασία στην αγαπημένη μου θεία Μαρία που έφυγε από την ζωή κατά την περίοδο εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας, αλλά και στην μονάκριβη μου κορούλα Βασιλική.



ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	I
ABSTRACT	III
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	VII
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	XI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	XIV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	XX
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και η ανάγκη για πλήρη ενσωμάτωσή τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.....	1
1.2 Ανασκόπηση προβλημάτων από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα.....	5
1.3 Οι βασικές τεχνολογίες και οι εφαρμογές των ΑΠΕ.....	9
1.4 Το Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.....	12
1.5 Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα	13
1.6. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	22
1.6.1. Μπαταρίες ιόντων - λιθίου	24
1.6.2. Μπαταρίες ροής.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	26
1.1. Εισαγωγή.....	26
1.2. Αυτόνομη λειτουργία σύγχρονων μηχανών	31
1.3. Παραλληλισμός σύγχρονων μηχανών	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	36
2.1. Εισαγωγή.....	36
2.2. Διπολικά τρανζίστορ με μόνωση πύλης (IGBT)	40
2.3. Η διαμόρφωση πλάτους παλμών (PWM)	42
2.4. Ο μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας	48
2.5. Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών με διπολική τάση εξόδου.....	49
2.6. Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών με μονοπολική τάση εξόδου.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ	55
3.1. Εισαγωγή.....	55
3.2. Έλεγχος στατικών χαρακτηριστικών	55



3.3. Έλεγχος ενεργής ισχύος-συχνότητας.....	60
3.4. Έλεγχος άεργης ισχύος-τάσης	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	63
4.1. Γενικά στοιχεία	63
4.1. Μετασχηματισμός Clarke.....	63
4.2. Μετασχηματισμός Park	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	67
5.1. Μεθοδολογία υλοποίησης και μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον του PSIM	67
5.1.1. DC τάση εισόδου.....	68
5.1.2. Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.....	69
5.1.3 Το σύστημα ελέγχου της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)	71
5.1.4. Ο αισθητήρας του ημιτονοειδές μέσου ρεύματος (I_o).....	84
5.1.5. Το φίλτρο εξόδου LC.....	87
5.1.6. Το βατόμετρο	88
5.1.7. Το βαρόμετρο	89
5.1.8. Ο αισθητήρας του ημιτονοειδές ρεύματος εξόδου (I)	90
5.1.9. Το ωμικό φορτίο	90
5.1.10. Ο αισθητήρας τάσης εξόδου (V).....	91
5.2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	104
5.2.1. Εισαγωγή.....	104
5.2.2. Το 1 ^ο σενάριο σε περίπτωση της τροφοδότηση ενός ωμικού φορτίου 30Ω.....	104
5.2.3. Το 2 ^ο σενάριο σε περίπτωση της τροφοδότησης ενός ωμικού – επαγωγικού φορτίου $R=50\Omega$ και $L=2mH$	109
5.2.4. Το 3 ^ο σενάριο σε περίπτωση τροφοδότησης ενός φορτίου RLC (ωμικό – επαγωγικό – χωρητικό φορτίο) $R=100\Omega$ $L=20mH$ $C=45\mu F$	113
5.2.5. Το 4 ^ο σενάριο σε περίπτωση τροφοδότησης του δικτύου.....	117
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	122
6.1. Συμπεράσματα	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	124

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1:** Ανανεώσιμες πηγές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: Eurostat, 2022).
- Εικόνα 2:** Ηλεκτρική ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - % της συνολικής ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 (Πηγή: Eurostat, 2022).
- Εικόνα 3:** Χωρική κατανομή του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα κατά το τέλος του πρώτου εξαμήνου του 2022
- Εικόνα 4:** Χάρτης αιολικών πάρκων στην Ελλάδα με έμφαση στην ταχύτητα των ανέμων
- Εικόνα 5:** Το Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας (Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας www.cres.gr)
- Εικόνα 6:** Σύγκριση της μπαταρίας μολύβδου – οξέος και την μπαταρία ιόντων – λιθίου
- Εικόνα 7:** Σχηματική παράσταση ρυθμιστή στροφών
- Εικόνα 8:** Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με εσωτερικούς πόλους
- Εικόνα 9:** Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με εξωτερικούς πόλους
- Εικόνα 10:** Κατηγορίες των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος
- Εικόνα 11:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης DC τάσης εισόδου.
- Εικόνα 12:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των διακοπών ελέγχου του αντιστροφέα.
- Εικόνα 13:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσων ρευμάτων ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα I_{od} και I_{oq} αντίστοιχα.
- Εικόνα 14:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που μετράται από το βολτόμετρο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.
- Εικόνα 15:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του LC φίλτρου.
- Εικόνα 16:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 17:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της υπολογίσιμης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 18:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 19:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών ρευμάτων της εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 20:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των μέγιστων τιμών αναφορών τάσης εξόδου V_d και της άεργης ισχύος V_q .
- Εικόνα 21:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσων ρευμάτων της ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 22:** Το Αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 23:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 24:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 25:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών των αναφορών τάσης εξόδου και της άεργης ισχύος.

-
- Εικόνα 26:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσων ρευμάτων ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 27:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 28:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 29:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 30:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών αναφοράς τάσης εξόδου του φορτίου και άεργης ισχύος.
- Εικόνα 31:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσων ρευμάτων εξόδου της ενεργής και της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 32:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.
- Εικόνα 33:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης ενεργής ισχύος όπως και της συχνότητας του φορτίου (δικτύου).
- Εικόνα 34:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος όπως και της μέγιστης τιμής αναφοράς της τάσης εξόδου (δικτύου).
- Εικόνα 35:** Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών αναφοράς τάσης εξόδου του φορτίου και της άεργης ισχύος.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 1:** Απλοποιημένο σύστημα ισχύος και προφίλ τάσης
- Σχήμα 2:** Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (LV) ενός δικτύου χωρίς σύνδεση ΑΠΕ (RE-DG) στο προφίλ τάσης
- Σχήμα 3:** Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (LV) με διαφορετικά σημεία σύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Φωτοβολταϊκών Συστημάτων)
- Σχήμα 4:** Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (LV) όταν η ανανεώσιμη ενέργεια (RE) είναι συνδεδεμένη στην πλευρά του μετασχηματιστή MV-LV.
- Σχήμα 5:** Προφίλ τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης (LV) όταν η ανανεώσιμη ενέργεια (RE) είναι συνδεδεμένη στην πλευρά του φορτίου.
- Σχήμα 6:** Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας
- Σχήμα 7:** Σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί αυτόνομα ένα μεταβαλλόμενο φορτίο.
- Σχήμα 8:** Μεταβολή της συχνότητας λόγω αύξησης του φορτίου
- Σχήμα 9:** Μεταβολή της συχνότητας λόγω μείωσης του φορτίου
- Σχήμα 10:** Διάταξη συγχρονισμού σύγχρονης γεννήτριας στο διαδίκτυο
- Σχήμα 11:** Σχηματικό διάγραμμα IGBT
- Σχήμα 12:** Εγκάρσια τομή ενός IGBT
- Σχήμα 13:** Μέθοδος α) ανοιχτού και β) κλειστού βρόχου
- Σχήμα 14:** Περιοχές λειτουργίας ενός αντιστροφέα
- Σχήμα 15:** Έλεγχος PWM και η αντίστοιχη τάση εξόδου
- Σχήμα 16:** Το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα
- Σχήμα 17:** Τιμές κανονικοποιημένων αρμονικών
- Σχήμα 18:** Σχηματικό διάγραμμα 1Φ αντιστροφέα πλήρους γέφυρας
- Σχήμα 19:** Αναπαράσταση PWM με διπολική τάση εξόδου
- Σχήμα 20:** Το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου στην περίπτωση αντιστροφέα της μονοπολικής τάσης εξόδου
- Σχήμα 21:** Ένα μικροδίκτυο με διεσπαρμένες παραγωγές ενέργειας και φορτία.
- Σχήμα 22:** Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μετατροπέα.
- Σχήμα 23:** Το πολικό διάγραμμα της συμπεριφοράς P/Q των παράλληλων συνδεδεμένων ΔΠΕ για (α) επαγωγική συμπεριφορά, (β) ωμική συμπεριφορά, (γ) σύνθετη συμπεριφορά δηλ. (ωμικό-επαγωγική συμπεριφορά). Με το κόκκινο συνεχές χρώμα έχουμε την ενεργή ισχύ ενώ με το μπλέ η άεργη ισχύς εξόδου.
- Σχήμα 24:** Ο έλεγχος ενεργού ισχύος – συχνότητας του μετατροπέα.
- Σχήμα 25:** Ο έλεγχος άεργης ισχύος – τάσης του μετατροπέα.
- Σχήμα 26:** Συνδυασμένα σταθερά και περιστρεφόμενα πλαίσια για τριφασικό σύστημα
- Σχήμα 27:** Η γενική εικόνα του κυκλώματος μας για την υλοποίηση της προσομοίωσης.
- Σχήμα 28:** Η μεθοδολογία επιλογής της DC τάσης εισόδου(Μπαταρίας) στο κύκλωμα μας.



-
- Σχήμα 29:** Οι παράμετροι της DC τάσης εισόδου (Μπαταρίας).
- Σχήμα 30:** Η μέθοδος εισαγωγής IGBT στο κύκλωμα μας.
- Σχήμα 31:** Οι παράμετροι των ελεγχόμενων διακοπών του κυκλώματος μας.
- Σχήμα 32:** Το σύστημα ελέγχου της PWM.
- Σχήμα 33:** Η μέθοδος επιλογής της πηγής τάσης τριγωνικού σήματος.
- Σχήμα 34:** Οι παράμετροι των πηγών τάσης του συστήματος μας .α) Triangle_A και β) Triangle_B.
- Σχήμα 35:** Το σύστημα ελέγχου για την δημιουργία ημιτονοειδούς τάσης.
- Σχήμα 36:** Η μέθοδος εισαγωγής του κειμένου (Label text).
- Σχήμα 37:** Η μέθοδος εισαγωγής του αθροιστή ή αφαιρέτη.
- Σχήμα 38:** Οι παράμετροι του summer.
- Σχήμα 39:** Η μέθοδος εισαγωγής του διαιρέτη.
- Σχήμα 40:** Οι παράμετροι της DC πηγής τάσης του συστήματος ελέγχου (γωνιακή συχνότητα).
- Σχήμα 41:** Η μέθοδος εισαγωγής του διαφοροποιητή.
- Σχήμα 42:** Η παράμετρος του διαφοροποιητή του συστήματος μας.
- Σχήμα 43:** Η μέθοδος εισόδου του μετασχηματισμού ab / dq .
- Σχήμα 44:** Η δημιουργία της γωνίας Theta ή της γωνιακής συχνότητας του συστήματος μας.
- Σχήμα 45:** Οι παράμετροι της δημιουργίας της γωνίας Theta. α) $2 * \pi = 2 * 3.14159 = 6.28$ και β) εσωτερικός επαναρυθμιζόμενος ολοκληρωτής.
- Σχήμα 46:** Η μέθοδος εισαγωγής του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή.
- Σχήμα 47:** Η παράμετρος του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή
- Σχήμα 48:** Η μέθοδος εισαγωγής των βολτομέτρων στο σύστημα μας.
- Σχήμα 49:** Η μέθοδος εισαγωγής των συγκριτών στο σύστημα μας.
- Σχήμα 50:** Η μέθοδος εισαγωγής της πύλης NOT στο σύστημα μας.
- Σχήμα 51:** Η μέθοδος εισαγωγής της γείωσης στο σύστημα μας.
- Σχήμα 52:** Η μέθοδος εισαγωγής της σταθεράς K στο σύστημα μας.
- Σχήμα 53:** Η παράμετρος της σταθεράς K του συστήματος μας.
- Σχήμα 54:** Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα του ημιτονοειδές μέσου ρεύματος στο κύκλωμα μας.
- Σχήμα 55:** Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα ημιτονοειδές μέσου ρεύματος (I_o).
- Σχήμα 56:** Η μέθοδος εισαγωγής του πολλαπλασιαστή στο σύστημα μας.
- Σχήμα 57:** Η μέθοδος εισαγωγής του ολοκληρωτή στο σύστημα μας.
- Σχήμα 58:** Οι παράμετροι του ολοκληρωτή.
- Σχήμα 59:** Το φίλτρο LC του κυκλώματος μας.
- Σχήμα 60:** Οι Παράμετροι των τιμών α)πηνίου και β)πυκνωτή του κυκλώματος μας.
- Σχήμα 61:** Η μέθοδος εισαγωγής του βατόμετρου στο κύκλωμα μας.
- Σχήμα 62:** Η παράμετρος του βατομέτρου του κυκλώματος μας.
- Σχήμα 63:** Η μέθοδος εισαγωγής του βαρόμετρου στο κύκλωμα μας.
- Σχήμα 64:** Η παράμετρος του βαρόμετρου του κυκλώματος μας.



-
- Σχήμα 65:** Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα του ημιτονοειδές ρεύματος εξόδου (I).
- Σχήμα 66:** α) Η μέθοδος εισαγωγής της αντίστασης στο κύκλωμα μας και β) η παράμετρος της αντίστασης.
- Σχήμα 67:** Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα τάσης εξόδου (V_o).
- Σχήμα 68:** Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα τάσης στο κύκλωμα μας.
- Σχήμα 69:** Η Γενική εικόνα των συστημάτων ενεργής και άεργης ισχύος του συστήματος μας.
- Σχήμα 70:** Η γενική εικόνα του συστήματος ελέγχου της στατική χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος – συχνότητας (P-f).
- Σχήμα 71:** Η μέθοδος εισαγωγής της 1ης τάξης φίλτρου χαμηλής διέλευσης στο σύστημα μας.
- Σχήμα 72:** Οι παράμετροι της 1ης τάξης φίλτρου χαμηλής διέλευσης.
- Σχήμα 73:** Η μέθοδος εισαγωγής του περιοριστή στο σύστημα μας.
- Σχήμα 74:** Οι παράμετροι του περιοριστή.
- Σχήμα 75:** Η γενική εικόνα του συστήματος ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής της άεργης ισχύος (Q-V).
- Σχήμα 76:** Οι παράμετροι του περιοριστή της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος του συστήματος μας
- Σχήμα 77:** Η καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής P-f.
- Σχήμα 78:** Η καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος - τάσης (Q-V).
- Σχήμα 79:** Η γενική εικόνα του τελικού συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα του κυκλώματος μας.
- Σχήμα 80:** Η μέθοδος επιλογής των PI ελεγκτών
- Σχήμα 81:** Οι παράμετροι των PI ελεγκτών.
- Σχήμα 82:** Η χωρητική και η επαγωγική αντίδραση του συστήματος μας.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1:** Οι βασικές τεχνολογίες ΑΠΕ και η εφαρμογή τους στους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης και ψύξης, καθώς και των μεταφορών
- Πίνακας 2:** Σύγκριση βασικών ενεργειακών μεγεθών μεταξύ της ΕΕ-27 και της Ελλάδας για το 1990 και το 2010.
- Πίνακας 3:** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των βασικών τύπων μπαταριών
- Πίνακας 4:** Συνοπτική παρουσίαση των καταστάσεων των διακοπών κατά την λειτουργία με μονοπολική τάση εξόδου



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και η ανάγκη για πλήρη ενσωμάτωσή τους για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι μορφές ενέργειας που δεν βασίζονται σε συμβατικά καύσιμα και συναντώνται ανεξάντλητα στη φύση, όπως «η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια». Οι ΑΠΕ μπορούν να αντικαταστήσουν ή να συμπληρώσουν τις παραδοσιακές πηγές ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο» (Collins English Dictionary, 2012). Ο ΙΕΑ (2023) ορίζει τις ΑΠΕ ως εξής: «ενέργεια που προέρχεται από φυσικές διεργασίες (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία και άνεμος), οι οποίες αναπληρώνονται με ταχύτερο ρυθμό από ότι καταναλώνονται. Η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική, η υδροηλεκτρική και ορισμένες μορφές βιομάζας είναι κοινές πηγές ανανεώσιμης ενέργειας».

Ανάλογα με την προέλευσή τους, οι ΑΠΕ μπορούν να χωριστούν σε (Loeb, 1975):

- ✓ ΑΠΕ από εξωγενείς πηγές: Σε αυτές τις πηγές συμπεριλαμβάνονται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδάτινη ενέργεια, η βιομάζα και η παλιρροϊκή ενέργεια, η οποία είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της βαρύτητας μεταξύ Γης, Σελήνης και Ήλιου.
- ✓ ΑΠΕ από ενδογενείς πηγές. Σε αυτές τις πηγές συμπεριλαμβάνονται η γεωθερμική ενέργεια, καθώς και η ωσμωτικής ενέργειας ή η ενέργεια βαθμίδας αλατότητας, δηλαδή η ενέργεια που διατίθεται από τη διαφορά στη συγκέντρωση αλάτων μεταξύ του θαλασσινού νερού και του νερού των ποταμών

Τα ενεργά στοιχεία της καύσιμης ύλης των ορυκτών καυσίμων, κυρίως ο άνθρακας (ή ορυκτός άνθρακας) και οι αναδυόμενες ενώσεις (κυρίως το CO₂) αποτελούν την κύρια αιτία του σημαντικότερου σήμερα αρνητικού περιβαλλοντικού φαινομένου, του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής (Boden et. al., 2009). Τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούν στην παγκόσμια αγορά παραγωγής ενέργειας συνεισφέροντας το 80% των πρωτογενών ενεργειακών αναγκών. Πρόσφατα στοιχεία δείχνουν ότι η ετήσια παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 20,68 τρισεκατομμύρια kWh, ενώ την ίδια στιγμή η κατανάλωση ανέρχεται σε 19,01 τρισεκατομμύρια kWh (CIA, 2012). Επομένως, η χρήση των συμβατικών και ορυκτών καυσίμων έχει προκαλέσει ένα σύνολο αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον. Αξίζει να αναφερθεί ότι τόσο η ατμοσφαιρική όσο και η θερμική ρύπανση, σε ποσοστό 95%, αποτελούν

απόρροια της καύσης συμβατικών και ορυκτών καυσίμων. Όλες αυτές οι καταστάσεις έχουν οδηγήσει στην κλιματική αλλαγή, την οποία βιώνουμε με αυξανόμενο ρυθμό κάθε χρόνο.

Σήμερα, ο παγκόσμιος πληθυσμός ξεπερνά τα 7,2 δισεκατομμύρια και οι ενεργειακές απαιτήσεις ανά άτομο έχουν αυξηθεί με αποτέλεσμα να έχουν αυξηθεί σημαντικά οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες. Για παράδειγμα, στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) η ζήτηση ενέργειας είναι 125 kWh ανά άτομο την ημέρα (Human Development Report, 2008). Η αυξημένη ενεργειακή ζήτηση, τα ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή ασφάλεια και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται κυρίως με τη χρήση ορυκτών καυσίμων έφεραν στην επιφάνεια την ανάγκη χρήσης και άλλων πηγών ενέργειας, κυρίως των ΑΠΕ.

Ως εκ τούτου, η ανάγκη για χρησιμοποίηση των ΑΠΕ είναι πλέον επιτακτική. Οι εν λόγω μορφές ενέργειας συμβάλλουν επιπλέον στην οικολογία, καθώς έχουν μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα, ενώ αποτελούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, με αποτέλεσμα να ενισχύεται περαιτέρω η ανάγκη χρήσης τους. Παράλληλα, ανάμεσα στα πλεονεκτήματα της χρήσης των ΑΠΕ, είναι ιδιαίτερα σημαντικό το γεγονός ότι η χρήση τους βοηθά στην ενίσχυση των οικονομιών των χωρών που τις χρησιμοποιούν, ενώ ταυτόχρονα τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης είναι εξαιρετικά χαμηλά σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Για το σύνολο των πλεονεκτημάτων της χρήσης των ΑΠΕ, πολλές από τις ανεπτυγμένες χώρες έχουν μπει στη διαδικασία εκμετάλλευσης των ΑΠΕ και ταυτόχρονης μείωσης της χρήσης συμβατικών μορφών ενέργειας.

Ωστόσο πέρα από τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, υπάρχουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ΑΠΕ είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης τους. Συγκεκριμένα, η απόδοσή τους κυμαίνεται σε ποσοστό της τάξεως του 30%, ενώ εξαρτάται άμεσα από την εποχή του έτους, το κλίμα της περιοχής που εγκαθίστανται, αλλά και το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης. Για το λόγο αυτό, οι ΑΠΕ μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.

Βέβαια, τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ και η ουσιαστική συμβολή τους στην ενεργειακή ανεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους, δικαιολογούν την στροφή σε αυτές τις μορφές ενέργειας. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι ΑΠΕ, συντελούν στην παγκόσμια προσπάθεια προστασίας του περιβάλλοντος, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση στις εκπομπών των ρύπων και ιδιαιτέρως του CO₂.

Επιπρόσθετα, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή έχει επιφέρει νέα στοιχεία στη διαμόρφωση των τιμών χονδρικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς

επιηρεάζει την κατανομή και τη μεταβλητότητά τους. Πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει ότι οι τιμές χονδρικής κυρίως μειώνονται λόγω του φαινομένου merit-order, το οποίο μετατοπίζει στοχαστικά την καμπύλη προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας προς τα έξω (Benhmad and Percebois, 2018). Ως αποτέλεσμα, σε πολλές ευρωπαϊκές ζώνες προσφορών έχουν παρατηρηθεί μηδενικές ή ακόμα και αρνητικές τιμές εκκαθάρισης στις χονδρεμπορικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (Αγορά Επόμενης Ημέρας, Ενδοημερήσιες Αγορές).

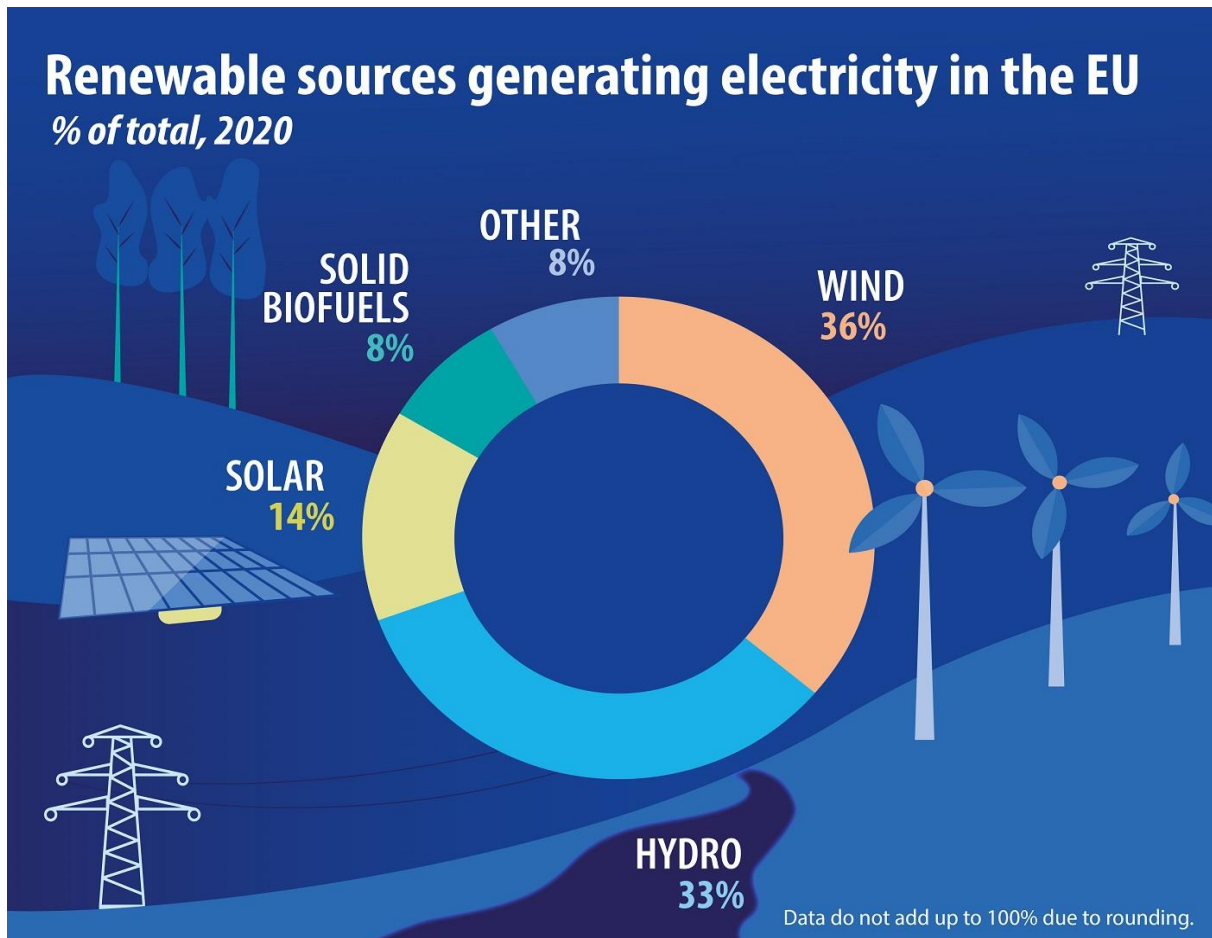
Στην Ευρώπη, από το 2000 έως το 2007 παρατηρήθηκε εντυπωσιακός ρυθμός αύξησης της δυναμικότητας των ΑΠΕ κατά 250% και αύξηση κατά 13% των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να αποτελούν τον κύριο πόρο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Τα μερίδια του άνθρακα και του λιγνίτη αποτελούν το ήμισυ του σημερινού συνολικού δυναμικού των 442 GW ισχύος με καύση ορυκτών καυσίμων στην ΕΕ-27 (EEA, 2012).

Κατά την περίοδο από το 1990 έως το 2008, η ενεργειακή απόδοση στον οικιακό τομέα βελτιώθηκε κατά 19% στην ΕΕ-27 με μέσο ρυθμό 1,1% ανά έτος. Κατά την ίδια περίοδο, η τελική κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια κατοικιών αυξήθηκε κατά περίπου 13% με μέσο ετήσιο ρυθμό 0,7%. Η κατανάλωση ενέργειας από τα νοικοκυριά ανά κάτοικο στην ΕΕ-27 κατά την ίδια περίοδο αυξήθηκε ελαφρώς. Ωστόσο, από το 2005, η κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο στον τομέα των νοικοκυριών μειώνεται ελαφρώς.

Ιδιαίτερα στις χώρες της νότιας Ευρώπης, όπως η Ελλάδα, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στις κατοικίες ήταν εξαιρετικά γρήγορη λόγω της αύξησης των επιπέδων άνεσης. Κατά την περίοδο 2005- 2007, η τελική οικιακή κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο μειώθηκε σχεδόν παντού, εκτός από τη Φιλανδία, την Εσθονία, την Πολωνία και την Ισπανία. Ο ρυθμός μείωσης ήταν 4,1% ανά έτος για την ΕΕ-27 (Mondol & Koumpetsos, 2013).

Η ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας από το 2019 (34%) ανέβηκε κατά τρεις ποσοστιαίες μονάδες το 2020, αντιπροσωπεύοντας το 37%. Η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσώπευαν πάνω από τα 2/3 της συνολικής ενέργειας που παρήχθη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 36% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ, ενώ η υδροηλεκτρική ενέργεια αντιπροσώπευε το 33% του συνόλου. Η Υπόλοιπη παραγόμενη ενέργεια, προήλθε από την ηλιακή ενέργεια (14%), τα στερεά βιοκαύσιμα (8%) και άλλες ανανεώσιμες πηγές (8%). Η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί την ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2008,

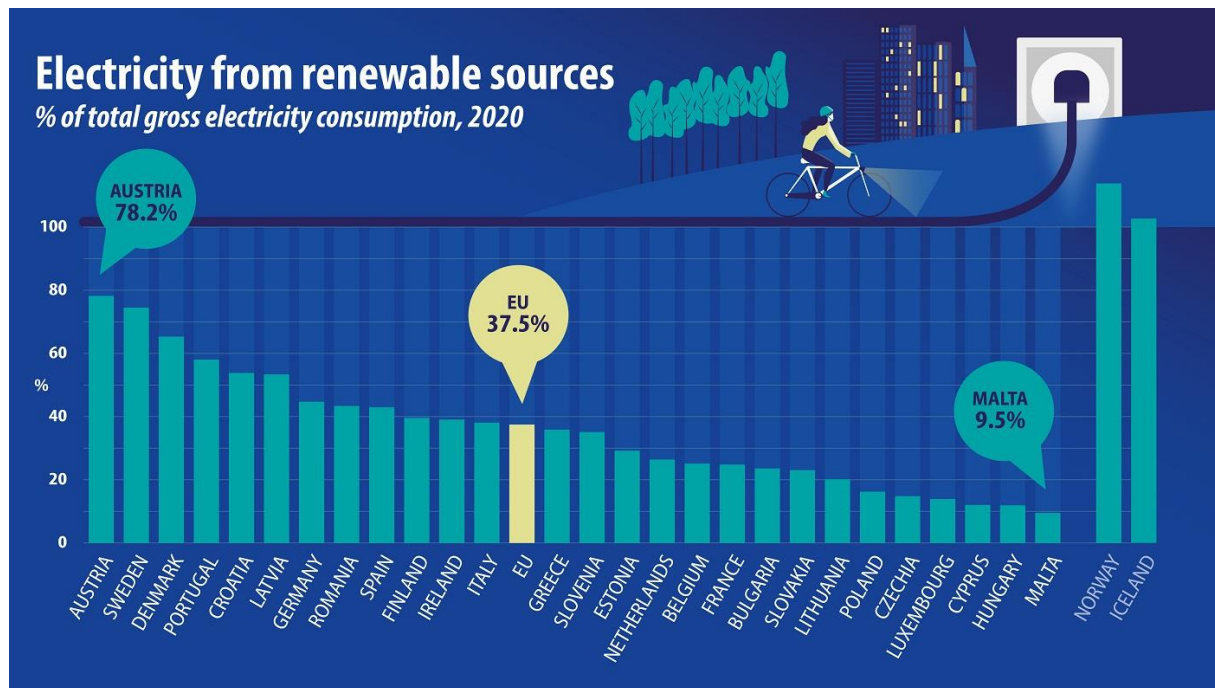
αντιπροσώπευε μόλις το 1% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση.



Εικόνα 1: Ανανεώσιμες πηγές που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Πηγή: Eurostat, 2022).

Ανάμεσα στα κράτη – μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.), το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας (> 70%) που καταναλώθηκε το 2020 παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές στην Αυστρία (78%) και τη Σουηδία (75%). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ήταν επίσης υψηλή και αντιπροσώπευε περισσότερο από το ήμισυ της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη Δανία (65%), την Πορτογαλία (58%), την Κροατία (53%) και τη Λετονία (53%). Αντίστοιχα, η χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, καταγράφηκε στη Μάλτα (9,5%), την Ουγγαρία (10,5%) και την Κύπρο (10,5%).

Όπως μπορεί εύκολα κανείς να διακρίνει από την εικόνα 2, η Ελλάδα βρίσκεται κάτω από το μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης.



Εικόνα 2: Ηλεκτρική ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - % της συνολικής ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας το 2020 (Πηγή: Eurostat, 2022).

1.2 Ανασκόπηση προβλημάτων από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα.

Η σύνδεση των ΑΠΕ με το ηλεκτρικό δίκτυο και σύστημα μπορεί να γίνει στη χαμηλή, μέση ή υψηλή τάση, ανάλογα με την ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού. Ανάλογα με το επίπεδο τάσης που συνδέεται ένας σταθμός ΑΠΕ, απαιτούνται οι κατάλληλοι υποσταθμοί με μετασχηματιστή, ενώ η μεταφορά και η διανομή της ενέργειας πραγματοποιείται μέσω των εναέριων γραμμών ή υπόγειων καλωδίων. Σε όλες τις περιπτώσεις υπάρχουν ορισμένα τεχνικά ζητήματα σε ότι αφορά την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα. Ανάμεσα σε αυτά, μπορούν να αναφερθούν τα ζητήματα της αξιοπιστίας, τα ζητήματα ποιότητας ισχύος αλλά και άλλα ζητήματα όπως οι αρμονικές, τα επίπεδα θορύβου κ.λπ.

Σε ότι αφορά τα ζητήματα αξιοπιστίας, η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παράγει μια ΑΠΕ, όπως η ηλιακή και η αιολική, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του ήλιου και του ανέμου αντιστοίχως. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι ποτέ σταθερές, η ισχύς εξόδου ενός συστήματος ηλιακής ενέργειας ή της αιολικής ενέργειας δεν θα είναι ποτέ σταθερή. Ως εκ τούτου, η υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τον κίνδυνο να καταστεί ολόκληρο το δίκτυο λιγότερο αξιόπιστο και να τίθεται σε κίνδυνο η ευστάθειά του.

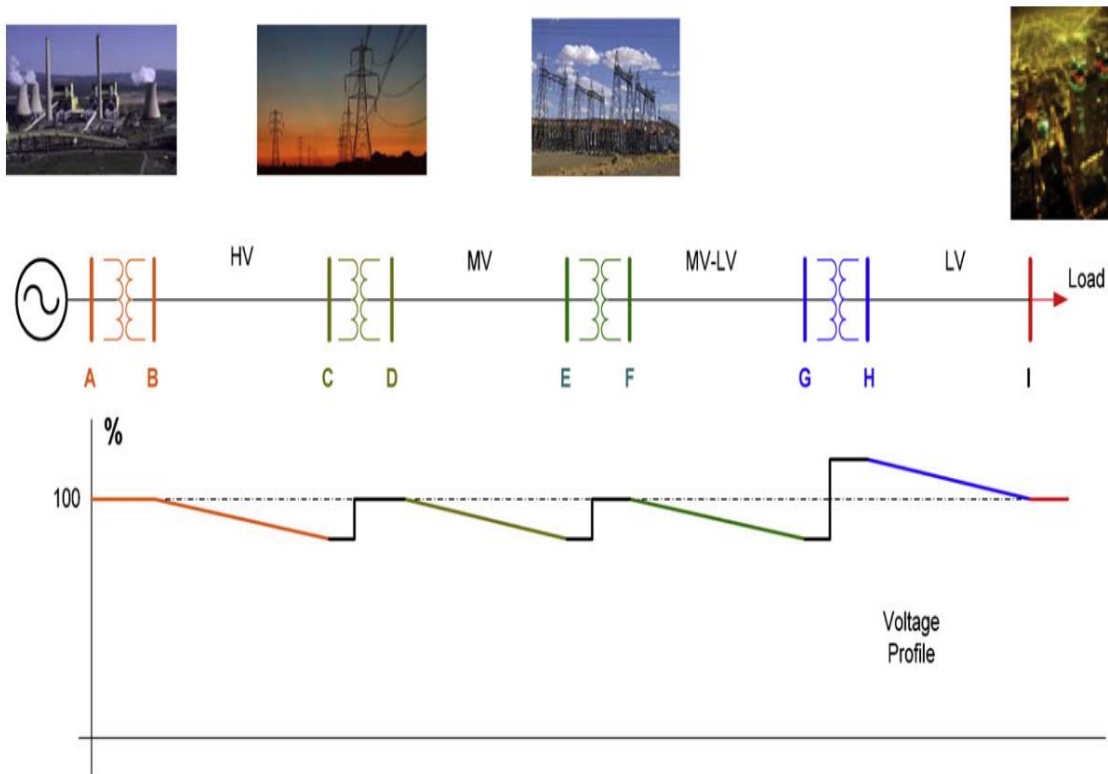
Τα ζητήματα ποιότητας της ισχύος είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς οι νέες ηλεκτρικές συσκευές είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στις διακυμάνσεις της τάσης (Dugan et. al., 2002). Η ποιότητα ισχύος ενός συστήματος ισχύος μετριέται από το επίπεδο των διακυμάνσεων της τάσης (υπέρταση και υπόταση), το επίπεδο των διακυμάνσεων της συχνότητας και των αρμονικών. Η διακύμανση της τάσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα, ιδιαίτερα σε υψηλά επίπεδα διείσδυσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς και διανομής της ενέργειας. Το ζήτημα αυτό πρέπει να εξετάζεται ενδελεχώς κατά την ενσωμάτωση διαλείπουσων πηγών, όπως είναι οι ΑΠΕ. Για παράδειγμα, η διακύμανση της τάσης είναι σημαντική, όταν μια ανεμογεννήτρια μεγάλης ισχύος συνδέεται σε ένα αδύναμο δίκτυο διανομής, ιδίως κατά τη διαδικασία εκκίνησης και διακοπής (IEA, 2002).

Επιπροσθέτως, με την αύξηση της κατανεμημένης παραγωγής ενέργειας, η ροή ισχύος γίνεται πιο περίπλοκη. Πολλές μεγάλες μονάδες ΑΠΕ τροφοδοτούν απευθείας το δίκτυο μέσης τάσης (MT), ενώ πολλές ανεμογεννήτριες συνδέονται ακόμη και σε δίκτυα χαμηλής τάσης (XT). Αντίστοιχα, μονάδες φωτοβολταϊκής παραγωγής συνδέονται στο δίκτυο MT, ενώ σε περιοχές με πολλές μονάδες σημαντική ισχύος, όπως π.χ. στην Κοζάνη, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το δίκτυο YT. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα πρέπει να επανεξετάζεται το εύρος των αυτόματων μετατροπέων των μετασχηματιστών YT/MT.

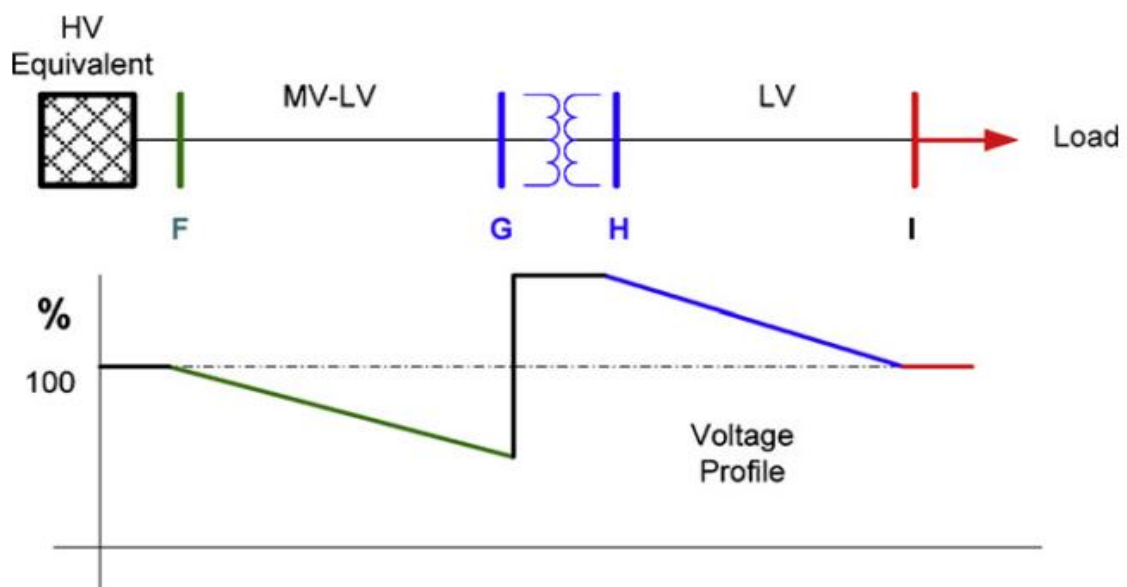
Η επιλογή του κατάλληλου σημείου σύνδεσης των ΑΠΕ με το δίκτυο είναι ένα σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας σχεδιασμού. Η σύνδεση ΑΠΕ με το δίκτυο (RE-DG) στην πλευρά του φορτίου ή του μετασχηματιστή θα προκαλέσει μεταβολή της ισχύος και κατά συνέπεια η μεταβολή αυτή έχει άμεσο αντίκτυπο στην τάση του συστήματος. Η μεταβολή της ισχύος στην πλευρά της χαμηλής τάσης έχει ως αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη μεταβολή της τάσης. Ανάλογα με το επίπεδο διείσδυσης, οι ΑΠΕ που συνδέονται στο δίκτυο ενδέχεται να προκαλέσουν αύξηση της τάσης, ιδίως σε συνθήκες χαμηλού φορτίου. Επομένως, ο αυτόματος ελεγκτής τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης πρέπει να λειτουργεί σωστά ελέγχοντας την τάση.

Στο σχήμα 1, παρουσιάζεται το προφίλ τάσης σε ένα προσομοιωμένο δίκτυο ισχύος σε όλα τα επίπεδα. Η κατεύθυνση της ισχύος μέσω ενός μετασχηματιστή θα είναι πάντα από το υψηλότερο επίπεδο τάσης στο χαμηλότερο επίπεδο τάσης. Οι μόνες εξαιρέσεις από αυτό είναι οι μετασχηματιστές ανύψωσης του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης ενός δικτύου χωρίς σύνδεση ΑΠΕ (RE-DG) στο προφίλ τάσης. Στο σχήμα 3, παρουσιάζεται η επίδραση του σημείου σύνδεσης του RE-DG στο προφίλ της τάσης. Το σχήμα 4 δείχνει το προφίλ τάσης με ρυθμιστή

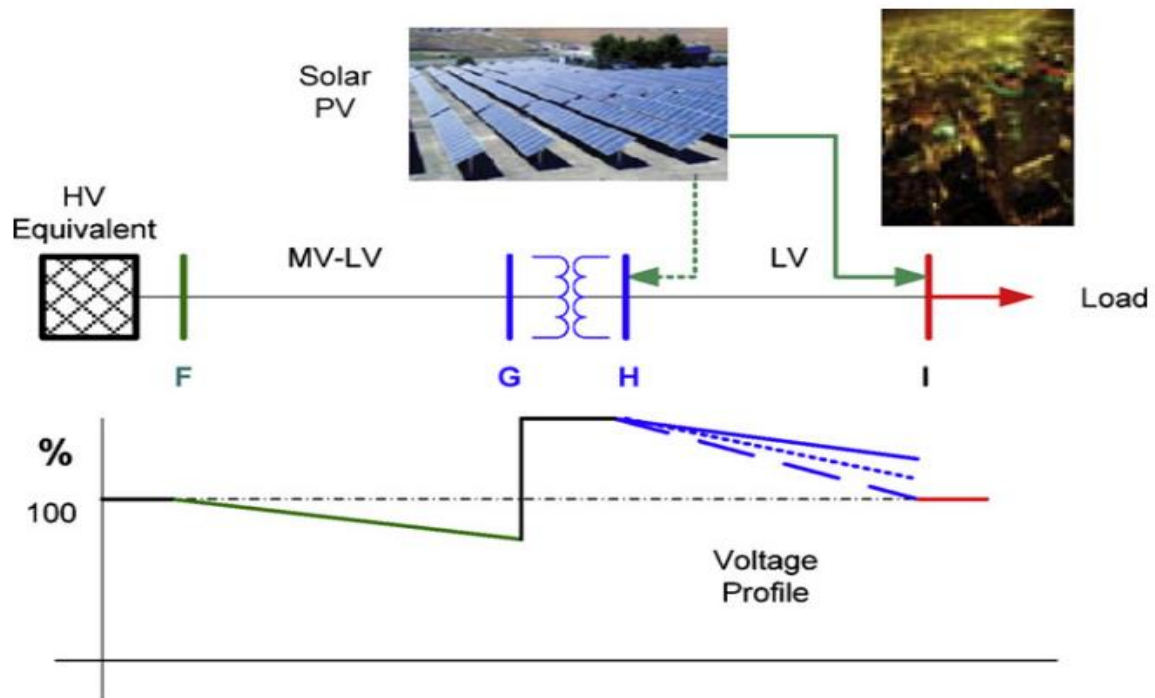
τάσης στην πλευρά της μεταφοράς. Το σχήμα 5 δείχνει πιθανή υπέρταση όταν το RE-DG συνδέεται στην πλευρά του φορτίου.



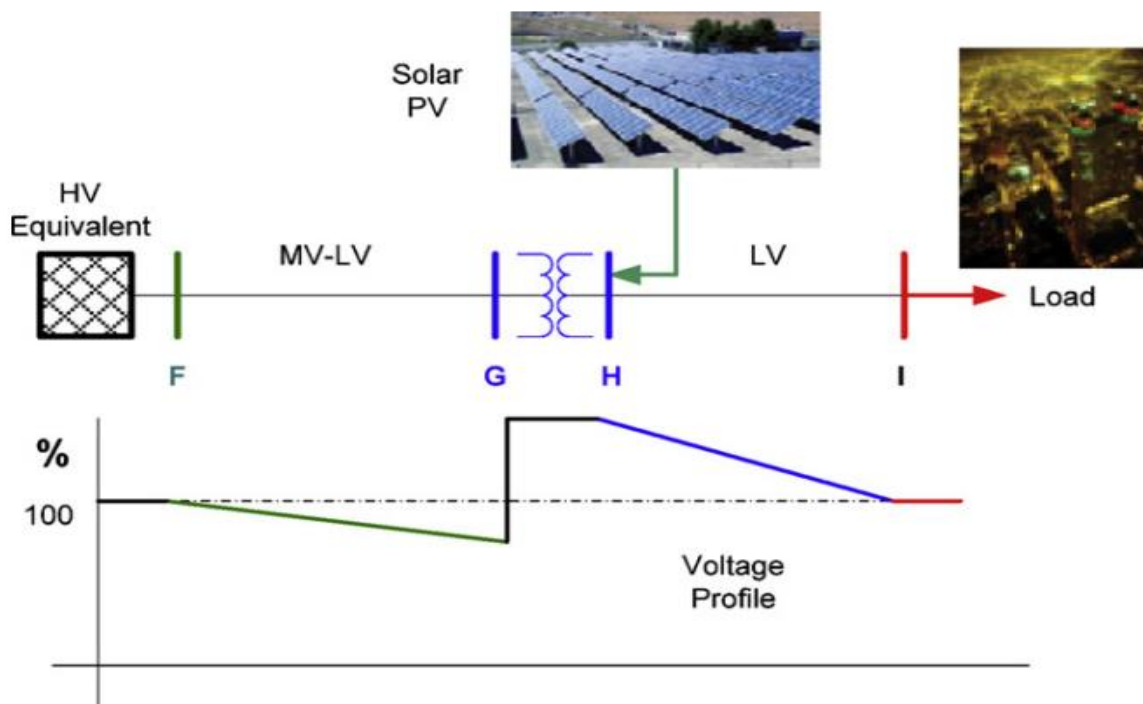
Σχήμα 1: Απλοποιημένο σύστημα ισχύος και προφίλ τάσης (Πηγή: Zahedi, 2011).



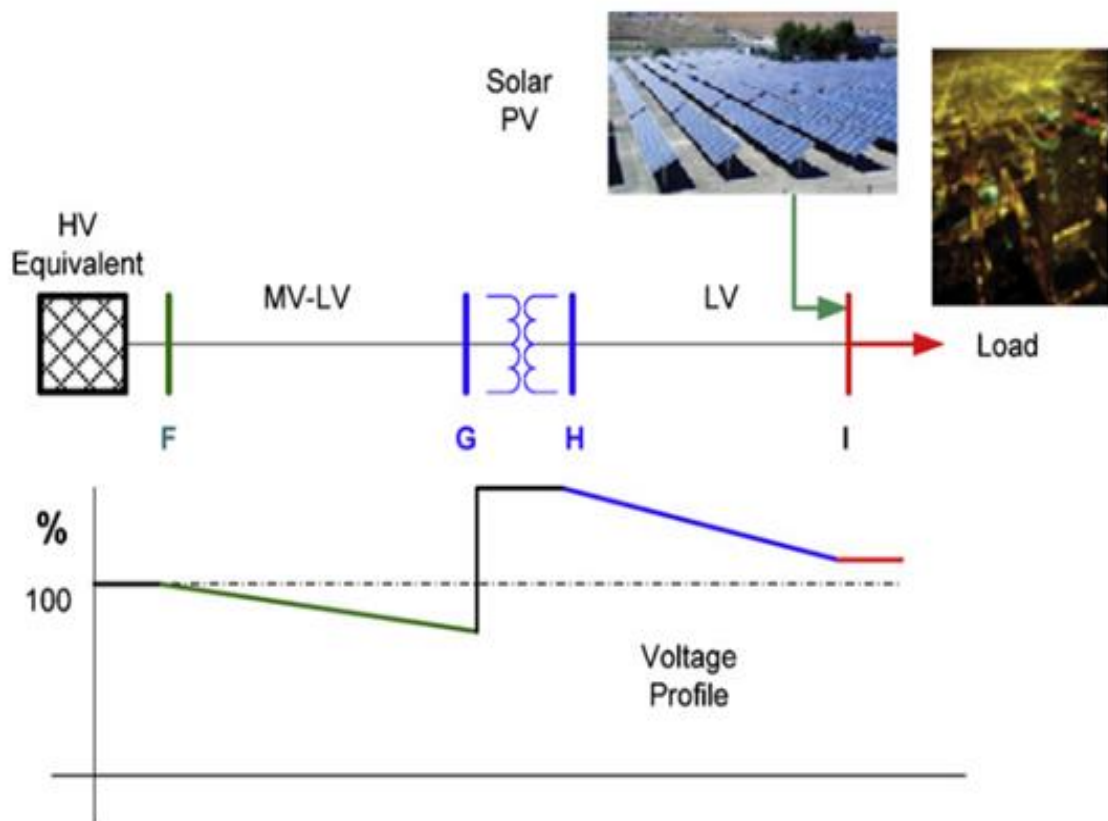
Σχήμα 2: Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (LV) ενός δικτύου χωρίς σύνδεση ΑΠΕ (RE-DG) στο προφίλ τάσης (Πηγή: Zahedi, 2011).



Σχήμα 3: Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (XT) με διαφορετικά σημεία σύνδεσης ΑΠΕ (Φωτοβολταϊκών Συστημάτων) (Πηγή: Zahedi, 2011).



Σχήμα 4: Προφίλ τάσης στην πλευρά της χαμηλής τάσης (XT) όταν η ανανεώσιμη ενέργεια (RE) είναι συνδεδεμένη στην πλευρά του μετασχηματιστή MT/XT. (Πηγή: Zahedi, 2011).



Σχήμα 5: Προφίλ τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης (XT) όταν η ανανεώσιμη ενέργεια (RE) είναι συνδεδεμένη στην πλευρά του φορτίου. (Πηγή: Zahedi, 2011).

1.3 Οι βασικές τεχνολογίες και οι εφαρμογές των ΑΠΕ

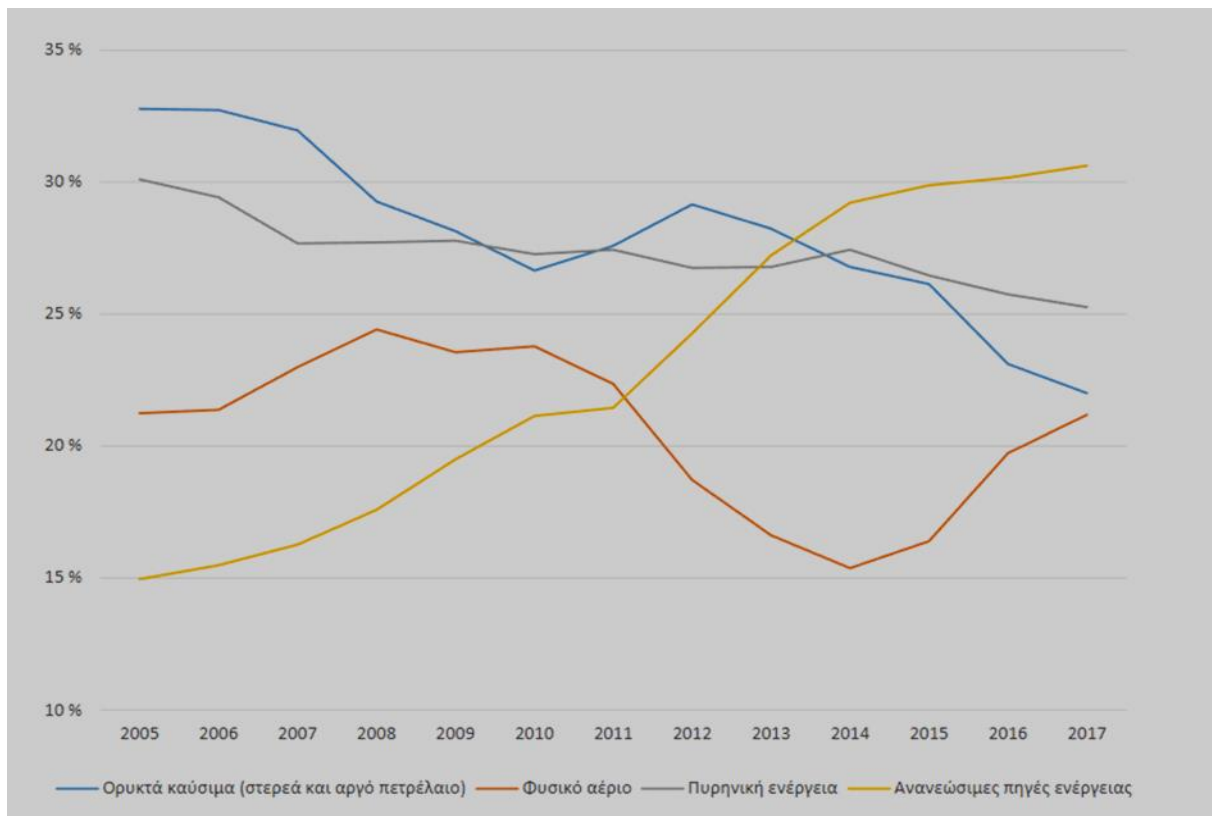
Στα πλαίσια ανάλυσης των βασικών τεχνολογιών και των εφαρμογών των ΑΠΕ, ο παρακάτω πίνακας, παρουσιάζει αναλυτικά τόσο τις βασικές τεχνολογίες των ΑΠΕ, όσο και την εφαρμογή τους τόσο στην ηλεκτρική ενέργεια, όσο και στη θέρμανση και την ψύξη αλλά και στις μεταφορές.

Πίνακας 1: Οι βασικές τεχνολογίες ΑΠΕ και η εφαρμογή τους στους τομείς της ηλεκτρικής ενέργειας, της θέρμανσης και ψύξης, καθώς και των μεταφορών

Τεχνολογία ΑΠΕ	Μετατροπή ενέργειας	Εφαρμογή
Υδροηλεκτρική ενέργεια	Ροή υδάτων και καταρράκτες για ηλεκτροπαραγωγή	Ηλεκτρική ενέργεια
Ανεμογεννήτριες	Αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή	
Ηλιακή ³ ενέργεια [φωτοβολταϊκή ⁴ και θερμική (περιλαμβάνεται η συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια)]	Ηλιακό φως για ηλεκτροπαραγωγή	
Βιομάζα/βιοαέριο/βιορευστά	Βιομάζα/βιοαέριο/βιορευστά για ηλεκτροπαραγωγή	
Αποτέφρωση αποβλήτων	Απόβλητα για ηλεκτροπαραγωγή	
Ενέργεια από κύματα, παλίρροιας και ωκεανούς	Κύματα και παλίρροιας για ηλεκτροπαραγωγή	
Γεωθερμική ενέργεια	Διαφορές θερμοκρασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	
Ηλιοθερμικά	Ηλιακό φως για θέρμανση και ψύξη	Θέρμανση και ψύξη
Βιοκαύσιμα / βιοαέριο	Βιομάζα για την παραγωγή ρευστών καυσίμων ή αερίου	
Αποτέφρωση αποβλήτων	Απόβλητα για θέρμανση και ψύξη	
Γεωθερμική ενέργεια	Διαφορές θερμοκρασίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	
Βιοκαύσιμα / βιοαέριο	Βιομάζα για την παραγωγή ρευστών καυσίμων ή αερίου	Μεταφορές

Έρευνες έχουν δείξει ότι σε ό,τι αφορά την παραγωγή ενέργειας, το 79% αυτής σε ό,τι αφορά την Ε.Ε., προέρχεται από τη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η Ε.Ε. αναγκάζεται να εισάγει ορυκτά καύσιμα για να μπορέσει να ανταπεξέλθει στις ανάγκες της, ενώ η κατάσταση αυτή την έχει οδηγήσει σε εξάρτηση από τις χώρες που αγοράζει. Κάτι τέτοιο φάνηκε κατά το τελευταίο χρονικό διάστημα με τον πόλεμο μεταξύ Ρωσίας – Ουκρανίας και με τη στάση της Ρωσίας ως μία από τους βασικούς προμηθευτές ενέργειας της Ε.Ε. Η εν λόγω στάση, ανέδειξε ακόμη περισσότερο το πρόβλημα της ενεργειακής εξάρτησης, καθώς ο συγκεκριμένος πόλεμος συνέβαλλε σημαντικά στην τελευταία ενεργειακή κρίση.

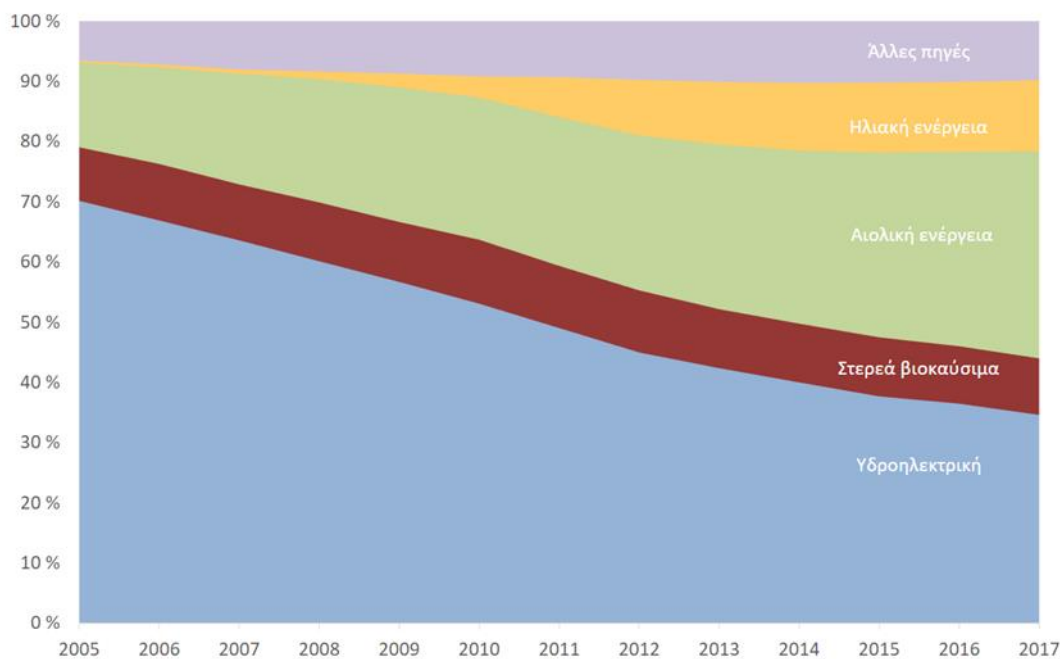
Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται το ποσοστό των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή από το 2005 ως το 2017. Όπως φαίνεται, η χρήση των ΑΠΕ που προορίζεται για ηλεκτροπαραγωγή αυξάνεται συνεχώς κάθε χρόνο, ενώ σήμερα έχει ξεπεράσει στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 30% του συνόλου της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.



Γράφημα 1: Ποσοστό των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ε.Ε. από το 2005 έως το 2017 (Πηγή: https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/img/el_fig01.svg)

Στο γράφημα ένα ακόμα παρατηρείται ότι το ποσοστό των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή για την Ε.Ε. διπλασιάστηκε από 15% σε σχεδόν 31%. Η ανάπτυξη αυτή προέρχεται κυρίως από δύο είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανάμεσα στα οποία διακρίνεται η ηλιακή ενέργεια και η αιολική ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθεί ότι μόνο για την περίοδο 2005-2017, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε με τη βοήθεια της αιολικής ενέργειας παρουσίασε αύξηση σε ποσοστό της τάξεως του 414 %. Το αντίστοιχο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε με τη βοήθεια της ηλιακής ενέργειας, παρουσίασε αύξηση της τάξεως του 8086%

Σε ότι αφορά την Ε.Ε., η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το 35% της συνολικής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, ενώ αντίστοιχα η αιολική ενέργεια αποτελεί το 34% και η ηλιακή ενέργεια το 12% της συνολικής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.



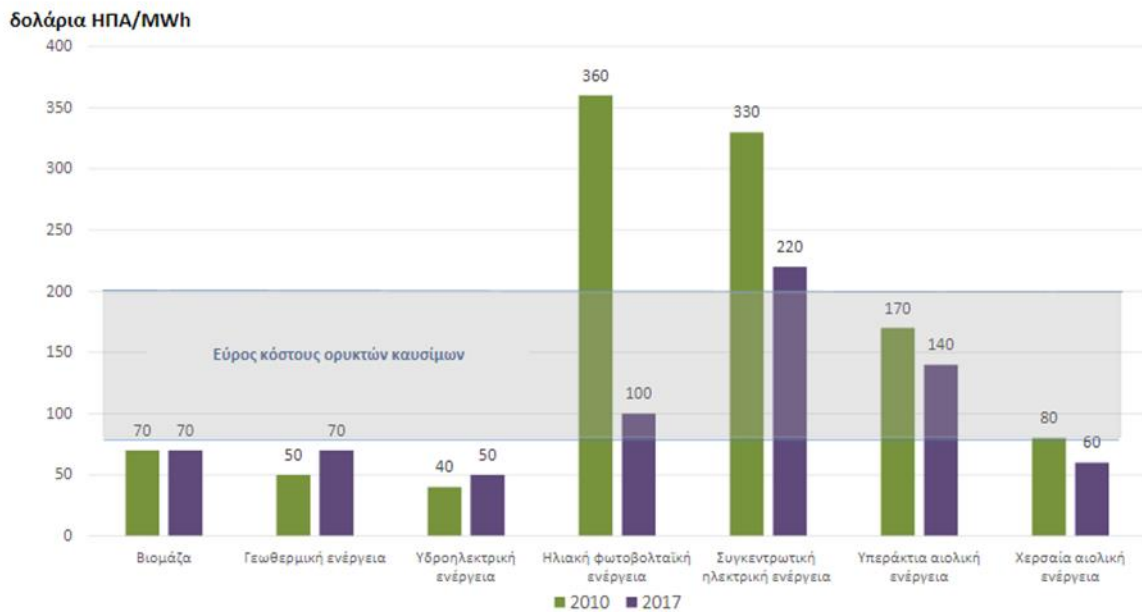
Γράφημα 2: Μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρήχθη από ΑΠΕ στην ΕΕ των 28, περίοδος 2006-2017 (Πηγή: https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/wind-solar-power-generation-8-2019/img/el_fig02.svg)

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι η μείωση του κόστους της τεχνολογίας τόσο στις ανεμογεννήτριες όσο και στα φωτοβολταϊκά συστήματα, έχει βοηθήσει ιδιαίτερα στην ενίσχυση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας αντίστοιχα.

1.4 Το Κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα

Για τον υπολογισμό του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανεξάρτητα από την τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της, η βιομηχανία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιεί τον δείκτη του σταθμισμένου κόστους ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΚΗΕ). Ο συγκεκριμένος δείκτης, αντιπροσωπεύει το ανά MW κόστος κατασκευής και εκμετάλλευσης ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια του χρόνου ζωής του. Ο χρόνος ζωής υπολογίζεται για τις ΑΠΕ στα 20-25 έτη.

Στο παρακάτω γράφημα, παρουσιάζεται το συνολικό σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ για την περίοδο 2010-2017.

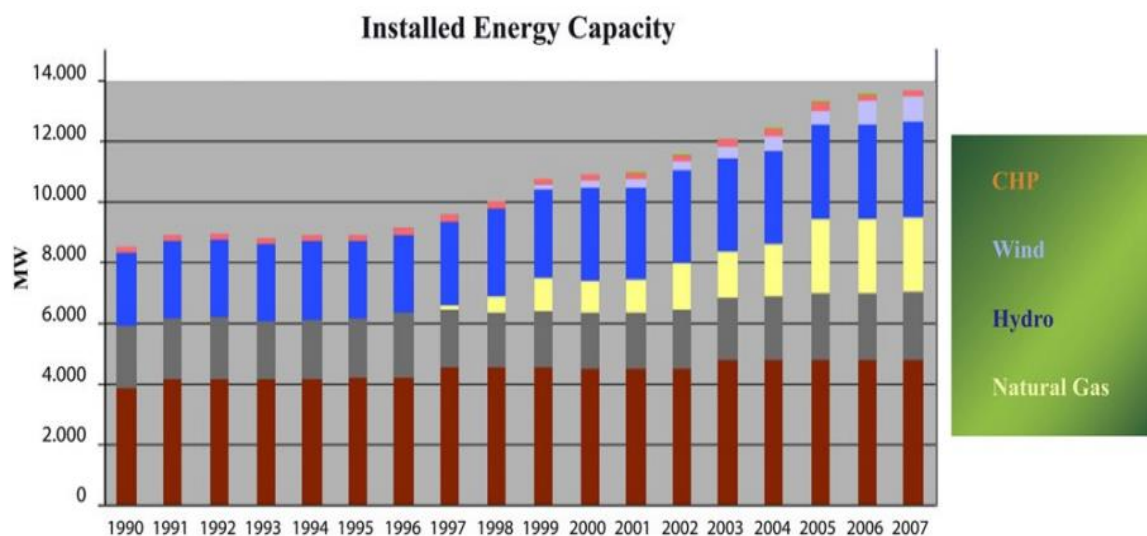


Γράφημα 3: Συνολικό σταθμισμένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ για την περίοδο 2010-2017 (σε δολάρια ΗΠΑ/MWh)

Μέσα από το γράφημα 3, φαίνεται ότι σε ό,τι αφορά την αιολική ενέργεια, αυτή βρίσκεται εντός του εύρους κόστους των ορυκτών καυσίμων. Αντίστοιχα, σε ό,τι αφορά τους φωτοβολταϊκούς σταθμούς, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα φαίνεται πως παρουσίασε ιδιαίτερως σημαντική μείωση. Η εν λόγω μείωση, προκλήθηκε από τη μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών συλλεκτών, ιδιαίτερα από τα τέλη του 2009 και μετά.

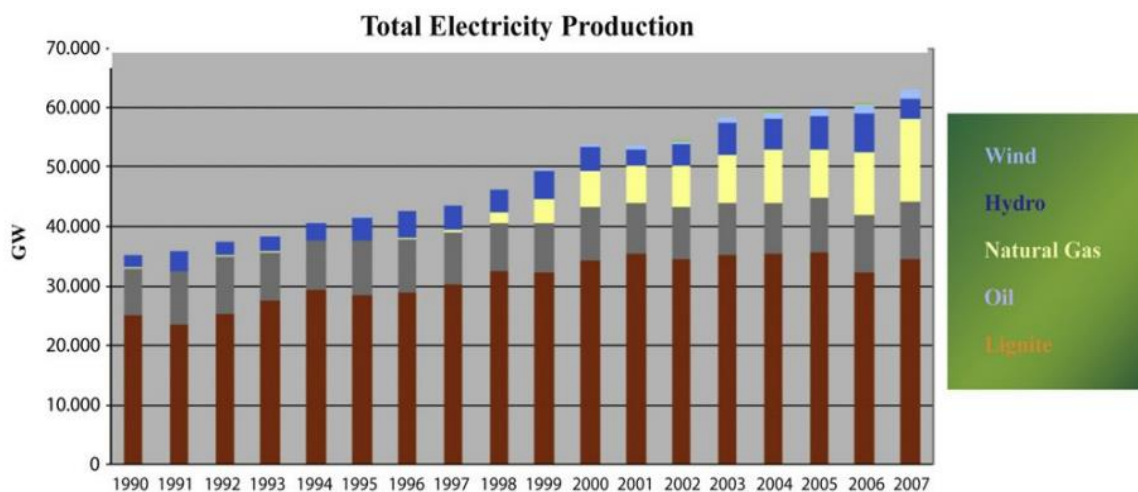
1.5 Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα

Η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα κατά την περίοδο μεταξύ 1990 και 2007 παρουσιάζεται στο Γράφημα 4. Σήμερα στην Ελλάδα κυρίαρχος ενεργειακός πόρος είναι το φυσικό αέριο, ενώ λίγα χρόνια πριν ήταν ο λιγνίτης, καθώς ο εν λόγω πόρος υπήρχε και υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες στη χώρα. Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας με βάση το πετρέλαιο συμβάλλουν επίσης σημαντικά στην Ελλάδα. Από το Γράφημα 4 φαίνεται ότι υπάρχει ένα σταθερό μερίδιο εγκατεστημένων υδροηλεκτρικών μονάδων, μια σταδιακή αύξηση των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με φυσικό αέριο και μια μικρή αλλά συνεχής αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών μονάδων που σηματοδοτεί μια νέα εποχή για τη διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη χώρα.



Γράφημα 4: Εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ενέργειας στην Ελλάδα (1990-2007) (Πηγή: ΜΕΕCC, 2012)

Στο Γράφημα 5, παρουσιάζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για την περίοδο μεταξύ 1990 και 2007. Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε σταδιακά κατά τη διάρκεια της περιόδου και το ετήσιο ποσοστιαίο μερίδιο των λιγνιτικών και πετρελαϊκών πηγών ενέργειας μειώθηκε. Το ετήσιο μερίδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, αιολική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές αυξήθηκε σταθερά κατά την περίοδο αυτή.



Γράφημα 5: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα (1990-2007) (Πηγή: ΜΕΕCC, 2012)

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται μία σύγκριση για την Ελλάδα και την ΕΕ -27, σε ότι αφορά την παραγωγή και τις χρήσεις ενέργειας. Το μέγεθος της Ελληνικής αγοράς ενέργειας έως το 2007, αντιπροσώπευε μερίδιο μικρότερο του 2% της αγοράς της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Έτσι, την περίοδο εκείνη κρίνονταν ιδιαίτερα σημαντική η προσπάθεια από την ελληνική κυβέρνηση, ώστε να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς βρισκόνταν κάτω από το μέσο ποσοστό της ΕΕ-27 (Mondol & Koumpetsos, 2013).

Πίνακας 2: Σύγκριση βασικών ενεργειακών μεγεθών μεταξύ της ΕΕ-27 και της Ελλάδας για το 1990 και το 2010.

Σύγκριση βασικών ενεργειακών μεγεθών μεταξύ της ΕΕ-27 και της Ελλάδας για το 1990 και το 2010.		
Τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (1000 τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου) ΕΕ (27)		
	1990	2010
Ε.Ε.- 27	210,491	243,907
Ελλάδα	3492	4576
Συνολική ακαθάριστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας-GW h		
	1990	2010
Ε.Ε.- 27	2,941,947	3,345,618
Ελλάδα	49,632	57,392
Ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές (% της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας)		
	1990	2010
Ε.Ε.- 27	11,62	19,94
Ελλάδα	4,96	16,68
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τα νοικοκυριά (1000 τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου)		
	1990	2010
Ε.Ε.- 27	52,022	72,456
Ελλάδα	780	1559

Η Ελλάδα από το 2004 έως το 2017 κατάφερε να διπλασιάσει τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από 6,9% στο 15,5%. Σαφώς, κάτι τέτοιο συνέβη καθώς η Ελλάδα ως κράτος

μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης συμφώνησε μαζί με τα υπόλοιπα μέλη της Ε.Ε. στην πλήρη αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ποσοστό 27% έως το 2030. Ο συγκεκριμένος στόχος είναι δεσμευτικός για τη χώρα, αλλά και για τα υπόλοιπα κράτη της Ε.Ε.

Η Ελλάδα βρίσκεται στην δεύτερη θέση στην Ευρώπη με βάση την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο με ποσοστό 12.6%.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 5.5GW. Επίσης η Ελλάδα βρίσκεται στην 8η θέση στην ΕΕ με ποσοστό 15% σε ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από αιολικά πάρκα. Σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο η Ελλάδα βρίσκεται στην 5η θέση της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε) με ποσοστό 39%.

Στο παρακάτω γράφημα, παρουσιάζεται το μείγμα όγκου πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας από τις διάφορες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες και μη, για το 2022. Όπως φαίνεται από το γράφημα, ένα ποσοστό της τάξεως του 33% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται από το αέριο, ενώ ένα εξίσου μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 30%, προέρχεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παρόλα αυτά, είναι ξεκάθαρο πως είναι πολλά αυτά που πρέπει να γίνουν, προκειμένου να ανεξαρτητοποιηθεί πλήρως η χώρα από τις συμβατικές πηγές ενέργειας και να προσανατολιστεί πλήρως προς τις ανανεώσιμες.

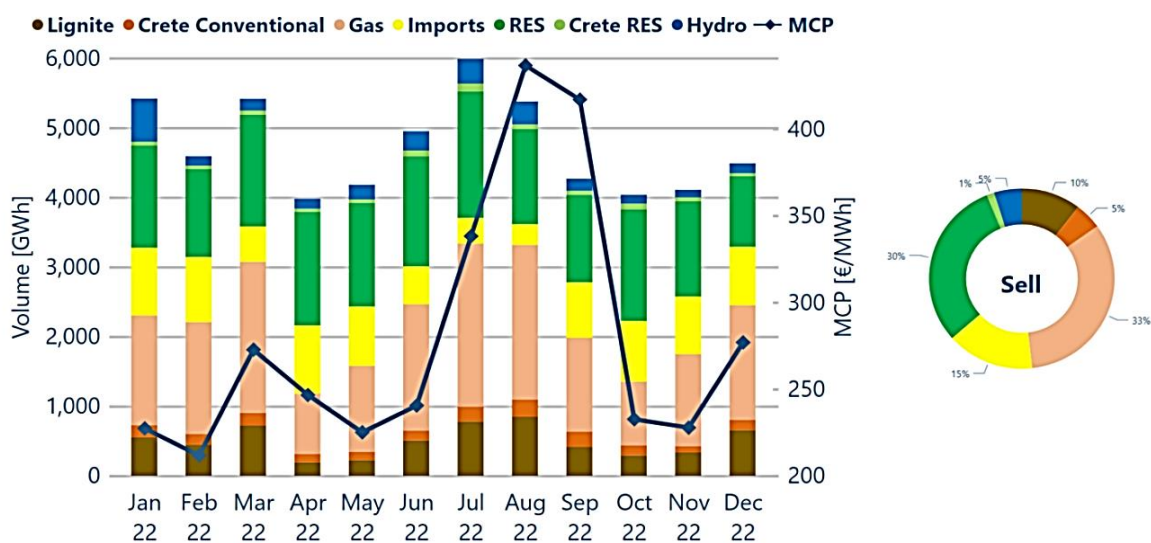
Σε ότι αφορά το ποσοστό ενέργειας που πωλείται και είναι προερχόμενο από την καύση του λιγνίτη στην Ελλάδα, για το σύνολο του 2022, αγγίζει το 10%.

Σε ότι αφορά τις εισαγωγές ενέργειας, φαίνεται ότι ο μέσος όρος των ετήσιων εισαγωγών ανέρχεται σε ποσοστό της τάξεως του 15%.

Αντίστοιχα, η υδροηλεκτρική ενέργεια συμμετέχει με ένα ποσοστό της τάξεως του 5% στο σύνολο του μίγματος πωλήσεων της χώρας.

Οι μήνες που παρουσίασαν τον μεγαλύτερο όγκο πωλήσεων στην Ελλάδα για το 2022, ήταν ο Ιούλιος, ενώ ακολούθησαν ο Ιανουάριος, ο Μάρτιος και ο Σεπτέμβριος. Στο σύνολο των μηνών που αναφέρθηκαν, ο όγκος της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε στη χώρα, υπερέβη τις 5000 Mwh. Αντίστοιχα, για το μήνα Ιούλιο, φαίνεται πως ο όγκος της ηλεκτρικής ενέργειας που πωλήθηκε στη χώρα ξεπέρασε τις 6000 Mwh.

Αναλυτικότερα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά μήνα στο γράφημα 6.



Γράφημα 6: Μείγμα όγκου πωλήσεων ηλεκτρικής ενέργειας από τις διάφορες πηγές ενέργειας, ανανεώσιμες και μη, για το 2022

Ειδικά στο κομμάτι της αιολικής ενέργειας, οι αιολικοί πόροι της Ελλάδας παρουσιάζονται ως από τους σημαντικότερους αιολικούς πόρους για παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη. Το προφίλ των ανέμων στην ελληνική επικράτεια είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μάλιστα είναι από τα σημαντικότερα προφίλ που παρουσιάζονται εντός της ευρωζώνης. Συγκεκριμένα, οι άνεμοι στα περισσότερα μέρη της Ελλάδας έχουν προφίλ άνω των 8m/s, ενώ πολλές είναι οι περιοχές της χώρας όπου οι άνεμοι βρίσκονται σε πλήρη δραστηριότητα για πάνω από δυόμισι χιλιάδες ώρες ετησίως.

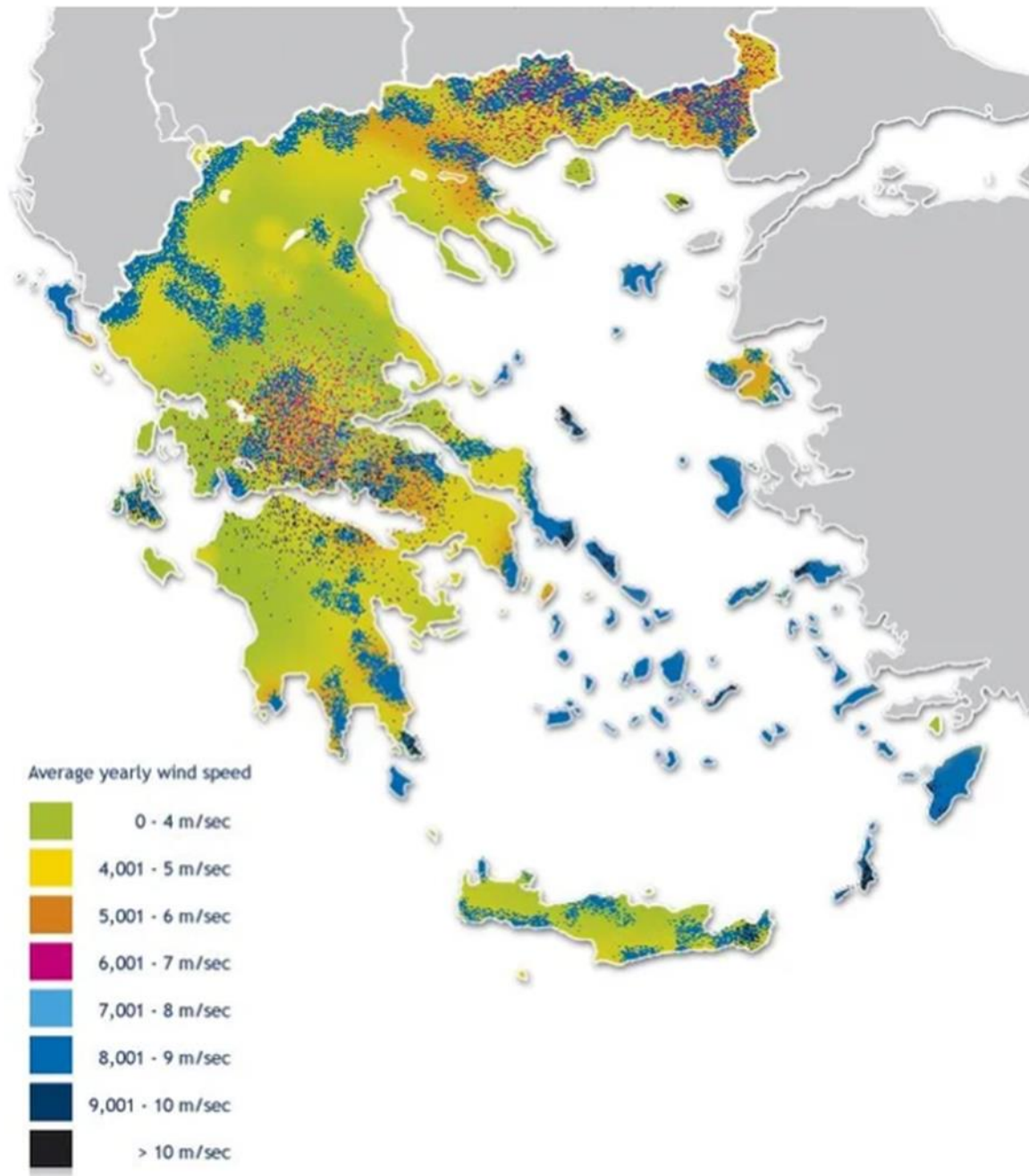
Από το 1990 έως και το 2003, οι εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στη χώρα αυξάνονταν περίπου σε ποσοστό 30% κάθε χρόνο, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής δυναμικότητας εγκαταστάθηκε στη χώρα το 2003 και το 2004, ενώ ακολούθησε μία ακόμη σημαντική περίοδος αύξησης του δυναμικού όπου ξεκίνησε το 2018. Με τις νέες εγκαταστάσεις που πραγματοποιήθηκαν αλλά και με την ανανέωση των υπάρχοντων ανεμογεννητριών, η ισχύς που παράχθηκε το 2018 από την αιολική ενέργεια ήταν 2.858,5MW. Σύμφωνα με την ΕΛΕΤΑΕΝ (2022), η αιολική ισχύς τον Ιούνιο του 2022 έφτασε τα 4.534MW, καταγράφοντας αύξηση της τάξεως του 63% σε σχέση με το 2018. Μάλιστα, κατά το τέλος του Ιουνίου του 2022, κατασκευάζονταν νέα αιολικά πάρκα ισχύος πάνω από 650MW, γεγονός που δείχνει ότι οι αυξητικές τάσεις έχουν παγιωθεί.

Στην παρακάτω εικόνα, καταγράφεται η διασπορά των εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα, όπως αυτή ίσχυε κατά το τέλος του πρώτου εξαμήνου του 2022.



Εικόνα 3: Χωρική κατανομή του αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα κατά το τέλος του πρώτου εξαμήνου του 2022 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ, 2022).

Η βέλτιστη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού της χώρας, πρόκειται να συντελέσει δυναμικά στη βιώσιμη ανάπτυξη της Ελλάδας. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται το πλούσιο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας ιδιαίτερα στα νησιά του αιγαίου, την Κρήτη και την Εύβοια.



Εικόνα 4: Χάρτης αιολικών πάρκων στην Ελλάδα με έμφαση στην ταχύτητα των ανέμων (Πηγή: <https://player.slideplayer.gr/41/11382849/data/images/img25.jpg>)

Αντιστοίχως η ηλιακή ενέργεια μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την βιώσιμη ηλεκτροπαραγωγή, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3, οι περιοχές

της Ελλάδας με το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό είναι η Πελοπόννησος, τα νησιά του νοτίου Αιγαίου και η Κρήτη.



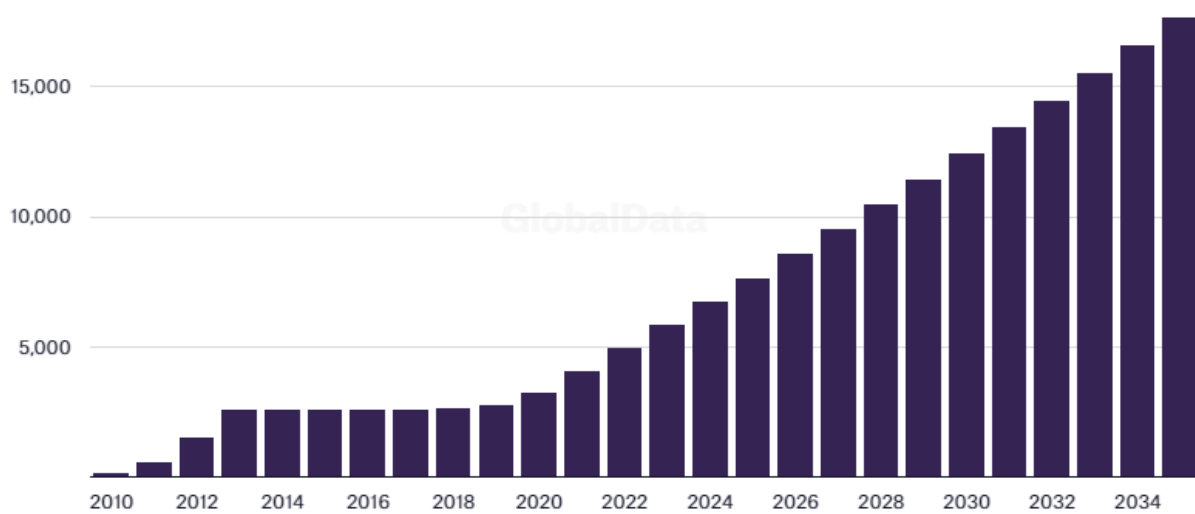
Εικόνα 5: Το Ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας (Πηγή: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας www.cres.gr)

Η ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα, έχει ξεκινήσει να αναπτύσσεται από το 2006 ενώ κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξής της, η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν συνυφασμένη με ένα πολύ υψηλό κόστος. Από το 2009, εξαιτίας των ελκυστικών τιμολογίων

τροφοδοσίας η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων ξεκίνησε την πλήρη ανοδική πορεία της (ΑΔΜΗΕ, 2021).

Η πορεία της δυναμικότητας των φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα καταγράφεται αναλυτικά στο παρακάτω γράφημα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα στην Ελλάδα φαίνεται πως παρουσίασαν μία σημαντική αύξηση από το 2010 έως το 2013, ενώ από το 2013 έως το 2019 ακολούθησαν μία σταθερή πορεία, η οποία βέβαια παρουσιάζει αυξητικές τάσεις από το 2020 και μετά ενώ προβλέπονται ιδιαίτερα σημαντικές αυξήσεις έως και το 2035.

Installed Capacity (MW)



Γράφημα 6: Ιστορική και προβλεπόμενη δυναμικότητα παραγωγής ηλιακών φωτοβολταϊκών στην Ελλάδα από το 2010 έως το 2035. (Πηγή: <https://www.power-technology.com/data-insights/solar-pv-in-greece>).

Από τις υπόλοιπες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ιδιαίτερα σημαντική για την Ελλάδα είναι η γεωθερμική ενέργεια. Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τους πόρους της γεωθερμίας. Οι γεωθερμικοί πόροι με υψηλή θερμοκρασία, είναι ικανοί να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ενώ βρίσκονται σε βάθος από ένα έως τρία χιλιόμετρα. Πόροι γεωθερμίας σε βάθος 1-2km, έχουν καταγραφεί στη Νίσυρο, τη Μήλο και τη Σαντορίνη. Αντίστοιχα σε λίγο μεγαλύτερο βάθος το οποία φτάνει έως και τα 3 χιλιόμετρα, αναφέρονται τα νησιά Λέσβος, Χίος και Σαμοθράκη, αλλά και στις λεκάνες της κεντρικής και ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης. Εκτός από τους γεωθερμικούς πόρους υψηλής θερμοκρασίας, η Ελλάδα διαθέτει και γεωθερμικούς χώρους χαμηλής θερμοκρασίας. Στους συγκεκριμένους πόρους, συμπεριλαμβάνονται οι 56 θερμές πηγές, οι οποίες βρίσκονται σε διάφορα μέρη της Ελλάδας. Το 2017, υπογράφηκε η πρώτη απόφαση χορήγησης άδειας για τη διανομή θερμικής

ενέργειας θερμικής ισχύος 9,8 MWth στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. Η εν λόγω ενέργεια πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων και νερού στην ευρύτερη περιοχή (Privacy Shield Framework, 2023).

Τέλος, ιδιαίτερος σημαντική κρίνεται η χρήση της βιομάζας και των βιοκαυσίμων για ενέργεια. Η Ελλάδα, έχει δεσμευτεί για αύξηση του ποσοστού των βιοκαυσίμων στο 10% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ η χώρα είναι ιδιαίτερα επικεντρωμένη στην αξιοποίηση των αποβλήτων. Η βιομάζα και τα βιοκαύσιμα είναι ισχυρές αγορές με υψηλό δυναμικό ανάπτυξης. Στην Ελλάδα, ο γεωργικός τομέας αντιπροσωπεύει πάνω από το 5% του ΑΕΠ, υπερτριπλάσιο του μέσου όρου της ΕΕ που είναι 1,8%. Έτσι, είναι εύκολη στη χώρα η εξεύρεση πηγών πρώτων υλών για εκμετάλλευση (Privacy Shield Framework, 2023).

1.6. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη των τελευταίων χρόνων στους τομείς των ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και στα έναρτα μέρη τους όπως τα διακοπτικά στοιχεία, τα ψηφιακά κυκλώματα και οι επεξεργαστές, σε συνδυασμό με τη βελτίωση των υλικών χρησιμοποιώντας το κάθε σύστημα, έχουν οδηγήσει με βεβαιότητα στην ανάπτυξη πιο αξιόπιστων αλλά και πιο αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Η λειτουργία των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι βασισμένη στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες μορφές και αντίστροφα. Οι μορφές στις οποίες μπορεί να αποθηκευτεί η ηλεκτρική ενέργεια έχουν ως εξής:

- Σε χημική μορφή
- Σε μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου τους λέγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς
- Σε μορφή μαγνητικού πεδίου
- Σε μορφή πεπιεσμένο αέρα
- Σε μορφή υδρογόνου
- Σε μηχανική μορφή
- Σε μορφή κινητικής ενέργειας σε σφόνδυλο

Ωστόσο, ιδιαίτερα σημαντικές είναι οι διάφορες τεχνολογίες βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης της ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, τα δίκτυα λόγω της υψηλής διεσπαρμένης παραγωγής μετατρέπονται από παθητικά σε ενεργητικά. Ένα ενεργητικό δίκτυο διανομής ορίζεται ως ένα δίκτυο διανομής εφοδιασμένο με συστήματα για τον έλεγχο και τον καθορισμό της συνδυασμένης λειτουργίας των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, χρησιμοποιείται ο τύπος αποθήκευσης μπαταριών των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Οι μπαταρίες αυτές είναι όμοιες με τις μπαταρίες αυτοκινήτου, συνήθως τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li-ion battery) ή οξέος μολύβδου. Οι μπαταρίες χαρακτηρίζονται από ένα σημαντικό πλήθος κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης και μεγάλη διάρκεια ζωής. Με τον όρο φόρτιση της μπαταρίας εννοούμε την διαδικασία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στην μπαταρία, ενώ με τον όρο εκφόρτιση εννοούμε την διαδικασία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τη μπαταρία προς το ηλεκτρικό σύστημα. Η φόρτιση της μπαταρίας πραγματοποιείται με συνεχές ρεύμα DC, επομένως απαιτούνται διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος για τη μετατροπή της AC σύνδεσης σε DC.

Σε λειτουργικές καταστάσεις με μεγάλες αυξομειώσεις στην θερμοκρασία κατά την διάρκεια του έτους, χρησιμοποιούνται αλκαλικές μπαταρίες νικελίου – καδμίου. Ένα σημαντικό θέμα αφορά τη διαστασιολόγηση των μπαταριών, η οποία γίνεται με γνώμονα με τις ανάγκες αυτονομίας ή με τεχνοοικονομικούς όρους, ανάλογα με τις υπηρεσίες που θα προσφέρει.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται τα βασικά πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα των πιο συχνών τύπων μπαταριών.

Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των βασικών τύπων μπαταριών

Τύπος Μπαταρίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μολύβδου-οξέος (PbO₂)	Χαμηλό κόστος, αξιόπιστη τεχνολογία, εύκολη αντικατάσταση, ευελιξία παρεχόμενης ισχύος	Υψηλές απαιτήσεις συντήρησης, αργή φόρτιση, μικρός κύκλος ζωής, χαμηλή πυκνότητα ενέργειας, επικίνδυνο και τοξικό χημικό περιεχόμενο
Νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)	Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, σχετικά μεγάλος χρόνος ζωής, χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, ανθεκτικότητα σε δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες	Υψηλό κόστος, επιβλαβές και τοξικό περιεχόμενο, πεπερασμένη ποσότητα καδμίου στον πλανήτη
Ψευδαργύρου-αέρα (Zn-Air)	Φιλικές προς το περιβάλλον, υψηλά επίπεδα ενέργειας, ελεγχόμενη εκφόρτιση, επαναφορτιζόμενη λειτουργία, χαμηλό κόστος	Μικρός κύκλος ζωής και μικρή αποτελεσματικότητα φόρτισης και εκφόρτισης
Λιθίου-Ιόντος (Li-Ion)	Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, μεγάλος κύκλος ζωής, γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση, μικρό βάρος, μεγάλη δυνατότητα ανακύκλωσης, μεγάλη αποτελεσματικότητα (σχεδόν 100%)	Υψηλό κόστος, σταδιακή υποβάθμιση κάτω από υψηλές θερμοκρασίες

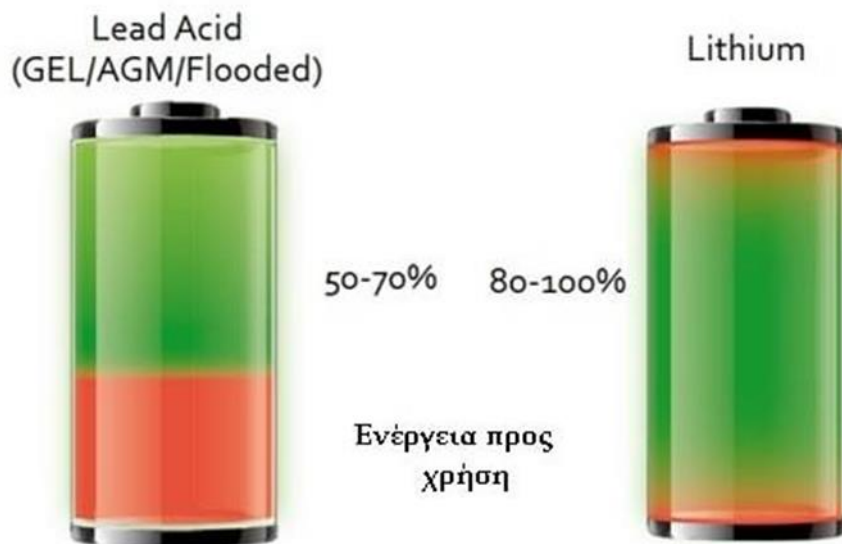
Σήμερα οι δύο τύποι μπαταριών που επικρατούν στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι αυτοί των μπαταριών ιόντος-λιθίου και ροής που θα αναφερθούμε στην συνέχεια.

1.6.1. Μπαταρίες ιόντων - λιθίου

Η πλειονότητα των συστημάτων αποθήκευσης με μπαταρίες πρόσφατα άρχισαν να χρησιμοποιούν μπαταρίες ιόντων-λιθίου, λόγω τους αποδεδειγμένης αξιόπιστης τεχνολογία τους. Οι μπαταρίες ιόντων – λιθίου παρουσιάζουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ο μεγάλος κύκλος ζωής τους, η γρήγορη απόκριση φόρτισης, το μικρό βάθος φόρτισης, ο χαμηλός ρυθμός αυτόματης εκφόρτισης, η δυνατότητα ανακύκλωσης, ο μεγάλος βαθμός απόδοσης και οι χαμηλές ανάγκες συντήρησης.

Ωστόσο, πέρα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως η μικρή τους αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και το υψηλό κόστος τους. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, στο μέλλον αναμένεται να μειωθεί το κόστος τους.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται σύγκριση της μπαταρίας μολύβδου – οξέος με τη μπαταρία ιόντων – λιθίου.



Εικόνα 6: Σύγκριση της μπαταρίας μολύβδου – οξέος και την μπαταρία ιόντων – λιθίου
(Πηγή: <https://www.mp-energy.gr/category/285/sunlight.html>)

1.6.2. Μπαταρίες ροής

Τα συστήματα με μπαταρίες ροής ξεχωρίζουν για την μεγάλη διάρκεια ζωής τους και έχουν την ικανότητα να παρέχουν αποθηκευτική διάρκεια από δύο έως οκτώ ώρες. Οι Μπαταρίες ροής σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων – λιθίου, έχουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα γεγονός που σημαίνει ότι καταναλώνουν περισσότερο φυσικό χώρο και είναι κατάλληλες μόνο για σταθερές και μεγάλες εφαρμογές.

Ο τύπος της μπαταρίας αυτής δεν είναι από την κατασκευή της εύφλεκτη, ενώ ο ηλεκτρολύτης της πρέπει να τοποθετείται με ασφάλεια καθώς η περίπτωση διαρροής δημιουργεί ανησυχίες.

Οι μπαταρίες αυτές έχουν χαμηλότερη απόδοση σε σύγκριση με τις μπαταρίες ιόντων – λιθίου. Όμως, η διάρκεια του κύκλου ζωής της συγκεκριμένης μπαταρίας είναι περίπου είκοσι χρόνια.

Συμπερασματικά, οι μπαταρίες αποτελούν μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας ενώ είναι γεγονός ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας ερευνάται συνεχώς η χρήση της και σε νέες εφαρμογές.

Τέλος, οι αιτήσεις για αποθήκευση ενέργειας στην Ελλάδα ανέρχονται στις 1800 για το έτος 2023, σύμφωνα με στοιχεία από το Energy-press. Αφορούν κυρίως συστήματα αποθήκευσης που προορίζονται για κατοικίες και συνδυάζονται με μπαταρία (Δεληγιάννης, 2023).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

1.1. Εισαγωγή

Η σύγχρονη μηχανή χρησιμοποιούμενη ως γεννήτρια αποτελεί μια από τις βασικότερες συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αφού είναι η σπουδαιότερη μηχανή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελούνται οι σύγχρονες γεννήτριες, είναι δύο: ο στάτης που είναι το ακίνητο μέρος της και ο δρομέας που είναι το περιστρεφόμενο μέρος της.

Επειδή στο δρομέα υπάρχει ένα πηνίο το οποίο διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της γεννήτριας. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από δύο πόλους, τον Βόρειο και τον Νότιο. Η μαγνητική ροή που δημιουργείται είναι σταθερή στο χρόνο και το πεδίο που δημιουργείται μοιάζει με το πεδίο που θα δημιουργούσε μια ράβδος μόνιμου μαγνήτη. Στην πλειοψηφία των σύγχρονων μηχανών το κύκλωμα διέγερσης βρίσκεται στο δρομέα και το τύλιγμα ισχύος στον στάτη. Στο κύκλωμα διέγερσης συνδέεται μια εξωτερική πηγή συνεχούς τάσης. Όταν η τάση μεταβάλλεται, μεταβάλλεται και το ρεύμα στο πηνίο του δρομέα. Αλλάζοντας το ρεύμα στο πηνίο του δρομέα αλλάζει η ένταση και η ροή του μαγνητικού πεδίου που αυτό δημιουργεί.

Ωστόσο όταν ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα η πεπλεγμένη με τον στάτη μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο. Σε κάθε μια περιστροφή του δρομέα η τάση στον στάτη κάνει επίσης μια περιστροφή στο χρόνο. Η συχνότητα της τάσης σε κύκλους ανά δευτερόλεπτα (Hz) είναι η ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα σε περιστροφές ανά δευτερόλεπτα, δηλαδή η ηλεκτρική συχνότητα της τάσης είναι (συγχρονισμένη) με την περιστροφική ταχύτητα του δρομέα. Από αυτό το γεγονός η μηχανή ονομάζεται σύγχρονη. Έτσι μια σύγχρονη μηχανή δύο πόλων πρέπει να περιστρέφεται με 3000 στροφές ανά λεπτό για να παράγει τάση συχνότητας 50Hz.

Με βάση τα παραπάνω, ο ρόλος της σύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο είναι σημαντική όταν θέλουμε να εξασφαλίσουμε απρόσκοπτη και συνεχή λειτουργία επί 24ώρου βάσεως (π.χ. ψυκτικών θαλάμων, χειρουργείων, παραγωγικών διαδικασιών, αντλιοστασίων κτλ.). Ο έλεγχος τάσης της σύγχρονης γεννήτριας μπορεί να πραγματοποιηθεί χειροκίνητα μέσω της διέγερσης, αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων αυτόματων

διατάξεων. Σε περίπτωση αύξησης του φορτίου της γεννήτριας δηλαδή αύξηση της έντασης του ρεύματος του δικτύου που τροφοδοτείται από την γεννήτρια οδηγεί σε μεγαλύτερη πτώση της τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου αποκαθίσταται στη θεμιτή τιμή μέσω της αύξησης του ρεύματος διέγερσης μέσω κατάλληλης μείωσης της ρυθμιστικής αντίστασης στην διεγέρτρια (DC τροφοδοσία της γεννήτριας). Εάν για οποιοδήποτε λόγο αυξηθεί η τάση εξόδου, επαναφέρεται στην θεμιτή τιμή με την αντίστροφη διαδικασία.

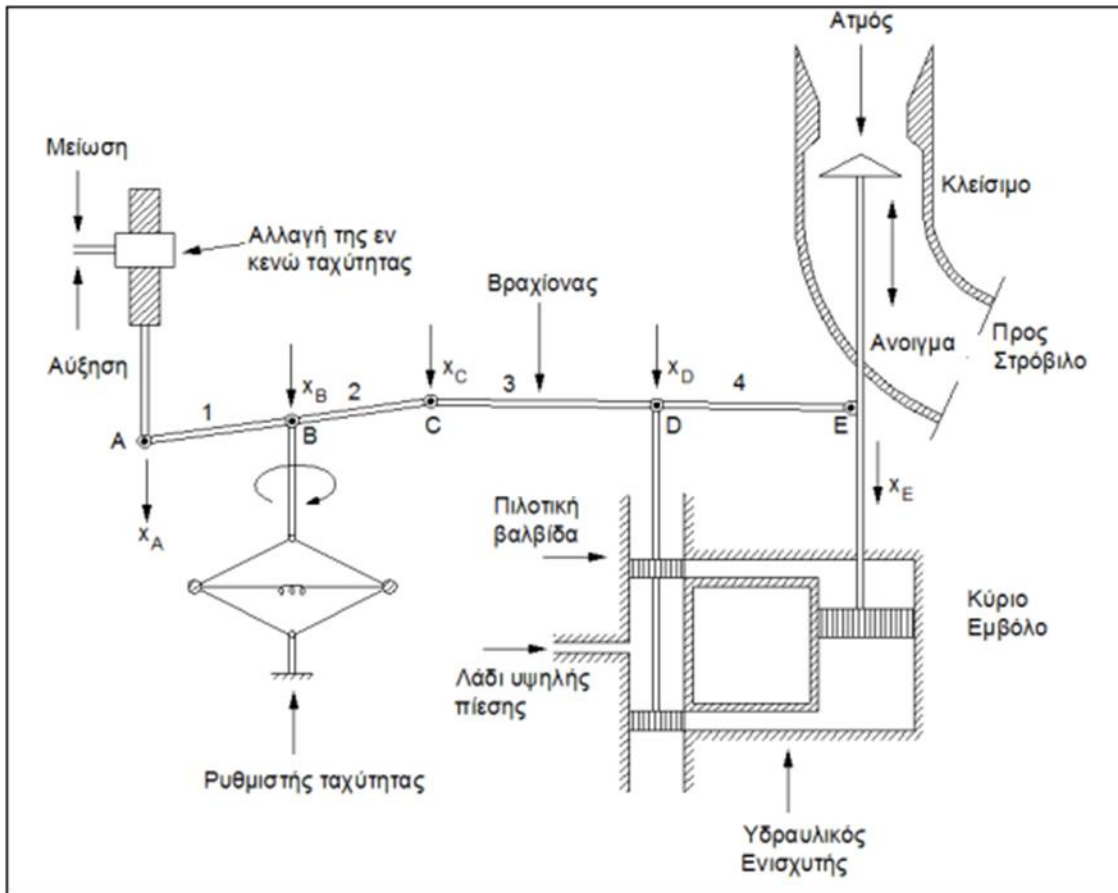
Απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή τροφοδότηση του δικτύου αποτελεί η διατήρηση σταθερής συχνότητας εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο της σύγχρονης γεννήτριας. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα της γεννήτριας. Η διατήρηση σταθερής ταχύτητας περιστροφής (ανεξαρτήτως του φορτίου) επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλου ελέγχου τροφοδοσίας καυσίμου του κινητήρα με χρήση αυτόματων διατάξεων.

Ο ρυθμιστής στροφών του κινητήριου μηχανισμού – γεννήτριας, είναι ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου που καθορίζει τόσο την κλίση όσο και τη θέση της στατικής χαρακτηριστικής. Η στατική χαρακτηριστική, δείχνει το πόσο θα μεταβληθούν οι στροφές ή η συχνότητα για κάποια μεταβολή της ισχύος της.

Στην παρακάτω εικόνα, βλέπουμε έναν παλαιού τύπου ρυθμιστή στροφών, ο οποίος όμως δείχνει παραστατικά την αρχή λειτουργίας του.

Η τιμή της συχνότητας χωρίς φορτίο είναι το σημείο Α. Για παράδειγμα, μία μείωση των στροφών θα κάνει το γυροσκόπιο να στρέφεται πιο αργά και επομένως το σημείο Β να ανέβει. Ως επακόλουθο της κατάστασης αυτής, θα ανεβούν και τα σημεία C και D και ως συνέπεια αυτού θα βγει λάδι από το χώρο του εμβόλου. Το έμβολο θα μετακινηθεί προς τα κάτω και η βαλβίδα του ατμού θα ανοίξει περισσότερο. Η αύξηση του ατμού θα προκαλέσει αύξηση της ενεργού ισχύος.

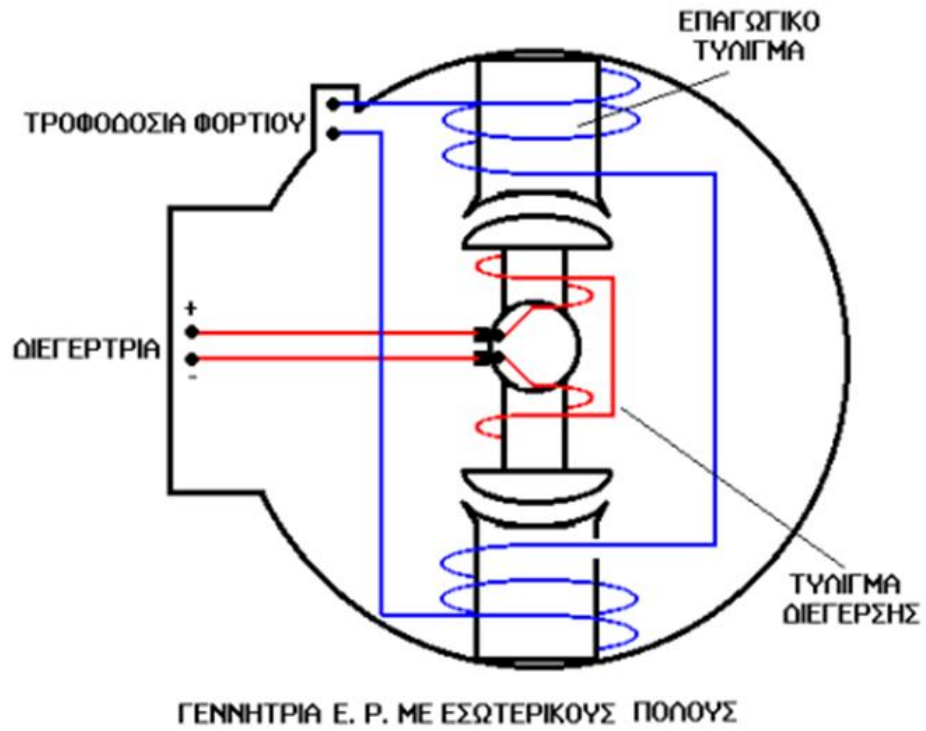
Μία αύξηση των στροφών, θα προκαλούσε το αντίθετο αποτέλεσμα. Οι σχέσεις των βραχιόνων καθορίζουν την κλίση της στατικής χαρακτηριστικής. Μία αλλαγή της θέσης του σημείου Α, σημαίνει παράλληλη μετατόπιση της στατικής χαρακτηριστικής προς τα επάνω ή προς τα κάτω αντίστοιχα.



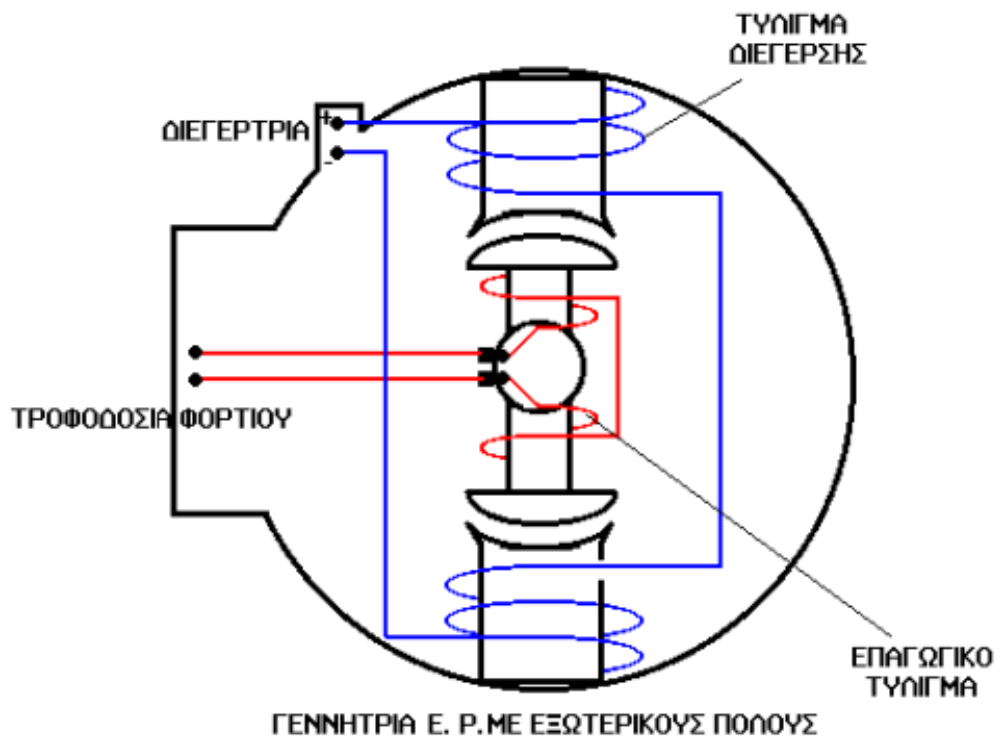
Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση ρυθμιστή στροφών

Οι ηλεκτρικές γεννήτριες κατατάσσονται ανάλογα με την τάση εξόδου τους σε μονοφασικές και τριφασικές. Ανάλογα με τη θέση των πόλων, το επαγωγικό τύλιγμα βρίσκεται ή στο δρομέα για γεννήτριες με εξωτερικούς πόλους, ή στο στάτη για γεννήτριες με εσωτερικούς πόλους. Στις παρακάτω εικόνες, παρατηρούμε τα βασικά χαρακτηριστικά μίας σύγχρονης γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος με εσωτερικούς πόλους και με εξωτερικούς πόλους. Όπως παρατηρείται στην εικόνα 8, ο στάτης περιέχει το επαγωγικό τύμπανο με το τύλιγμα του και ο δρομέας τους μαγνητικούς πόλους. Ο στάτης της γεννήτριας με εσωτερικούς πόλους αποτελείται από το τύλιγμα πολλών περιελίξεων που συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας συγκρότημα ομάδων τα οποία τοποθετούνται στον πυρήνα του τυμπάνου σε μια η δύο στρώσεις. Από το τύλιγμα της γεννήτριας μένουν ελεύθερα τα τυλίγματα που συνδέονται στους ακροδέκτες. Ο δρομέας των γεννητριών έχει ως βασικό σκοπό να περιστρέφει τους πόλους ώστε να δημιουργεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Τέλος οι γεννήτριες με εσωτερικούς πόλους παρέχουν τάσεις έως 6kV αλλά παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες (ισχύος, τάσης, τριβών) και απαιτούν συνεχή συντήρηση.



Εικόνα 8: Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με εσωτερικούς πόλους



Εικόνα 9: Γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος με εξωτερικούς πόλους

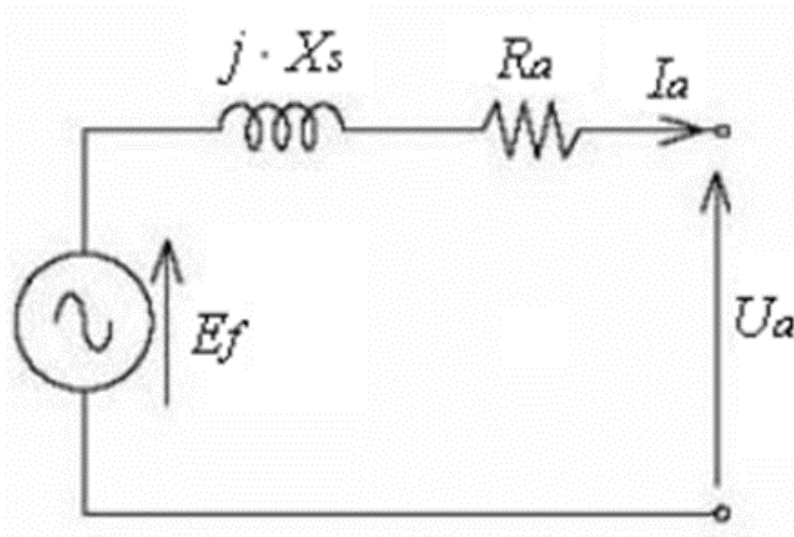
Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τον τύπο γεννήτριας με εξωτερικούς πόλους. Σε αυτόν τον τύπο γεννήτριας ο στάτης στηρίζει την μηχανή και δημιουργεί κατάλληλη και καθορισμένη μαγνητική ροή. Ο δρομέας έχει σκοπό να δημιουργεί τάση και ρεύμα από επαγωγή στο τυλίγμα που τοποθετείται σε αυτόν.

Εν συνεχεία στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας.

Το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης σε σειρά με μία σύνθετη αντίσταση με ωμικό και επαγωγικό μέρος.

όπου:

- E_f είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) που επάγεται στο στάτη της γεννήτριας
- U_a είναι η τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας
- R_a είναι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου
- X_s είναι η επαγωγική αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου
- I_a το εξερχόμενο ρεύμα φάσης του τυλίγματος τυμπάνου



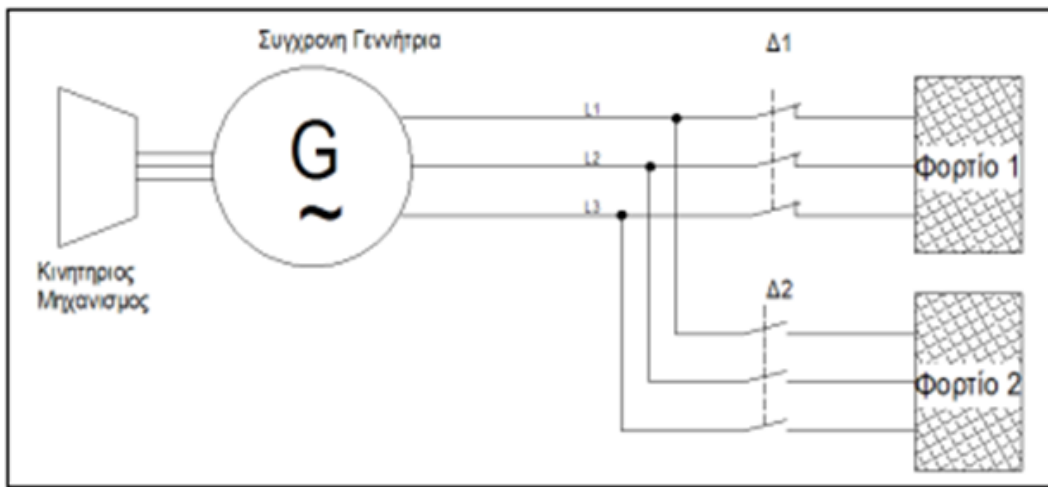
Σχήμα 6: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της σύγχρονης γεννήτριας

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα είτε σε παραλληλισμό με άλλες γεννήτριες. Στο επόμενο υποκεφάλαιο του παρόντος κεφαλαίου, ακολουθεί η ανάλυση της αυτόνομης λειτουργίας των σύγχρονων μηχανών που τροφοδοτεί αυτόνομα ένα μεταβαλλόμενο φορτίο.

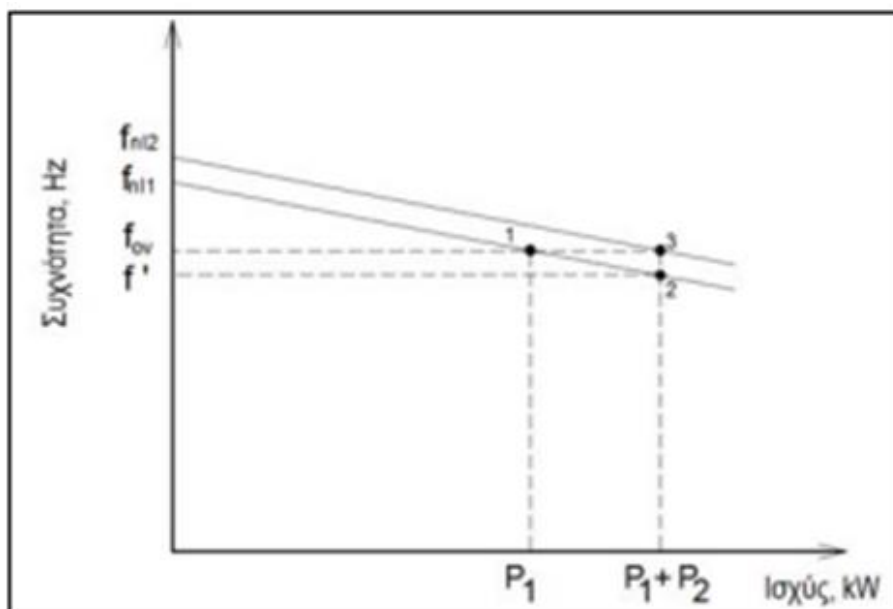
1.2. Αυτόνομη λειτουργία σύγχρονων μηχανών

Σχηματικά η αυτόνομη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 7 παρακάτω. Έστω ότι αρχικά η μηχανή τροφοδοτεί το Φορτίο 1, με ενεργό ισχύ P_1 . Ο ρυθμιστής στροφών έχει ρυθμίσει την εν κενό συχνότητα f_{n1} έτσι ώστε, για την δεδομένη κλίση της χαρακτηριστικής, η συχνότητα της τάσης με την οποία η γεννήτρια τροφοδοτεί το φορτίο να είναι η ονομαστική. Αυτό είναι το σημείο λειτουργίας 1.

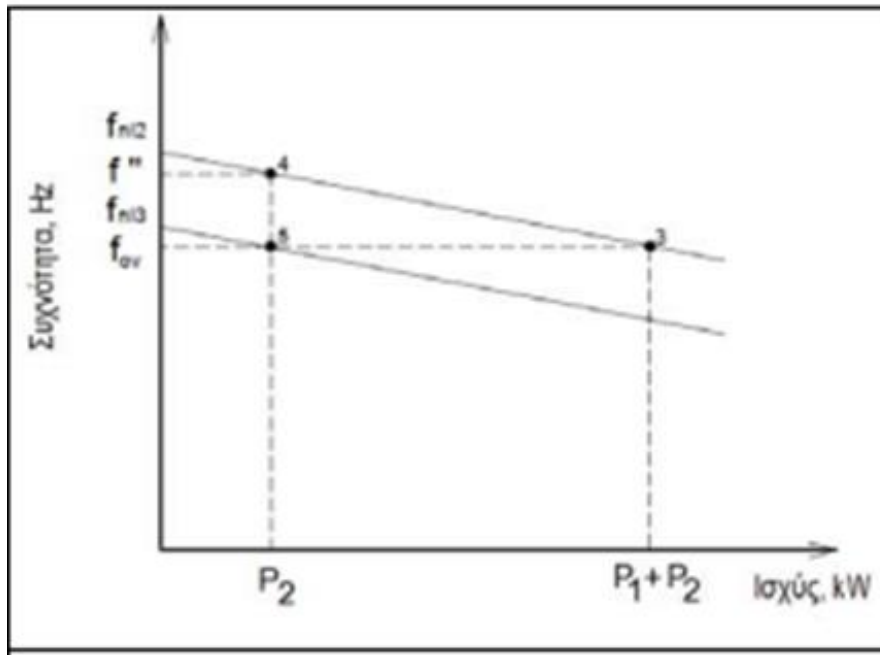
Αν συνδεθεί και το Φορτίο 2 με ισχύ P_2 , τότε μετά το μεταβατικό φαινόμενο, η ισχύς θα γίνει P_1+P_2 και η συχνότητα θα μειωθεί στο f' . Σημείο λειτουργίας 2.



Σχήμα 7: Σύγχρονη γεννήτρια που τροφοδοτεί αυτόνομα ένα μεταβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 8: Μεταβολή της συχνότητας λόγω αύξησης του φορτίου



Σχήμα 9: Μεταβολή της συχνότητας λόγω μείωσης του φορτίου

Για να επανέλθει η συχνότητα στην ονομαστική της τιμή $f_{ον}$, θα πρέπει ο ρυθμιστής στροφών να αυξήσει την παροχή ενεργού ισχύος στον κινητήριο μηχανισμό έτσι ώστε η στατική χαρακτηριστική να μετακινηθεί προς τα πάνω στο σημείο f_{n12} .

Έτσι για την ισχύ P_1+P_2 , η συχνότητα του συστήματος, με την νέα χαρακτηριστική, θα αυξηθεί και θα επανέλθει στην ονομαστική τιμή $f_{ον}$ (σημείο λειτουργίας 3).

Αν υποθέσουμε ότι γίνεται απόζευξη του Φορτίου 1. Μετά το μεταβατικό φαινόμενο, η συχνότητα του συστήματος θα αυξηθεί στο f'' (σημείο λειτουργίας 4). Για να επανέλθει η συχνότητα στην ονομαστική της τιμή, ο ρυθμιστής στροφών θα πρέπει να μειώσει την παροχή καυσίμου στον κινητήριο μηχανισμό και επομένως να μετακινήσει την στατική χαρακτηριστική στο σημείο f_{n13} (Σημείο λειτουργίας 5).

Ακολουθεί ο παραλληλισμός των σύγχρονων μηχανών, θα δούμε αναλυτικά την διαδικασία και τι πρέπει να ισχύει για να παραλληλιστούν οι σύγχρονες μηχανές και πως συνδέονται οι σύγχρονες γεννήτριες στο δίκτυο.

1.3. Παραλληλισμός σύγχρονων μηχανών

Ως παράλληλη λειτουργία σύγχρονων μηχανών εννοούμε εκείνη την κατάσταση όπου δύο ή περισσότερες γεννήτριες τροφοδοτούν από κοινού ένα φορτίο. Παραδείγματα αποτελούν οι

σύγχρονες γεννήτριες που τροφοδοτούν το φορτίο σε ένα μη συνδεδεμένο νησί ή οι εφεδρικές γεννήτριες που τροφοδοτούν το φορτίο, π.χ. ενός νοσοκομείου ή μιας βιομηχανίας ή ενός εμπορικού κέντρου μετά από διακοπή του δικτύου.

Τέτοια περίπτωση μπορούμε επίσης να έχουμε όταν ένας καταναλωτής με μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας – ηλεκτρισμού αποφασίσει να διακόψει την διασύνδεση του με το δίκτυο επειδή την δεδομένη χρονική στιγμή είναι πιο συμφέρουσα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από δικές του μονάδες. Για να υπάρξει παραλληλισμός σύγχρονων μηχανών πρέπει πρώτα να γίνεται συγχρονισμός των γεννητριών.

Ως συγχρονισμό εννοούμε την διαδικασία για την ένταξη μιας σύγχρονης γεννήτριας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αντίθεση με τις ασύγχρονες γεννήτριες, οι σύγχρονες απαιτούν ακριβέστερη μέθοδο συγχρονισμού πριν την σύνδεση τους με κάποιο δίκτυο επειδή παράγουν στον στάτη δική τους τάση. Για τον συγχρονισμό θα πρέπει αυτή η τάση να γίνει σχεδόν ίδια με την τάση δικτύου στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί η μηχανή.

Οι προϋποθέσεις συγχρονισμού είναι :

- α) Οι rms τιμές των πολικών τάσεων της γεννήτριας και του δικτύου να είναι οι ίδιες.
- β) Οι rms τιμές μίας φασικής τάσης της γεννήτριας και του δικτύου να είναι οι ίδιες.
- γ) Η διαδοχή των φάσεων στην γεννήτρια και στο δίκτυο να είναι ίδια.
- δ) Η συχνότητα των τάσεων της γεννήτριας να είναι λίγο μεγαλύτερη από την συχνότητα του δικτύου.

Η διαδικασία συγχρονισμού, η οποία σήμερα γίνεται μέσω αυτόματων διατάξεων, είναι η ακόλουθη :

- α) Η γεννήτρια επιταχύνεται, μέσω του κινητήριου μηχανισμού της, μέχρι οι στροφές της να γίνουν λίγο μεγαλύτερες από τις σύγχρονες.
- β) Αυξάνεται σταδιακά το ρεύμα διέγερσης μέχρι η rms τιμή της πολικής τάσης στο στάτη της γίνει ίση με την τιμή της πολικής τάσης του δικτύου.
- γ) Γίνεται σύγκριση της αλληλουχίας των φάσεων στην γεννήτρια και στο δίκτυο.

Όταν οι παραπάνω συνθήκες ικανοποιηθούν, δίνεται εντολή και κλείνει ο διακόπτης που συνδέει την γεννήτρια στο δίκτυο. Στο σχήμα 10 φαίνεται σχηματικά μία αυτόματη διάταξη συγχρονισμού.

Οι λαμπτήρες που φαίνονται στο σχήμα δεν χρησιμοποιούνται πλέον αλλά είναι απαραίτητοι σε περίπτωση χειροκίνητης διαδικασίας συγχρονισμού.

Κάθε λαμπτήρας, πριν το κλείσιμο του διακόπτη δέχεται στους ακροδέκτες του την διαφορά των αντίστοιχων φασικών τάσεων της γεννήτριας και του δικτύου.

Στις ιδανικές συνθήκες συγχρονισμού η τάση κάθε λαμπτήρα είναι μεταβαλλόμενη για τους ακόλουθους λόγους: Εάν οι πολικές τάσεις της γεννήτριας και του δικτύου είναι οι ίσες και η ακολουθία φάσεων η ίδια, τότε επειδή η συχνότητα της γεννήτριας είναι λίγο μεγαλύτερη από την συχνότητα του δικτύου η τάση $U_{\Delta,L1}$ θα του λαμπτήρα L1 θα είναι:

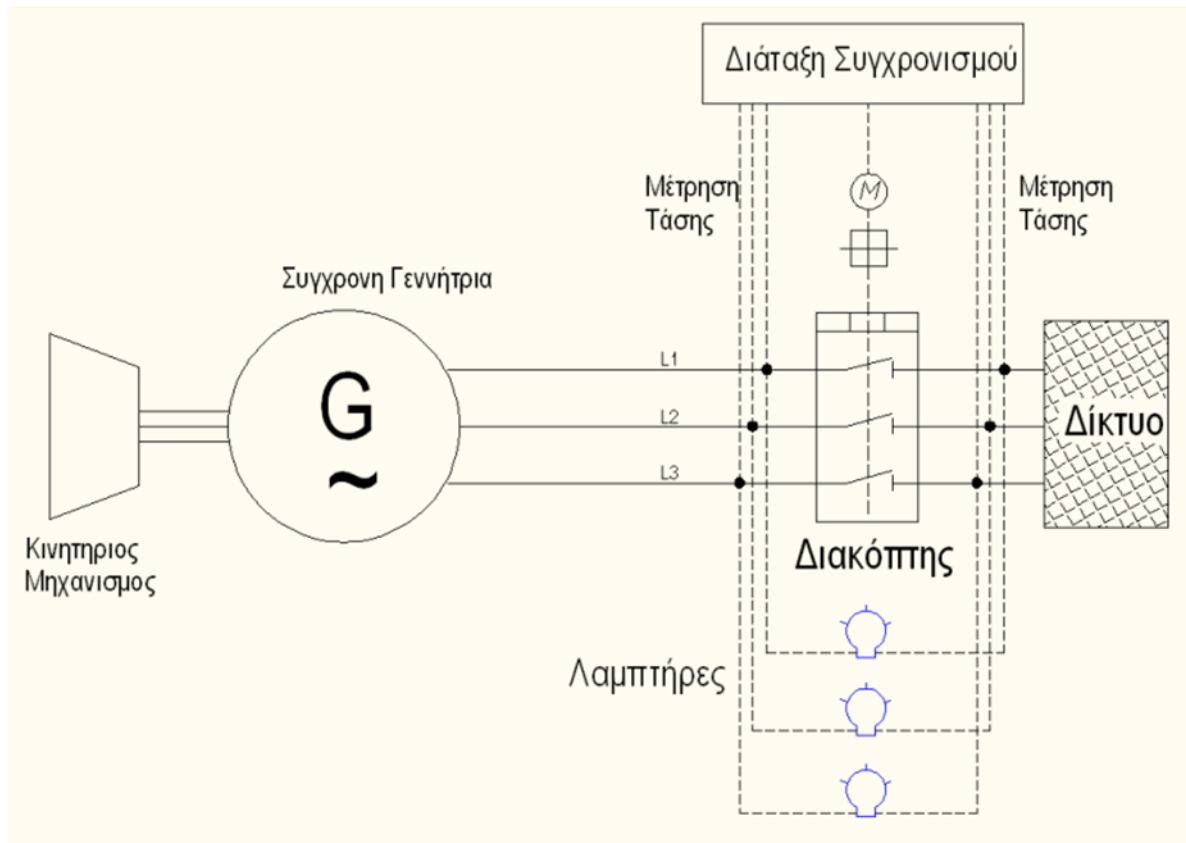
$$U_{\Delta,L1} = U_{\Delta,L1} - U_{G,L1} = U_{\max} \sin(\omega_{\Delta}t) - U_{\max} \sin(\omega_Gt + \phi) = \\ U_{\max} \sin\left(\frac{\omega_{\Delta} - \omega_G}{2}t - \frac{\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_{\Delta} + \omega_G}{2}t + \frac{\phi}{2}\right)$$

- Όπου ω_{Δ} και ω_G είναι η συχνότητα του δικτύου και της γεννήτριας αντίστοιχα.
- Όπου $U_{\Delta,L1}$ και $U_{G,L1}$ είναι η φασική τάση του δικτύου και της γεννήτριας αντίστοιχα για την φάση L1.

Παρατηρούμε ότι η τάση του λαμπτήρα έχει πλάτος που μεταβάλλεται με την συχνότητα ίση με την ημι διαφορά των συχνοτήτων του δικτύου και της γεννήτριας.

Έτσι ο λαμπτήρας θα αναβοσβήνει με αυτήν την συχνότητα. Επειδή το ίδιο συμβαίνει και με τους άλλους δυο λαμπτήρες, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις λαμπτήρες θα αναβοσβήνουν ομοιόμορφα.

Ο διακόπτης πρέπει να κλείσει λίγο πριν σβήσουν οι λαμπτήρες. Αν η αλληλουχία των φάσεων δεν είναι ίδια, τότε οι λαμπτήρες δεν θα αναβοσβήνουν ομοιόμορφα. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αλλάξουν θέσεις μεταξύ τους οι δύο φάσεις της γεννήτριας και να ξανά γίνει η διαδικασία.



Σχήμα 10: Διάταξη συγχρονισμού σύγχρονης γεννήτριας στο διαδίκτυο

Όταν μία σύγχρονη μηχανή λειτουργεί παράλληλα με άλλες και τροφοδοτούν ένα φορτίο, η συχνότητα και το μέτρο της τάσης στους ακροδέκτες είναι κοινά και ίδια με του φορτίου. Το μέρος της ενεργού και της άεργου ισχύος του κοινού φορτίου που αναλαμβάνει κάθε γεννήτρια καθορίζεται από τις χαρακτηριστικές Ενεργού ισχύος – συχνότητας ($P-f$) και Άεργου ισχύος και τάσης κάθε γεννήτριας ($Q-V$). Αναλυτικότερα οι στατικές χαρακτηριστικές αναλύονται στο Κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

2.1. Εισαγωγή

Ως ηλεκτρονικά ισχύος ορίζουμε τα ηλεκτρονικά που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή και τον έλεγχο της ηλεκτρικής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, ο ρόλος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η επεξεργασία και ο έλεγχος της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας, με την παροχή τάσεων και ρευμάτων σε μορφή κατάλληλη για κάθε επιμέρους τύπο φορτίου.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα ηλεκτρονικά για διαχείριση πληροφορίας / σημάτων και
- Τα ηλεκτρονικά για διαχείριση ισχύος

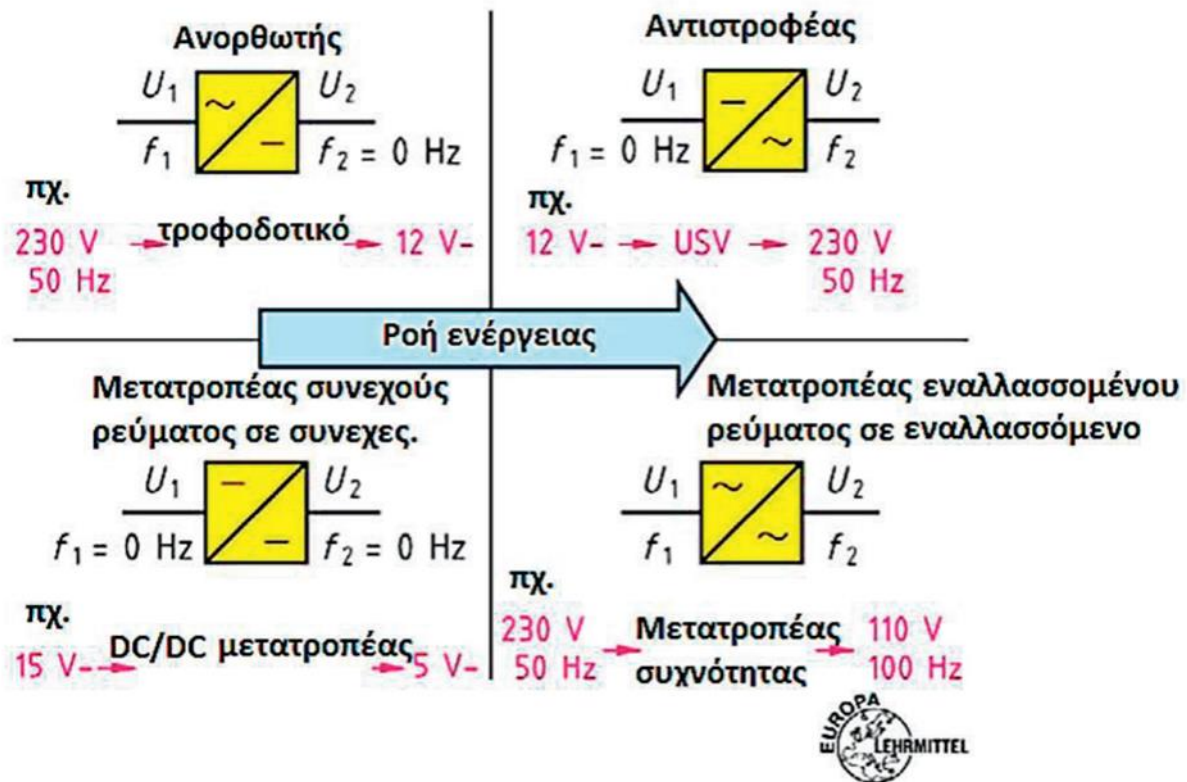
Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η σημασία των δύο κατηγοριών που αναφέραμε παραπάνω, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα ηλεκτρονικά πληροφορίας / σημάτων αποτελούν τον «εγκέφαλο», ενώ τα ηλεκτρονικά ισχύος τους «μύες».

Τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορούν να λειτουργήσουν τόσο στη συνεχή όσο και στην εναλλασσόμενη τάση. Ανάλογα με την λειτουργία τους μπορούν να μεταβάλλουν για συνεχή τάση το πλάτος και την πολικότητα, ενώ για εναλλασσόμενη τάση μεταβάλλουν το πλάτος την συχνότητα την φάση και τον αριθμό φάσεων.

Πιο αναλυτικά οι εργασίες που εκτελούνται με την βοήθεια των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος είναι οι παρακάτω:

- ✓ **Ανορθωτής AC/DC:** Ο ανορθωτής μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή τάση.
- ✓ **Μετατροπέας DC/DC:** Ο μετατροπέας DC/DC μετατρέπει μια συνεχή τάση ενός επιπέδου σε μια τάση διαφορετικού επιπέδου ή ακόμα και διαφορετικής πολικότητας.
- ✓ **Μετατροπέας AC/AC:** Ο μετατροπέας AC/AC μετατρέπει μια εναλλασσόμενη τάση σε εναλλασσόμενη τάση με διαφορετική ενεργό τιμή και συχνότητας
- ✓ **Ο Αντιστροφέας DC/AC:** Ο αντιστροφέας DC/AC μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας και ενεργού τιμής.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι τέσσερις τύποι μετατροπέων ηλεκτρικών ισχύος.



Εικόνα 10: Κατηγορίες των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος (Πηγή: <https://www.europa-lehrmittel.de>)

Στην παρούσα πτυχιακή χρησιμοποιείται ο αντιστροφέας DC/AC. Οι συγκεκριμένοι μετατροπέες είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι, η λειτουργία τους είναι να μεταφέρουν ισχύ από ένα σύστημα συνεχής τάσης (DC) σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης (AC), λειτουργούν δηλαδή ως αντιστροφεείς (Inverters). Η δυνατότητα των αντιστροφέων να ρυθμίζουν την τάση και το ρεύμα στην έξοδο τους είναι πάρα πολύ σημαντική και εξαιτίας αυτής βρίσκουν πρακτικές εφαρμογές σε πάρα πολλές περιοχές.

Μια ιδιαίτερης σημασίας εφαρμογή του αντιστροφέα, είναι η σύνδεση στο δίκτυο διεσπαρμένης παραγωγής, δηλαδή παραγωγής που προέρχεται από μονάδες μικρής ισχύος. Τέτοιες μονάδες μπορεί να είναι πηγές, όπως οι κυψέλες καυσίμου και τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αλλά και μονάδες με AC τάση εξόδου, οι οποίες δεν μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο δίκτυο καθώς, είτε παράγουν τάση μεταβλητής συχνότητας όπως οι ανεμογεννήτριες, είτε παράγουν τάση υψηλής συχνότητας όπως οι μικροτουρμπίνες.

Οι αντιστροφεείς χρησιμοποιούνται εκτενώς σε συστήματα ελέγχου εναλλασσόμενων ηλεκτρικών κινητήρων. Η τάση τροφοδοσίας μετατρέπεται αρχικά σε συνεχή, μέσω μιας

ανορθωτικής διάταξης και έπειτα, αφού μετατραπεί σε ελεγχόμενη τριφασική εναλλασσόμενη τάση, εφαρμόζεται στον κινητήρα. Ο αντιστροφέας μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, και έχει την δυνατότητα να ρυθμίζει την ενεργό τιμή αυτής, καθώς και την συχνότητα της και κατά συνέπεια να ελέγχει τον ηλεκτρικό κινητήρα. Έτσι, πραγματοποιείται έλεγχος θέσης, ταχύτητας, επιτάχυνσης, αλλά και ροπής, με ικανοποιητική ακρίβεια και δυναμική απόκριση σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων.

Η χρήση των αντιστροφέων στην οδήγηση κινητήρων, συνέβαλε σταδιακά στην αντικατάσταση των DC μηχανών σε βιομηχανικές εφαρμογές, διότι οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι μικρότερες και κοστίζουν λιγότερο, αν και ο έλεγχος τους είναι πιο πολύπλοκος.

Μεταφορά ισχύος από το δίκτυο μέσω του DC/AC μετατροπέα πραγματοποιείται επίσης και σε συστήματα αποθήκευσης, δηλαδή για την φόρτιση συσσωρευτών (Μπαταριών). Ο DC/AC μετατροπέας μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά ισχύος από γραμμές υψηλής συνεχούς τάσης.

Οι αντιστροφείς μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS). Η χρήση των UPS γίνεται σε κρίσιμα φορτία (π.χ. υπολογιστές, χειρουργεία, συστήματα ελέγχου σε ένα αεροδρόμιο, κτλ.). Έτσι επιτυγχάνεται άμεση παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο φορτίο, ενώ με κατάλληλο φιλτράρισμα στο σήμα εισόδου εξαλείφονται οι αιχμές και οι αυξομειώσεις και παρέχεται καλής ποιότητας ηλεκτρική τάση στο φορτίο.

Ακόμα, συμβάλλουν στην καταστολή των αρμονικών του ρεύματος και στην διόρθωση των διαταραχών της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ενεργό φίλτρο, εγχέοντας στο δίκτυο αρμονικά ρεύματα ίδιου πλάτους, αλλά με διαφορά 180 μοίρες με τα αρμονικά ρεύματα του δικτύου. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί παράλληλα προς το δίκτυο. Αν λειτουργεί σε σειρά με αυτό, τότε μπορεί να διορθώσει και διαταραχές της τάσης, όπως βυθίσεις. Τα ενεργά φίλτρα, εκ των άλλων μπορούν να διορθώσουν ασυμμετρίες στην τάση και στο ρεύμα, και βέβαια τον συντελεστή ισχύος του δικτύου.

Όταν οι αντιστροφείς λειτουργούν ως ενεργά φίλτρα, διορθώνουν τα προβλήματα που άλλοι μετατροπείς ή γενικά άλλα μη γραμμικά φορτία δημιούργησαν. Μαζί με τα παθητικά φίλτρα καταστέλλουν τις αρμονικές και αποτρέπουν τα διάφορα προβλήματα που αυτές συνεπάγονται, όπως π.χ. απώλειες ισχύος, υπερθέρμανση στα τυλίγματα των μηχανών και σε ουδέτερους αγωγούς, θόρυβο σε κυκλώματα ελέγχου κτλ.

Τέλος, χρησιμοποιούνται ακόμα και για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος με τα συστήματα αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Ο μετατροπέας, συνδέεται παράλληλα με το δίκτυο και διαχέει ή απορροφά μόνο άεργο ισχύ προς ή από το δίκτυο, ώστε ο συντελεστής ισχύος μίας πηγής ή ενός φορτίου να βρίσκεται εντός των επιθυμητών προδιαγραφών. Με τα συστήματα αντιστάθμισης άεργου ισχύος γίνεται οικονομικότερη αξιοποίηση των γραμμών μεταφοράς, καθώς μεταφέρεται περισσότερη ενεργή ισχύς.

Επίσης στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, οι ημιαγώγιμοι διακόπτες είναι το κύριο δομικό στοιχείο των μετατροπέων. Ένας διακόπτης ισχύος είναι μια ημιαγώγιμη διάταξη που επιτρέπει η διακόπτει την ροή του ρεύματος, με την εφαρμογή ενός κατάλληλου σήματος σε κάποια από τις υποδοχές του (συνήθως στη πύλη). Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη λειτουργία ενός μηχανικού διακόπτη, όπου η μετάβαση ανάμεσα στις καταστάσεις On/Off επιτυγχάνεται μέσω μηχανικών διεργασιών.

Πιο συγκεκριμένα ένας μηχανικός διακόπτης:

- Είναι αργός και για αυτό δεν προορίζεται για συνεχείς και επαναλαμβανόμενους χειρισμούς.
- Περιλαμβάνει διάφορα κινούμενα μέρη τα οποία επειδή δέχονται πιέσεις καταπονήσεις μειώνουν τον χρόνο ζωής τους.
- Χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρές απώλειες κατά την αγωγή, γεγονός που τον κάνει πρακτικά έναν ιδανικό διακόπτη.

Αντιθέτως, ένας ηλεκτρονικός διακόπτης, είναι γρήγορος και προορίζεται για συνεχείς χειρισμούς, δεν περιλαμβάνει κινούμενα μέρη, ωστόσο χαρακτηρίζεται από απώλειες αγωγής και αποκοπής.

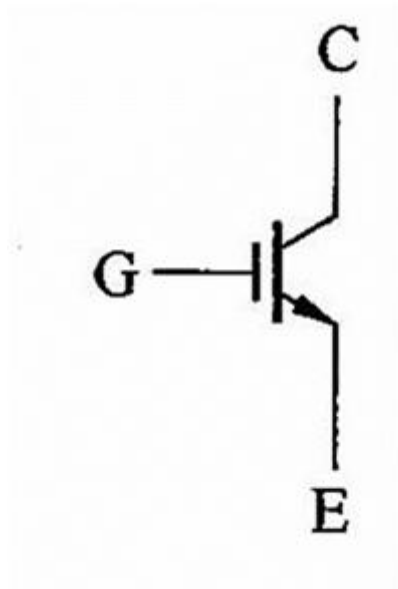
Συνεπώς τα χαρακτηριστικά ενός μετατροπέα ισχύος εξαρτώνται από τον τύπο διακοπών που χρησιμοποιούνται. Οι βασικές κατηγορίες και τα χαρακτηριστικά τους είναι τα παρακάτω:

- ✓ Μη ελεγχόμενοι διακόπτες: σε αυτήν την κατηγορία ανήκει η δίοδος ισχύος, η οποία αποτελεί ένα ημιαγώγιμο στοιχείο δύο στρωμάτων και ουσιαστικά είναι ο μόνος μη ελεγχόμενος διακόπτης.
- ✓ Ημιελεγχόμενοι διακόπτες: είναι το πιο διαδεδομένο ημιελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο σε αυτήν την κατηγορία διακοπών είναι το θυρίστορ (Thyristor). Σε αυτό μπορεί να ελεγχθεί μόνο η στιγμή που θα ξεκινήσει η αγωγή του διακόπτη μέσω ενός σήματος στην πύλη του, με την προϋπόθεση ότι είναι ορθά πολωμένο.

-
- ✓ Πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες: σε αυτήν την κατηγορία βρίσκεται ένα πλήθος διακοπών (π.χ. IGBT, MOSFET, GTO, κτλ.), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε σύγχρονες διατάξεις και εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα η στιγμή της αποκοπής και της αγωγής ενός τέτοιου καθορίζονται άμεσα μέσω των σημάτων στην πύλη τους. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι ελεγχόμενοι διακόπτες τύπου μονωμένων διπολικών τρανζίστορ (Insulated Bipolar Transistor - IGBT).

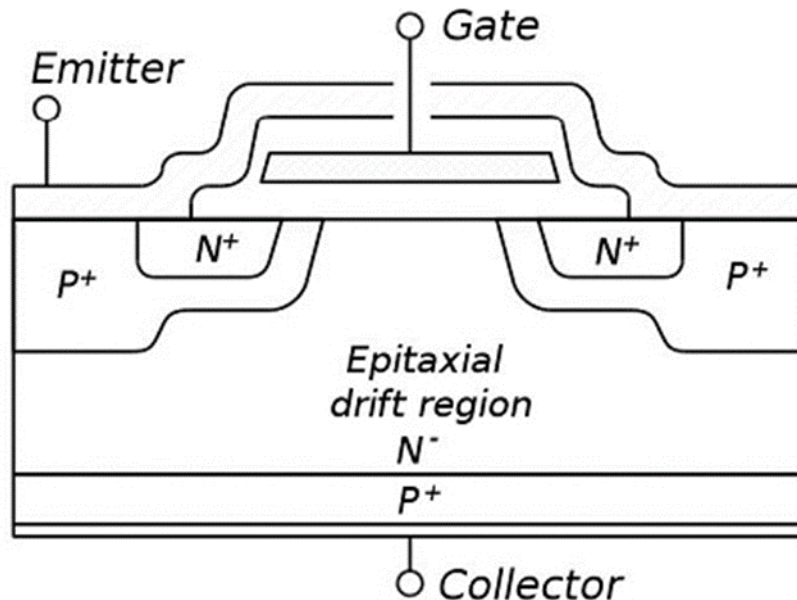
2.2. Διπολικά τρανζίστορ με μόνωση πύλης (IGBT)



Σχήμα 11: Σχηματικό διάγραμμα IGBT (Πηγή: <https://www.inductioncooker.net/el/blog/what-is-the-use-of-igbt-in-induction-cooker/>)

Τα διπολικά τρανζίστορ με μόνωση πύλης (IGBT) είναι από τα πιο δημοφιλή ημιαγωγικά στοιχεία στα συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος. Το IGBT έχει μεγάλη σύνθετη αντίσταση πύλης και έτσι απαιτείται μια μικρή μόλις ποσότητα ενέργειας για την μετάβαση του, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από απλό τρόπο οδήγησης και μικρούς χρόνους μετάβασης. Τα διπολικά τρανζίστορ με μόνωση πύλης (IGBT) μπορούν να αποκόψουν ανάστροφες τάσεις. Κατά μια έννοια, θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι το IGBT, είναι ουσιαστικά ένα MOSFET με βασική διαφορά την πρόθεση ενός P υποστρώματος τύπου n κάτω από αυτό, όπως φαίνεται

στο παρακάτω σχήμα. Ο συλλέκτης αντιστοιχεί στην εκροή του MOSFET και ο εκπομπός στην πηγή.



Σχήμα 12: Εγκάρσια τομή ενός IGBT (Πηγή: <https://gr.weblogographic.com/difference-between-igbt>)

Έτσι, η κατάσταση λειτουργίας του ελέγχεται από την τάση πύλης εκπομπού. Για να διαρρεύσει ρεύμα μέσα από το στοιχείο, πρέπει να εφαρμοστεί θετική τάση μεταξύ της πύλης και του εκπομπού, ενώ παράλληλα θα πρέπει ο συλλέκτης να βρίσκεται σε υψηλότερη τάση από τον εκπομπό. Τότε σχηματίζεται κάτω από την πύλη το στρώμα αναστροφής (ή κανάλι n) το οποίο συνδέει αγώγιμα τη περιοχή του εκπομπού με την περιοχή ολίσθησης και υπάρχει ροή ισχύος μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη. Σε αυτή την κατάσταση η τάση αγωγής είναι της τάξεως των 2-3V. Έτσι, το IGBT επιτρέπει ροή ρεύματος μόνο προς μια φορά (από τον συλλέκτη στον εκπομπό). Συνοπτικά τα IGBT έχουν χρόνους έναυσης και σβέσης της τάξης του 1μsec και αντέχουν μεγάλες ονομαστικές τιμές τάσης. Επιπλέον, το IGBT μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες από ένα απλό τρανζίστορ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να επεξεργαστεί υψηλότερες τάσεις και ρεύματα από ένα MOSFET.

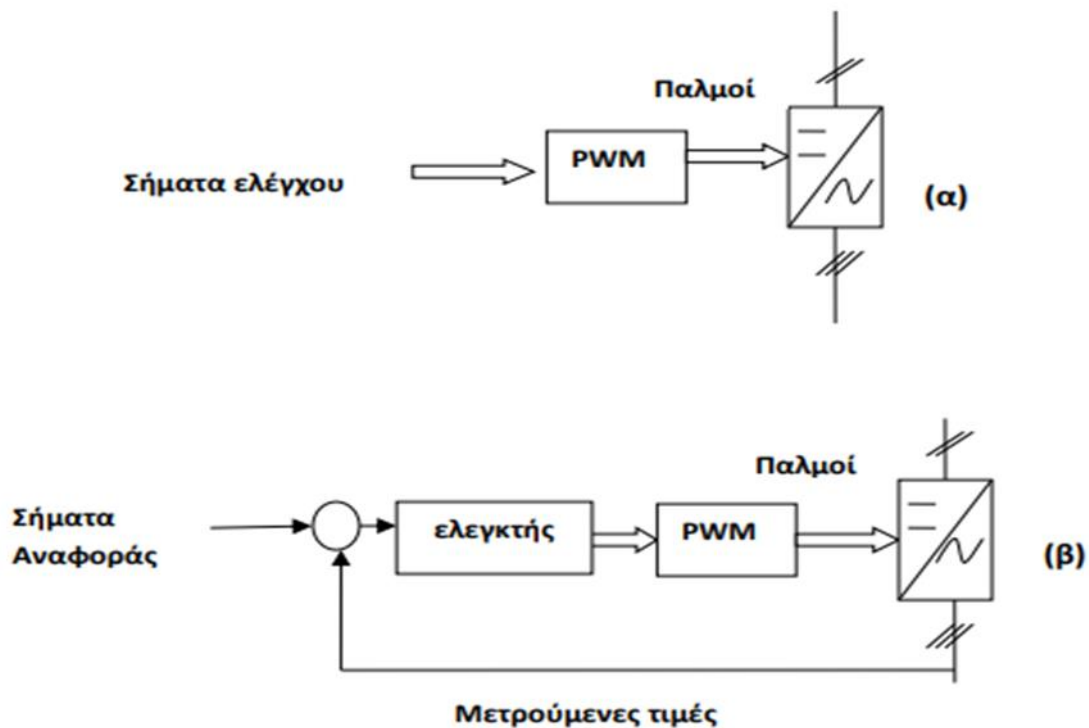
Συνεπώς, οι μετατροπείς ισχύος με IGBT καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος ισχύος, που μπορεί με κατάλληλο παραλληλισμό των διακοπών να αποτελέσουν την πιο δημοφιλή λύση στα ηλεκτρικά συστήματα ισχύος στις μέρες μας.

2.3. Η διαμόρφωση πλάτους παλμών (PWM)

Ως διαμόρφωση πλάτους παλμών, ορίζονται τα σήματα οδήγησης τα οποία είναι αποτελέσματα μιας διαδικασίας που διασφαλίζουν την σωστή λειτουργία του μετατροπέα σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε εφαρμογής.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της διαδικασίας αυτής, είναι ο εύκολος έλεγχος της τάσης εξόδου και της θεμελιώδους συχνότητας, καθώς και η μείωση των απαιτήσεων του σχεδιασμού του φίλτρου εξόδου για την μείωση των αρμονικών διαταραχών.

Οι παλμοί μπορούν να παράγονται είτε από ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου, δηλαδή από κάποια σήματα ελέγχου, είτε από ένα σύστημα κλειστού βρόχου δηλαδή από ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί την έξοδο του αντιστροφέα για να παράγει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου, ώστε η λειτουργία του αντιστροφέα να είναι επιθυμητή.



Σχήμα 13: Μέθοδος α) ανοιχτού και β) κλειστού βρόχου

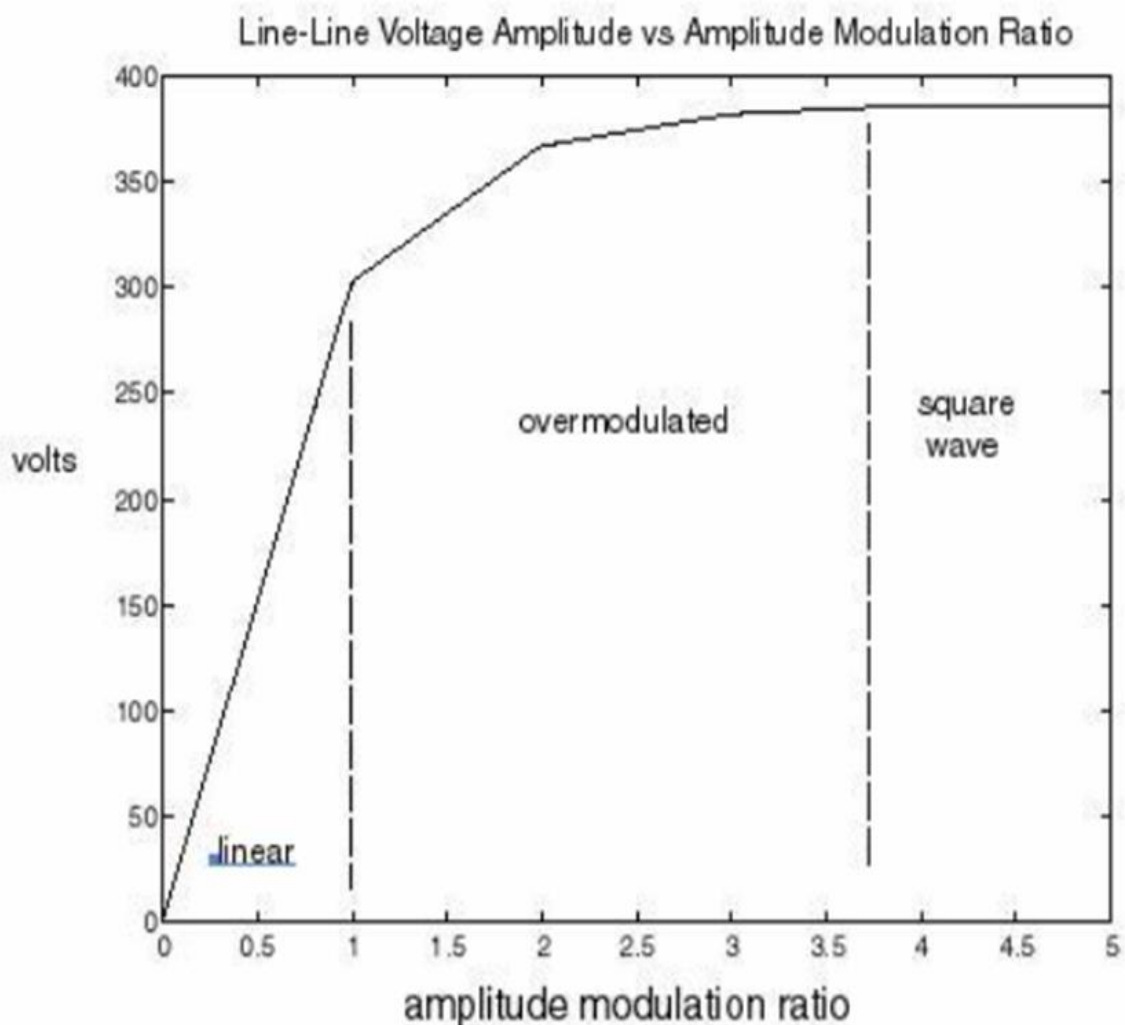
Για την δημιουργία μίας ημιτονοειδούς τάσης στην έξοδο, οι διακόπτες πρέπει να ελεγχθούν με συγκεκριμένη σειρά. Για να γίνει αυτό, απαιτείται μια ημιτονοειδής κυματομορφή αναφοράς, η οποία καλείται επίσης σήμα διαμόρφωσης ή σήμα ελέγχου και συγκρίνεται με μια δεύτερη κυματομορφή που ονομάζεται φέρων σήμα.

Το φέρων σήμα είναι συνήθως μια τριγωνική κυματομορφή, η συχνότητα της οποίας καθορίζει την συχνότητα μετάβασης των διακοπών του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή,

όπως και το πλάτος της. Παράλληλα το σήμα ελέγχου καθορίζει την σχετική διάρκεια αγωγής των διακοπών ενώ χαρακτηρίζεται από μια από μια συχνότητα που είναι η επιθυμητή θεμελιώδεις συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

Κάθε φορά που το σήμα ημιτονοειδούς τάσης θα είναι μεγαλύτερο από το τριγωνικό σήμα, τότε ο αντίστοιχος διακόπτης θα άγει, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θα βρίσκεται σε αποκοπή. Ωστόσο, η τάση εξόδου δεν θα είναι μια ιδανική ημιτονοειδής κυματομορφή, αλλά θα περιέχει αρμονικές. Για την καταστολή των αρμονικών χρησιμοποιούνται παθητικά φίλτρα, τα οποία είναι συνδυασμοί πηνίων και πυκνωτών.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους, είναι πολύ σημαντικό μέγεθος επειδή δεν καθορίζει απλά το πλάτος της φασικής τάσης του μετατροπέα, αλλά γιατί επιπλέον διαχωρίζει τις διάφορες περιοχές λειτουργίας του αντιστροφέα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 14: Περιοχές λειτουργίας ενός αντιστροφέα (Πηγή:
<https://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1998/08/PWMINV.HTM>)

Έτσι, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

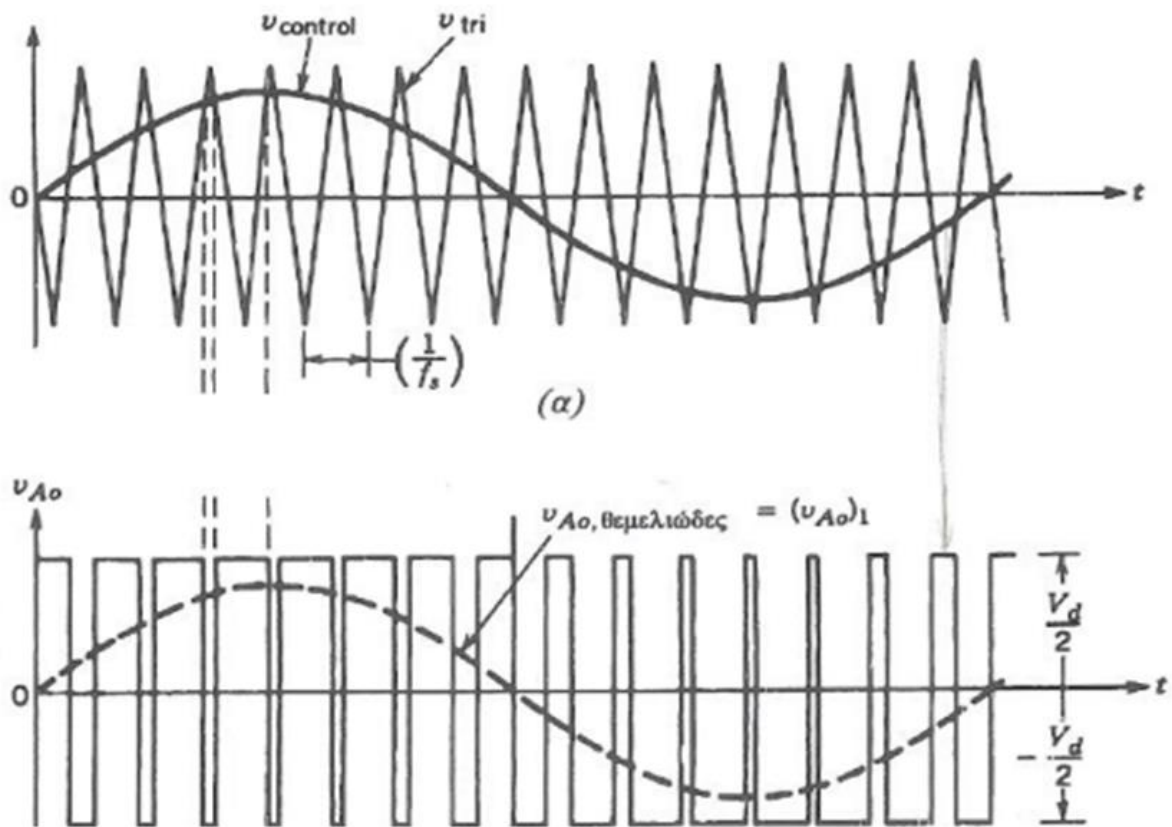
- ✓ Αν $ma \in [0,1]$ τότε βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή και τότε η λειτουργία ονομάζεται Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM).
- ✓ Αν $ma \in [1, 3.5]$ τότε υπάρχει υπερδιαμόρφωση, δηλαδή μία ενδιάμεση κατάσταση λειτουργίας μεταξύ SPWM και τετραγωνικού παλμού. Σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας, το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου δεν αυξάνεται γραμμικά με το ma . Η σχέση της θεμελιώδους συνιστώσας και του ma εξαρτάται από τον λόγο mf .
- ✓ Αν $ma > 3.5$ τότε υπάρχει λειτουργία τετραγωνικού παλμού, όπου κάθε διακόπτης του σκέλους του αντιστροφέα είναι κλειστός για μία ημιπερίοδο της επιθυμητής εξόδου (180°), ενώ η τάση εξόδου σε αυτή την περιοχή είναι ανεξάρτητη του ma και έχει την μορφή τετραγωνικού παλμού.

Ο συντελεστής mf καθορίζει τις τάξεις των αρμονικών συνιστωσών της τάξης εξόδου. Συνήθως ο συγκεκριμένος συντελεστής πρέπει να είναι ακέραιος και αρκετά υψηλός. Δηλαδή, η συχνότητα του φέροντος πρέπει να είναι πολλαπλάσια της συχνότητας αναφοράς, ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση αρμονικών χαμηλής τάξης, η οποία είναι πιο δύσκολο να φιλτραριστεί και προκαλεί ακουστικό θόρυβο. Ωστόσο, αν είναι υψηλός ο λόγος mf , τότε αυξάνονται οι διακοπτικές απώλειες.

Πιο συγκεκριμένα σε περίπτωση ενός αντιστροφέα ημιγέφυρας θα ισχύει:

- $V_{ctrl} > V_{tri}$ Ο Διακόπτης $S1$ άγει και έχουμε $V_{A0} = V_{dc}/2$
- $V_{ctrl} < V_{tri}$ Ο Διακόπτης $S2$ άγει και έχουμε $V_{A0} = -V_{dc}/2$

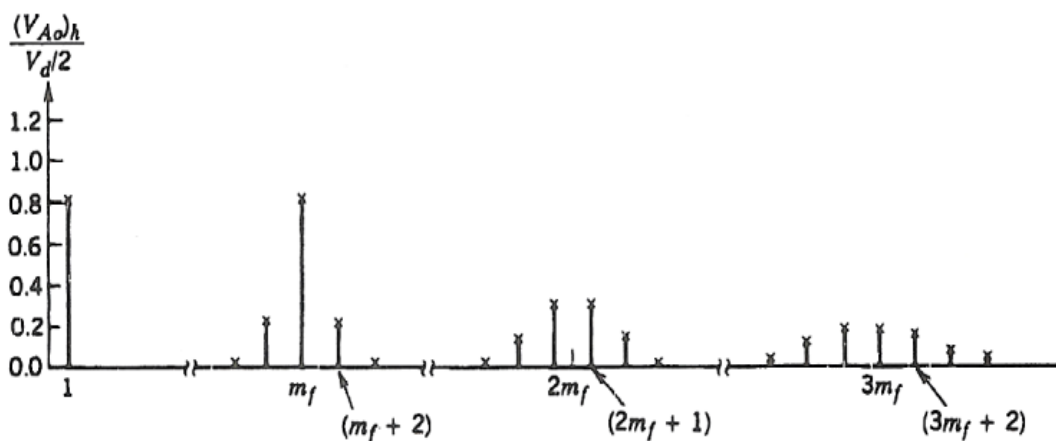
Όπου V_{A0} είναι η τάση εξόδου του αντιστροφέα σε σχέση με το σημείο αναφοράς (0) και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ και το φάσμα της V_{A0} .



Σχήμα 15: Έλεγχος PWM και η αντίστοιχη τάση εξόδου (Πηγή:

<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/12782/1/DT2015-0134.pdf>)

Στο επόμενο σχήμα μπορεί κανείς να παρατηρήσει το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 16: Το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα

(Πηγή:<http://artemis.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/12782/1/DT2015-0134.pdf>)

Οι αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες, με κέντρο την συχνότητα μετάβασης (διακοπτική συχνότητα) και τις πολλαπλάσιες της, δηλαδή γύρω από τις αρμονικές m_f , $2m_f$, $3m_f$. Για ένα συντελεστή διαμόρφωσης $m_f > 9$, τα πλάτη των αρμονικών είναι σχεδόν ανεξάρτητα από τον m_f , μολονότι ο m_f καθορίζει τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές.

Στον παρακάτω πίνακα καταγράφονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές $(V_{A0,h} / V_{DC}/2)$, ως προς τον συντελεστή m_a με $m_f > 9$.

Γενικευμένες αρμονικές της V_{A0} για μεγάλο m_f .

$h \backslash m_a$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Θεμελιώδη					
m_f	1.242	1.15	1.006	0.818	0.601
$m_f \pm 2$	0.016	0.061	0.131	0.220	0.318
$m_f \pm 4$					0.018
$2m_f \pm 1$	0.190	0.326	0.370	0.314	0.181
$2m_f \pm 3$		0.024	0.071	0.139	0.212
$2m_f \pm 5$				0.013	0.033
$3m_f$	0.335	0.123	0.083	0.171	0.113
$3m_f \pm 2$	0.044	0.139	0.203	0.176	0.062
$3m_f \pm 4$		0.012	0.047	0.104	0.157
$3m_f \pm 6$				0.016	0.044
$4m_f \pm 1$	0.163	0.157	0.008	0.105	0.068
$4m_f \pm 3$	0.012	0.070	0.132	0.115	0.009
$4m_f \pm 5$			0.034	0.084	0.119
$4m_f \pm 7$				0.017	0.050

Σχήμα 17: Τιμές κανονικοποιημένων αρμονικών

Συνεπώς με βάση τον παραπάνω πίνακα, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις τιμές της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης αλλά και κάποιες από τις κυριότερες αρμονικές. Έτσι για οποιαδήποτε τιμή του h , η rms τιμή της αντίστοιχης συνιστώσας θα δίνεται από τον τύπο:

$$V_{A0,h} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_{DC}}{2} \frac{V_{A0,h}}{V_{DC}/2}$$

Ο συντελεστής m_f , στην συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να είναι περιττός ακέραιος.

Η επιλογή μιας περιττής ακέραιας τιμής για τον m_f , έχει ως αποτέλεσμα μια περιττή συμμετρία.

Επομένως, υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές ενώ οι άρτιες εξαφανίζονται από την V_{A0} .

Επίσης σύμφωνα με την ανάλυση Fourier, μόνο οι συντελεστές της σειράς των ημιτόνων είναι διάφοροι του μηδενός, ενώ αυτοί της σειράς των συνημιτόνων είναι μηδενικοί.

Έτσι, οι αρμονικές που βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες φιλτράρονται σχετικά πιο εύκολα σε σχέση με εκείνες που βρίσκονται σε χαμηλές συχνότητες. Συνεπώς, είναι επιθυμητές όσο το δυνατόν υψηλότερες συχνότητες μετάβασης. Από την άλλη πλευρά, οι απώλειες μετάβασης που χαρακτηρίζουν τον αντιστροφέα είναι ανάλογες προς την συχνότητα. Επομένως, η συχνότητα επιλέγεται να είναι χαμηλότερη των 6kHz ώστε να υπάρχουν μειωμένες απώλειες ή μεγαλύτερη των 20kHz ώστε να είναι πάνω από την ακουστική περιοχή συχνοτήτων.

Επακόλουθα, η σχέση μεταξύ του φέροντος κύματος και του σήματος ελέγχου ουσιαστικά καθορίζεται από το μέγεθος της m_f . Πιο συγκεκριμένα, ως τυπικό όριο στην τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας θεωρείται η τιμή $m_f = 21$ λόγω των διαφοροποιήσεων που παρουσιάζονται παρακάτω.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για την γραμμική περιοχή λειτουργίας του αντιστροφέα, δηλαδή όταν $m_a < 1$. Έτσι, για μικρές τιμές του m_f το σήμα του φέροντος πρέπει να είναι συγχρονισμένο με το σήμα ελέγχου (συγχρονισμένη διαμόρφωση PWM).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαιτείται η τιμή του m_f να είναι περιττός ακέραιος. Στην περίπτωση ασύγχρονης διαμόρφωσης PWM, έχουμε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υποαρμονικών της θεμελιώδους συχνότητας, κάτι το οποίο είναι ανεπιθύμητο ($m_f > 21$).

Τα πλάτη των υποαρμονικών που οφείλονται στην ασύγχρονη διαμόρφωση PWM είναι μικρά, όταν οι τιμές του m_f είναι μεγάλες. Επομένως σε μεγάλες τιμές του m_f μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ασύγχρονη διαμόρφωση PWM, όπου η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, διατηρείται σταθερή ενώ η συχνότητα του V_{ctrl} μεταβάλλεται, έχοντας ως αποτέλεσμα μη ακέραιες τιμές του m_f . Ωστόσο, αν ο αντιστροφέας τροφοδοτεί κάποιο φορτίο, όπως για παράδειγμα έναν ac κινητήρα, οι υποαρμονικές που βρίσκονται στη μηδενική ή κοντά στη μηδενική συχνότητα, παρά το γεγονός ότι έχουν μικρό πλάτος, θα έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλα ρεύματα.

Σε αυτό το σημείο, γίνεται φανερό γιατί το σήμα $V_{control}$ επιλέγεται ημιτονοειδές, ώστε να παράγεται ημιτονοειδές τάση εξόδου. Αν θεωρηθεί ότι η τάση ελέγχου δίνεται από την σχέση:

$$V_{control} = V_{control} \sin \omega_1 t$$

όπου

$$\hat{V}_{control} \leq \hat{V}_{tri}$$

Με βάση και τα προηγούμενα, συμπεραίνουμε ότι η θεμελιώδης συνιστώσα $V_{A0,1}$ μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και σε φάση με το V_{control} και έτσι προκύπτει:

$$V_{A0,1} = \frac{V_{\text{control}}}{V_{\text{tri}}} \sin \omega_1 t \frac{V_{\text{DC}}}{2}$$

$$V_{A0,1} = m_a \sin \omega_1 t \frac{V_{\text{DC}}}{2}$$

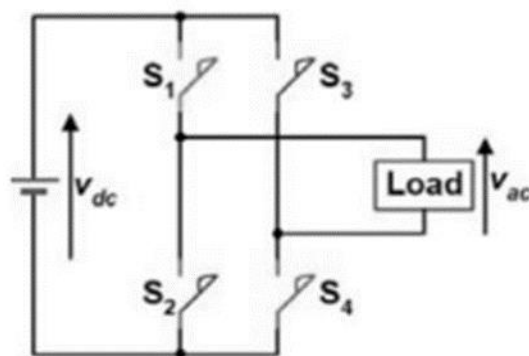
Επομένως,

$$\hat{V}_{A0,1} = m_a \frac{V_{\text{DC}}}{2} \text{ με } m_a \leq 1$$

2.4. Ο μονοφασικός αντιστροφεάς πλήρους γέφυρας

Σε περίπτωση που δύο αντιστροφείς μισής γέφυρας εναθούν παράλληλα μέσω των -DC μερών τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 18, τότε σχηματίζεται ένας μονοφασικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας. Ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με την συνδεσμολογία μισής γέφυρας είναι ότι η τιμή της εναλλασσόμενης τάσης που προκύπτει έχει διπλάσια τιμή σε σχέση με την διάταξη μισής γέφυρας, γεγονός το οποίο συντελεί στη πιο αποδοτική χρήση της DC τάσης και των διακοπών. Πιο συγκεκριμένα, με την ίδια DC τάση εισόδου και για ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών αποτελούν το μισό εκείνων της μισής γέφυρας.

Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.



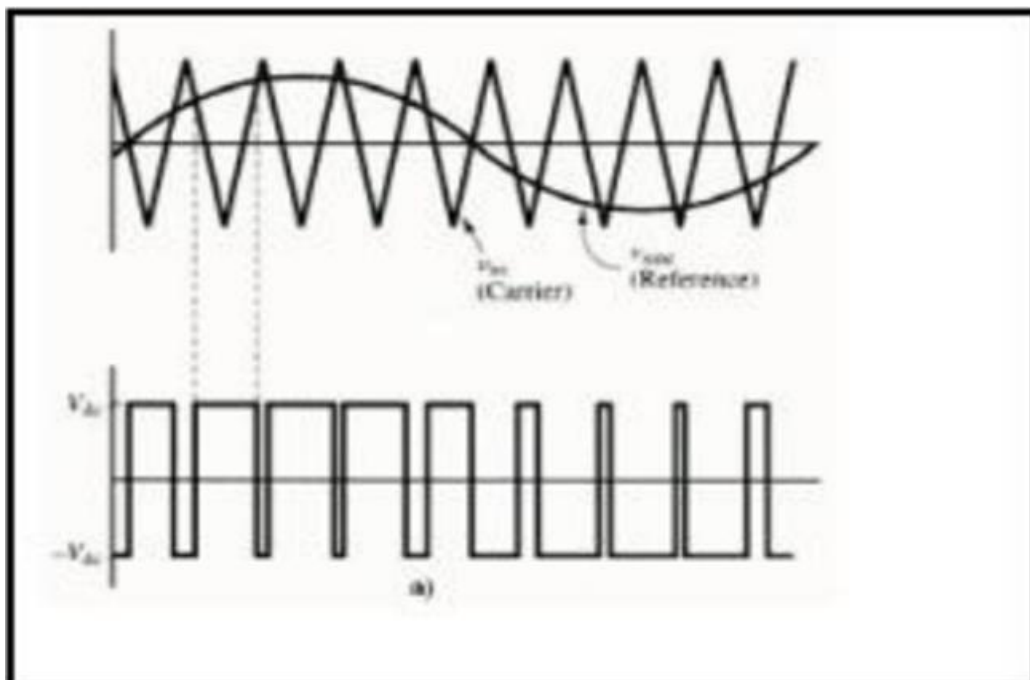
Voltage-Source Inverter

Σχήμα 18: Σχηματικό διάγραμμα 1Φ αντιστροφέα πλήρους γέφυρας

Ωστόσο, θα πραγματοποιηθεί ιδιαίτερη αναφορά σε δύο είδη διαμόρφωσης, την διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου και την διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου.

2.5. Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών με διπολική τάση εξόδου

Ως ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών με διπολική τάση εξόδου εννοείται η διαμόρφωση εκείνη, όπου η τάση εξόδου του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας είναι είτε V_{dc} είτε $-V_{dc}$. Στο παρακάτω σχήμα πραγματοποιείται αναπαράσταση PWM με διπολική τάση εξόδου.



Σχήμα 19: Αναπαράσταση PWM με διπολική τάση εξόδου

(Πηγή:https://www.wikiwand.com/el/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AC_%CE%B9%CF%83%CF%87%CF%8D%CE%BF%CF%82)

Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος των διακοπών γίνεται σε ζευγάρια. Πιο συγκεκριμένα, ως πρώτο ζεύγος διακοπών, θεωρούνται οι διακόπτες S_1, S_4 ενώ ως δεύτερο ζευγάρι οι διακόπτες S_3, S_2 ώστε ανάλογα με τα σήματα που δέχονται από τον έλεγχο αλλάζουν ταυτόχρονα κατάσταση.

Η κυμάτωση της τάσης του αριστερού σκέλους του αντιστροφέα ταυτίζεται με αυτή της μισής γέφυρας. Συνακόλουθα, η έξοδος του δεξιού σκέλους είναι αντίθετη ως προς της έξοδο του αριστερού. Επομένως, $V_a = -V_b$, ενώ η πολική τάση του αντιστροφέα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_0 = V_{ab} = V_a - V_b = \pm V_{DC}.$$

Έτσι, με την αντίστοιχη ανάλυση όπως και στη περίπτωση της μισής γέφυρας, για το πλάτος της τάσης εξόδου ισχύει η σχέση:

$$\hat{V}_{0,1} = m_a V_{DC}$$

Τέλος, επειδή η τάση εξόδου μεταβαίνει μεταξύ των τιμών V_{dc} και $-V_{dc}$ γίνεται φανερός ο λόγος ονομασίας της συγκεκριμένης λειτουργίας του μετατροπέα ως διπολική. Επομένως το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου (V_{o1}) μπορεί να βρεθεί από την σχέση:

$$V_{o1} = m_a * V_{dc} \quad (m_a \leq 1).$$

Η τάση εξόδου V_o μεταβαίνει μεταξύ των επιπέδων τάσης $-V_d$ και V_d επομένως αυτός είναι ο λόγος που αυτή η μορφή μετάβασης ονομάζεται διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου.

Ανάλογα με την ανάλυση που έγινε στην περίπτωση του αντιστροφέα μισής γέφυρας, οι rms τιμές των αρμονικών της τάσης εξόδου μπορούν να βρεθούν από την σχέση:

$$V_{A0,h} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \frac{\hat{V}_{A0,h}}{V_{DC}/2}$$

Όπως παρατηρείται, η μόνη διαφορά με την προηγούμενη σχέση είναι ότι έχει πολλαπλασιαστεί επί δύο (2). Οι συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι αρμονικές δίνονται από την επόμενη σχέση δηλαδή:

$$f_h = (jm_f \pm k)f_1$$

Στο επόμενο κεφάλαιο, ακολουθεί ανάλυση της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών με μονοπολική τάση εξόδου. Στην πτυχιακή αυτή χρησιμοποιήθηκε ο μονοφασικός μετατροπέας ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών με μονοπολική τάση εξόδου, ώστε

να εμφανίζονται λιγότερες αρμονικές στην τάση εξόδου και να απαιτείται η τοποθέτηση μικρότερου φίλτρου.

2.6. Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών με μονοπολική τάση εξόδου

Ως ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών με μονοπολική τάση εξόδου, ονομάζεται η διαμόρφωση όπου οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα σε σχέση με την περίπτωση διπολικής τάσης εξόδου.

Εδώ χρησιμοποιούνται δύο ημιτονοειδή σήματα αναφοράς (V_{ctrl}), ενός για κάθε σκέλος του αντιστροφέα με διαφορά φάσης 180° μοίρες, ενώ χρησιμοποιείται μια τριγωνική κυματομορφή (V_{tri}) ως φέρων σήμα.

Έτσι κάθε σκέλος ελέγχεται ξεχωριστά, με την σύγκριση της V_{tri} με τα V_{ctrl} και $-V_{ctrl}$.

Πιο συγκεκριμένα οι διακόπτες S1, S2 ελέγχονται μέσω του σήματος V_{ctrl} ενώ οι διακόπτες S3, S4 μέσω του σήματος $-V_{ctrl}$.

Με βάση τα παραπάνω, ισχύουν οι ακόλουθες λειτουργίες των διακοπών:

- Όταν $V_{ctrl} > V_{tri}$ άγει ο διακόπτης S1 και η τάση εξόδου είναι $V_{ao} = V_{dc}/2$.
- Όταν $V_{ctrl} < V_{tri}$ άγει ο διακόπτης S2 και η τάση εξόδου είναι $V_{ao} = -V_{dc}/2$.
- Όπου V_{ao} είναι η τάση εξόδου του πρώτου σκέλους του αντιστροφέα σε σχέση με το σημείο αναφοράς της DC πλευράς.

Για τον έλεγχο του δεύτερου σκέλους η $-V_{ctrl}$ συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή.

- Όταν $-V_{ctrl} > V_{tri}$ άγει ο διακόπτης S3 και η τάση εξόδου είναι $V_{bo} = V_{dc}/2$.
- Όταν $-V_{ctrl} < V_{tri}$ άγει ο διακόπτης S4 και η τάση εξόδου είναι $V_{bo} = -V_{dc}/2$.
- Όπου V_{bo} είναι η τάση εξόδου του δεύτερου σκέλους του αντιστροφέα σε σχέση με το σημείο αναφοράς της DC πλευράς.

Έχοντας ως προϋπόθεση ότι $m_a < 1$ προκύπτει ότι το πλάτος της πολικής και της φασικής τάσης εξόδου της θεμελιώδους συνιστώσας του αντιστροφέα είναι γραμμικώς εξαρτώμενα από τον συντελεστή m_a . Επομένως, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις :

$$\hat{V}_{a0,1} = \hat{V}_{b0,1} = \frac{V_{dc}m_a}{2}$$

- Όπου $\hat{V}_{a0,1} = \hat{V}_{b0,1}$ =πλάτος θεμελιώδους φασικής τάσης εξόδου $=\frac{V_{dc}m_a}{2}$

$$\hat{V}_{ab,1} = \hat{V}_{a0,1} - V_{b0,1} = \hat{V}_{a0,1} - (-\hat{V}_{a0,1}) = 2\hat{V}_{a0,1} = V_{dc}m_a$$

- Όπου $V_{ab,1}$ =πλάτος θεμελιώδους πολικής τάσης εξόδου $= V_{dc}m_a$

Οι παραπάνω σχέσεις φανερώνουν γιατί η περιοχή του m_a αναφέρεται ως γραμμική και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Στη συνέχεια, στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τέσσερις συνδυασμοί που αναφέρονται παραπάνω.

Πίνακας 4: Συνοπτική παρουσίαση των καταστάσεων των διακοπών κατά την λειτουργία με μονοπολική τάση εξόδου

Mode	<i>S1</i>	<i>S2</i>	<i>S3</i>	<i>S4</i>	v_{ac}	Note
I	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	0	<i>Freewheeling</i>
II	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	$-V_{dc}$	-
III	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	$+V_{dc}$	-
III	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	<i>OFF</i>	<i>ON</i>	0	<i>Freewheeling</i>

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, οι διακόπτες ενός σκέλους δεν μπορούν να άγουν την ίδια στιγμή. Σε περίπτωση που συμβεί κάτι τέτοιο, θα δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα στα άκρα της DC πηγής και μπορεί να καταστραφούν οι διακόπτες ή ο μετατροπέας.

Εξαιτίας των διόδων ανατροφοδότησης που συνδέονται αντιπαράλληλα προς τους διακόπτες, οι τάσεις στην έξοδο είναι ανεξάρτητες από την φορά του ρεύματος εξόδου (i_o). Συνεπώς, το ρεύμα μπορεί να έχει οποιαδήποτε φορά ανεξάρτητα από την πολικότητα της τάσης.

Επίσης, παρατηρείται ότι όταν και οι δύο διακόπτες *S1* και *S3* είναι κλειστοί, η τάση εξόδου είναι μηδέν. Το ρεύμα εξόδου κυκλοφορεί σε ένα βρόχο μέσω των *S1,D3* (αντιπαράλληλη διάδος στον *S3*) ή *D1, S3* αναλόγως την φορά του ρεύματος εξόδου i_o .

Κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος χρόνου, το ρεύμα εισόδου i_{dc} είναι μηδέν. Παρομοίως το ίδιο συμβαίνει όταν οι δύο κάτω διακόπτες είναι κλειστοί.

Ουσιαστικά η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα του διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης σε ότι αφορά τις αρμονικές εξόδου, σε σύγκριση με την διπολική διάταξη μετάβασης τάσης.

Επίσης, τα άλματα της τάσης σε κάθε μετάβαση μειώνονται σε V_d από $2V$ όπως παρουσιάστηκε στην περίπτωση διπολικής τάσης εξόδου.

Το πλεονέκτημα του διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης, εμφανίζεται στο φάσμα της τάσης εξόδου, όπου οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους.

Πιο συγκεκριμένα, σε ένα μονοφασικό μετατροπέα εάν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f οι κυματομορφές του πρώτου και του δεύτερου σκέλους V_{a0} και V_{b0} αντίστοιχα θα μετατοπιστούν 180° από την θεμελιώδη συχνότητα η μία από την άλλη. Επομένως οι όροι των αρμονικών τάσεων, στη συχνότητα μετάβασης έχουν την ίδια φάση ($\varphi_{a0} - \varphi_{b0} = 180^\circ$) το m_f θα είναι μηδέν αφού οι κυματομορφές είναι μετατοπισμένες κατά 180° και ο m_f πρέπει να είναι άρτιος.

Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την απαλοιφή του αρμονικού όρου στη συχνότητα μετάβασης, στην τάση εξόδου $V_{ab} = V_{a0} - V_{b0}$.

Επίσης εξαλείφονται οι πλευρικές των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης. Κατά παρόμοιο τρόπο εξαλείφεται η άλλη κύρια αρμονική με συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, ενώ παραμένουν οι πλευρικές ζώνες της. Από την παρακάτω σχέση ισχύει :

$$V_{ol} = m_a V_{dc} \quad (\text{Τύπος θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου})$$

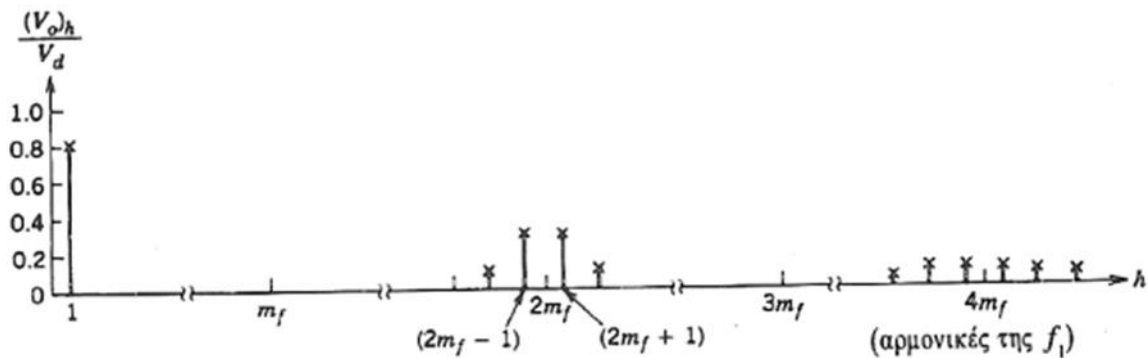
Όπου V_{ol} είναι η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση η αρμονική τάξη h δίνεται από την σχέση:

$$h = j(2m_f) \pm k \quad (\text{Τύπος αρμονικής τάξης})$$

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο συντελεστής διαμόρφωσης m_f , έχει άρτιες τιμές στην τεχνική της μονοπολικής τάσης εξόδου. Επειδή οι αρμονικές υπάρχουν ως πλευρικές ζώνες γύρω από την $2m_f$ και τις πολλαπλάσιες της και εφόσον το h παίρνει μόνο περιττές τιμές το k παίρνει και αυτό μόνο περιττές τιμές. Ενώ για τον υπολογισμό των αρμονικών τιμών ακολουθείται την ίδια διαδικασία με αυτή της διπολικής τάσης εξόδου, πρέπει σε κάθε περίπτωση να εφαρμόζονται οι κατάλληλες τιμές για τα m_f , k , j .

Συνοψίζοντας, από την σύγκριση της μετάβασης μονοπολικής και διπολικής τάσης εξόδου προκύπτει ότι και στις δυο περιπτώσεις οι τάσεις της θεμελιώδους συχνότητας είναι ίσες για ίδιους λόγους m_a . Ωστόσο στη μονοπολική τάση εξόδου, οι κύριες αρμονικές με κέντρο γύρω από την m_f , εκλείπουν, έχοντας ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερο περιεχόμενο.



Σχήμα 20: Το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου στην περίπτωση αντιστροφεία της μονοπολικής τάσης εξόδου

Συγκρίνοντας την μετάβαση της μονοπολικής και της διπολικής τάσης φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις οι τάσεις της θεμελιώδους είναι ίσες για ίσους λόγους $m\alpha$.

Ωστόσο με την μονοπολική τάση εξόδου οι κύριες αρμονικές τάσεις με κέντρο γύρω από την m_f εξαφανίζονται, έχοντας ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερο περιεχόμενο.

Συνεπώς αυξάνοντας την διακοπτική συχνότητα υπάρχει παράλληλα μια μετακίνηση των αρμονικών σε υψηλότερες συχνότητες, ενώ έτσι είναι πιο εύκολος ο σχεδιασμός του φίλτρου αλλά αυξάνονται ταυτόχρονα και οι απώλειες μετάβασης, κάτι που είναι μη επιθυμητό.

Όπως είναι προφανές, στην περίπτωση διπολικής διαμόρφωσης χρησιμοποιείται μεγαλύτερο φίλτρο για την εξάλειψη της υπάρχουσας κυμάτωσης. Αντίθετα, στην μονοπολική διαμόρφωση δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου ρεύμα κυμάτωσης γύρω από τα σημεία μηδενισμού αφού η έξοδος γειώνεται μέσω των πάνω ή κάτω διακοπών.

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση πραγματικών διακοπών, λόγω των χρόνων αγωγής και αποκοπής των διακοπών, θα πρέπει να εισάχθει ένα χρονικό διάστημα που ονομάζεται νεκρός χρόνος (deadline), ο οποίος βρίσκεται στη διαμόρφωση μεταξύ της μετάβασης της σβέσης του ενός διακόπτη και της έναυσης του άλλου.

Η διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, εξαρτάται από την ταχύτητα μετάβασης ώστε να ασφαλίζει ότι και οι δύο διακόπτες του ίδιου σκέλους να είναι εκτός, όταν ένας εξ' αυτών είναι έτοιμος να κλείσει, μικραίνοντας έτσι η πιθανότητα κάποιου βραχυκυκλώματος στα άκρα της DC πηγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

3.1. Εισαγωγή

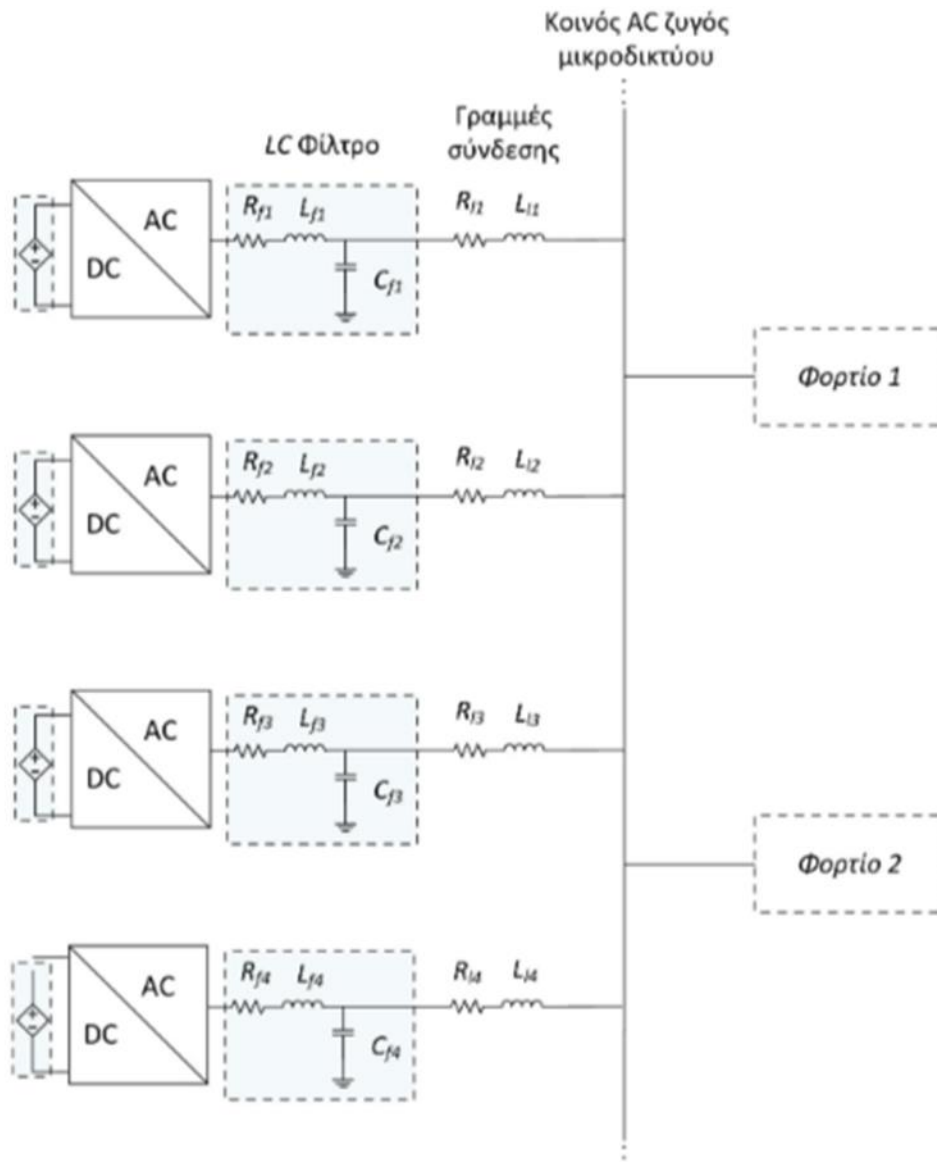
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο έλεγχος του αντιστροφέα της μπαταρίας, ώστε να προσομοιώνει τη λειτουργία μίας σύγχρονης γεννήτριας.

Η μέθοδος ελέγχου που εφαρμόζονται συνήθως στον μονοφασικό, αλλά και τον τριφασικό αντιστροφέα, είναι η Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM), η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Σε ότι αφορά την PWM, έχουν βρεθεί πολλές παραλλαγές για τον έλεγχο της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Υπάρχουν επίσης πολλές άλλες τεχνικές ελέγχου -με σκοπό την κάλυψη των απαιτήσεων διαφόρων εφαρμογών. Από αυτές τις τεχνικές ελέγχου, επιλέγεται η πιο κατάλληλη με βάση ορισμένα κριτήρια, τα οποία σχετίζονται με τις ανώτερες αρμονικές, με την καλύτερη εκμετάλλευση της DC -τάσης εισόδου, ενώ ένα σημαντικό κριτήριο αποτελεί η κατάλληλη μέθοδος για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, αφού τις περισσότερες φορές η πολυπλοκότητα ενός συστήματος απαιτεί τη χρήση ενός συγκεκριμένου συστήματος για τον έλεγχο και την πολύπλοκη παλμοδότηση του.

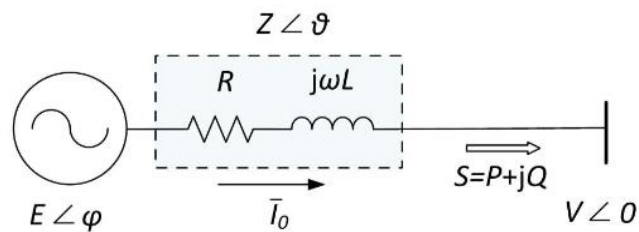
3.2. Έλεγχος στατικών χαρακτηριστικών

Αρχικά θα παρουσιαστεί η θεωρητική ανάλυση αυτής της μεθόδου. Στο σχήμα 21, παρουσιάζεται ένα μικροδίκτυο αποτελούμενο από διεσπαρμένες μονάδες που είναι συνδεδεμένες σε κοινό ζυγό. Αντίστοιχα, το σχήμα 22 αναφέρεται στο ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα ενός μετατροπέα.

Σε αυτό το σχήμα, παρατηρείται πως η τάση E είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος του αντιστροφέα, το I_0 είναι το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα, V_0° είναι η τάση του κοινού ζυγού, και $R+j\omega L$ είναι η σύνθετη αντίσταση που περιέχει την αντίδραση του φίλτρου και την σύνθετη αντίσταση της γραμμής σύνδεσης έως τον κοινό ζυγό.



Σχήμα 21: Ένα μικροδίκτυο με διεσπαρμένες παραγωγές ενέργειας και φορτία.



Σχήμα 22: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin ενός μετατροπέα.

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\bar{I}_0 = \frac{E \angle \varphi - V \angle 0}{Z \angle \theta} = \frac{E}{Z} \angle (\varphi - \theta) - \frac{V}{Z} \angle (-\theta)$$

$$\bar{Z} = Z \angle \theta = R + j\omega L$$

Επιπρόσθετα, η φαινόμενη ισχύς S που μπορεί να εγχύσει κάθε μετατροπέας στον κοινό ζυγό δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\bar{S} = \bar{V} * \bar{I}_0^* = P + jQ$$

Όπου \bar{I}_0^* είναι ο συζυγής του \bar{I}_0 . Από τις παραπάνω εξισώσεις θα προκύψει η ενεργός και η άεργος ισχύς που φαίνονται παρακάτω στις εξισώσεις που ακολουθούν.

$$P = \frac{V}{Z} [(E \cos \varphi - V) * \cos \theta + E * \sin \theta * \sin \varphi]$$

$$Q = \frac{V}{Z} [(E \cos \varphi - \Omega) * \sin \theta + E \cos \theta * \sin \varphi]$$

Αν υποθέσουμε ότι η διαφορά φάσης φ μεταξύ της τάσης εξόδου του μετατροπέα και της τάσης του κοινού ζυγού ως πολύ μικρή, τότε οι εξισώσεις θα μετατραπούν όπως φαίνεται παρακάτω:

$$P \cong \frac{V}{Z} [(E - V) * \cos \theta + E \varphi * \sin \theta]$$

$$Q \cong \frac{V}{Z} [(E - V) * \sin \theta + E \varphi * \cos \theta]$$

Από τις εξισώσεις αυτές, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ενεργός και άεργης ισχύς είναι εξαρτώμενες από την γωνία θ . Οπότε μπορεί να γίνει η διάκριση της ισχύος για κάποιες περιπτώσεις οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω ως εξής :

Για επαγωγική συμπεριφορά δηλ. $\theta = 90^\circ$, $\bar{Z} = jX$, οι εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος είναι οι εξής:

$$P \cong \frac{V * E * \varphi}{Z}$$

$$Q \cong \frac{V(E - V)}{Z}$$

Για ωμική συμπεριφορά δηλ. $\theta = 0^\circ$, $\bar{Z} = R$, οι εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος είναι οι εξής:

$$P \cong \frac{V * (E - V)}{Z}$$

$$Q \cong \frac{-V * E * \varphi}{Z}$$

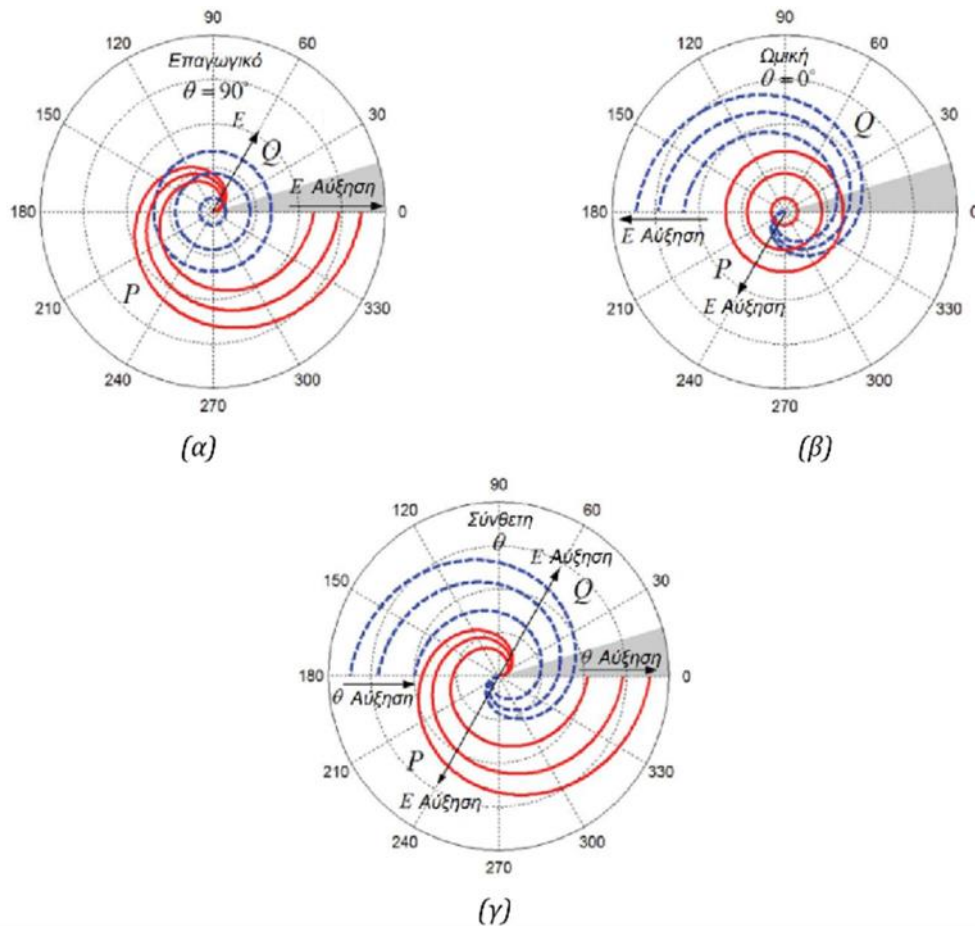
Και ως συμπεριφορά σύνθετης αντίστασης δηλ. θ , $\bar{Z} = R + jX$ ισχύουν οι εξισώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Επειδή όμως στις περισσότερες περιπτώσεις η σύνθετη αντίσταση της γραμμής παρουσιάζει επαγωγική συμπεριφορά (π.χ. στις εναέριες γραμμές μεταφοράς), πιο συνηθισμένη θεωρείται η χρήση των εξισώσεων με επαγωγική συμπεριφορά.

Επομένως σύμφωνα με αυτές παρατηρείται μία μεγάλη εξάρτηση της ενεργού ισχύος από τη γωνία φ , ενώ η άεργος ισχύς επηρεάζεται από την διαφορά του πλάτους E-V.

Στα σχήματα 23 α, β και γ, φαίνεται η επίδραση ανάμεσα στην σύνθετη αντίσταση και την κατανομή της ισχύος. Όπου οι πολικές ακτίνες στα σχήματα δείχνουν τις τιμές της ενεργού και της άεργου ισχύος, ενώ οι πολικές γωνίες την γωνία φ μεταξύ της τάσης εξόδου της διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας και της τάσης του κοινού ζυγού σύνδεσης.

Τα τμήματα σκίασης των κύκλων αναφέρονται στα λειτουργικά τμήματα ενός πραγματικού συστήματος, αφού όπως αναφέρθηκε η τιμή της γωνίας φ είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ μικρή. Επιπλέον από τα σχήματα προκύπτει το συμπέρασμα της επίδρασης της τάσης E και της γωνίας φ στην ενεργό και άεργο ισχύ για κάθε περίπτωση.



Σχήμα 23: Το πολικό διάγραμμα της συμπεριφοράς P/Q των παράλληλων συνδεδεμένων ΔΠΕ για (α) επαγωγική συμπεριφορά, (β) ωμική συμπεριφορά, (γ) σύνθετη συμπεριφορά δηλ. (ωμικό-επαγωγική συμπεριφορά). Με το κόκκινο συνεχές χρώμα έχουμε την ενεργή ισχύ ενώ με το μπλέ η άεργη ισχύς εξόδου.

Σε περίπτωση ενός δικτύου που κυριαρχεί η επαγωγική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς, οι στατικές χαρακτηριστικές που χρησιμοποιούνται φαίνονται στις παρακάτω εξισώσεις :

$$f = f_0 - m * P$$

$$V_n = V_0 - n * Q$$

Όπου f και V_n είναι η συχνότητα και η τάση ελέγχου, f_0 και V_0 είναι η συχνότητα και η τάση στην εν κενώ λειτουργία, P και Q είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου, και m, n είναι οι κλίσεις των στατικών χαρακτηριστικών ελέγχου αντίστοιχα.

Οι τιμές των κλίσεων των στατικών χαρακτηριστικών προκύπτουν από την μέγιστη διαθέσιμη ισχύ της πηγής για κάθε χρονική στιγμή. Σε περίπτωση που η διεσπαρμένη παραγωγή ενέργειας

τροφοδοτείται από κάποια συμβατική πηγή, η ισχύς εξόδου μπορεί να ρυθμιστεί, με αποτέλεσμα η διαθέσιμη ενεργός ισχύς P_{pot} να είναι ίση με την ονομαστική της φαινόμενης ισχύος S_{nom} . Σε αντίθετη περίπτωση αν τροφοδοτηθεί από μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκή πηγή), τότε η διαθέσιμη ενεργός ισχύς του μετατροπέα θα προσδιορίζεται ανάλογα με την διαθεσιμότητα της ανανεώσιμης πηγής. Το αποτέλεσμα της ανάλυσης όσον αναφέρθηκαν παραπάνω είναι η συνεχόμενη μεταβολή των στατικών χαρακτηριστικών αναλόγως την διαθέσιμη ισχύ. Επομένως οι τιμές των κλίσεων των στατικών χαρακτηριστικών θα δίνονται από τις σχέσεις των παρακάτω εξισώσεων :

$$m = \frac{\Delta f_{max}}{S_{nom}}$$

$$n = \frac{\Delta V_{max}}{S_{nom}}$$

Όπου Δf και ΔV είναι οι μέγιστες επιτρεπτές μεταβολές της συχνότητας και του μέτρου της τάσης σύμφωνα με τα όρια που ορίζει το πρότυπο EN50160.

3.3. Έλεγχος ενεργής ισχύος-συχνότητας

Ο ρόλος του ελέγχου αυτού είναι η ρύθμιση της ενεργής ισχύος μέσω της επιθυμητής συχνότητας κάθε φορά που συνδέονται ή αποσυνδέονται διάφορα φορτία. Πιο αναλυτικά η μέθοδος αυτή υλοποιείται στο πλαίσιο αναφοράς dq του μετασχηματισμού στο εσωτερικό σύστημα ελέγχου του μετατροπέα. Γι' αυτό ο μετατροπέας μετράει το ρεύμα εξόδου και την τάση εξόδου. Ενώ, για την εξάλειψη των αρμονικών που δημιουργούνται από τον έλεγχο της διαμόρφωσης εύρους παλμών που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, τοποθετείται στην έξοδο του μετατροπέα ένα LC φίλτρο, του οποίου το μέγεθος της αυτεπαγωγής επιλέγεται έτσι ώστε η ποσοστιαία πτώση τάσης πάνω της να μην υπερβαίνει το 2% σε ονομαστικές συνθήκες ρεύματος. Το μέγεθος του πυκνωτή καθορίζεται βάσει της επιθυμητής συχνότητας συντονισμού του φίλτρου, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{\text{φίλτρου}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L_f * C_f}}$$

Όπου L_f και C_f είναι οι αντίστοιχες τιμές της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας του φίλτρου. Από την υλοποίηση του ελέγχου στο dq πλαίσιο αναφοράς, προκύπτει ότι οι μετρούμενες ποσότητες μετατρέπονται σε σταθερές ποσότητες με την βοήθεια του μετασχηματισμού

σύμφωνα με την γωνία ελέγχου θ . Η γωνία ελέγχου θ προκύπτει από τη συχνότητα f , που υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

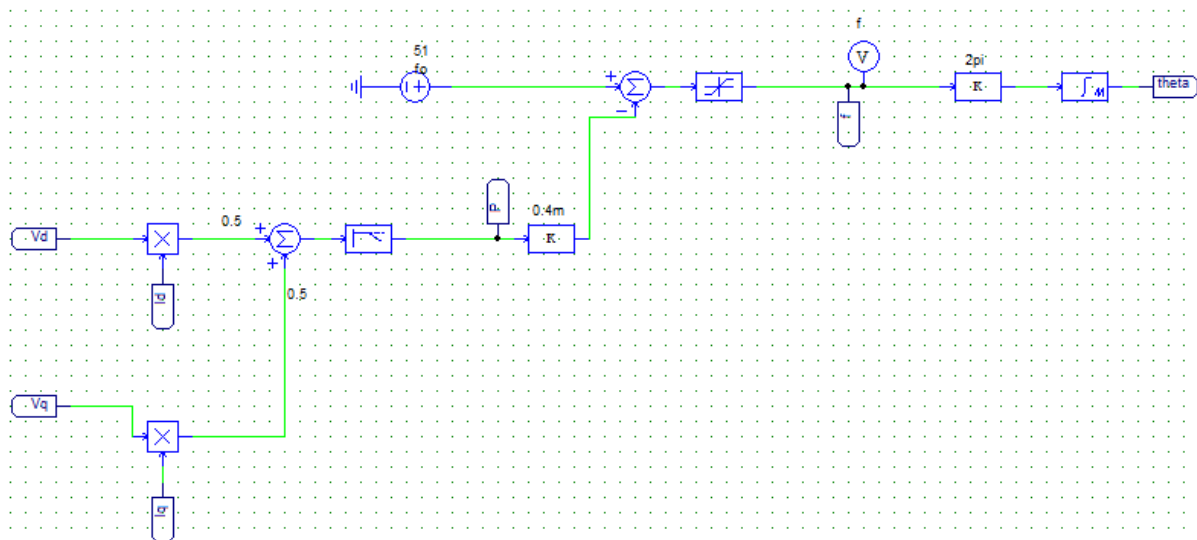
$$\theta = \int f dt$$

Ενώ από τους μετασχηματισμούς των ρευμάτων και των τάσεων θα προκύψει η τιμή της ενεργής ισχύος εξόδου του μετατροπέα που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P = V_d * I_d + V_q * I_q$$

Όπου V_d, V_q, I_d, I_q είναι οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου στο πλαίσιο αναφοράς του μετασχηματισμού και $V_{od}, V_{oq}, I_{od}, I_{oq}$ είναι οι τάσεις και τα ρεύματα εξόδου του μετατροπέα μετά το LC φίλτρο. Επιπρόσθετα για να μην επηρεαστούν οι βρόχοι της ισχύος και του ρεύματος για την καλύτερη ποιότητα ισχύος, οι υπολογίσιμες ποσότητες ενεργού ισχύος περνούν από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, με αποτέλεσμα στην έξοδο του φίλτρου να υπάρχει μόνο η DC συνιστώσα τους. Η συχνότητα αποκοπής του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι τις περισσότερες φορές μικρή.

Εν τέλει παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου ενεργού ισχύος – συχνότητας στο σχήμα 24



Σχήμα 24: Ο έλεγχος ενεργού ισχύος – συχνότητας του μετατροπέα.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται στον αντιστροφέα (Inverter) που συνδέει την μπαταρία με το δίκτυο και αφορά την κατάλληλη διανυσματική τάση αναφοράς της PWM διαμόρφωσης τόσο σε πλάτος όσο και σε γωνία. Σε περίπτωση που στο απομονωμένο δίκτυο έχουμε μόνο μονάδες με inverters, ορισμένες από αυτές αναλαμβάνουν την διαμόρφωση του δικτύου ρυθμίζοντας την τάση και την συχνότητα με βάση τις στατικές χαρακτηριστικές P-f και Q-V. Σε αυτούς

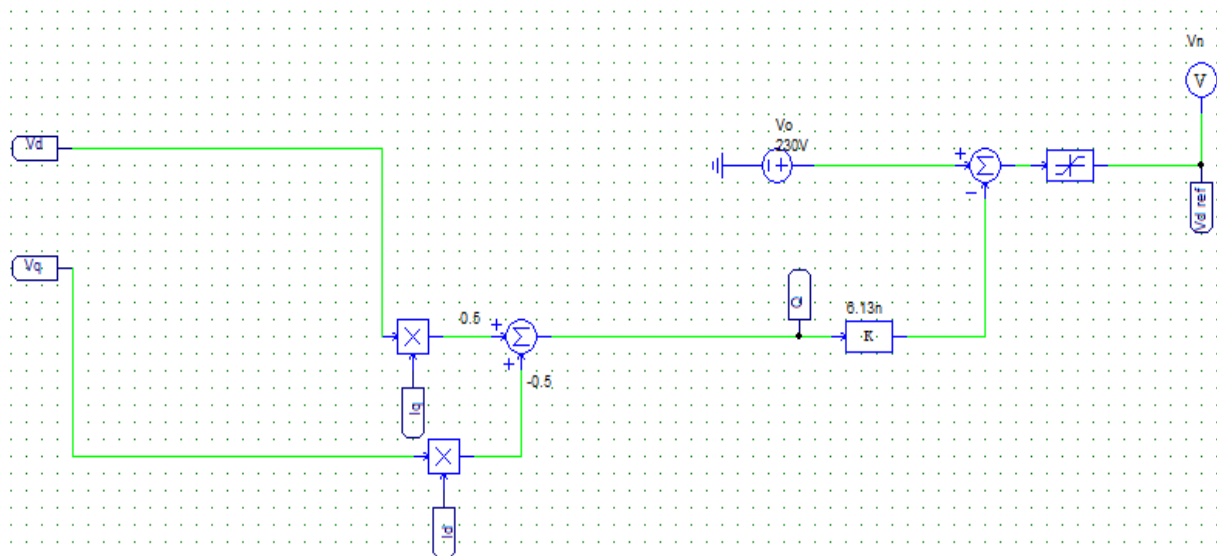
λοιπόν τους αντιστροφείς πηγής τάσης, η επιθυμητή συχνότητα επηρεάζει την παραγόμενη ενεργή ισχύ, ενώ η επιθυμητή τάση την άεργο ισχύ όπως ακριβώς συμβαίνει και στις σύγχρονες γεννήτριες. Η αλληλεπίδραση αυτών των μεγεθών καθορίζει το τελικό διάνυσμα της τάσης αναφοράς (V_{dref}).

3.4. Έλεγχος άεργης ισχύος-τάσης

Ο ρόλος αυτού του ελέγχου είναι η ρύθμιση της άεργης ισχύος βάσει της τάσης κάθε φορά που συνδέονται ή αποσυνδέονται διάφορα φορτία. Έτσι η πραγματική τιμή της άεργου ισχύος συγκρίνεται με την επιθυμητή και μέσω του PI ελεγκτή ρυθμίζεται έτσι ώστε το πλάτος της τάσης στο AC να λάβει την επιθυμητή τιμή.

Επομένως, για τον έλεγχο του πλάτους της τάσης πρέπει να ορίζονται η αρχική τιμή της τάσης, και η τιμή της άεργης ισχύος, η οποία καθορίζει την άεργο ισχύ που πρέπει να διοχετεύει ο μετατροπέας ώστε η τάση να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή.

Στη συνέχεια, στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου άεργης ισχύος – τάσης.



Σχήμα 25: Ο έλεγχος άεργης ισχύος – τάσης του μετατροπέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

4.1. Γενικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μετασχηματισμοί Clarke και Park.

Η συμπεριφορά των τριφασικών μηχανών περιγράφεται συνήθως από τις εξισώσεις τάσης και ρεύματος. Οι συντελεστές των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι (εκτός αν ο δρομέας είναι ακίνητος). Η μαθηματική μοντελοποίηση ενός τέτοιου συστήματος τείνει να είναι πολύπλοκη, δεδομένου ότι οι δεσμοί ροής, οι επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα μεταβάλλονται συνεχώς καθώς το ηλεκτρικό κύκλωμα βρίσκεται σε σχετική κίνηση. Για την ανάλυση μιας τέτοιας πολύπλοκης ηλεκτρικής μηχανής, χρησιμοποιούνται συχνά μαθηματικοί μετασχηματισμοί για την αποσύνδεση των μεταβλητών και την επίλυση εξισώσεων που περιλαμβάνουν χρονικά μεταβαλλόμενες ποσότητες με αναφορά όλων των μεταβλητών σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς.

Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων μεθόδων μετασχηματισμού, οι πιο γνωστές είναι:

- Ο Μετασχηματισμός Clarke
- Ο Μετασχηματισμός Park

Από τη μία πλευρά, ο μετασχηματισμός Clarke μετατρέπει τις ισορροπημένες τριφασικές ποσότητες σε ισορροπημένες διφασικές τετραγωνικές ποσότητες.

Από την άλλη πλευρά, ο μετασχηματισμός Park μετατρέπει τα διανύσματα στο ισορροπημένο διφασικό ορθογώνιο σταθερό σύστημα σε ορθογώνιο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Οι μετασχηματισμοί Clarke και Park είναι απαραίτητοι για την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου μεθόδων. Βασικά, ο μετασχηματισμός Clarke μετατρέπει τις (abc) στάσιμες ποσότητες σε $(\alpha - \beta)$ ποσότητες. Ενώ ο μετασχηματισμός Park μετατρέπει τις $(\alpha - \beta)$ ποσότητες στις $(d - q)$ περιστρεφόμενες ποσότητες (Chattopasdhya et. al., 2010).

4.1. Μετασχηματισμός Clarke

Για την απλούστευση της μοντελοποίησης του συστήματος κίνησης ελέγχου με προσανατολισμό στο πεδίο, είναι κοινή πρακτική ο μετασχηματισμός των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος από το τριφασικό σύστημα (abc) σε μία ορθογώνια $(\alpha-\beta)$

αναπαράσταση ή $(d - q)$ περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με άμεσο (direct) (d) και τετραγωνικό (quadrature) (q) άξονα, όπου η προκύπτουσα f δηλώνει είτε την τάση του ρεύματος ή τη σύνδεση μαγνητικής ροής του στάτη και όπου θ_r είναι η γωνία θέσης του ρότορα του περιστρεφόμενου $(d - q)$ πλαισίου αναφοράς (Chattopadhyay et. al., 2010).

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \triangleq \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

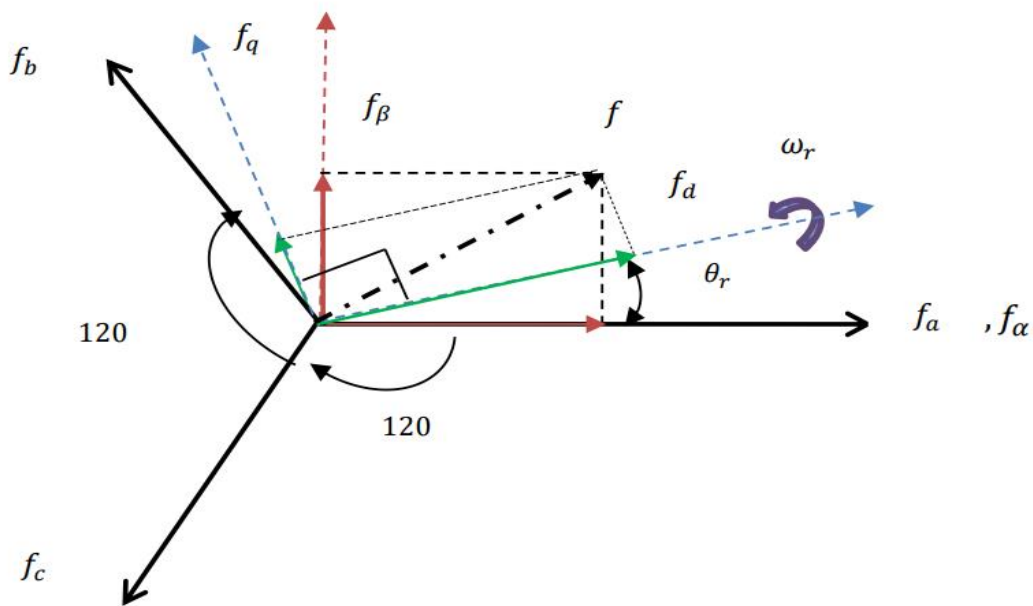
$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = [\text{Clarke Matrix}] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

όπου,

$$[\text{Clarke Matrix}] \triangleq \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Είναι προφανές από το παρακάτω σχήμα, ότι το φυσικό μέγεθος που προκύπτει από την αναπαράσταση $(\alpha - \beta)$ είναι:

$$f = \sqrt{f_\alpha^2 + f_\beta^2}$$



Σχήμα 26: Συνδυασμένα σταθερά και περιστρεφόμενα πλαίσια για τριφασικό σύστημα

4.2. Μετασχηματισμός Park

Ο μετασχηματισμός Park έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ανάλυση των σύγχρονων και επαγωγικών μηχανών. Η καινοτομία του έργου του Park περιλαμβάνει την ικανότητά του να μετασχηματίζει το σύνολο εξισώσεων οποιασδήποτε σχετικής μηχανής με χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές σε μια άλλη με χρονικά αμετάβλητους συντελεστές.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = [Park\ Matrix] \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$

Όπου:

$$[Park\ Matrix] \triangleq \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

Από τις αρχικές εξισώσεις Clarke και Park έχουμε (Krause et. al., 2013):

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

με,

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} = [Park\ Matrix][Clarke\ Matrix]$$

Είναι προφανές από το σχήμα 21 ότι το φυσικό μέγεθος που προκύπτει από την αναπαράσταση ($d - q$) είναι:

$$f = \sqrt{f_d^2 + f_q^2}$$

Η αναπαράσταση των δύο φάσεων (α, β) του πλαισίου που υπολογίζεται με τον μετασχηματισμό Clarke τροφοδοτείται στη συνέχεια στο ένα μπλοκ διανυσματικής περιστροφής όπου περιστρέφεται κατά γωνία θ_r για να ακολουθήσει το πλαίσιο αναφοράς (d, q).

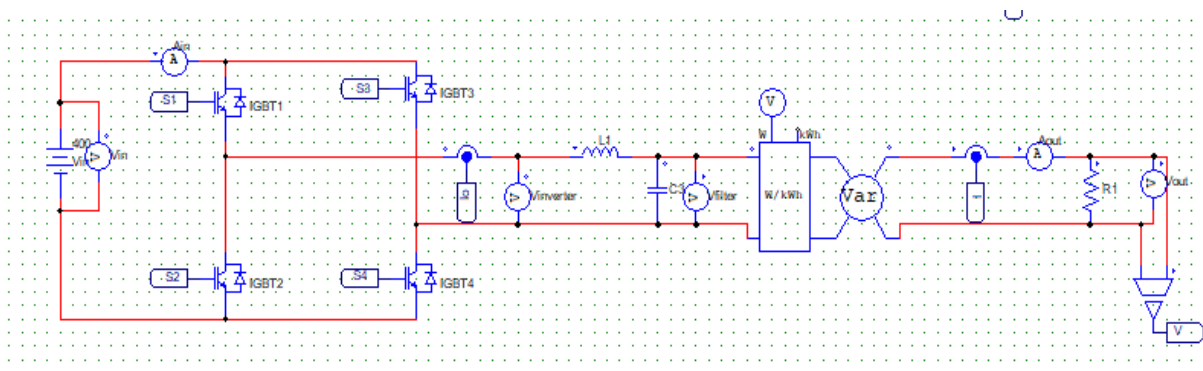
q) που είναι προσαρτημένο στην ποσότητα του δρομέα. Η περιστροφή κατά γωνία θr γίνεται σύμφωνα με τους παραπάνω τύπους. Στο σχήμα 26 παρουσιάζεται η συνδυασμένη διανυσματική αναπαράσταση για τριφασικά συστήματα (Abdul & Altahir, 2020).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1. Μεθοδολογία υλοποίησης και μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον του PSIM

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία υλοποίησης και η μοντελοποίηση του συστήματος στο περιβάλλον PSIM, με βάση τα όσα έχουν παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, θα ακολουθήσει η εισαγωγή και η ρύθμιση κάθε στοιχείου ξεχωριστά για την καλύτερη δυνατή κατανόηση της μεθοδολογίας του συστήματος, ενώ στην ενότητα 5.2 πραγματοποιείται επαλήθευση της λειτουργίας του μοντέλου μέσω προσομοίωσης και τέλος, θα γίνει επαλήθευση της λειτουργίας του μοντέλου μέσω προσομοίωσης και παρουσίαση των σχετικών αποτελεσμάτων.

Αρχικά, παρουσιάζεται παρακάτω η γενική εικόνα του συνολικού κυκλώματος στο σχήμα 27.



Σχήμα 27: Η γενική εικόνα του κυκλώματος για την υλοποίηση της προσομοίωσης.

Το κύκλωμα, αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- α) μια DC πηγή τάσης, η οποία αντιστοιχεί στην τάση της μπαταρίας
- β) ένα μονοφασικό αντιστροφέα πλήρους γέφυρας,
- γ) το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα μέσω της διαμόρφωσης εύρους παλμών,
- δ) ένα αισθητήρα για τη μέτρηση του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα (I_o),
- ε) ένα βολτόμετρο παράλληλα στην έξοδο του αντιστροφέα για την μέτρηση της τάσης του αντιστροφέα ($V_{inverter}$),
- στ) το φίλτρο εξόδου του αντιστροφέα τύπου LC,

-
- ζ) ένα βολτόμετρο παράλληλα στην έξοδο του φίλτρου για την μέτρηση της τάσης του φίλτρου LC (*Vfilter*),
 - η) ένα βατόμετρο για την μέτρηση της ενεργού ισχύος,
 - θ) ένα βαρόμετρο για την μέτρηση της άεργου ισχύος,
 - ι) ένα αισθητήρα ρεύματος εξόδου (I),
 - κ) το φορτίο, το οποίο αρχικά αποτελείται από μία ωμική αντίσταση (R1),
 - λ) ένα βολτόμετρο παράλληλα με το φορτίο για την μέτρηση της τάσης εξόδου του φορτίου και
 - μ) ένα αισθητήρα τάσης εξόδου (V).

5.1.1. DC τάση εισόδου

Η τάση εισόδου ενός μετατροπέα DC / AC αντιπροσωπεύει την μονάδα αποθήκευσης της ενέργειας, δηλαδή τη μπαταρία. Η τάση της μπαταρίας έχει μία διακύμανση, η οποία εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισής της. Ωστόσο, στην παρούσα πτυχιακή οι μικρομεταβολές της τάσης δεν έχουν ληφθεί υπόψη και η μπαταρία έχει προσομοιωθεί από μια πηγή τάσης με σταθερή τιμή.

Για λόγους που σχετίζονται με την ευκολότερη εξάλειψη των αρμονικών, έχει επιλεγεί η λειτουργία του αντιστροφέα στην γραμμική περιοχή. Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους θα πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας ($m_a < 1$).

Επομένως θα ισχύει ότι :

$$\hat{V}_{Ao} = m_a * V_{DC}$$

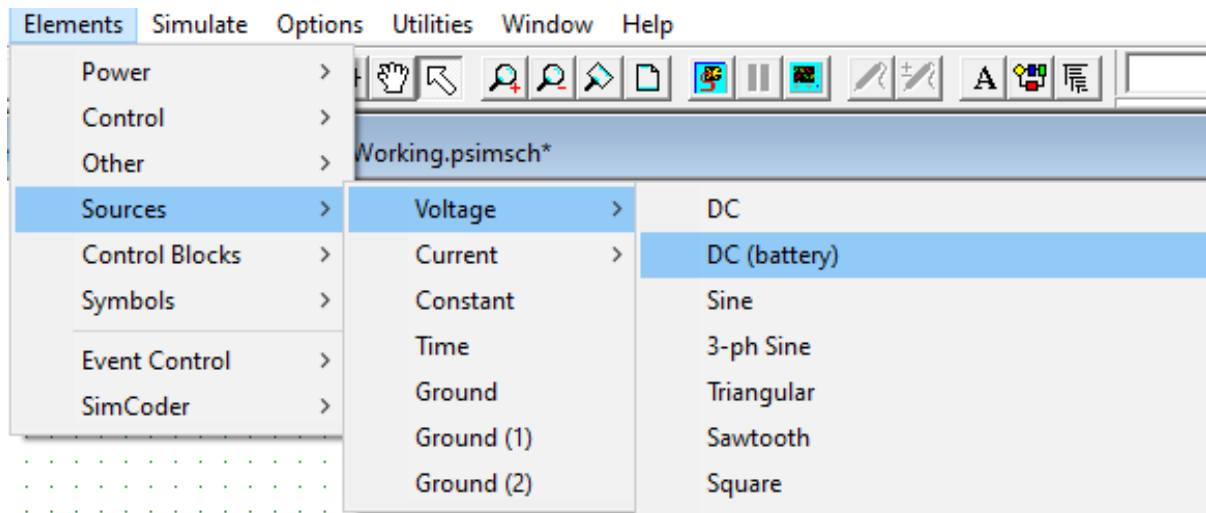
$$\hat{V}_{AB} = 2\hat{V}_{Ao}$$

Επειδή $m_a < 1$, το ονομαστικό πλάτος της τάσης στο φορτίο θα πρέπει να είναι ίσο με 325V, δηλ. $1.41 * 230V_{rms}$, όπου 230V είναι η ονομαστική rms τάση του δικτύου. Άρα η DC πηγή τάσης της μπαταρίας θα πρέπει να έχει τιμή:

$$V_{DC} \geq \hat{V}_{AB}$$

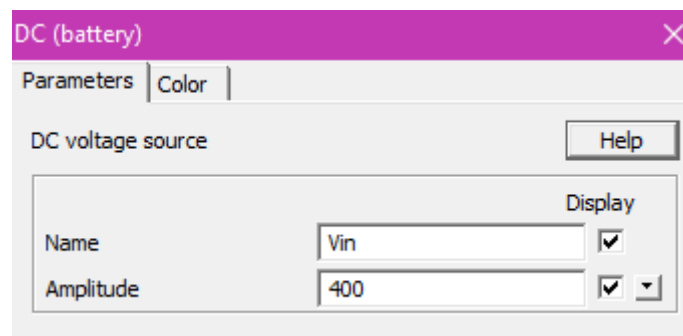
$$V_{DC} \geq 325V$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η DC πηγή του κυκλώματος είναι ιδανική, οπότε δεν λαμβάνονται υπόψη άλλα παρασιτικά φαινόμενα (π.χ. φίλτρο εισόδου) που μπορούν να παρουσιαστούν στην DC του αντιστροφέα. Η επιλογή της DC τάσης εισόδου (μπαταρίας) για το σύστημα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 28.



Σχήμα 28: Η μεθοδολογία επιλογής της DC τάσης εισόδου(Μπαταρίας) στο κύκλωμα μας.

Η εισαγωγή της DC τάσης εισόδου (μπαταρίας) στο κύκλωμα, έγινε μέσω του Elements > Sources > Voltage > DC (battery), ενώ παρακάτω στο σχήμα 29 παρουσιάζονται οι παράμετροι της DC τάσης εισόδου (battery).



Σχήμα 29: Οι παράμετροι της DC τάσης εισόδου (Μπαταρίας).

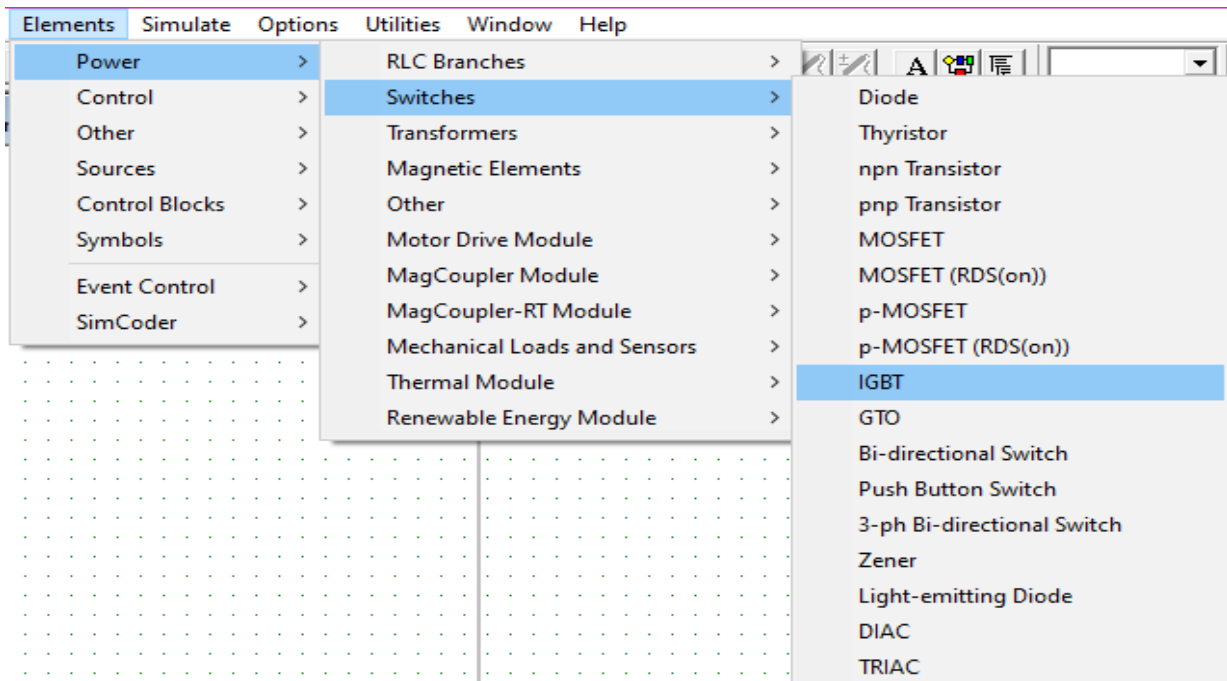
Στο 1ο σενάριο προσομοίωσης, το φορτίο είναι μία ωμική αντίσταση 30Ω.

5.1.2. Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας

Η μεθοδολογία της υλοποίησης και η μοντελοποίηση του μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας και των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα, έγινε με την χρήση τεσσάρων (4) πλήρως ελεγχόμενων διακοπών με μόνωση πύλης (IGBT). Ο μετατροπέας αποτελείται από

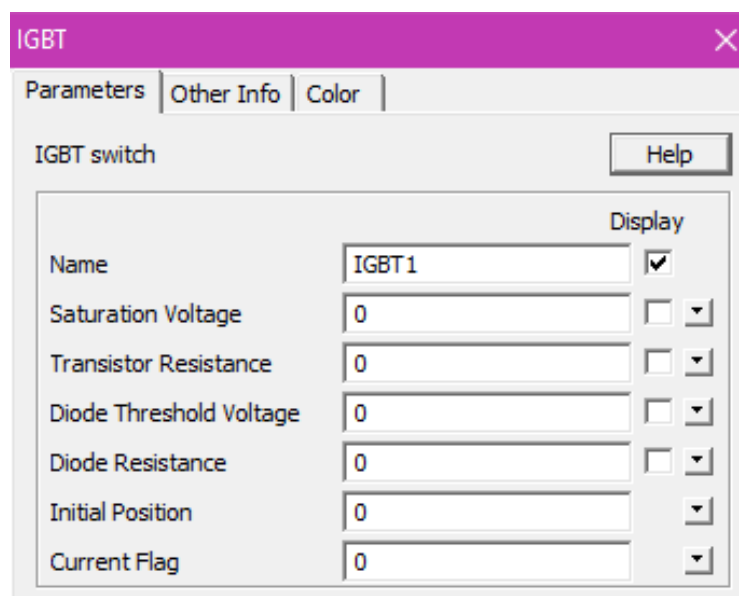
δύο κλάδους σχηματίζοντας μία διάταξη γέφυρας. Αντιπαράλληλα στα IGBT υπάρχουν τοποθετημένες δίοδοι ισχύος.

Ακολούθως παρουσιάζεται η διαδικασία εισαγωγής των διακοπών στο κύκλωμα.



Σχήμα 30: Η μέθοδος εισαγωγής IGBT στο κύκλωμα.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η μέθοδος εισαγωγής των πλήρως ελεγχόμενων διακοπών, έγινε μέσω του Elements > Power > Switches > IGBT, ενώ στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 31) φαίνονται οι παράμετροί τους.



Σχήμα 31: Οι παράμετροι των ελεγχόμενων διακοπών του κυκλώματος μας.

Όλες οι παράμετροι των IGBT είναι μηδέν, γιατί θεωρήθηκαν ιδανικοί διακόπτες, χωρίς να γίνει εμπειριστατωμένη ανάλυση ως προς την πτώση τάσης αγωγής και τις απώλειές τους. Τα σήματα οδήγησης δίνονται στις πύλες των IGBT μέσω του συστήματος ελέγχου (PWM). Πιο συγκεκριμένα, ο ελεγχόμενος διακόπτης ON-OFF διασυνδέεται μεταξύ του κυκλώματος ισχύος και του κυκλώματος ελέγχου. Η είσοδος του είναι ένα λογικό σήμα (0 ή 1) από το κύκλωμα ελέγχου, ενώ όπως αναφέρθηκε η έξοδος του συνδέεται με την πύλη του IGBT για τον έλεγχο της αγωγιμότητας αυτού.

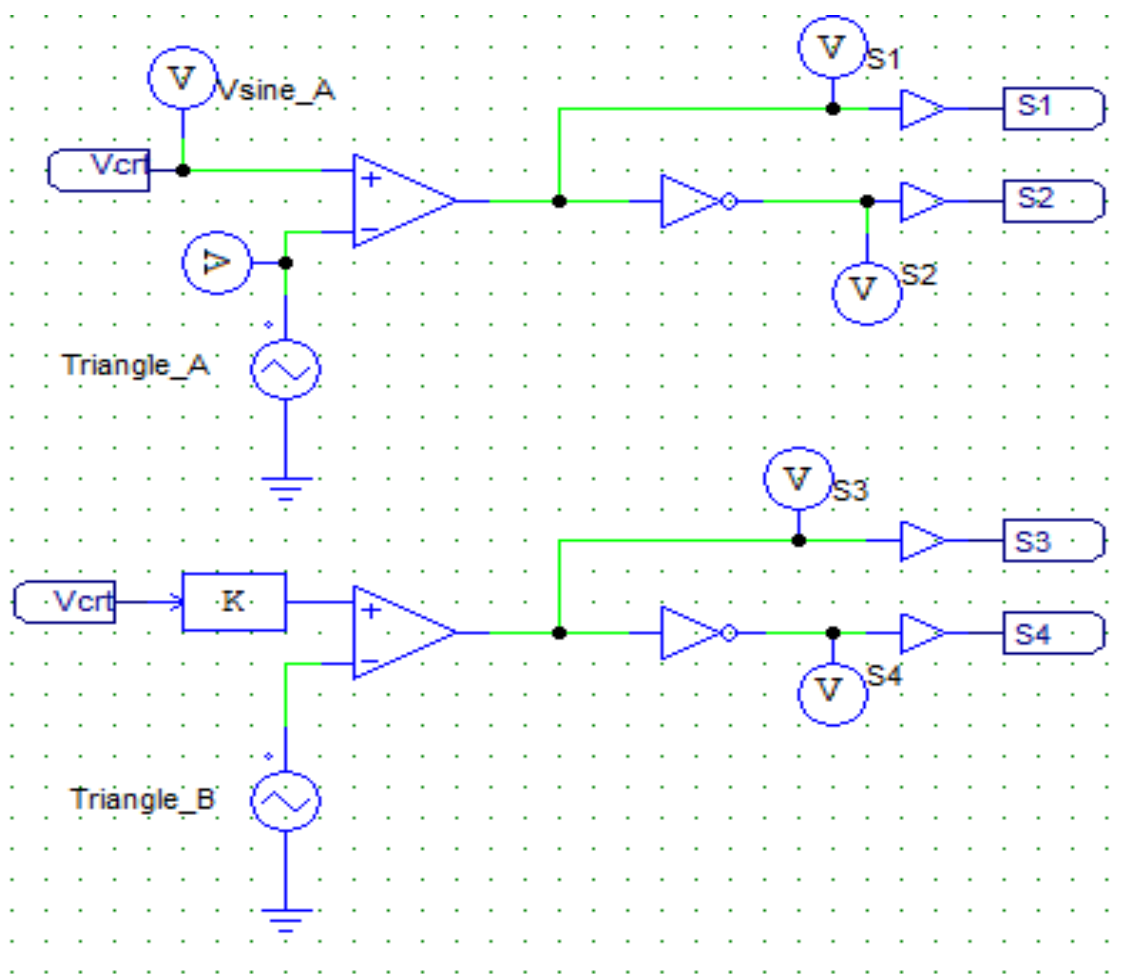
5.1.3 Το σύστημα ελέγχου της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM)

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε για την διαμόρφωση εύρους παλμών, κυρίαρχο ρόλο έχουν τα σήματα ελέγχου των IGBT του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας. Πιο αναλυτικά, παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας των σημάτων ελέγχου στο περιβάλλον του PSIM, ενώ παρουσιάζεται επίσης η μεθοδολογία υλοποίησης και η μοντελοποίηση των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα στοιχεία του συστήματος είναι τα ακόλουθα :

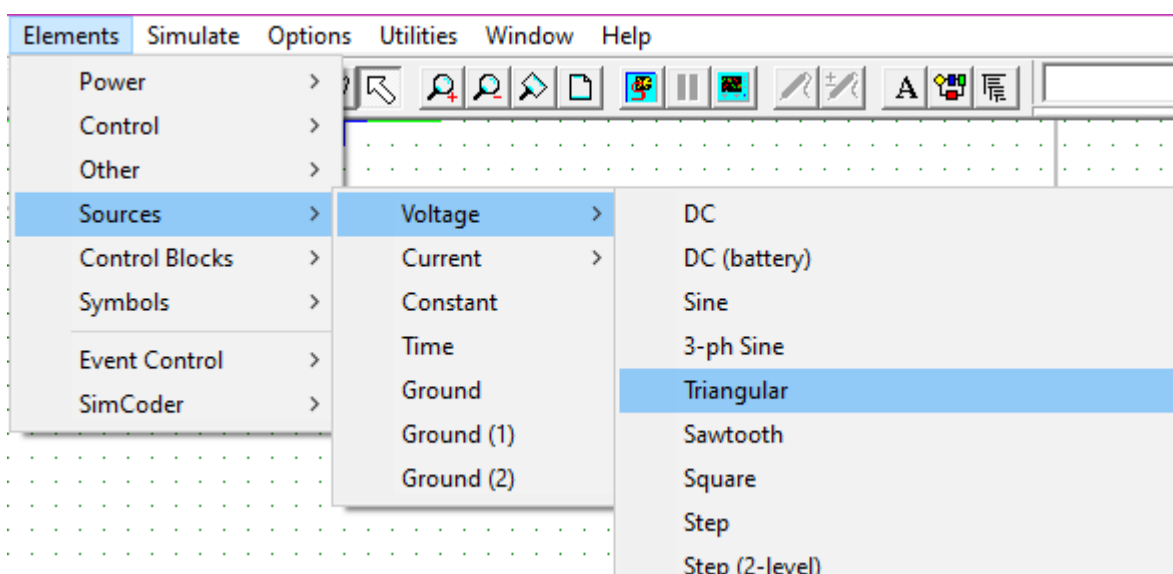
- α) Πηγές τάσης δημιουργίας του τριγωνικού σήματος παλμών.
- β) Πηγές τάσης για την δημιουργία ημιτονοειδούς σήματος παλμών (V_{ctrl}).
- γ) Βολτόμετρα για την ένδειξη των τιμών τάσης των σημάτων.
- δ) Συγκριτές (Comparator) για την σύγκριση των δυο παλμικών σημάτων.
- ε) Πύλες NOT για την αντιστροφή του τριγωνικού σήματος.
- στ) Γείωση

Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται το σύστημα ελέγχου της PWM του συστήματος στο περιβάλλον PSIM. Στην συνέχεια, αναλύονται όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



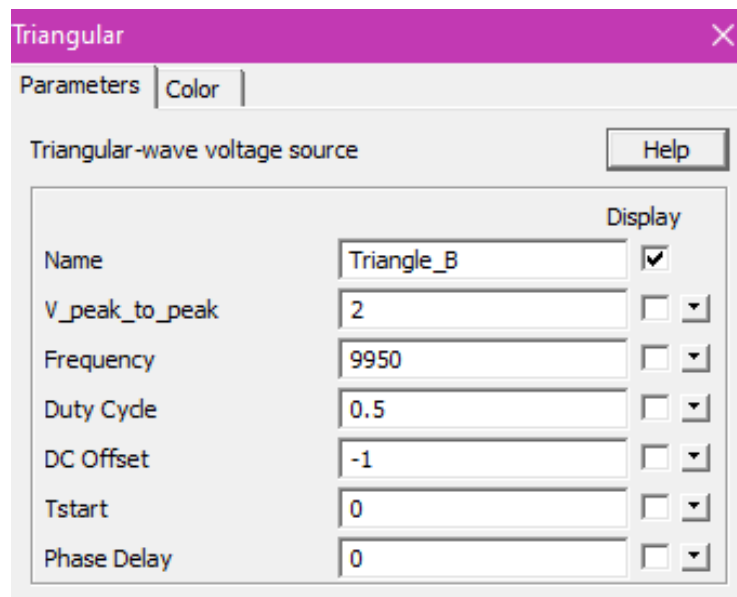
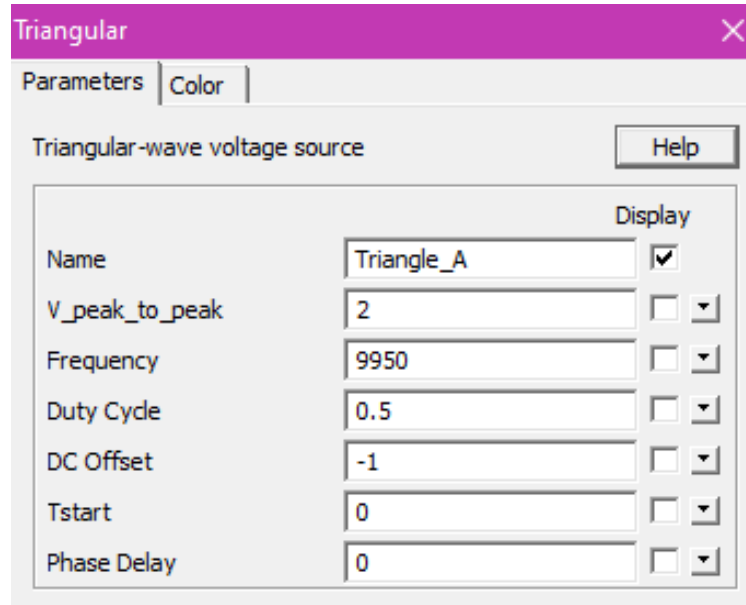
Σχήμα 32: Το σύστημα ελέγχου της PWM.

Η επιλογή των πηγών τάσης του τριγωνικού σήματος παλμών (Triangle A και B) έγινε με τη διαδικασία που φαίνεται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33: Η μέθοδος επιλογής της πηγής τάσης τριγωνικού σήματος.

Όπως απεικονίζεται στο σχήμα 33, η μέθοδος της επιλογής της πηγής αυτής έγινε μέσω του Elements > Sources > Voltage > Triangular, ενώ παρακάτω στο σχήμα 34 παρουσιάζονται οι παράμετροι για τις συγκεκριμένες πηγές τάσης.



Σχήμα 34: Οι παράμετροι των πηγών τάσης του συστήματος α) Triangle_A και β) Triangle_B.

Οι πηγές τάσης τριγωνικού σήματος έχουν τις εξής παραμέτρους :

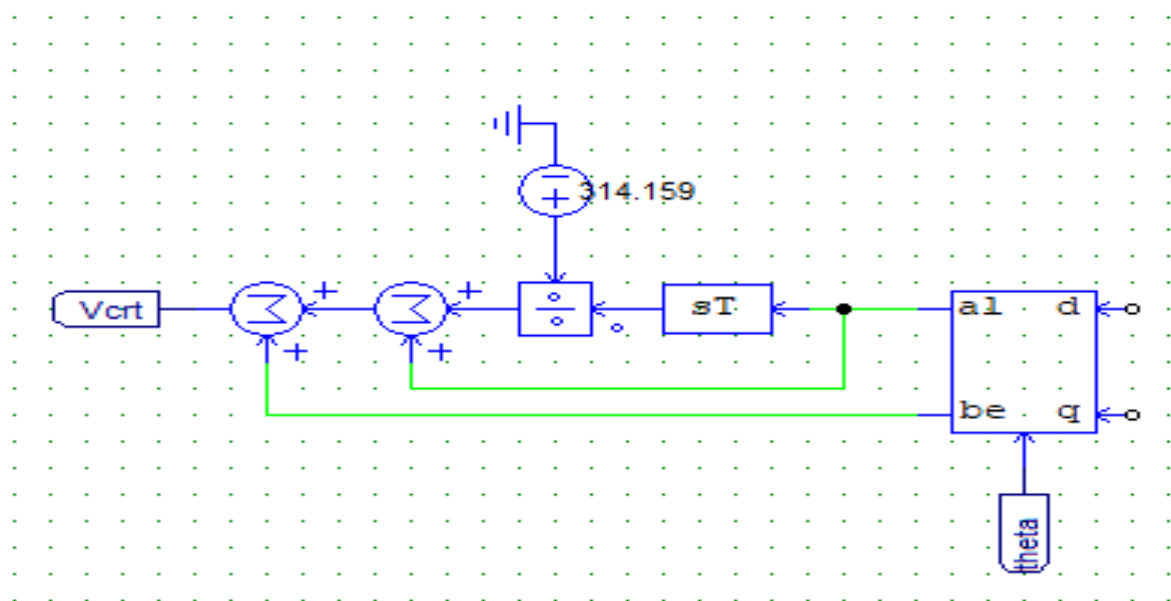
- ✓ V peak to peak (Το πλάτος της τάσης από κορυφή σε κορυφή)
- ✓ Frequency (Η συχνότητα του σήματος σε Hz)
- ✓ Duty Cycle (Η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας κάθε τριγωνικού σήματος)
- ✓ DC Offset (Η μετατόπιση συνεχούς ρεύματος DC)

- ✓ T start (Η εκκίνηση T των παλμών)
- ✓ Phase Delay (Η καθυστέρηση γωνίας φάσης)

Αρχικά, καθορίστηκε το πλάτος της τάσης από κορυφή σε κορυφή 2V με συχνότητα 9950Hz, για γρήγορη εναλλαγή του σήματος. Στη συνέχεια καθορίστηκε η διάρκεια του κύκλου λειτουργίας κάθε τριγωνικού σήματος στα 0.5sec και η μετατόπιση συνεχούς τάσης στο -1 (δηλαδή η μικρότερη τιμή της τάσης είναι ίση με 1), ενώ η εκκίνηση αυτών των παλμών θα ξεκινάει αμέσως, για αυτό είναι μηδέν (0). Τέλος, δεν απαιτείται να χρησιμοποιηθεί κάποια καθυστέρηση φάσης στο σύστημα.

Για την καλύτερη κατανόηση των ανωτέρω, παρουσιάζεται ακολούθως ένα σχετικό παράδειγμα. Π.χ. εάν $V_{peak}=1$, Συχνότητα=1kHz, ο κύκλος λειτουργίας=0.5, η μετατόπιση DC ρεύματος=0 και με γωνία φάσης=0, τότε η κυματομορφή θα είναι τριγωνική, ξεκινώντας από την κατώτερη τιμή, δηλαδή -1. Τη χρονική στιγμή 0 αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τιμή ίση με 1 (0.25msec), ενώ στη συνέχεια μειώνεται γραμμικά μέχρι την τιμή ίση με -1, η οποία γίνεται για $t = 0.75$ msec. Η κυματομορφή θα επανέλθει στην αρχική τιμή 0 στο τέλος της περιόδου, δηλαδή για $t = T = 1$ msec., σε περίπτωση που η γωνία φάσης είναι 90° η κυματομορφή θα μετατοπιστεί προς τα δεξιά κατά 90° , (0.25msec σε αυτήν την περίπτωση). Δηλαδή, η κυματομορφή θα είναι 0.5 στα 0sec, 0 στα 0.25msec, 1 στα 0.75 msec και στο 0.5 στα 1 msec.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος εισαγωγής των στοιχείων του συστήματος ελέγχου για την δημιουργία του ημιτονοειδούς σήματος (V_{ctrl}). Η γενική εικόνα του συστήματος ελέγχου που δημιουργήσαμε στο PSIM παρουσιάζεται στο σχήμα 35.

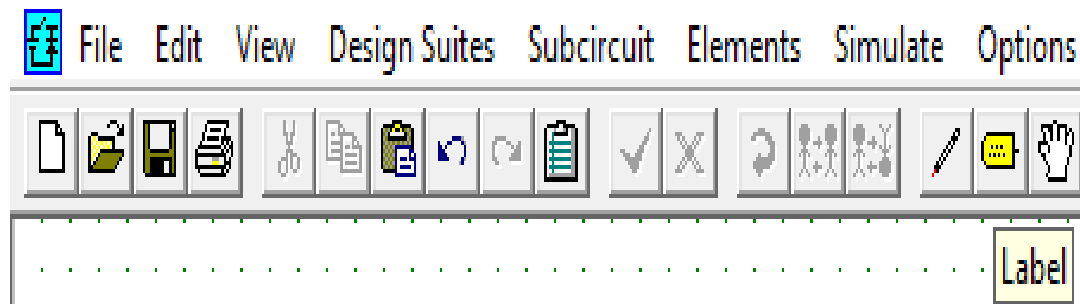


Σχήμα 35: Το σύστημα ελέγχου για την δημιουργία ημιτονοειδούς τάσης.

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- α) Το summer το οποίο λειτουργεί ως αθροιστής ή αφαιρετής.
- β) Έναν Διαιρέτη (Divider).
- γ) Μια DC πηγή τάσης 314.159V.
- δ) Έναν Διαφοροποιητή (Differentiator).
- ε) από τον Λόγο Μετασχηματισμού ab / dq και
- στ) από την γωνία θ (Theta).

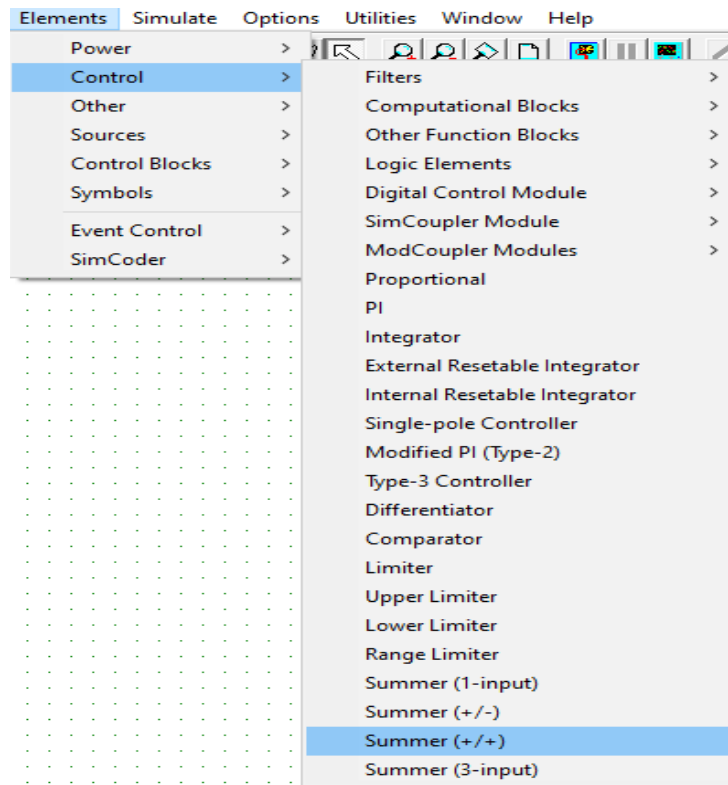
Για να μεταφέρουμε ένα σημείο του κυκλώματος σε ένα διαφορετικό σημείο, χρησιμοποιείται η ταμπέλα (label). Για να ενωθούν δύο κόμβοι του κυκλώματος, χρησιμοποιείται καλώδιο (wire). Παρακάτω απεικονίζεται η διαδικασία απόδοσης ταμπέλας (κίτρινο στοιχείο του σχήματος).



Σχήμα 36: Η μέθοδος εισαγωγής του κειμένου (Label text).

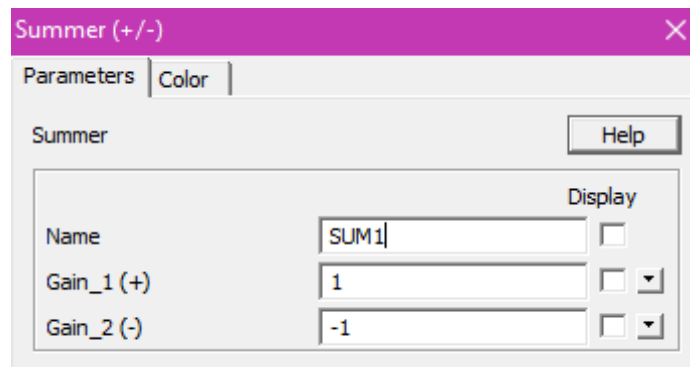
Στο συγκεκριμένο κύκλωμα έχει ονομαστεί το σήμα ελέγχου ως *Vctrl.*, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί σε κάθε συγκριτή χωρίς τη χρήση επιπλέον καλωδίων. Θα συνδεθεί με το συγκριτή, χωρίς τη χρησιμοποίηση γραμμών καλωδίου.

Το επόμενο στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το summer, δηλαδή ο αθροιστής ή αφαιρετής, η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM παρουσιάζεται στο σχήμα 37.



Σχήμα 37: Η μέθοδος εισαγωγής του αθροιστή ή αφαιρέτη.

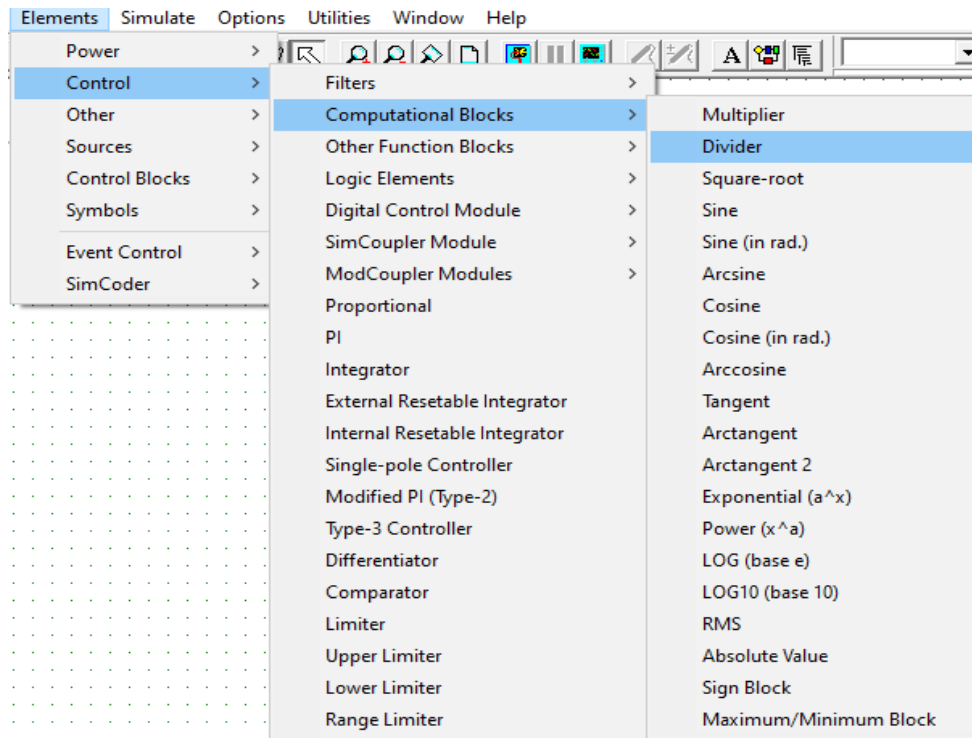
Όπως φαίνεται, η μέθοδος επιλογής του αθροιστή ή αφαιρέτη (Summer), πραγματοποιήθηκε μέσω του Elements > Control > και επιλέγεται το Summer ανάλογα με την λειτουργία που εξυπηρετεί. Στο σχήμα 38, παρουσιάζονται οι παράμετροι αυτού.



Σχήμα 38: Οι παράμετροι του summer.

Ο Summer μπορεί να λειτουργεί ως αθροιστής ή αφαιρέτης ανάλογα με τα πρόσημα που θα τεθούν στο πεδίο Gain. Αν χρησιμοποιηθεί ως αθροιστής, θα μπουν οι παράμετροι (+/+), ενώ ως αφαιρέτης, θα μπει (+/-).

Η εισαγωγή του διαιρέτη (Divider) που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα ελέγχου της ημιτονοειδούς πηγής τάσης φαίνεται στο σχήμα 39.



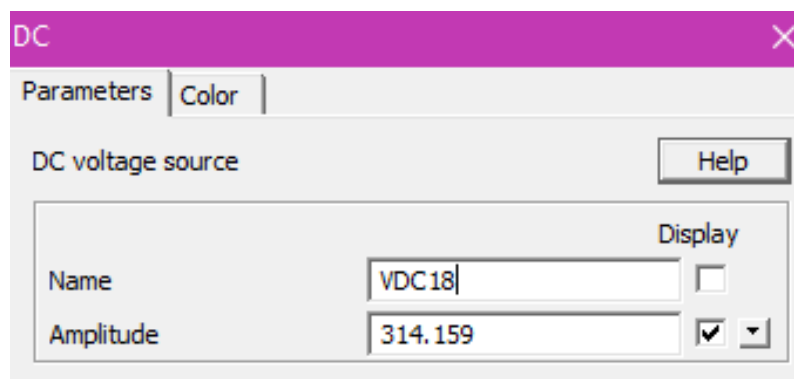
Σχήμα 39: Η μέθοδος εισαγωγής του διαιρέτη.

Η εισαγωγή του διαιρέτη πραγματοποιείται μέσω του Elements > Computational Blocks > Divider, ενώ η λειτουργία του διαιρέτη συνεπάγεται ότι η έξοδος τού είναι ίση με την διαίρεση των δύο σημάτων στις εισόδους του.

Στην συνέχεια χρησιμοποιείται μία DC πηγή τάσης 314.159V, η οποία αντιστοιχεί την κυκλική συχνότητα του συστήματος ελέγχου για τη δημιουργία της ημιτονοειδούς τάσης σήματος. (V_{ctrl}).

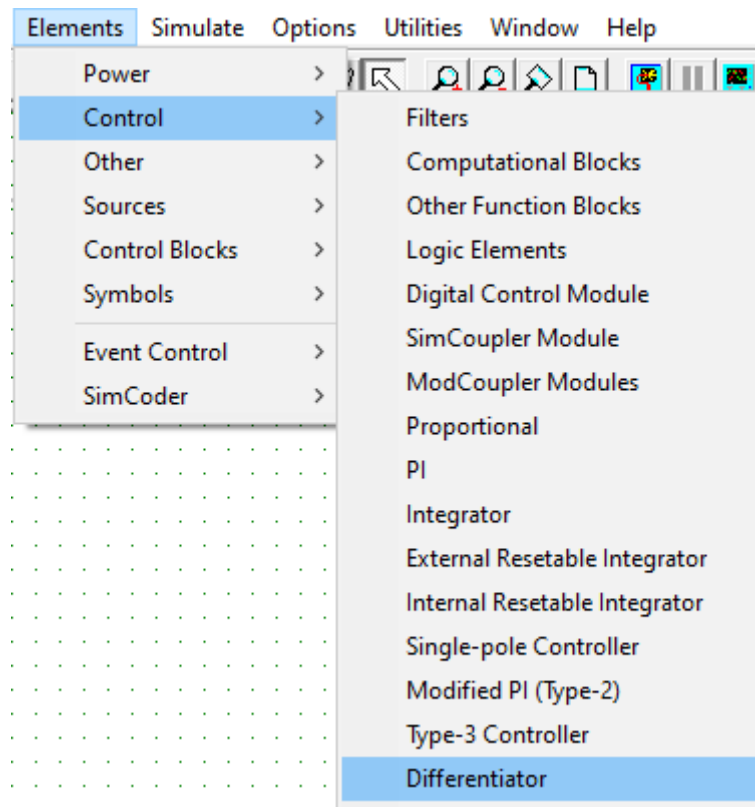
Η κυκλική συχνότητα βρίσκεται από τον τύπο $\omega=2*\pi*f$ αντικαθιστώντας τις τιμές $2*3.14159*50\text{Hz}=314.159 \text{ rad/sec}$.

Οι παράμετροι της πηγής φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 40.



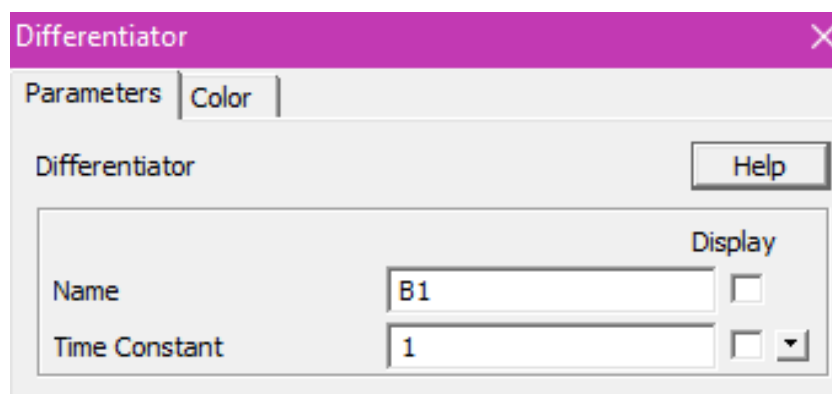
Σχήμα 40: Οι παράμετροι της DC πηγής τάσης του συστήματος ελέγχου (γωνιακή συχνότητα).

Το επόμενο στοιχείο του συστήματος ελέγχου της V_{ctrl} είναι ένας διαφοροποιητής (Differentiator), ενώ η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM ακολουθεί στο σχήμα 41.



Σχήμα 41: Η μέθοδος εισαγωγής του διαφοροποιητή.

Η εισαγωγή του διαφοροποιητή (Differentiator) στο PSIM, έγινε μέσω του Elements > Control > Differentiator, ενώ η παράμετρος αυτού φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 42.



Σχήμα 42: Η παράμετρος του διαφοροποιητή του συστήματος μας.

Η παράμετρος του διαφοροποιητή είναι μια χρονική σταθερά με τιμή 1, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς του διαφοροποιητή είναι η ακόλουθη :

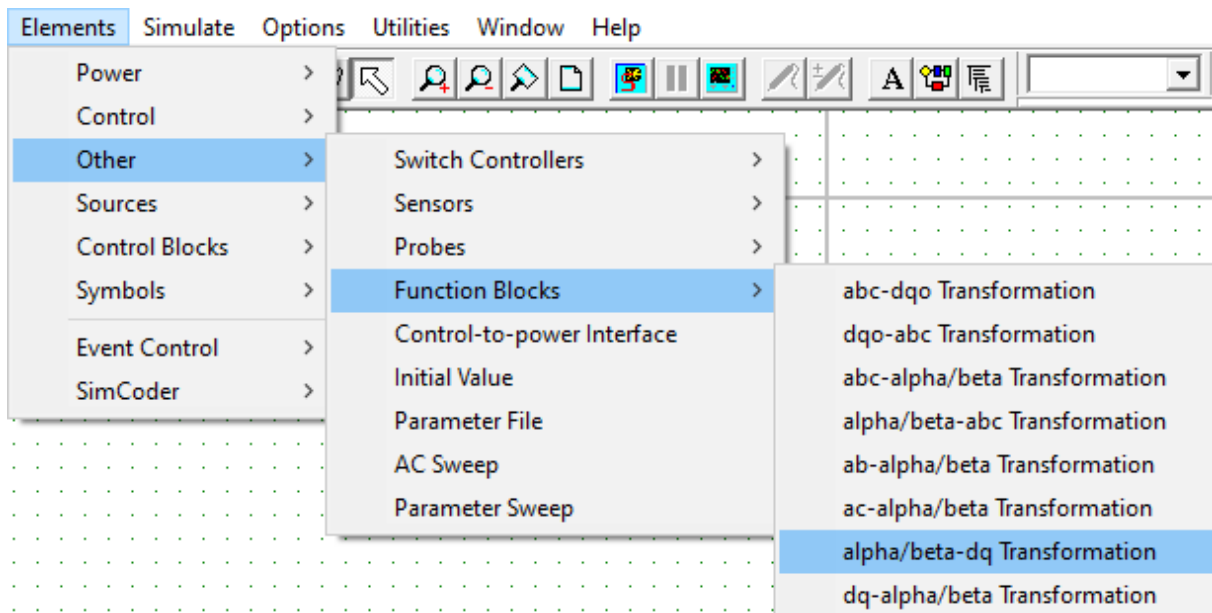
$$G(s) = sT$$

Πιο συγκεκριμένα ο διαφοροποιητής υπολογίζεται από τον εξής τύπο :

$$V_o(t) = T * (V_{in}(t) - V_{in}(t - t_{step})) / t_{step}$$

Όπου t_{step} είναι το χρονικό βήμα προσομοίωσης, ενώ $V_{in}(t)$ και $V_{in}(t - t_{step})$ είναι οι τιμές εισόδου στο παρόν και στο προηγούμενο χρονικό βήμα.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα ελέγχου, ο μετασχηματισμός ab/dq όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, ενώ η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM παρουσιάζεται στο σχήμα 43.



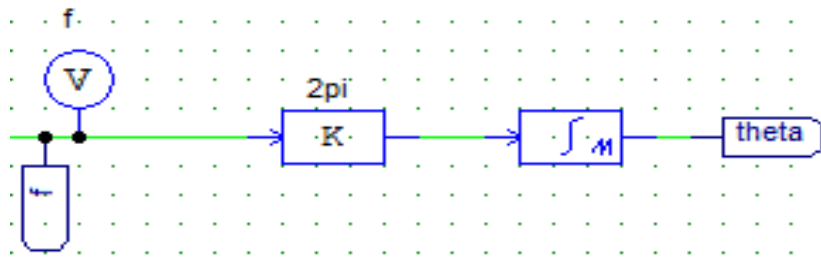
Σχήμα 43: Η μέθοδος εισόδου του μετασχηματισμού ab / dq.

Η μέθοδος εισαγωγής του μετασχηματισμού ab/dq γίνεται μέσω του Elements > Other > Fuction Blocks > alpha/beta – dq Transformation. Οι εξισώσεις του μετασχηματισμού αυτού είναι οι ακόλουθες :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix}$$

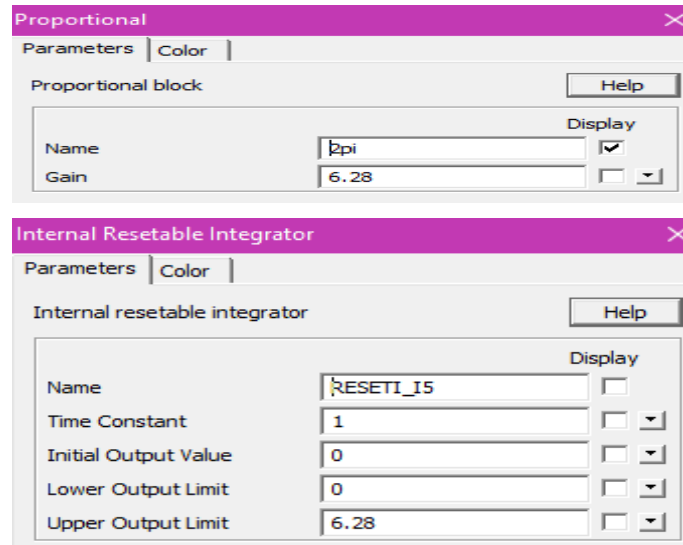
Η γωνία θ (theta) καθορίζεται εξωτερικά μέσω του κόμβου εισόδου στο κάτω μέρος του μετασχηματισμού και μετράτε σε rad.

Η μέθοδος δημιουργίας της γωνίας θ (Theta) φαίνεται στο σχήμα 44.



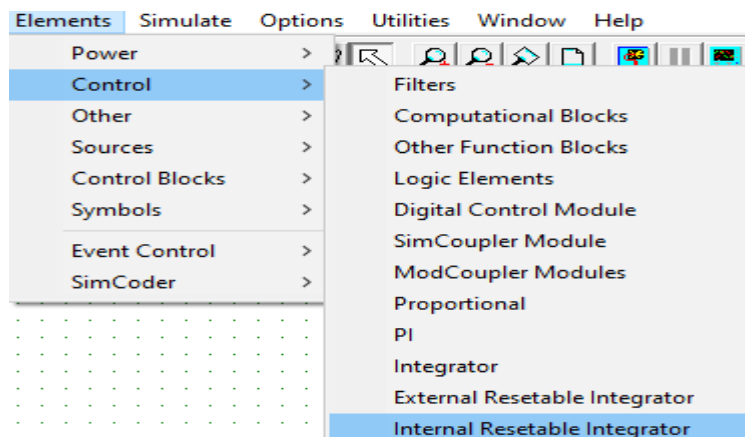
Σχήμα 44: Η δημιουργία της γωνίας Theta ή της γωνιακής συχνότητας του συστήματος μας.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι τιμές των παραμέτρων της γωνίας Theta.



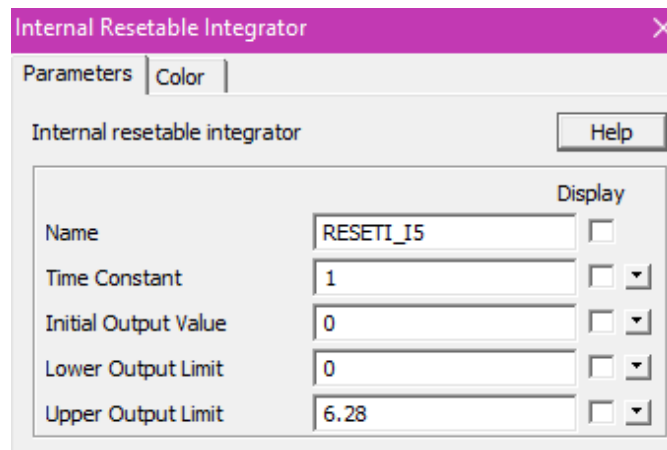
Σχήμα 45: Οι παράμετροι της δημιουργίας της γωνίας Theta. α) $2 * \pi = 2 * 3.14159 = 6.28$ και β) εσωτερικός επαναρυθμιζόμενος ολοκληρωτής.

Η μέθοδος εισαγωγής του εσωτερικού επαναρυθμιζομένου ολοκληρωτή στο PSIM, παρουσιάζεται στο σχήμα 46.



Σχήμα 46: Η μέθοδος εισαγωγής του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή.

Η μέθοδος της εισαγωγής στο PSIM γίνεται μέσω του Elements > Control > Internal Resettable Integrator, ενώ η παράμετρος του ορίζεται στο σχήμα 47.

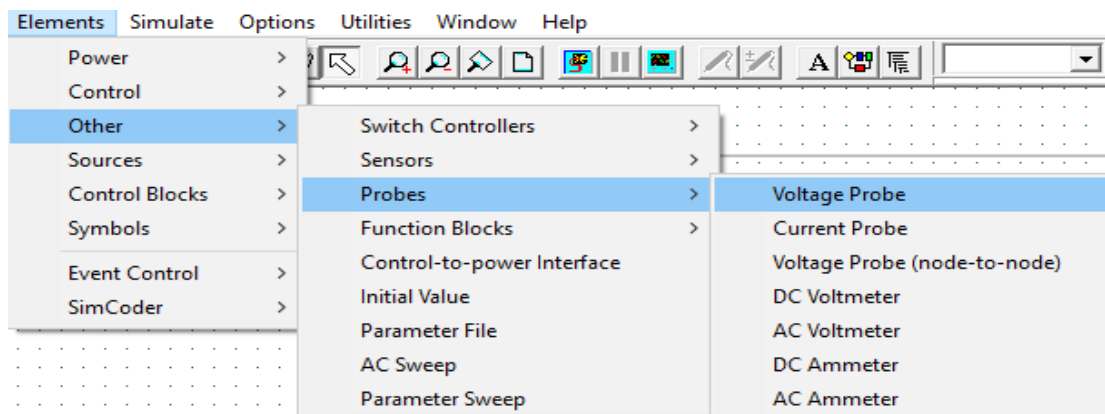


Σχήμα 47: Η παράμετρος του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή.

Η παράμετρος ορίστηκε ώστε το ανώτερο όριο της εξόδου να είναι 6.28rad, δηλαδή 2π rad. Επομένως, το αποτέλεσμα για την δημιουργία της γωνίας Theta χρησιμοποιήθηκε ο τύπος $2\pi \cdot f$ που ισούται με $2 \cdot 50\text{Hz}$. Σύμφωνα με τη λειτουργία του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή, η έξοδος του επαναφέρεται στο μηδέν όταν υπερβαίνει ένα ανώτερο όριο. Το ανώτατο όριο ορίστηκε ως 2π , αντιστοιχίζοντας μία πλήρη περίοδο του σήματος. Η συνάρτηση μεταφοράς του ολοκληρωτή είναι:

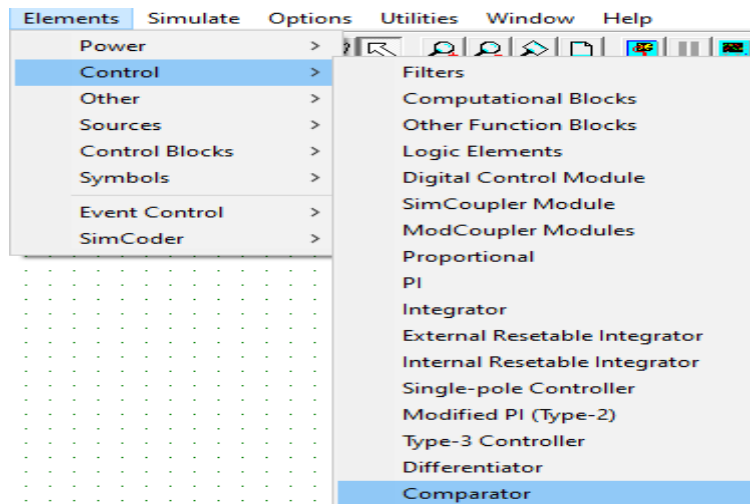
$$G(s) = 1 / (sT)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέθοδος εισαγωγής των βολτομέτρων στο PSIM, στο σχήμα 48.



Σχήμα 48: Η μέθοδος εισαγωγής των βολτομέτρων στο σύστημα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής των βολτομέτρων στο σύστημα μας, γίνεται μέσω του Elements > Other > Probes > Voltage Probe, ενώ στην παράμετρο αυτών βάζουμε το όνομα της μέτρησης τάσης που αντιπροσωπεύει, επομένως είναι σημαντική για την προσομοίωση του συστήματος μας. Η μέθοδος εισαγωγής των συγκριτών στο PSIM φαίνεται από το σχήμα 49.

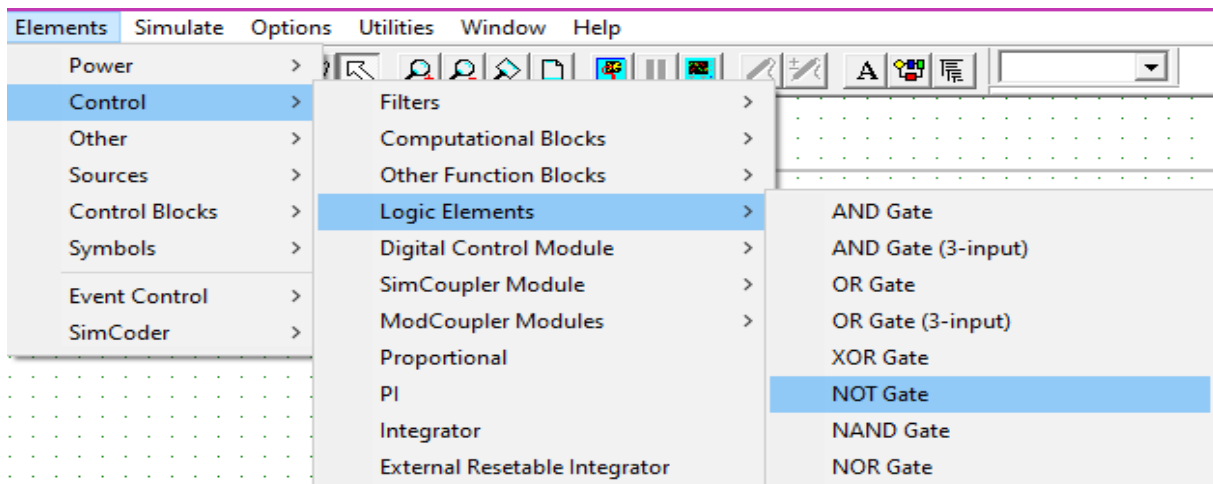


Σχήμα 49: Η μέθοδος εισαγωγής των συγκριτών στο σύστημα μας.

Η εισαγωγή των συγκριτών στο PSIM έγινε μέσω του Elements > Control > Comparator.

Η λειτουργία του συγκριτή είναι η εξής: όταν η θετική είσοδος είναι μεγαλύτερη από την αντιστρέψιμη είσοδο, τότε το αποτέλεσμα είναι (1), ενώ όταν η αντιστρέψιμη είσοδος είναι μεγαλύτερη από την θετική είσοδο, τότε η έξοδος είναι (0). Εάν οι δύο είσοδοι είναι ίδιες η έξοδος είναι απροσδιόριστη και θα διατηρηθεί η προηγούμενη τιμή.

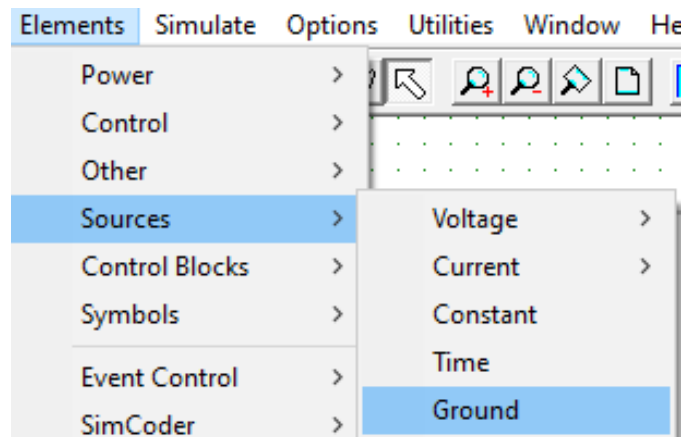
Η μέθοδος εισαγωγής των NOT πυλών στο PSIM φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 50.



Σχήμα 50: Η μέθοδος εισαγωγής της πύλης NOT στο σύστημα μας.

Η εισαγωγή της πύλης NOT, γίνεται μέσω του Elements > Control > Logic Elements > NOT GATE, ενώ η λειτουργίας της είναι η αντιστροφή των σημάτων στην έξοδο της.

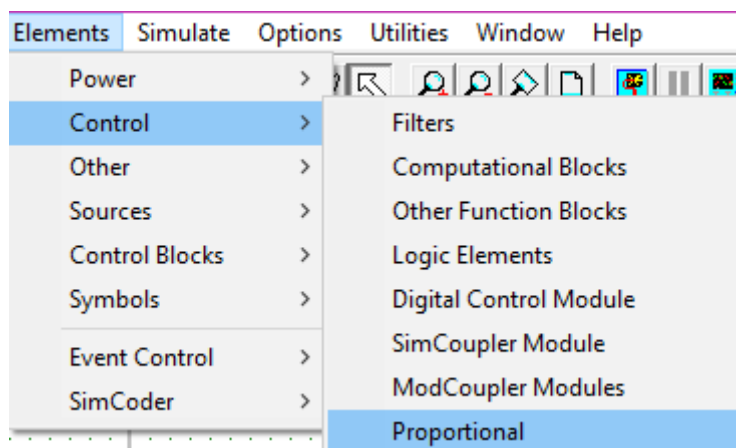
Η μέθοδος εισαγωγής της γείωσης στο PSIM φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 51.



Σχήμα 51: Η μέθοδος εισαγωγής της γείωσης στο σύστημα μας.

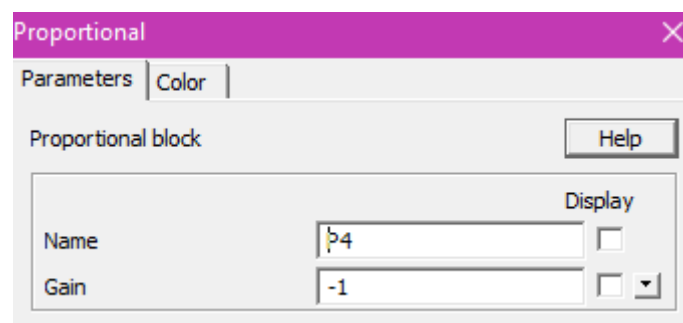
Η εισαγωγή της γείωσης στο PSIM έγινε μέσω του Elements > Sources > Ground.

Η εισαγωγή της σταθεράς K στο PSIM φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 52: Η μέθοδος εισαγωγής της σταθεράς K στο σύστημα μας.

Η σταθερά K εισάγεται μέσω του Elements > Control > Proportional Block, ενώ η παράμετρος της φαίνεται στο σχήμα 53.

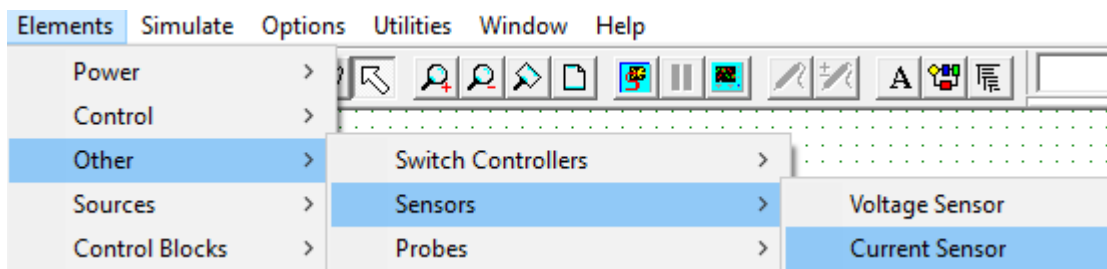


Σχήμα 53: Η παράμετρος της σταθεράς K του συστήματος μας.

Η σταθερά K ορίστηκε ως -1 , ώστε το σήμα που εισέρχεται στο συγκριτή να γίνεται αρνητικό. Το σύστημα ελέγχου που αναφέρθηκε είναι ένα μαθηματικό μοντέλο για τον λόγο $Dcouple$, ο οποίος θα αποσιζεύξει την ενεργό και την άεργο ισχύ που προκύπτει λόγω του φίλτρου εξόδου.

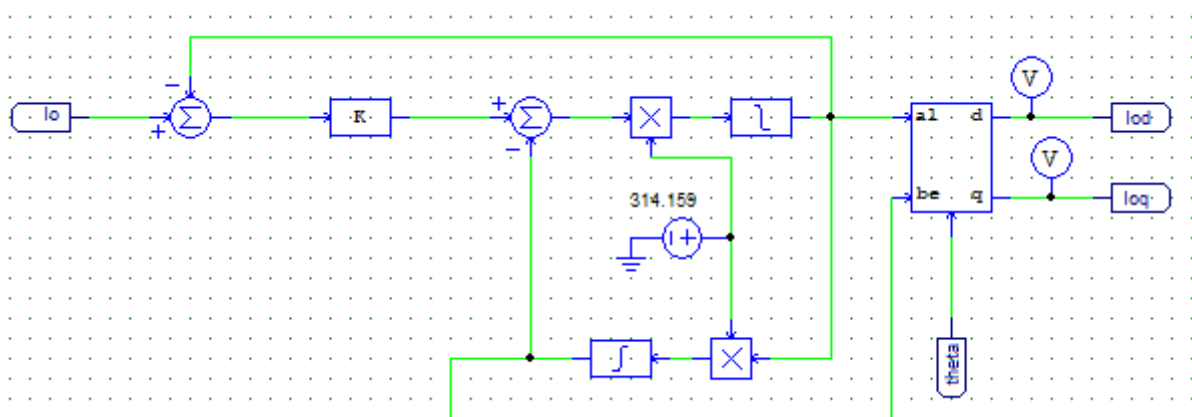
5.1.4. Ο αισθητήρας του ημιτονοειδές μέσου ρεύματος (I_o)

Η εισαγωγή του αισθητήρα στο PSIM γίνεται μέσω της ακόλουθης διαδικασίας του σχήματος 54.



Σχήμα 54: Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα του ημιτονοειδές μέσου ρεύματος στο κύκλωμα μας.

Η εισαγωγή του γίνεται μέσω του Elements > Other > Sensors > Current Sensor. Ιδιαίτερα σημαντικό. Στη γενική εικόνα του σχήματος 27 του κυκλώματος, ο αισθητήρας του ημιτονοειδές μέσου ρεύματος είναι στην έξοδο του αντιστροφέα, ενώ στο σχήμα 55 απεικονίζεται το σύστημα ελέγχου που δημιουργήθηκε για την λειτουργία αυτού του αισθητήρα.



Σχήμα 55: Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα ημιτονοειδές μέσου ρεύματος (I_o).

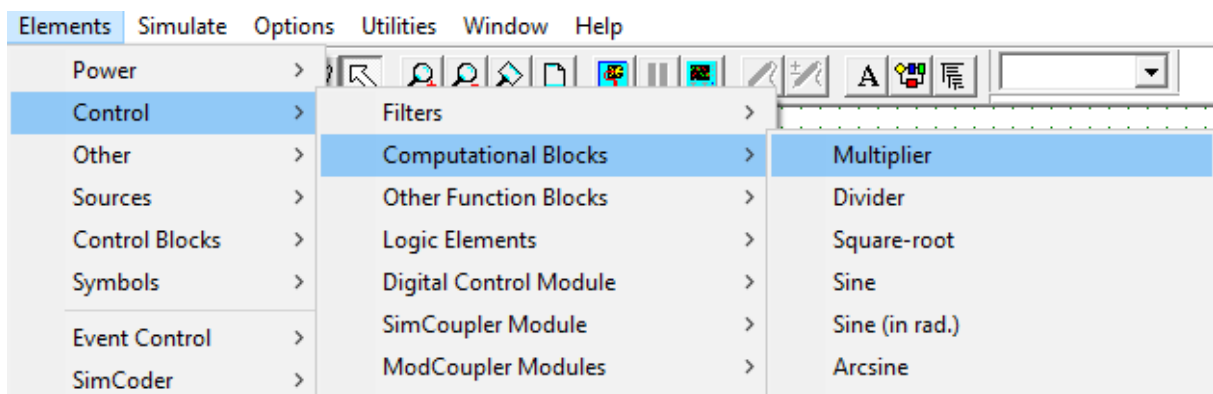
Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τα εξής στοιχεία :

- α) Την εισαγωγή κειμένου για την σύνδεση του I_o στο κύκλωμα.
- β) Τα summer δηλ. αθροιστές ή αφαιρετές.

- γ) Την σταθερά K που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα 5.1.3.
- δ) Την DC πηγή τάσης που στην ουσία είναι η κυκλική συχνότητα $2 * \pi * f = 2 * 3.14159 * 50Hz = 314.159$.
- ε) Τα βολτόμετρα του συστήματος ελέγχου για την ένδειξη της προσομοίωσης
- στ) Τον μετασχηματισμό ab/dq .
- ζ) Την γωνία Θ ή αλλιώς γωνιακή ταχύτητα.
- η) Οι πολλαπλασιαστές (Multiplier) και
- θ) Οι ολοκληρωτές (integral block).

Στο σύστημα ελέγχου του ρεύματος, χρησιμοποιούμε πολλά στοιχεία του PSIM που έχουν ήδη παρουσιαστεί, επομένως δεν θα γίνει εκτενής αναφορά.

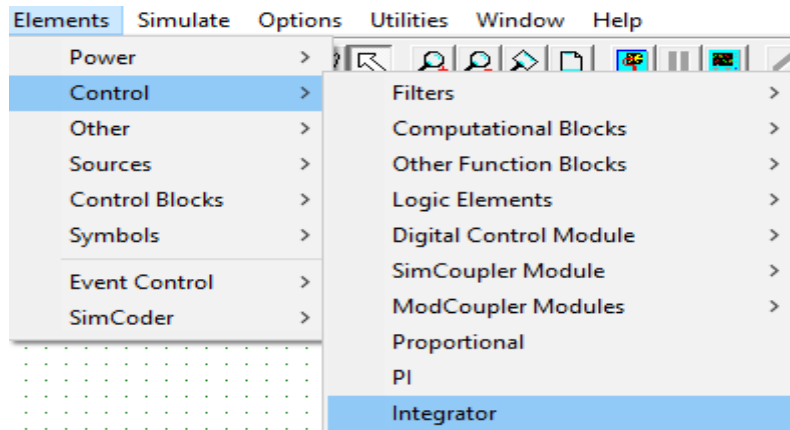
Ο ρόλος των πολλαπλασιαστών (Multiplier) είναι να πολλαπλασιάζει δυο τιμές και στην έξοδο να παράγεται το γινόμενο τους. Ακολούθως, φαίνεται η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM.



Σχήμα 56: Η μέθοδος εισαγωγής του πολλαπλασιαστή στο σύστημα μας.

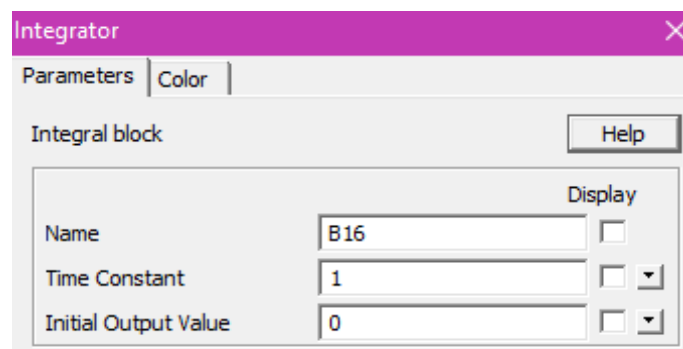
Η μέθοδος εισαγωγής αυτού, πραγματοποιείται μέσω του Elements > Control > Computational Blocks > Multiplier.

Ο ολοκληρωτής (integral block) ολοκληρώνει ένα αποτέλεσμα στην έξοδο του, ενώ παρακάτω στο σχήμα 57, φαίνεται η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM.



Σχήμα 57: Η μέθοδος εισαγωγής του ολοκληρωτή στο σύστημα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής TOY στο κύκλωμα γίνεται μέσω του Elements > Control > Integrator, ενώ στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι παράμετροι μπορεί κανείς να παρατηρήσει τους παραμέτρους του ολοκληρωτή, όπως επίσης και η συνάρτηση μεταφοράς του.



Σχήμα 58: Οι παράμετροι του ολοκληρωτή.

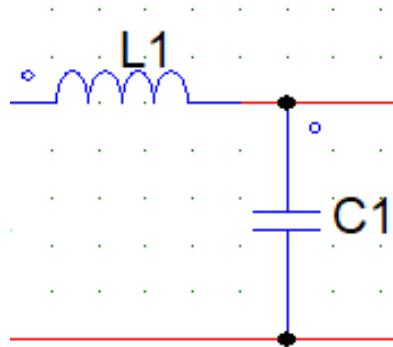
Οι παράμετροι του ολοκληρωτή είναι η χρονική σταθερά, η οποία είναι 1sec και η αρχική τιμή εξόδου που βρίσκεται στο 0, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς του είναι ίδια με την συνάρτηση μεταφοράς του εσωτερικού επαναρυθμιζόμενου ολοκληρωτή, η οποία είναι η εξής:

$$G(s) = 1 / (sT)$$

Εφόσον εξετάστηκε αναλυτικά το κάθε στοιχείο του κυκλώματος ελέγχου, ακολούθως περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας. Το ημιτονοειδές ρεύμα εξόδου μετριέται μέσω των αισθητήρων και ανάγεται σε δυο κάθετα διανύσματα (ένα στον άξονα d και ένα στον άξονα q), σύμφωνα με το μετασχηματισμό Park.

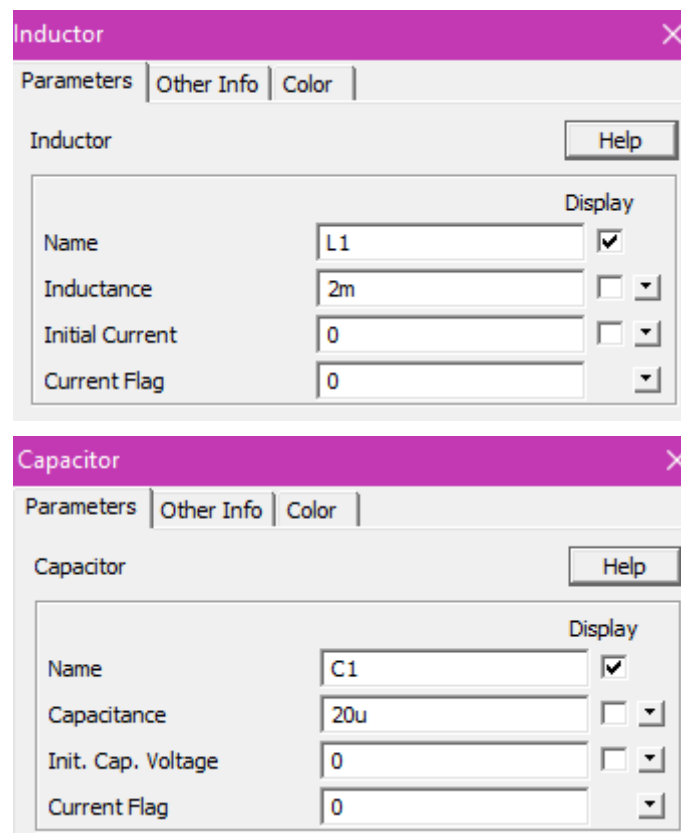
5.1.5. Το φίλτρο εξόδου LC

Το φίλτρο LC είναι ένα φίλτρο 2ής τάξης (χαμηλής διέλευσης συχνοτήτων), το οποίο χρησιμοποιείται στο κύκλωμα όπως απεικονίζεται στο σχήμα 29 μετά την έξοδο του αντιστροφέα για την αποκοπή των υψηλών συχνοτήτων. Το αποτέλεσμα είναι ένα καθαρό DC σήμα στην έξοδο του. Στο σχήμα 59 παρουσιάζεται το συγκεκριμένο φίλτρο που δημιουργήθηκε μέσω του PSIM.



Σχήμα 59: Το φίλτρο LC του κυκλώματος μας.

Οι τιμές του πηνίου και του πυκνωτή που ορίστηκαν στο φίλτρο LC φαίνονται στο σχήμα 60.

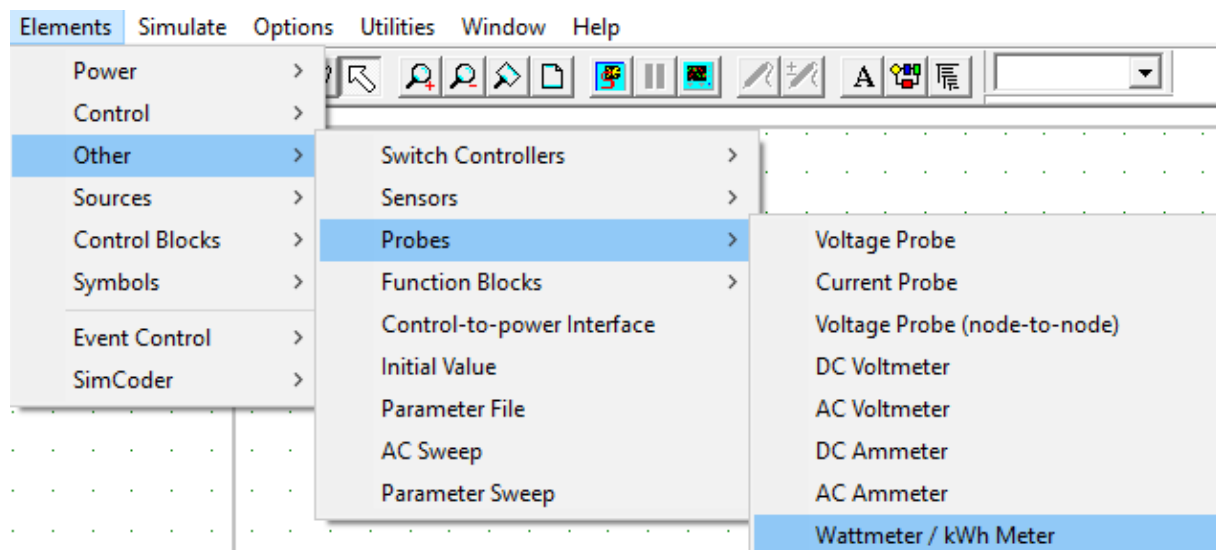


Σχήμα 60: Οι Παράμετροι των τιμών α)πηνίου και β)πυκνωτή του κυκλώματος μας.

Όπως φαίνεται, η τιμή του πηνίου είναι στα 2mH, ενώ η τιμή του πυκνωτή στα 20μF. Παράλληλα με το φίλτρο LC συνδέθηκε ένα βολτόμετρο για την ένδειξη της πλέον φιλτραρισμένης τάσης του (*Vfilter*).

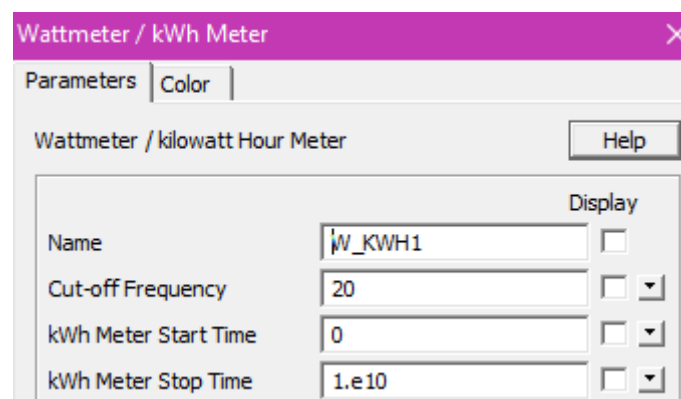
5.1.6. Το βατόμετρο

Στο κύκλωμα μας προσθέσαμε ένα βατόμετρο για τη μέτρηση της ενεργής ισχύος, ενώ η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM φαίνεται στο σχήμα 61.



Σχήμα 61: Η μέθοδος εισαγωγής του βατόμετρου στο κύκλωμα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής του βατόμετρου στο κύκλωμα, έγινε μέσω του Elements > Other > Probes > Wattmeter / kWh Meter, ενώ στην συνέχεια στο σχήμα 62 φαίνεται η παράμετρος που ορίστηκε σε αυτό.

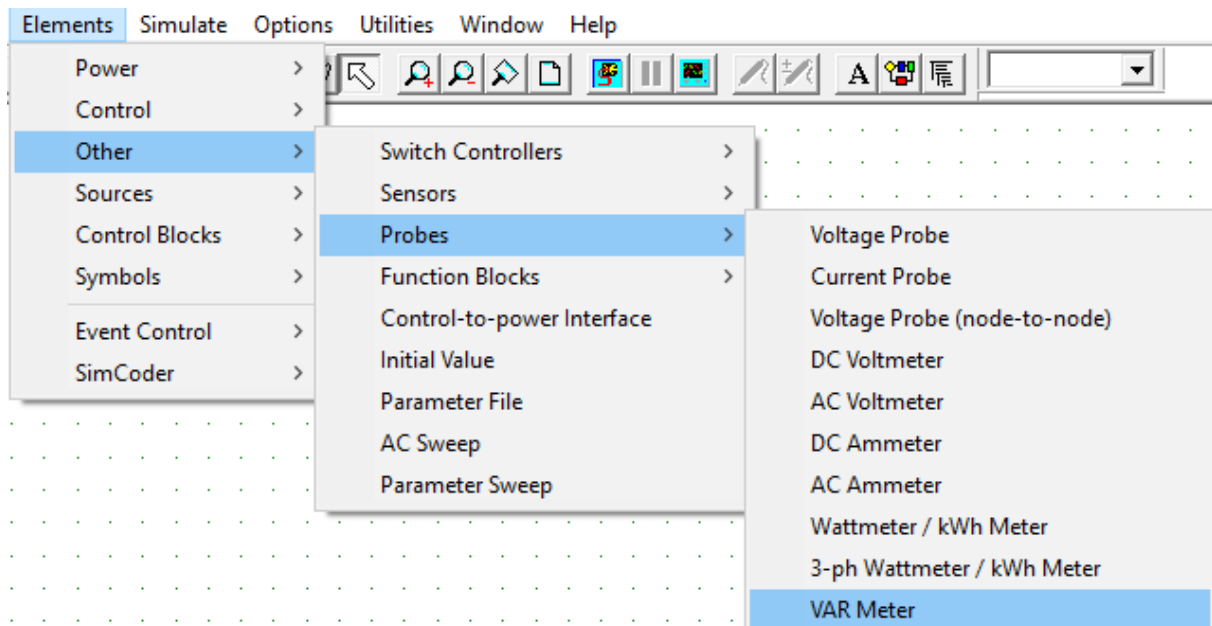


Σχήμα 62: Η παράμετρος του βατομέτρου του κυκλώματος μας.

Η παράμετρος που ορίσαμε στο βατόμετρο είναι η συχνότητα αποκοπής (Cut-off Frequency) δηλ. να αποκόπτει τις συχνότητες πάνω των 20Hz.

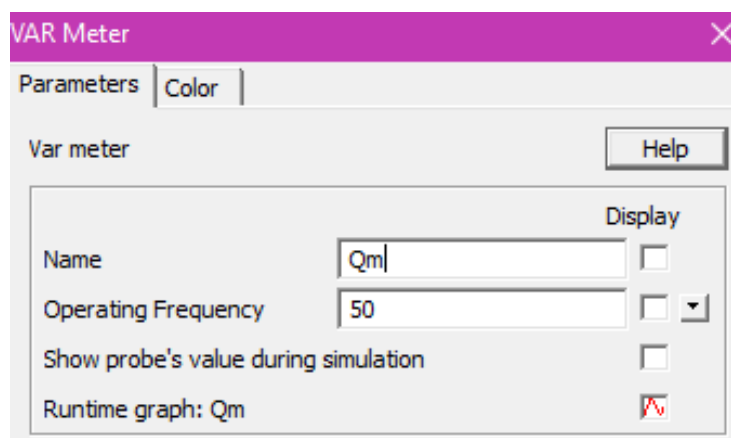
5.1.7. Το βαρόμετρο

Στο κύκλωμα προστίθεται επίσης ένα βαρόμετρο για την μετρούμενη ένδειξη της άεργου ισχύος, ενώ η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM φαίνεται στο σχήμα 63.



Σχήμα 63: Η μέθοδος εισαγωγής του βαρόμετρου στο κύκλωμα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής του βαρόμετρου στο κύκλωμα έγινε μέσω του Elements > Other > Probes > Var Meter, ενώ η παράμετρος του φαίνεται στο σχήμα 64.

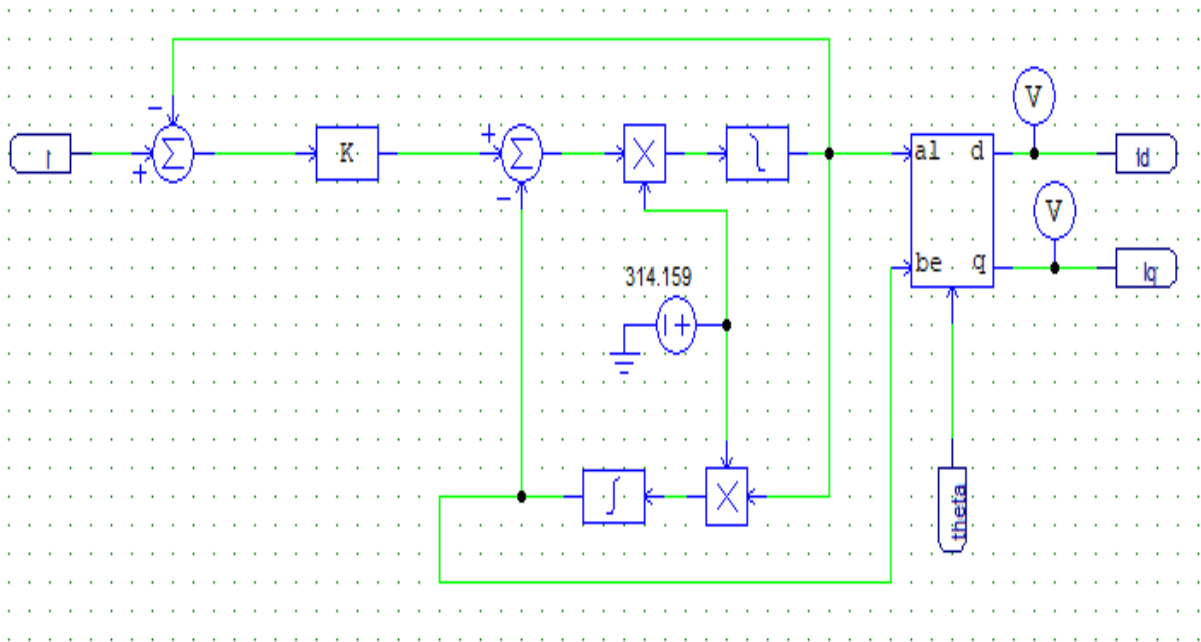


Σχήμα 64: Η παράμετρος του βαρόμετρου του κυκλώματος μας.

Η παράμετρος του βαρόμετρου είναι η συχνότητα λειτουργίας, (Operating Frequency) η οποία ορίστηκε να λειτουργεί στα 50Hz για το κύκλωμα.

5.1.8. Ο αισθητήρας του ημιτονοειδές ρεύματος εξόδου (I)

Η λειτουργία του επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος ελέγχου που δημιουργήθηκε και παρουσιάζεται στο σχήμα 65.

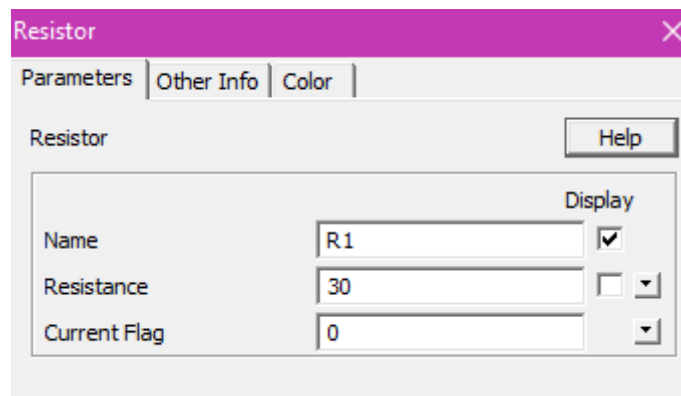
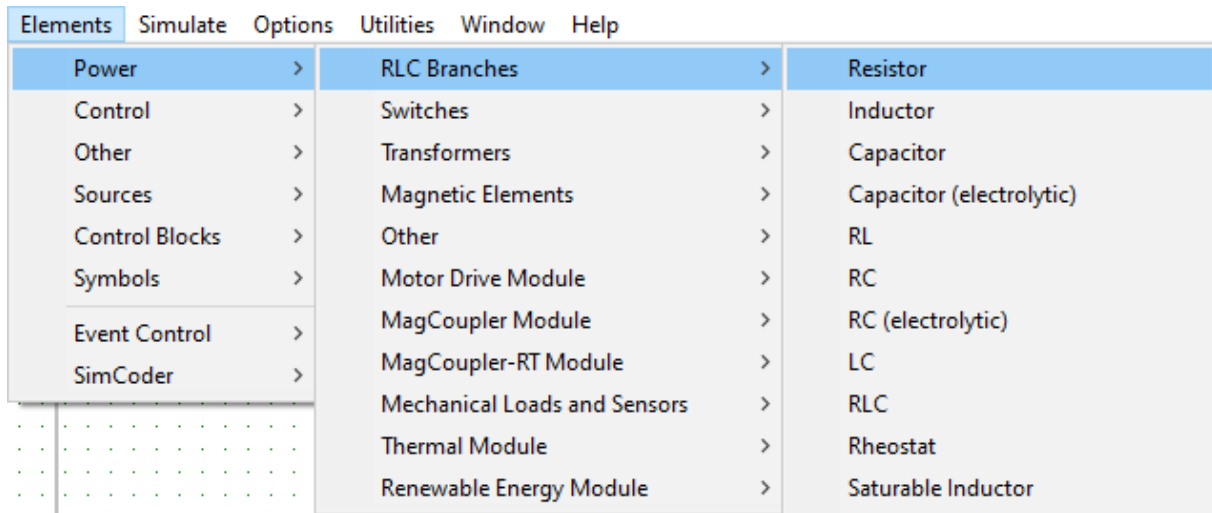


Σχήμα 65: Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα του ημιτονοειδές ρεύματος εξόδου (I).

Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα του ρεύματος εξόδου είναι ίδιο με το σύστημα ελέγχου του ημιτονοειδούς εύματος (I_o) που αναλύθηκε στην ενότητα 5.1.4. Η διαφορά μεταξύ των δύο είναι στα μεγέθη των DC τιμών μετά τον μετασχηματισμό ab/dq, δηλαδή το I_d και το I_q , όπου I_d αντιστοιχεί στη συνιστώσα του ρεύματος της ενεργής ισχύος, ενώ I_q είναι η συνιστώσα του ρεύματος της άεργης ισχύος.

5.1.9. Το ωμικό φορτίο

Το φορτίο αποτελείται αρχικά από μια ωμική αντίσταση $R=30\Omega$, (1ο σενάριο). Η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα είναι 5kW, ενώ η μέθοδος εισαγωγής της αντίστασης και της παραμέτρου στο PSIM φαίνεται στο σχήμα 66.

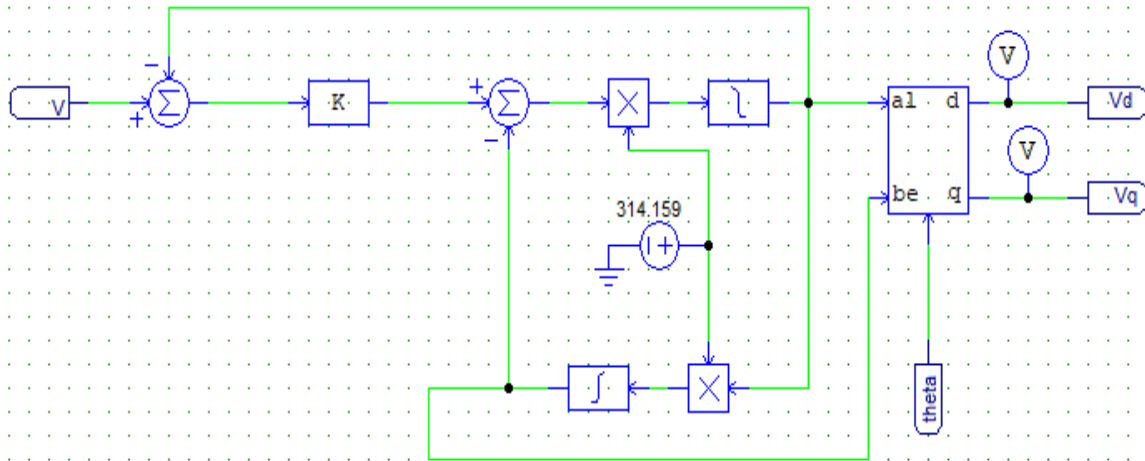


Σχήμα 66: α) Η μέθοδος εισαγωγής της αντίστασης στο κύκλωμα μας και β) η παράμετρος της αντίστασης.

Η μέθοδος εισαγωγής της αντίστασης έγινε μέσω του Elements > Power > RLC Branches > Resistor, ενώ η παράμετρος της αντίστασης ορίστηκε στα 30Ω για το 1ο σενάριο.

5.1.10. Ο αισθητήρας τάσης εξόδου (V)

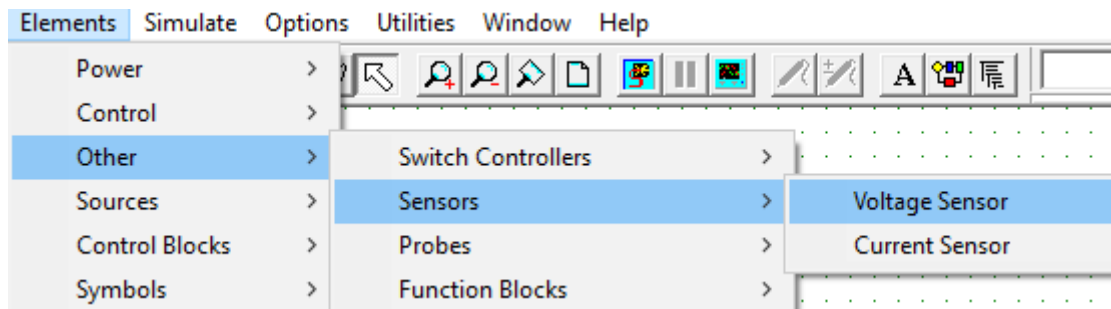
Ο αισθητήρας τάσης εξόδου μετράει την τάση στην έξοδο του φορτίου και, η λειτουργία του πραγματοποιείται μέσω του συστήματος ελέγχου που παρουσιάζεται στο σχήμα 67.



Σχήμα 67: Το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα τάσης εξόδου (V_o).

Το σύστημα ελέγχου είναι κοινό με εκείνο του ημιτονοειδούς ρεύματος (I_o) και του ημιτονοειδούς ρεύματος εξόδου (I), που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.1.4 και 5.1.8 αντίστοιχα. Η διαφορά μεταξύ αυτών είναι στα μεγέθη τα οποία σε αυτή την περίπτωση είναι το V_d και το V_q , όπου V_d είναι η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου και V_q ελέγχεται ώστε να είναι ίση με μηδέν (0).

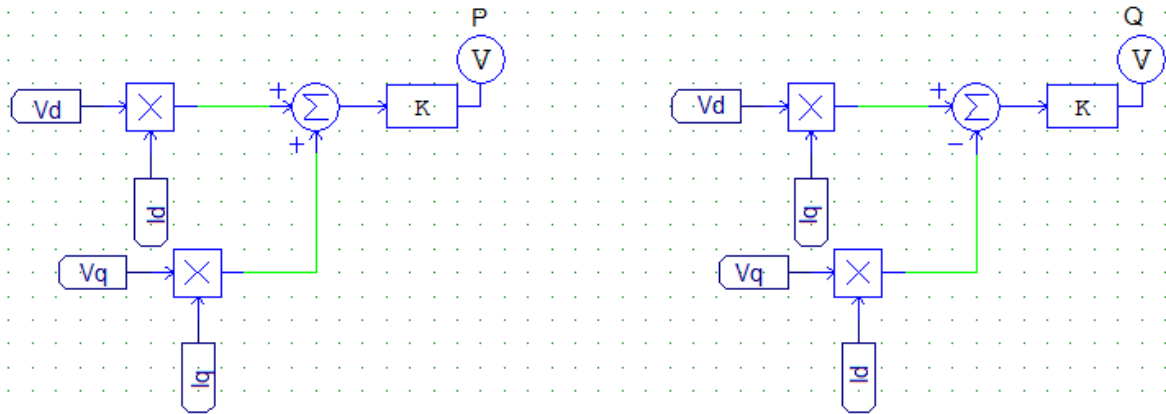
Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα τάσης στο PSIM παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 68: Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα τάσης στο κύκλωμα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής του αισθητήρα τάσης εξόδου στο κύκλωμα, έγινε μέσω του Elements > Other > Sensors > Voltage Sensor.

Παρακάτω περιγράφεται το σύστημα ελέγχου που δημιουργήθηκε για τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος. Η γενική εικόνα της δημιουργίας αυτών των συστημάτων στο PSIM φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 69.



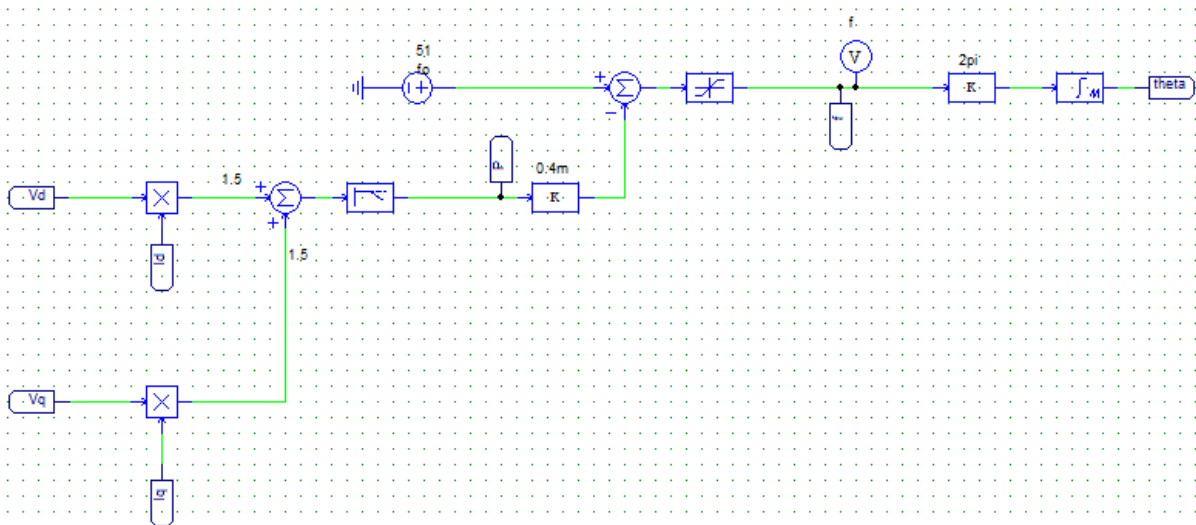
Σχήμα 69: Η Γενική εικόνα των συστημάτων ενεργής και άεργης ισχύος του συστήματος μας.

Η ενεργός και άεργος ισχύς υπολογίζεται από τις αντίστοιχες ποσότητες του ρεύματος και της τάσης στο dq πλαίσιο ελέγχου με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$i) P = Vd * Id + Vq * Iq$$

$$ii) Q = Vd * Iq - Vq * Id$$

Για την υλοποίηση των στατικών χαρακτηριστικών, υλοποιήθηκε το παρακάτω κύκλωμα. Οι ονομαστικές κλίσεις των στατικών χαρακτηριστικών ενεργής ισχύος - συχνότητας (P-f) και άεργης ισχύος - τάσης (Q-V) υπολογίστηκαν για την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα, δηλαδή 5Kw. Η μοντελοποίηση παρουσιάζεται στο σχήμα 70.

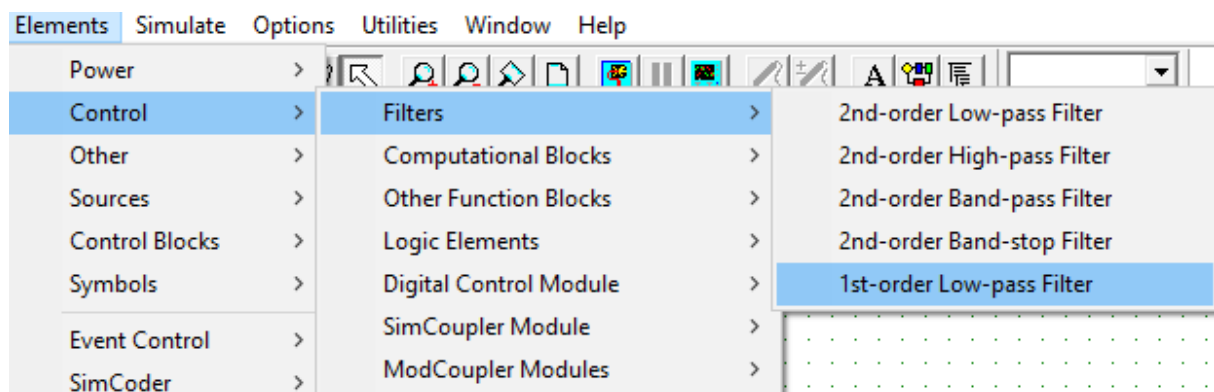


Σχήμα 70: Η γενική εικόνα του συστήματος ελέγχου της στατική χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος – συχνότητας (P-f).

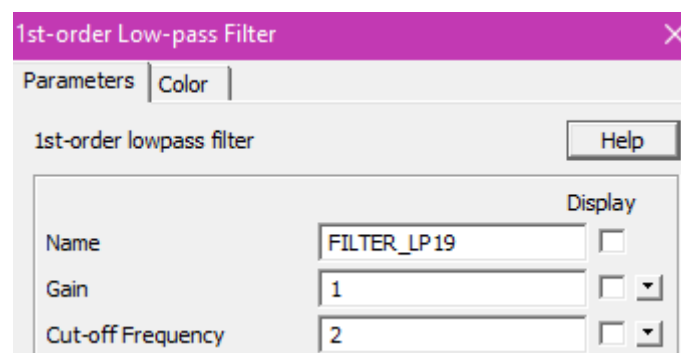
Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- α) Τους Πολλαπλασιαστές
- β) Τα Summer (αθροιστές και αφαιρέτες)
- γ) Ένα πρώτης τάξης χαμηλοπερατό φίλτρο
- δ) Οι Σταθερές K
- ε) Μια Πηγή DC συνεχούς τάσης.
- στ) Ένα Περιοριστή (Limiter)
- ζ) Ένα Βολτόμετρο για την μετρούμενη ένδειξη της συχνότητας
- η) Ένα εσωτερικό επαναρυθμιζόμενο ολοκληρωτή (internal resettable integrator) και
- θ) Την γωνία θ (Theta)

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, πολλά στοιχεία έχουν ήδη αναλυθεί για την δημιουργία του συστήματος ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος – συχνότητας. Το πρώτης τάξης χαμηλοπερατό φίλτρο αποκόπτει τις αρμονικές μεγαλύτερης τάξης, ενώ η μέθοδος εισαγωγής του συγκεκριμένου φίλτρου στο PSIM φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 71: Η μέθοδος εισαγωγής της 1ης τάξης φίλτρου χαμηλής διέλευσης στο σύστημα μας.



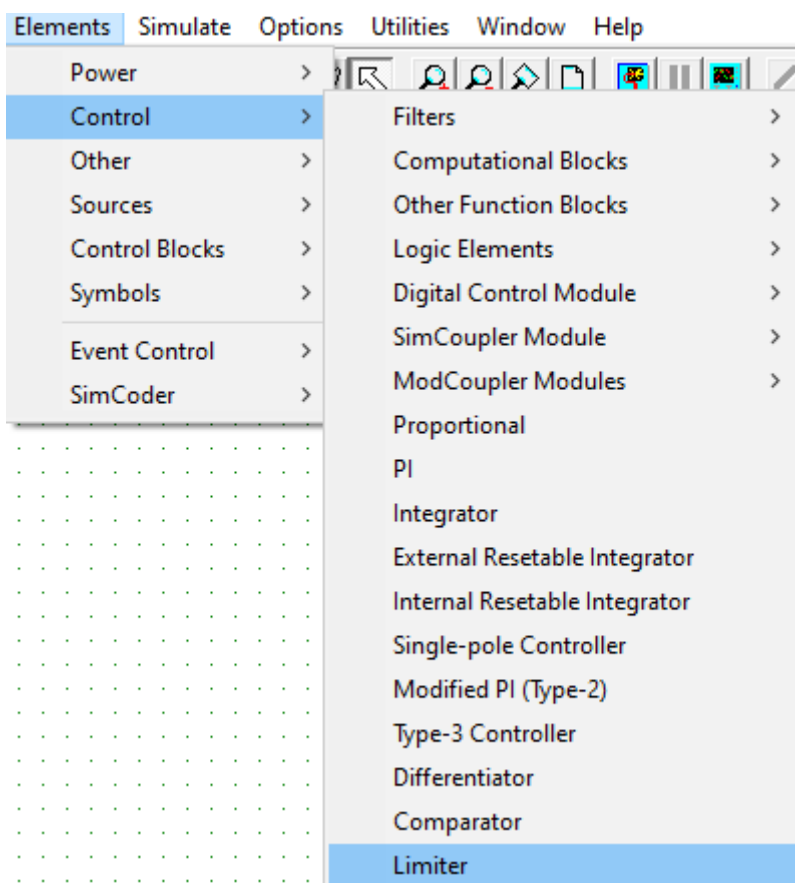
Σχήμα 72: Οι παράμετροι της 1ης τάξης φίλτρου χαμηλής διέλευσης.

Οι παράμετροι του χαμηλοπερατού φίλτρου είναι οι εξής δύο: το κέρδος (gain) το οποίο είναι μία σταθερά που ορίστηκε ίση με 1, και η συχνότητα αποκοπής (cut – off Frequency), η οποία ορίστηκε ίση με την τιμή 2, για να απομονώνεται η DC συνιστώσα. Ο τύπος της συχνότητας αποκοπής είναι ο ακόλουθος:

$$f_c = \omega_c / (2\pi)$$

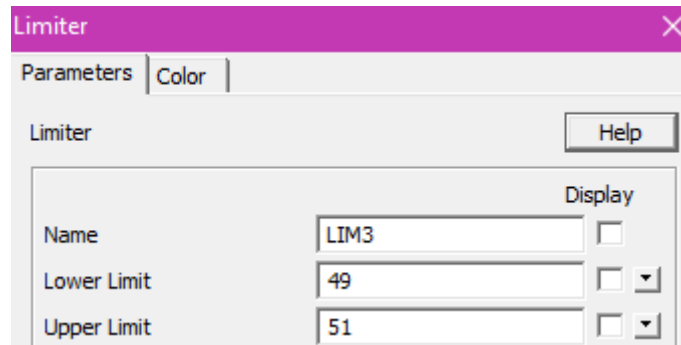
Όπου το f_c είναι η συχνότητα αποκοπής, το ω_c είναι η κυκλική συχνότητα αποκοπής, ενώ το 2π είναι ο πλήρης κύκλος δηλ. 360° .

Ο περιοριστής στο σύστημα ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής έχει κάποια όρια λειτουργίας και τοποθετείται για να εξασφαλίσει τη λειτουργία εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Η μέθοδος εισαγωγής του στο PSIM παρουσιάζεται στο σχήμα 73.



Σχήμα 73: Η μέθοδος εισαγωγής του περιοριστή στο σύστημα μας.

Η μέθοδος εισαγωγής του περιοριστή στο σύστημα, έγινε μέσω του Elements > Control > Limiter, ενώ οι παράμετροι παρουσιάζονται στο σχήμα 74.



Σχήμα 74: Οι παράμετροι του περιοριστή.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι του περιοριστή είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο, οπότε στο κύκλωμα ορίζεται ως κατώτερο όριο συχνότητας 49Hz, και ανώτερο όριο συχνότητας 51Hz. Στην περίπτωση που η είσοδος είναι εντός των τιμών των ορίων, τότε η έξοδος είναι ίση με την είσοδο.

Πιο αναλυτικά, το σύστημα ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής της ενεργής ισχύος – συχνότητας (P-f) προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$f = f_o - m * P$$

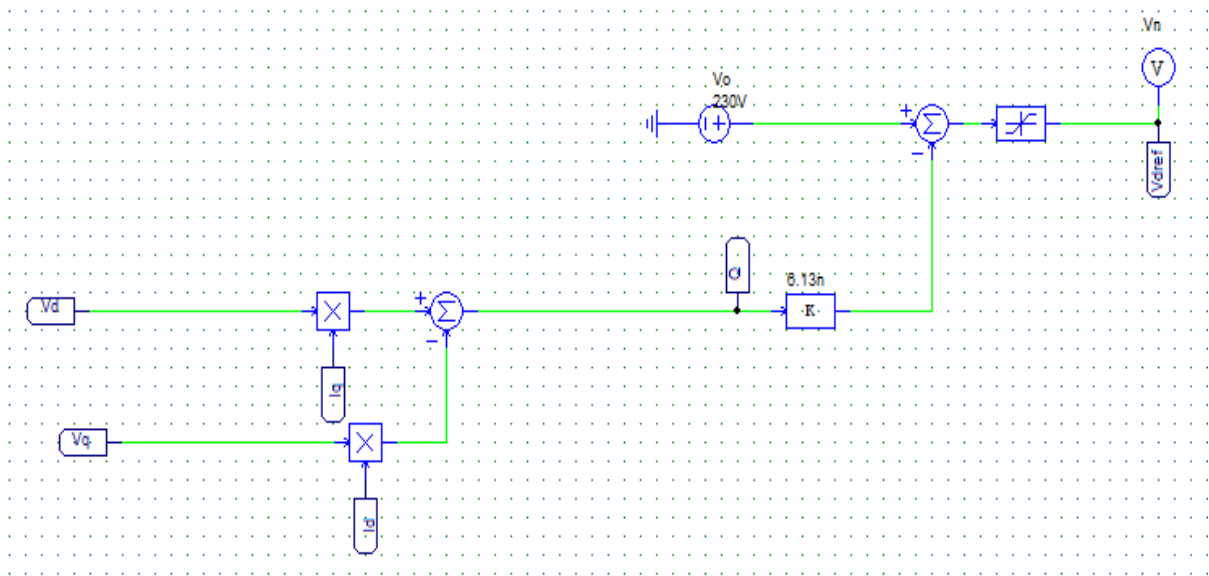
Όπου :

- ✓ f = η συχνότητα,
- ✓ f_o = η συχνότητα σε λειτουργία χωρίς φορτίο,
- ✓ m = ο συντελεστής κλίσης της στατικής χαρακτηριστικής και
- ✓ P = η ενεργός ισχύ.

Επομένως, προκύπτει ο τύπος του συντελεστή κλίσης της στατικής χαρακτηριστικής ενεργού ισχύος που είναι ο ακόλουθος :

$$m = \frac{f_o - f}{P}$$

Στο σχήμα 75 παρουσιάζεται η γενική εικόνα του συστήματός ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής της άεργης ισχύος (Q-V).

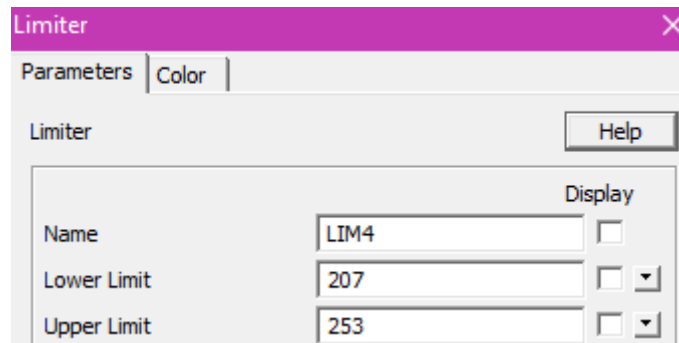


Σχήμα 75: Η γενική εικόνα του συστήματος ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής της άεργης ισχύος (Q-V).

Το σύστημα ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής της άεργης ισχύος αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- α) Τους πολλαπλασιαστές (Multiplier)
- β) Τα summer (αθροιστές και αφαιρέτες)
- γ) Την σταθερά K
- δ) Την πηγή DC συνεχούς τάσης (V_0)
- ε) Έναν περιοριστή (Limiter) και
- ζ) Ένα βολτόμετρο για την ένδειξη της τιμής της τάσης αναφοράς εξόδου ($Vdref$).

Το σύστημα ελέγχου μας αποτελείται από στοιχεία που έχουν ήδη παρουσιαστεί. Οι παράμετροι του περιοριστή φαίνονται στο σχήμα 76.



Σχήμα 76: Οι παράμετροι του περιοριστή της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος του συστήματος μας.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι του περιοριστή έχουν ως κατώτερο όριο τα 207V (90% της ονομαστικής τάσης 230V), ενώ ως ανώτερο όριο τα 253V (110% της ονομαστικής τάσης 230V). Πιο αναλυτικά, το σύστημα ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος (Q-V) προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$V_n = V_o - n * Q$$

Όπου :

- ✓ V_n = η τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου,
- ✓ V_o = η τιμή τάσης της λειτουργίας χωρίς φορτίο,
- ✓ n = ο συντελεστής κλίσης της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος και
- ✓ Q = η άεργος ισχύς

Επομένως προκύπτει ο τύπος του συντελεστή κλίσης άεργης ισχύος ο οποίος είναι ο ακόλουθος :

$$n = \frac{V_o - V_n}{Q}$$

Οι κλίσεις των στατικών χαρακτηριστικών υπολογίζονται σύμφωνα με τα μέγιστα όρια λειτουργίας της συχνότητας και της τάσης για την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα, δηλαδή 5kW. Επομένως, για την κλίση της χαρακτηριστικής ενεργού ισχύος – συχνότητας δημιουργείται η εξής εξίσωση:

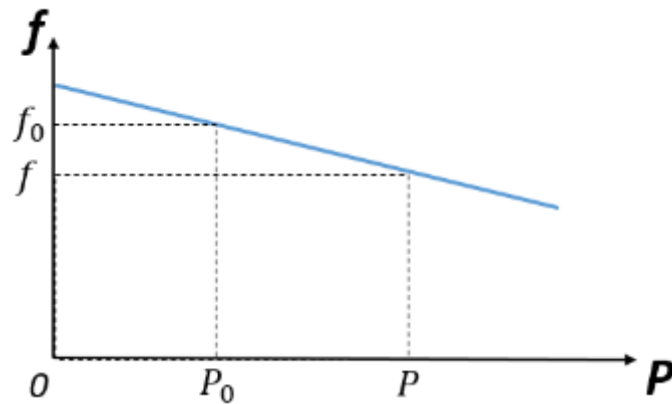
$$m = \frac{f_o - f}{P} = \frac{51 - 49}{5000} = 0.4 * 10^{-3}$$

Από τον τύπο της συχνότητας λειτουργίας της στατικής χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος αντικαθιστώντας προκύπτει η εξής ελάχιστη συχνότητα:

$$f = f_o - m * P = 51 - 0.0004 * 5000 = 51 - 2 = 49Hz$$

Πιο αναλυτικά, η λειτουργία του συστήματος ελέγχου της στατικής χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος – συχνότητας (P-f) είναι η εξής : οι αισθητήρες μετρούν τις εναλλασσόμενες τιμές της τάσης και του ρεύματος, οι οποίες μετατρέπονται μέσω των κατάλληλων μετασχηματισμών σε DC τιμές στον άξονα d και q. Από τη συχνότητα, θα προκύψει η γωνία ελέγχου θ (theta). Η

καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής ενεργής ισχύος – συχνότητας ακολουθεί στο σχήμα 77.



Σχήμα 77: Η καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής P-f.

Παρατηρώντας την καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής η f_0 είναι η συχνότητα λειτουργίας χωρίς φορτίο, επομένως όσο αυξάνεται η τιμή της ενεργής ισχύος, τόσο μειώνεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος, ακριβώς όπως συμβαίνει στις σύγχρονες γεννήτριες.

Στη συνέχεια αναλύεται η στατική χαρακτηριστική άεργου ισχύος -τάσης (Q-V). Ο μέγιστος συντελεστής ισχύος (Power Factor -PF) του μετατροπέα ορίστηκε ίσος 0.8. Επομένως, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς είναι ίση με:

$$S = \frac{P}{PF} = \frac{5000}{0.8} = 6250 \text{ VA}$$

Επομένως η μέγιστη άεργη ισχύς είναι ίση με:

$$\begin{aligned} Q &= \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{6250^2 - 5000^2} = \\ &= \sqrt{14.062.500} = 3750 \text{ VAR} \end{aligned}$$

$$Q_{max} = 3750 \text{ VAR}$$

Με τον υπολογισμό της μέγιστης άεργης ισχύος μπορεί να υπολογιστεί και η ονομαστική κλίση της στατικής χαρακτηριστικής άεργου ισχύος – τάσης ως εξής:

$$n = \frac{V_o - V_{min}}{Q}$$

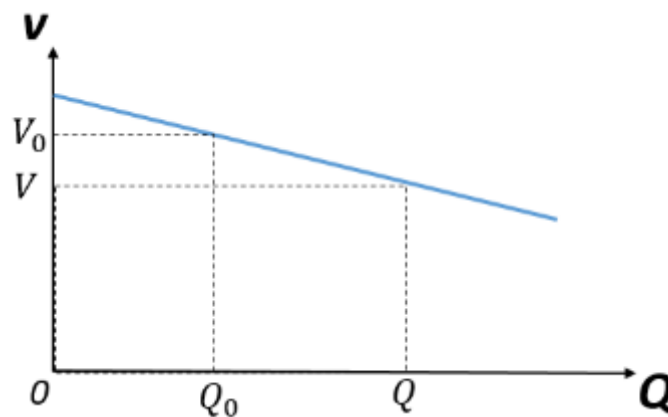
Αντικαθιστώντας τις τιμές στον τύπο προκύπτει ότι :

$$n = \frac{230 - 207}{3750} = \frac{23}{3750} = 6.13 * 10^{-3}$$

Στην περίπτωση της έγχυσης μέγιστης ισχύος, η τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου ($V_{d_{ref}}$) ή αλλιώς (V_n) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} V_n &= V_o - n * Q = 230 - 0.00613 * 3750 = \\ &= 230 - 23 = 207V \end{aligned}$$

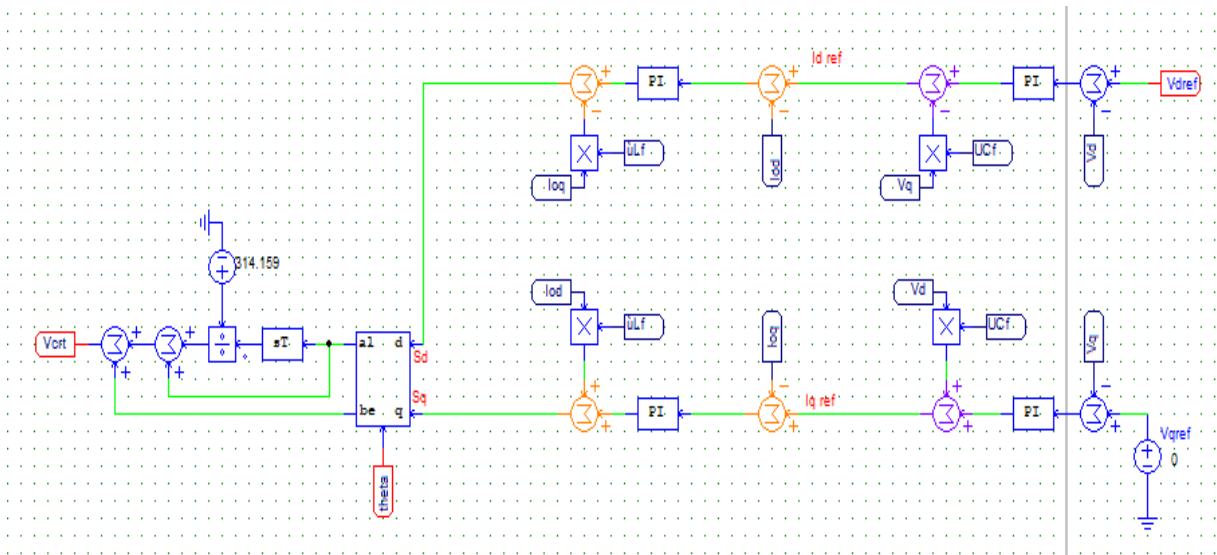
Η καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος - τάσης παρουσιάζεται στο σχήμα 78.



Σχήμα 78: Η καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος - τάσης (Q-V).

Παρατηρώντας την καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής (Q-V), προκύπτει ότι η V_0 είναι η τάση λειτουργίας χωρίς φορτίο, επομένως όταν μειώνεται η τάση εξόδου, αυξάνεται η έγχυση άεργης ισχύος.

Στο σχήμα 79 παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο του συστήματος ελέγχου.



Σχήμα 79: Η γενική εικόνα του τελικού συστήματος ελέγχου του αντιστροφέα του κυκλώματος μας.

Το σύστημα ελέγχου αποτελείται από έναν έλεγχο τάσης και έναν έλεγχο ρεύματος, ενώ καταλήγει στη διαμόρφωση της τάσης ελέγχου V_{cnt} .

i) Το κύκλωμα ελέγχου της τάσης αποτελείται:

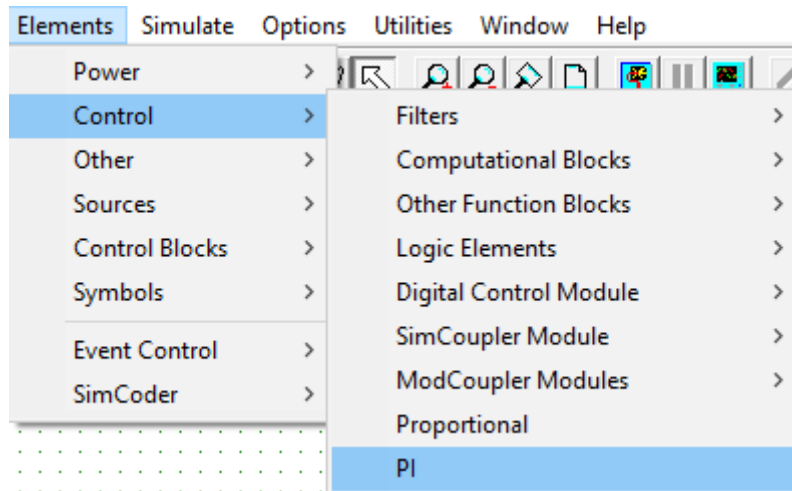
- α) Από τον αισθητήρα τάσης εξόδου
- β) Τα summer (Αθροιστές και αφαιρέτες)
- γ) Τους PI ελεγκτές (PI Controller).
- δ) Τους πολλαπλασιαστές (Multiplier).
- ε) Την ωCf η οποία είναι η χωρητική αντίδραση του πυκνωτή.

ii) Το κύκλωμα ελέγχου του ρεύματος αποτελείται:

- α) Από τον αισθητήρα μέσου ανορθωμένου ρεύματος (I_o).
- β) Τα summer (Αθροιστές και αφαιρέτες).
- γ) Τους PI ελεγκτές (PI Controller).
- δ) Τους πολλαπλασιαστές (Multiplier).
- ε) Την ωLf η οποία είναι η επαγωγική αντίδραση του πηνίου.

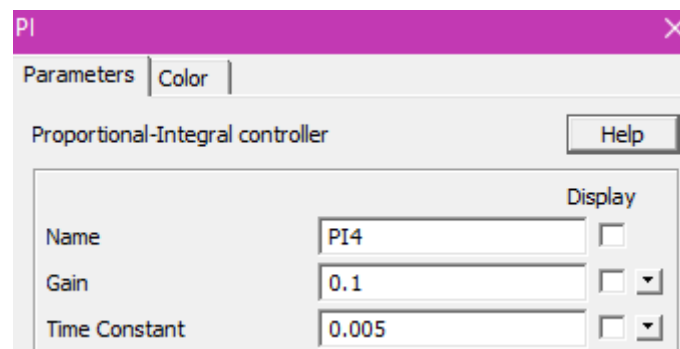
iii) Την δημιουργία της ημιτονοειδούς τάσης σημάτων (V_{ctrl}), που αναφερθήκαμε στην ενότητα 5.1.3.

Η ρύθμιση των PI ελεγκτών παρουσιάζεται στο σχήμα 80.



Σχήμα 80: Η μέθοδος επιλογής των PI ελεγκτών.

Η μέθοδος επιλογής των PI ελεγκτών για το ΚΥΚΛΩΜΑ, έγινε μέσω του Elements > Control > PI, ενώ οι παράμετροι του παρουσιάζονται στο σχήμα 81.



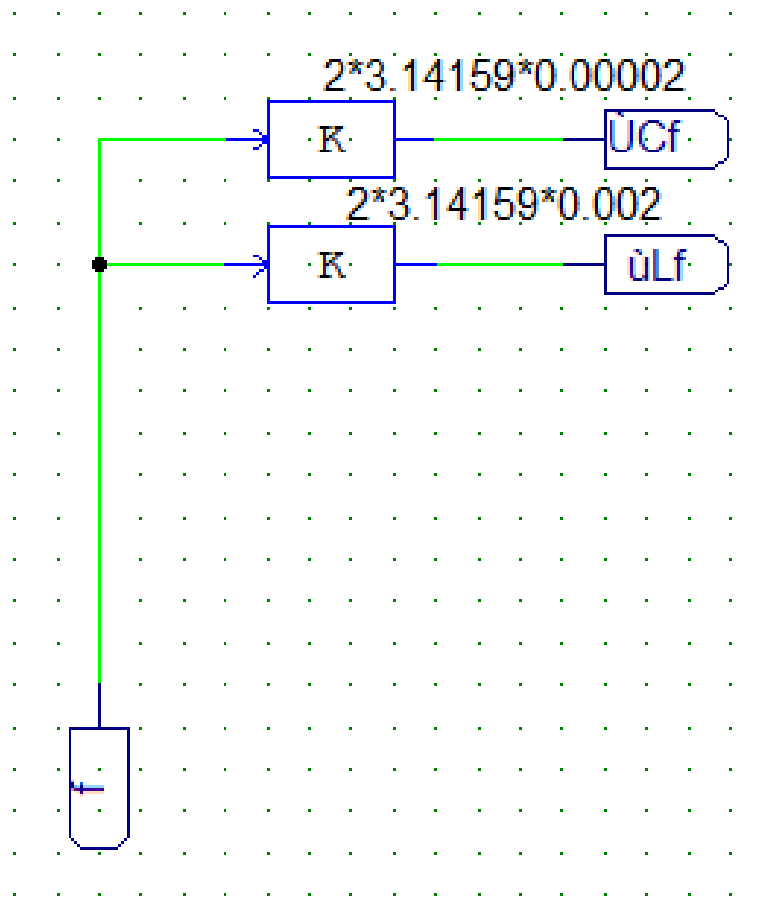
Σχήμα 81: Οι παράμετροι των PI ελεγκτών.

Οι δύο παράμετροι είναι το κέρδος (gain) που είναι μια αναλογική σταθερά ίση με 0.1, και η χρονική σταθερά ολοκλήρωσης που ορίστηκε σε 0.005. Οι τιμές ρύθμισης των παραμέτρων του PI ελεγκτή έγινε με τη μέθοδο δοκιμών – σφάλματος (trial and error method).

Πιο συγκεκριμένα, ο όρος PI σημαίνει: αναλογικός και ολοκληρωτικός ελεγκτής. Το κομμάτι του αναλογικού όρου (P) του ελεγκτή βοηθάει στη βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στην μεταβατική, όσο και στην μόνιμη κατάσταση, αλλά δεν μπορεί να μηδενίσει πλήρως το μόνιμο σφάλμα, γι' αυτό συνδυάζεται μαζί με τον ολοκληρωτικό όρο (I) που χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Για το χρονικό διάστημα του σφάλματος, η έξοδος του ελεγκτή αυξάνεται λόγω του ολοκληρώματος, με αποτέλεσμα τον μηδενισμό του σφάλματος, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς του PI ελεγκτή είναι η εξής :

$$G(s) = k * \frac{(1 + sT)}{(sT)}$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι όροι αποσύζευξης, οι οποίοι δημιουργούνται από τις ποσότητες ωCf και ωLf και παρουσιάζονται στο σχήμα 82. Οι όροι αποσύζευξης χρησιμοποιούνται για την αποσύζευξη της ενεργού και αέργου ισχύος.



Σχήμα 82: Η χωρητική και η επαγωγική αντίδραση του συστήματος μας.

Το παραπάνω κύκλωμα εκτελεί τις ακόλουθες πράξεις:

$$i) \omega Cf = 2 * \pi * f * C$$

$$ii) \omega Lf = 2 * \pi * f * L$$

Όποτε για την χωρητική αντίδραση του πυκνωτή αντικαθιστώντας ισχύει: $2 * 3.14159 * 0.00002 * 50 = 6.28 * 10^{-3} \Omega$.

Ενώ για την επαγωγική αντίδραση του πηνίου αντικαθιστώντας ισχύει : $2 * 3.14159 * 0.002 * 50 = 628 * 10^{-3} \Omega$

Αρχικά, υπολογίζεται στον έλεγχο της τάσης το σφάλμα τάσης, το οποίο προκύπτει από τις μετρούμενες και τις υπολογιζόμενες τιμές. Οι υπολογιζόμενες τιμές της τάσης αναφοράς προκύπτουν μέσα από τη στατιστική χαρακτηριστική Q-V. Επειδή οι ποσότητες είναι στους άξονες d και q, η γωνία θ (theta) που χρησιμοποιείται στους αντίστοιχους μετασχηματισμούς έχει λάβει υπόψη τη λειτουργία της στατιστικής χαρακτηριστικής P-f. Το αποτέλεσμα του PI ελεγκτή από το σφάλμα τάσης είναι το ρεύμα αναφοράς. Το ρεύμα αναφοράς συγκρίνεται με το μετρούμενο ρεύμα και επομένως προκύπτει το σφάλμα ρεύματος, το οποίο διορθώνεται με PI ελεγκτές. Τέλος, η έξοδος του PI ελεγκτή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της τάσης αναφοράς V_{cntr} , η οποία και χρησιμοποιείται στον PWM έλεγχο του αντιστροφέα.

5.2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

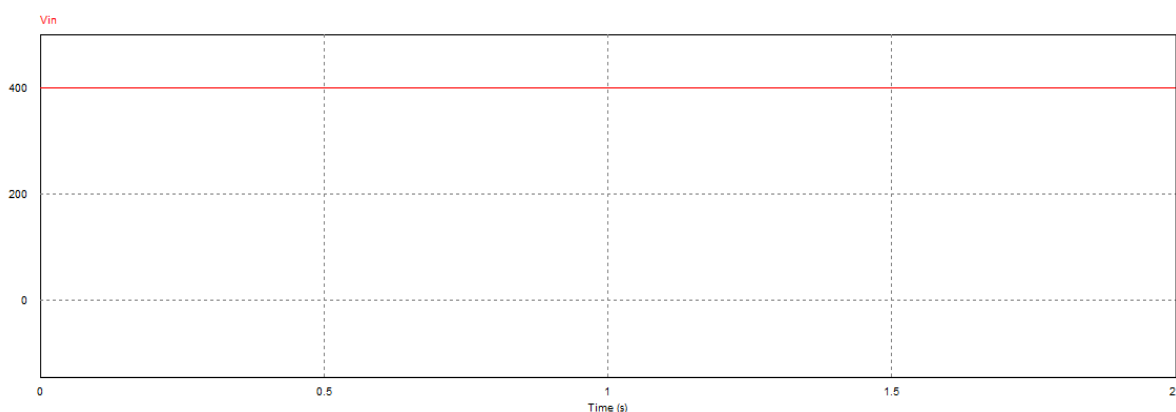
5.2.1. Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από όλες τις προσομοιώσεις των σεναρίων ξεχωριστά. Στο 1ο σενάριο το κύκλωμα του μετατροπέα τροφοδοτεί ένα ωμικό φορτίο (-R) ίσο με 30Ω . Στο 2ο σενάριο, τροφοδοτεί ένα ωμικό - επαγωγικό φορτίο (RL), ενώ στο 3ο σενάριο τροφοδοτεί ένα ωμικό - χωρητικό φορτίο (RC).

Τέλος στο 4ο σενάριο το σύστημα μας τροφοδοτεί το δίκτυο.

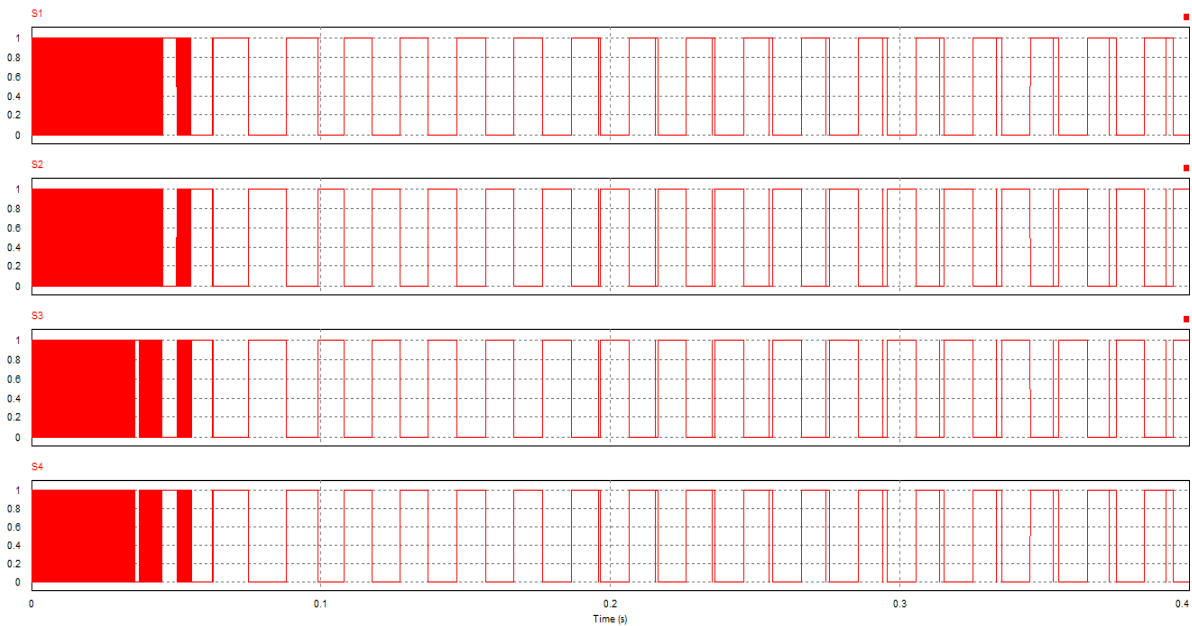
5.2.2. Το 1^ο σενάριο σε περίπτωση της τροφοδότηση ενός ωμικού φορτίου 30Ω .

Από την προσομοίωση του 1ου σεναρίου προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες ξεκινώντας με την DC τάση εισόδου.



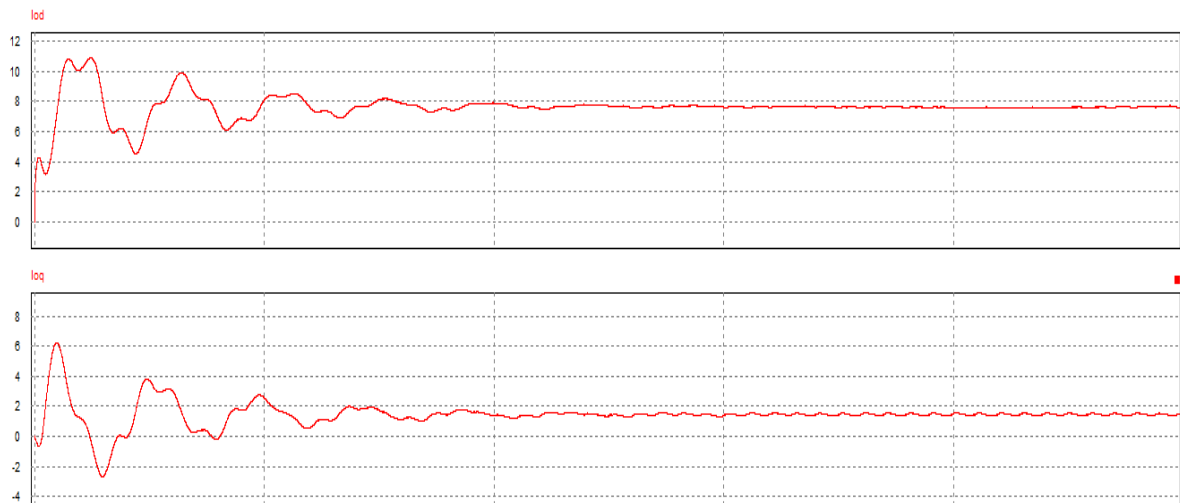
Εικόνα 11: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης DC τάσης εισόδου.

Παρατηρώντας, την προσομοίωση της DC τάσης εισόδου, προκύπτει το αποτέλεσμα ότι είναι $400 V_{dc}$.



Εικόνα 12: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των διακοπών ελέγχου του αντιστροφέα.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διακοπών ελέγχου, προκύπτει ότι άγουν, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Δηλαδή, ο S1 ταυτόχρονα με τον S4, ενώ ο S3 ταυτόχρονα με τον S2.

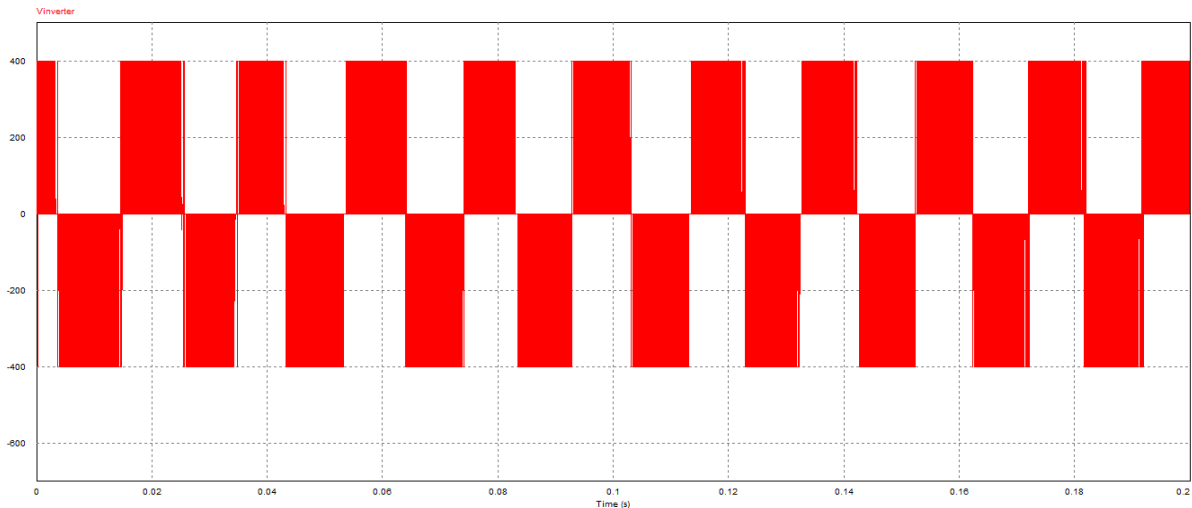


Εικόνα 13: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσων ρευμάτων ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα I_{od} και I_{oq} αντίστοιχα.

Από την προσομοίωση των ρευμάτων εξόδου, προκύπτει ότι στην περίπτωση του ωμικού φορτίου υπάρχει μόνο ρεύμα στον άξονα d, το οποίο αντιστοιχεί στο ρεύμα ενεργής ισχύος,

ενώ το ρεύμα στον άξονα q είναι σχεδόν μηδέν (0). Το ρεύμα δεν είναι ακριβώς μηδέν, διότι υπάρχει μία άεργη ισχύς πάνω στο φίλτρο εξόδου.

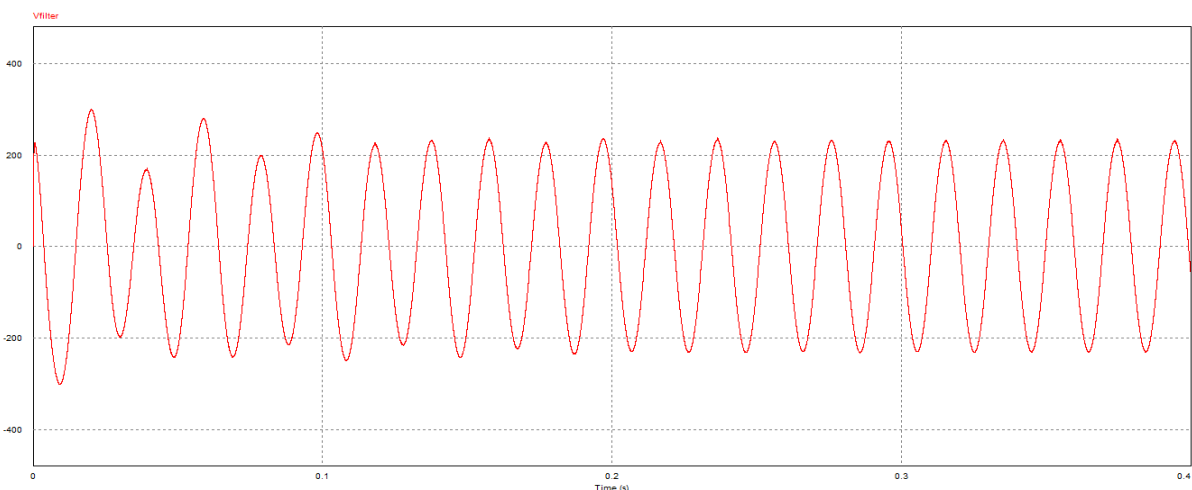
Ωστόσο στην παρακάτω εικόνα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει την προσομοίωση της καμπύλη της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.



Εικόνα 14: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης που μετράται από το βολτόμετρο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

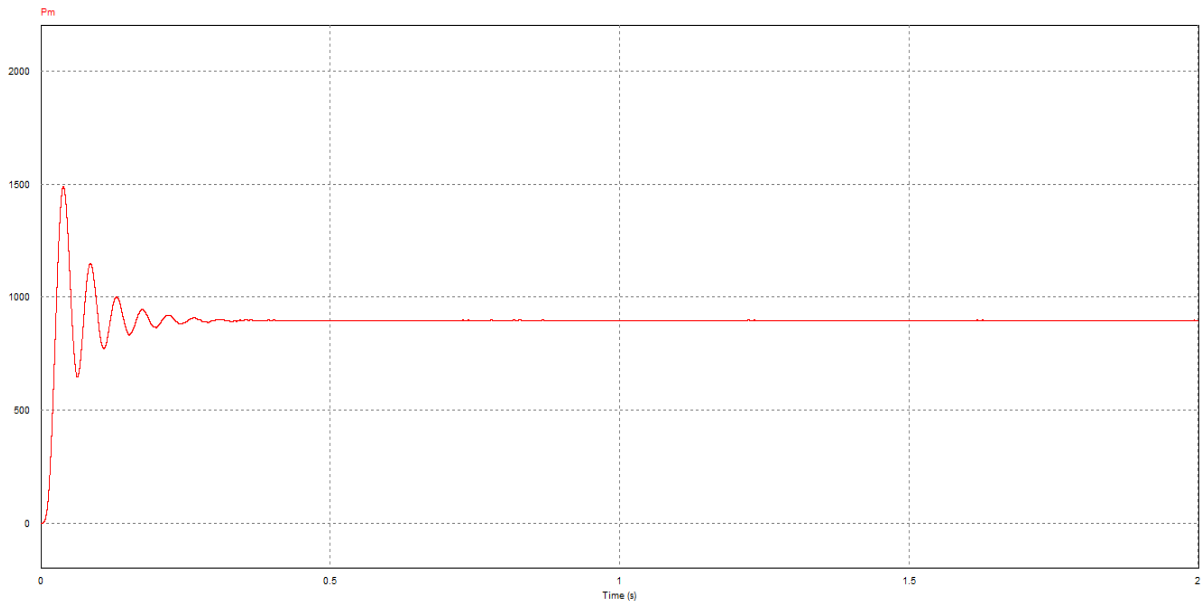
Όπως είναι αναμενόμενο, η τάση εξόδου μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών 400V και -400V, δηλαδή του V_{dc} και $-V_{dc}$.

Οπότε, για τον λόγο αυτό στο κύκλωμα προστίθεται ένα χαμηλοπερατό φίλτρο LC, ενώ η τάση μετά το φίλτρο απεικονίζεται στην εικόνα 15.



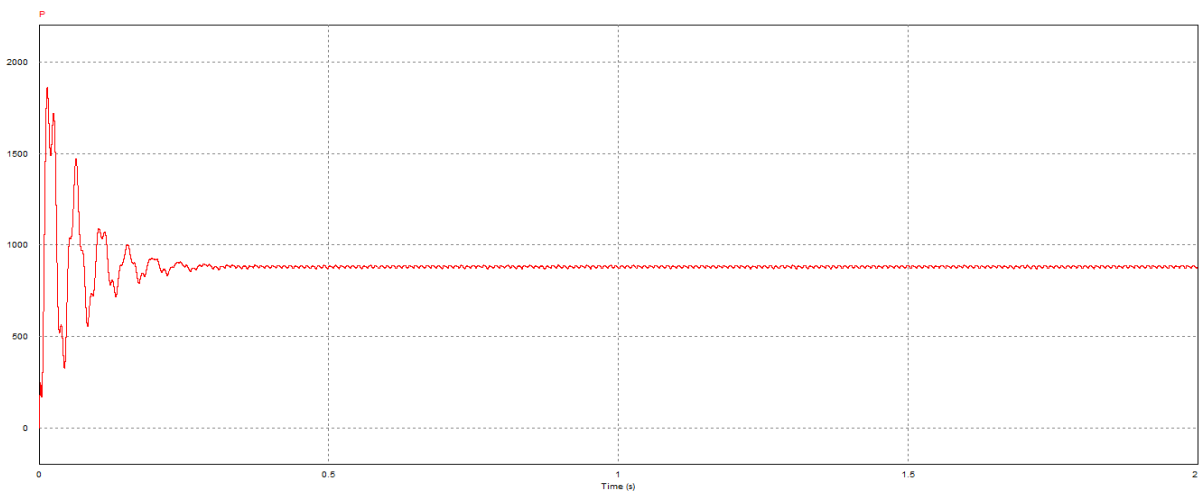
Εικόνα 15: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του LC φίλτρου.

Από την προσομοίωση της φιλτραρισμένης τάσης εξόδου, προέκυψε ότι η τάση εξόδου του αντιστροφέα πλέον είναι καθαρής ημιτονοειδούς μορφής. Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται η μέτρηση της ενεργού ισχύος που καταναλώνεται από το ωμικό φορτίο των 30Ω.



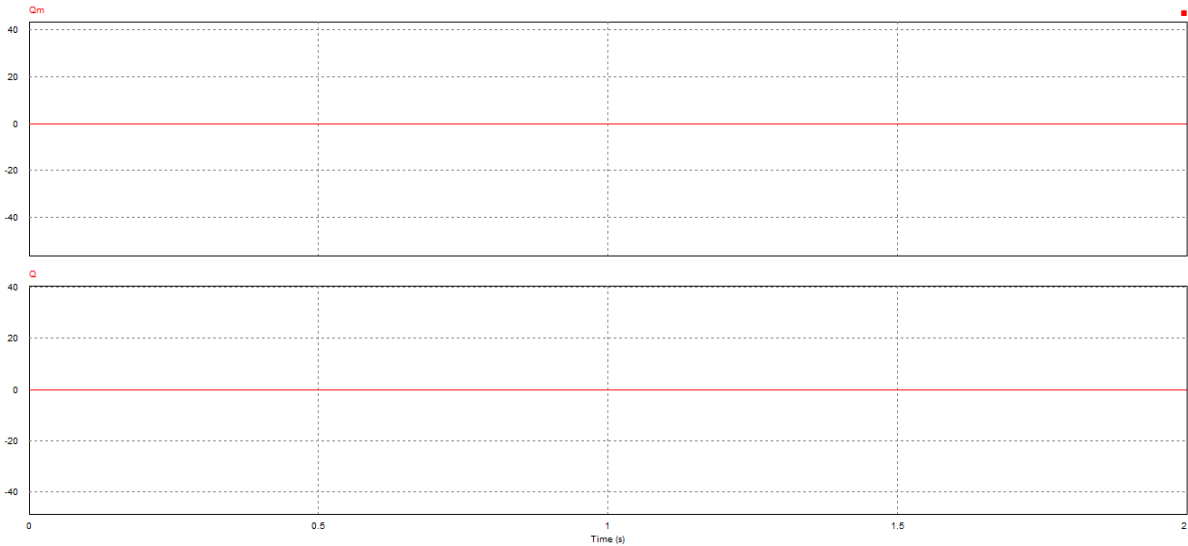
Εικόνα 16: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.

Στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης η καμπύλη της ενεργού ισχύος όπως αυτή μετριέται από το βατόμετρο είναι σταθερή περίπου στα 900 W, ενώ στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η καμπύλη της ενεργούς ισχύος όπως αυτή υπολογίζεται μέσω του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 17: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της υπολογίσιμης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.

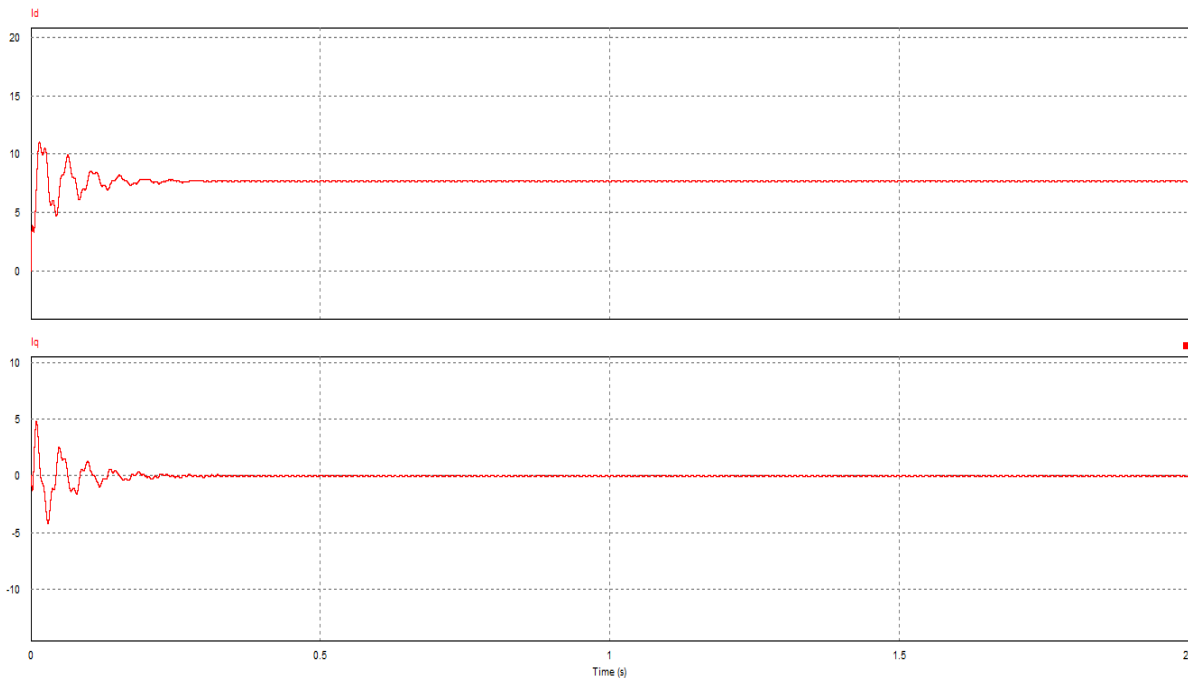
Συγκρίνοντας τις δύο καμπύλες, η ενεργή ισχύς που μετριέται από το βαρόμετρο και η υπολογιζόμενη ενεργή ισχύς είναι ίδιες. Στην παρακάτω εικόνα, φαίνεται η καμπύλη της άεργης ισχύος που τροφοδοτεί το ωμικό φορτίο των 30Ω .



Εικόνα 18: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Συγκρίνοντας και πάλι τις δυο καμπύλες, προκύπτει ότι η άεργη ισχύς στο φορτίο είναι μηδέν (0), ενώ αυτό συμβαίνει γιατί το σενάριο που εξετάζεται είναι ωμικού φορτίου, ωστόσο, θα αναφερθούν περισσότερα για την άεργη ισχύ στο 2ο και στο 3ο σενάριο της προσομοίωσης.

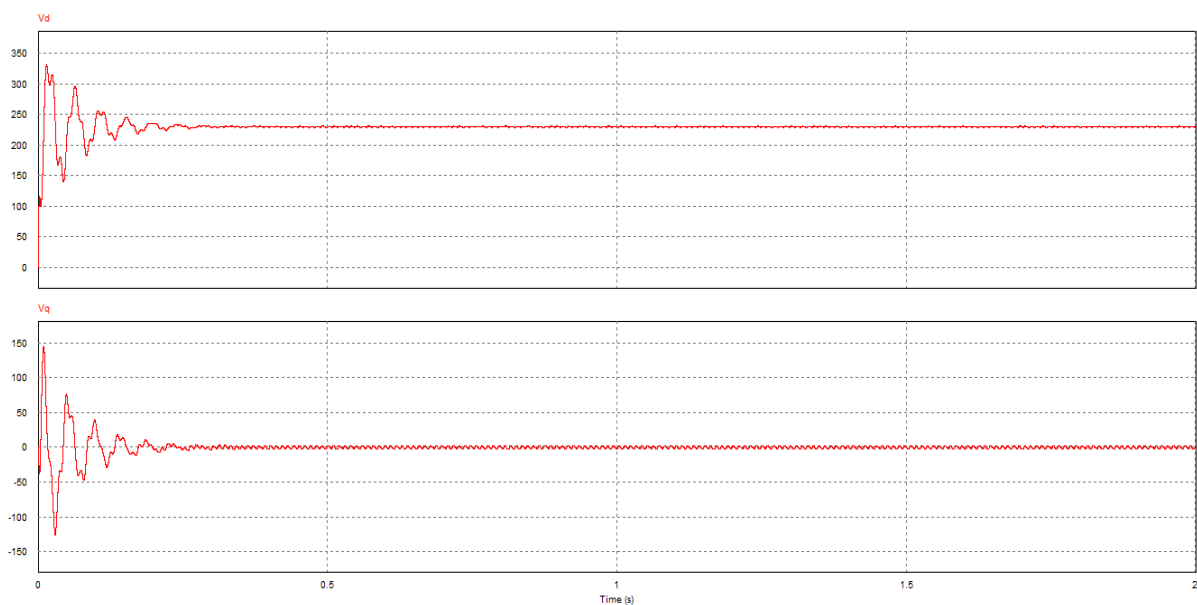
Στην εικόνα 19 φαίνονται η καμπύλη του ρεύματος εξόδου στον άξονα του d και στον άξονα του q, όπως αυτές προκύπτουν από το σύστημα ελέγχου.



Εικόνα 19: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών ρευμάτων της εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Συγκρίνοντας τα δύο μεγέθη των ρευμάτων της ενεργής και της άεργης ισχύος, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι το ρεύμα στον άξονα d είναι μεγαλύτερο γύρω στα $8A$ από εκείνο του ρεύματος άεργης ισχύος το οποίο είναι μηδενικό $0A$. Μία αύξηση του φορτίου θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος εξόδου, εφόσον η ενεργή ισχύς που απορροφάει το φορτίο μειώνεται.

Τέλος, στην εικόνα 20 φαίνεται η καμπύλη της τάσης του φορτίου, όπως επίσης και η καμπύλη της μέγιστης τιμής αναφοράς της τάσης εξόδου (V_d) και της V_q που προέκυψαν από το σύστημα ελέγχου της τάσης.



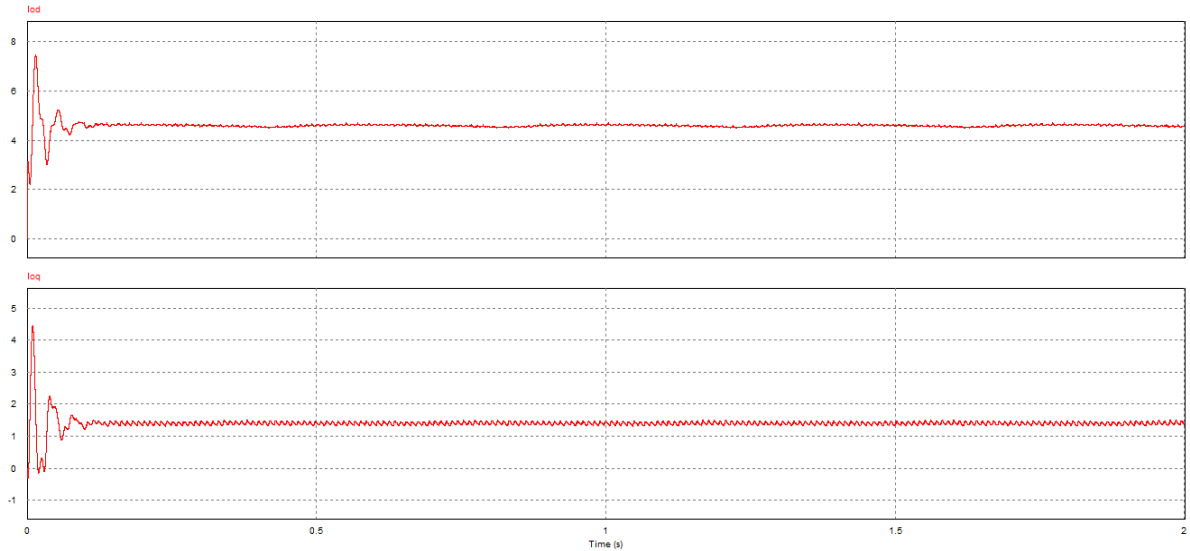
Εικόνα 20: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των μέγιστων τιμών αναφορών τάσης εξόδου V_d και της άεργης ισχύος V_q .

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα, μπορεί κανείς να παρατηρήσει πώς η τιμή της τάσης στον άξονα d για ωμικό φορτίο $R=30\Omega$ είναι $230V$, ενώ η τιμή τάσης στον άξονα q είναι μηδέν (0).

5.2.3. Το 2^ο σενάριο σε περίπτωση της τροφοδότησης ενός ωμικού – επαγωγικού φορτίου $R=50\Omega$ και $L=2mH$.

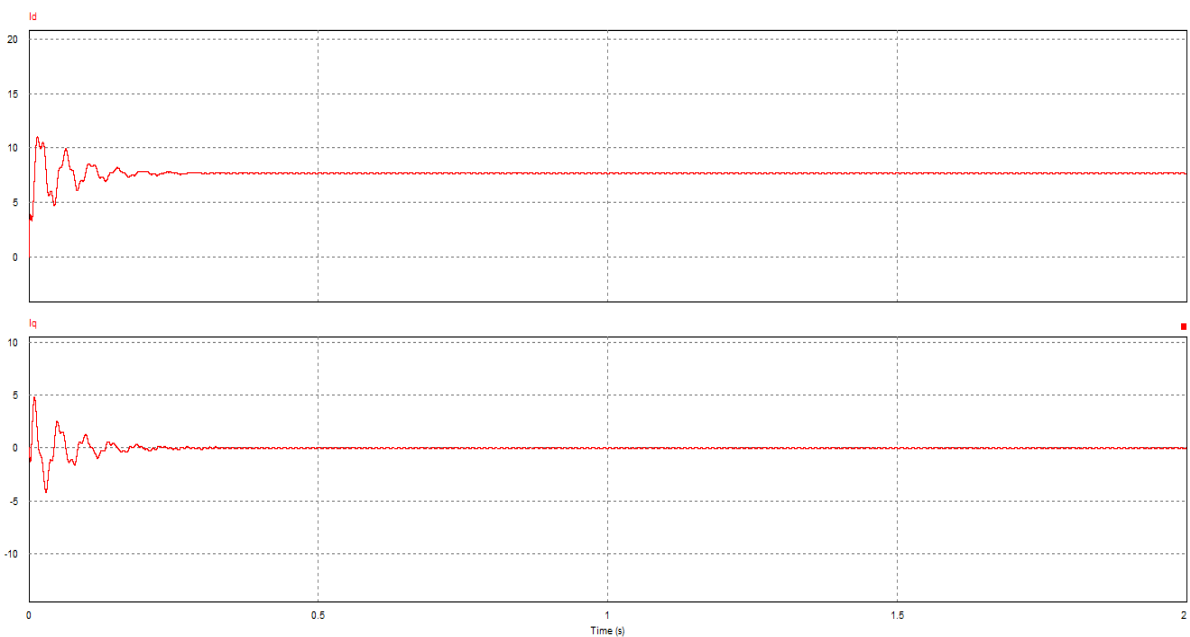
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η περίπτωση τροφοδότησης ενός ωμικού – επαγωγικού φορτίου με τιμές $R=50\Omega$ και $L=2mH$.

Στην εικόνα 21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των ρευμάτων στους άξονες d και q.



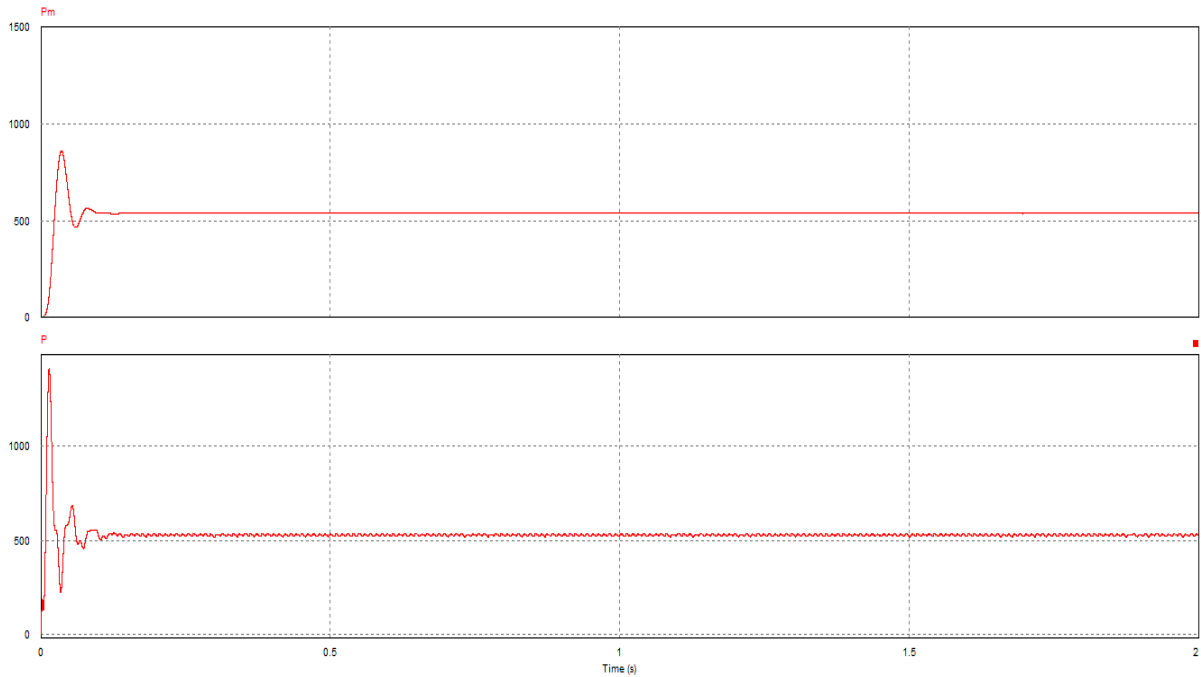
Εικόνα 21: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων της ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Λόγω της προσθήκης της αυτεπαγωγής στο φορτίο, καταναλώνεται πλέον άεργη ισχύς στο κύκλωμα με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ρεύμα στην q συνιστώσα του ρεύματος. Στη συνέχεια στην εικόνα 22 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του ρεύματος εξόδου τόσο της ενεργής όσο και της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.



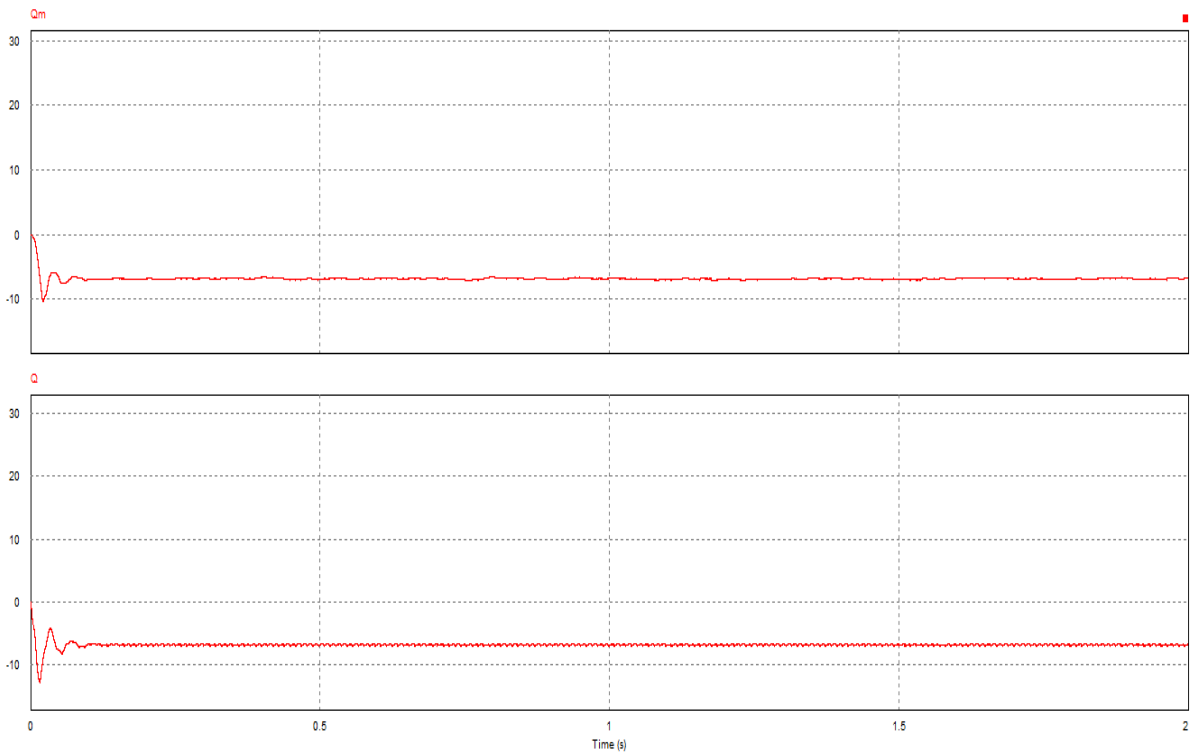
Εικόνα 22: Το Αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Το αποτέλεσμα που προέκυψε από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα είναι ότι το σύστημα ελέγχου ρεύματος μας μέσω των PI ελεγκτών, μηδενίζει το σφάλμα του ρεύματος στην έξοδο του, με συνέπεια την αύξηση του ρεύματος εξόδου της ενεργής ισχύος. Στην συνέχεια παρουσιάζεται στην εικόνα 23 το αποτέλεσμα της προσομοίωσης τόσο της μετρούμενης ενεργής ισχύος του αντιστροφέα, όσο και του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 23: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.

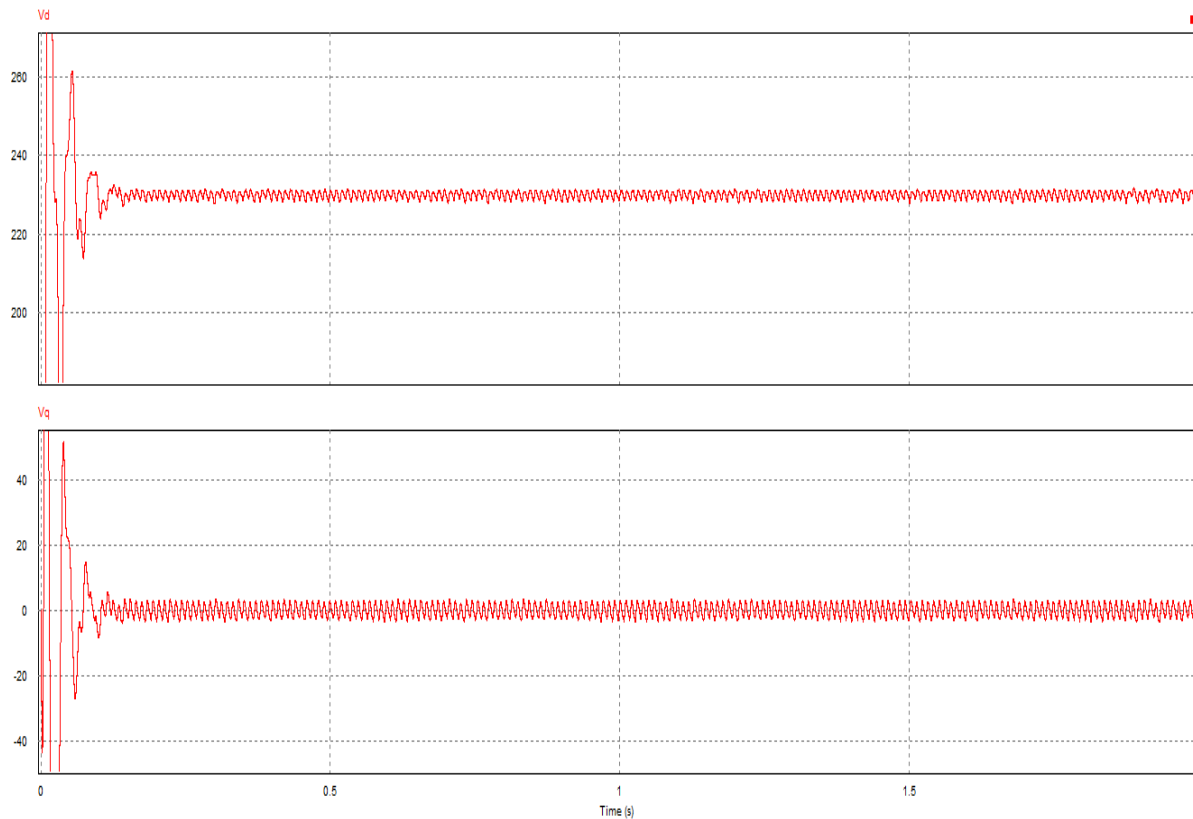
Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα, παρατηρείται ότι η ενεργός ισχύς που μετράει το βατόμετρο και το σύστημα ελέγχου έχει ίδια τιμή κοντά στα 550W, για την περίπτωση του 2ου σεναρίου, ενώ για το 1ο σενάριο της ωμικής αντίστασης η ενεργή ισχύς είναι περίπου 900W. Στην παρακάτω εικόνα, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης άεργης ισχύος και της υπολογίσιμης άεργης ισχύος μέσω του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 24: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Συγκρίνοντας, το αποτέλεσμα παρατηρείται πως η άεργη ισχύς που μετριέται από το βατόμετρο και το σύστημα ελέγχου είναι η ίδια με τιμή κοντά στα -7 kVAR, λόγω της επαγωγικής αντίδρασης που υπάρχει στο φορτίο αυτού του σεναρίου.

Τέλος, στην εικόνα 25 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της τιμής αναφοράς τάσης στους άξονες d και q αντιστοίχως, όπως αυτή μετριέται και υπολογίζεται μέσω του συστήματος ελέγχου της τάσης εξόδου.

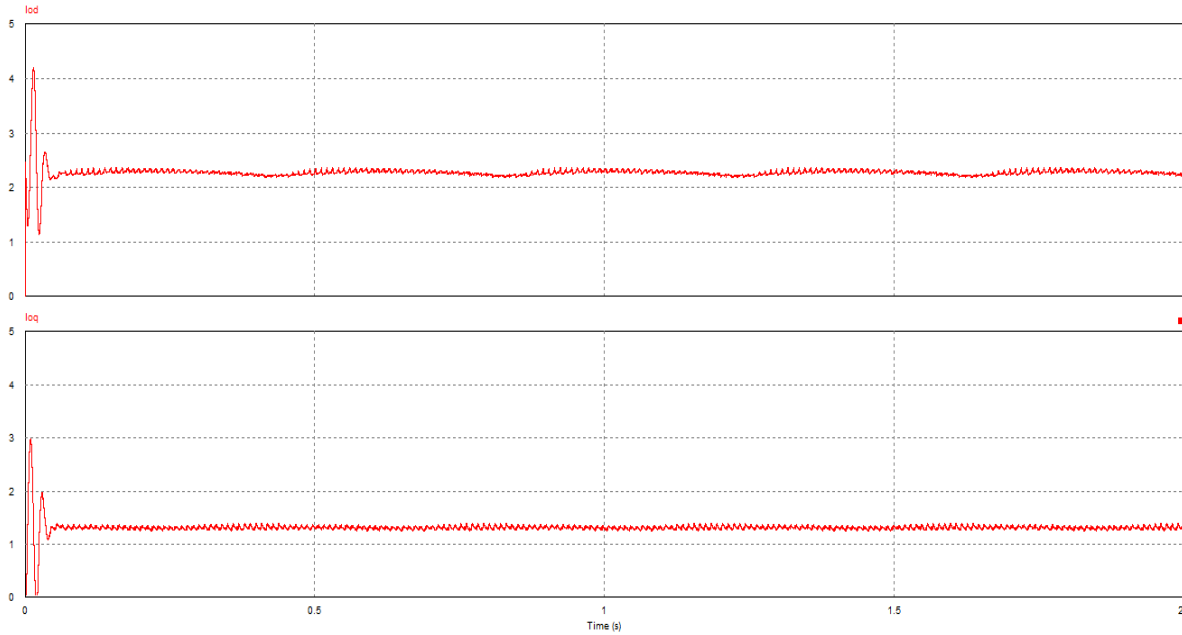


Εικόνα 25: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών των αναφορών τάσης εξόδου και της άεργης ισχύος.

Παρατηρώντας το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, η τιμή της τάσης στον άξονα d είναι και σε αυτό το σενάριο 230V, ενώ η τάση στον άξονα q είναι επίσης 0.

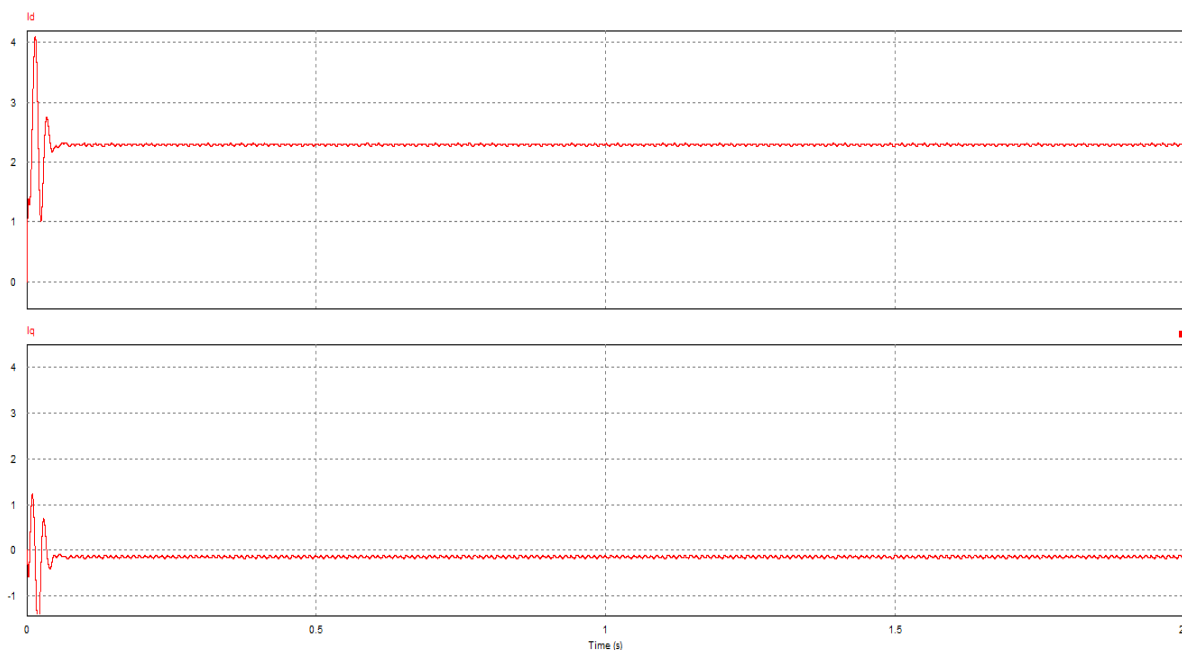
5.2.4. Το 3^ο σενάριο σε περίπτωση τροφοδότησης ενός φορτίου RLC (ωμικό – επαγωγικό – χωρητικό φορτίο) $R=100\Omega$ $L=20mH$ $C=45\mu F$.

Εφόσον, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του 1ου και του 2ου σεναρίου, ακολουθεί το 3ο σενάριο, το οποίο αφορά την περίπτωση τροφοδότησης ενός φορτίου RLC, δηλαδή ενός ωμικού – επαγωγικού – χωρητικού φορτίου. Στην εικόνα 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ημιτονοειδούς μέσου ρεύματος της ενεργής και της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.



Εικόνα 26: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσω των ρευμάτων ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

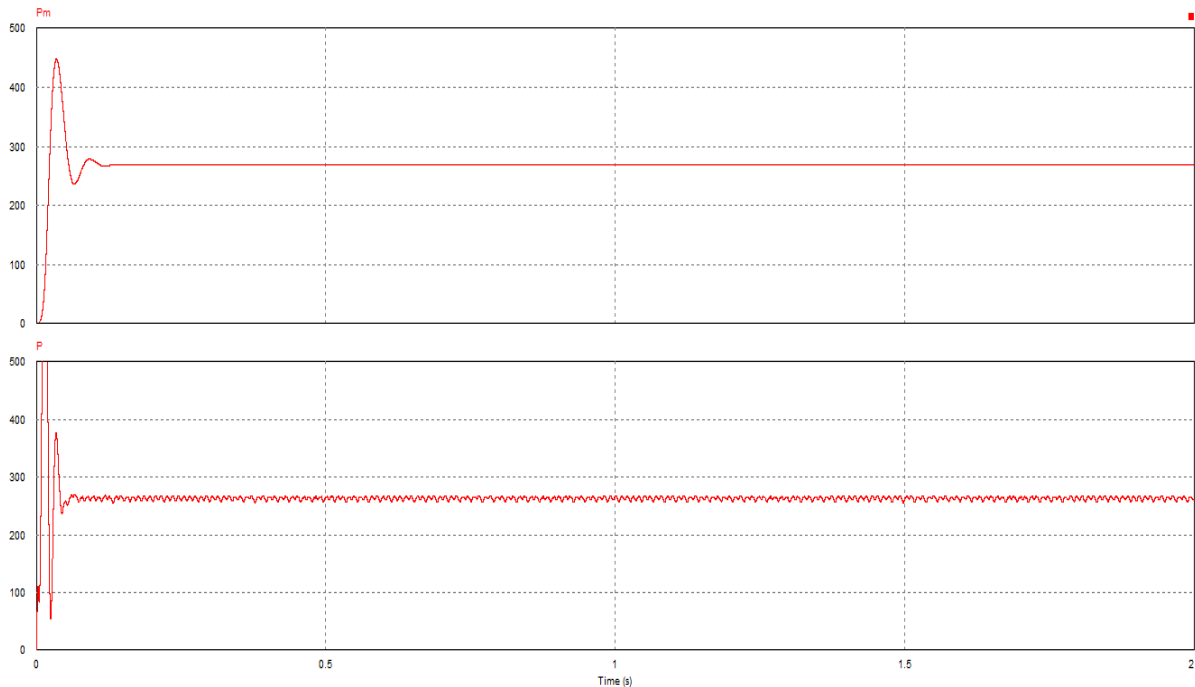
Από το αποτέλεσμα προέκυψε για την περίπτωση αυτού του σεναρίου, οι τιμές του ρεύματος ενεργής και άεργης ισχύος είναι περίπου 2.5A και 1.5A αντίστοιχα.



Εικόνα 27: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

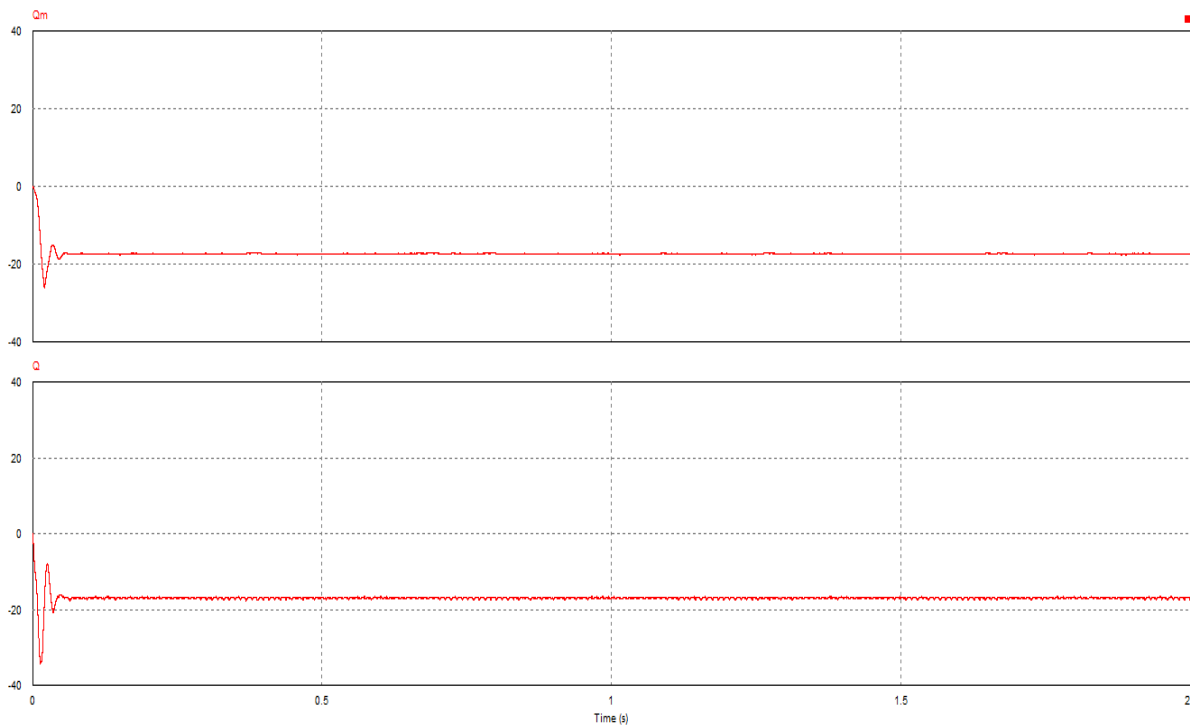
Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που αφορούν τα ρεύματα εξόδου της ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα, φαίνεται πως το σύστημα ελέγχου του ρεύματος μέσω των PI ελεγκτών μηδένισε το σφάλμα ρεύματος εξόδου της άεργης ισχύος.

Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης τιμής της ενεργής ισχύος του αντιστροφέα και της υπολογισμένης τιμής της ενεργής ισχύος μέσω του συστήματος ελέγχου μας.



Εικόνα 28: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης ενεργής ισχύος του αντιστροφέα.

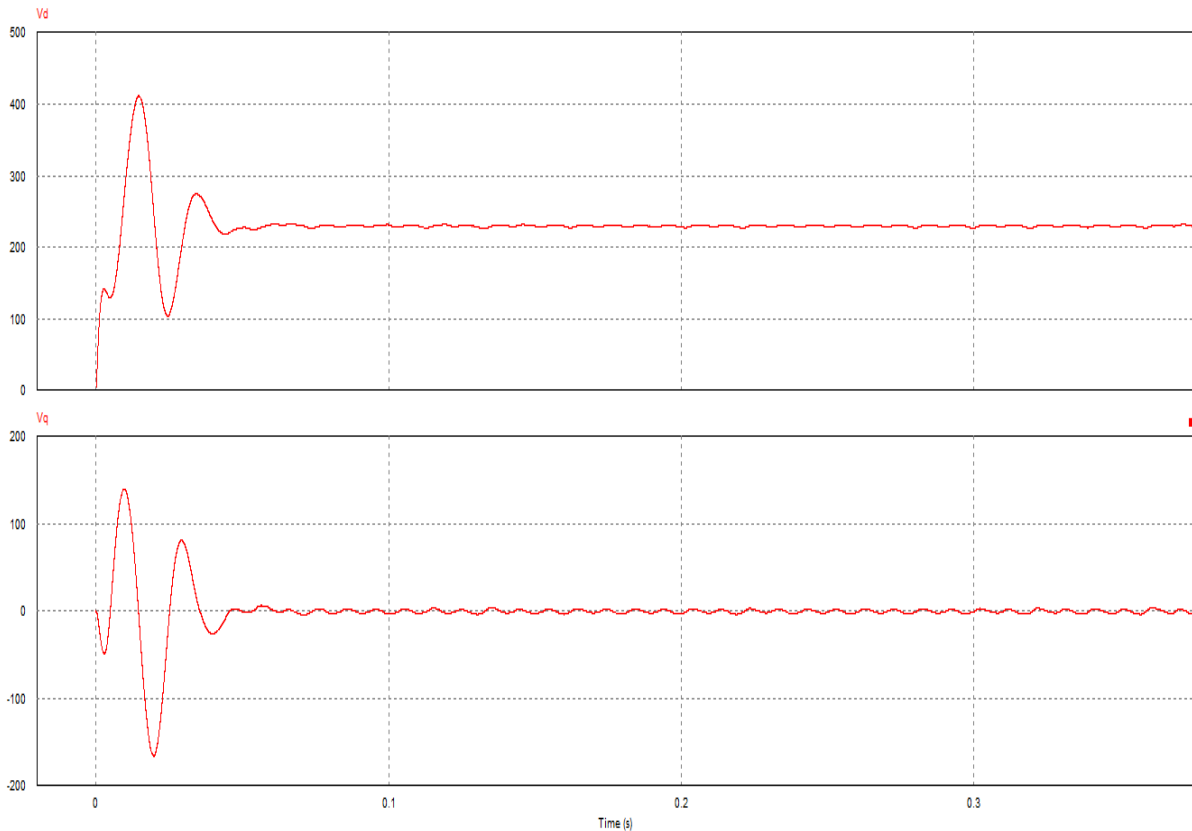
Παρατηρώντας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο της μετρούμενης τιμής της ενεργής ισχύος μέσω του βατομέτρου, όσο και της υπολογισμένης τιμής μέσω του συστήματος ελέγχου είναι τα ίδια. Επίσης, προκύπτει ότι για αυτό το σενάριο, η ενεργή ισχύς του αντιστροφέα θα είναι 270 W, ενώ στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης άεργης ισχύος και της υπολογισμένης άεργης ισχύος μέσω του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 29: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο της μετρούμενης όσο και της υπολογισμένης τιμής άεργης ισχύος προκύπτει ότι οι τιμές αυτών είναι ίδιες, επομένως η τιμή της άεργης ισχύος γι' αυτό το σενάριο είναι περίπου -17 VAR, λόγω της επαγωγικής και της χωρητικής αντίδρασης που έχουμε στο φορτίο.

Τέλος, στην εικόνα 30 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της υπολογισμένης τιμής τάσης αναφοράς εξόδου στον άξονα d και q.



Εικόνα 30: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών αναφοράς τάσης εξόδου του φορτίου και άεργης ισχύος.

Το συμπέρασμα αυτού του σεναρίου είναι ότι για οποιοδήποτε φορτίο και να έχουμε στην έξοδο του αντιστροφέα, η τροφοδότηση του γίνεται με πλήρη μηδενισμό του σφάλματος τόσο του ρεύματος όσο και της τάσης της άεργης ισχύος, ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως ο αντιστροφέας.

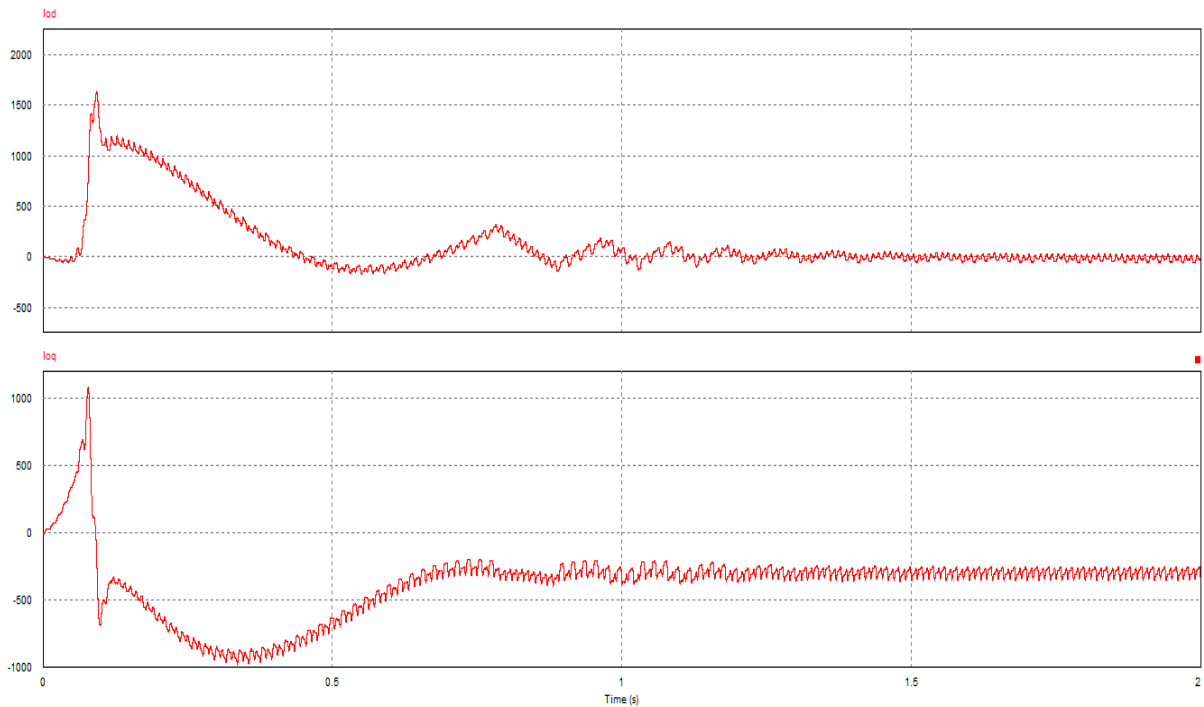
5.2.5. Το 4^ο σενάριο σε περίπτωση τροφοδότησης του δικτύου.

Η τελευταία περίπτωση που εξετάστηκε στο 4ο σενάριο είναι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της τροφοδότησης του δικτύου. Δηλαδή, το φορτίο μας είναι το δίκτυο. Ωστόσο στην παρακάτω σχέση υπολογίζει το πλάτος της ονομαστικής τάσης του δικτύου και έχει ως εξής :

$$V_{rms} \geq 325V$$

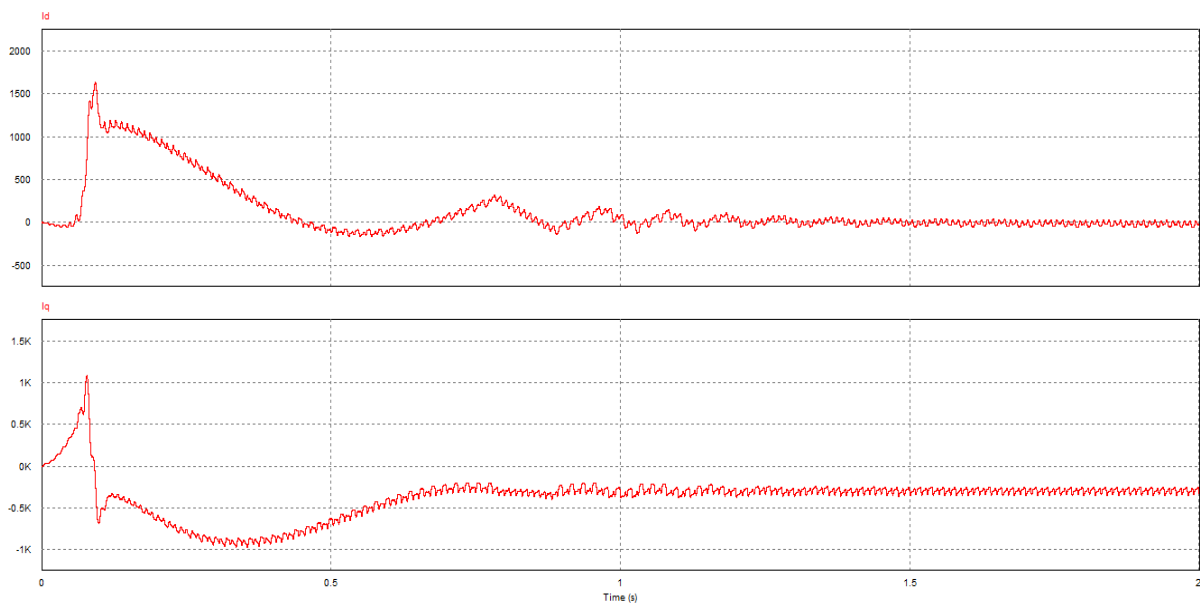
Η σχέση αυτή προκύπτει από τον τύπο $V_{rms} * \sqrt{2}$ που ισούται με $230V * 1.41 = 325V$. Ξεκινώντας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου αυτού, στην εικόνα 31

παρουσιάζεται το ρεύμα εξόδου στον άξονα d και q όπως προέκυψαν από το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.



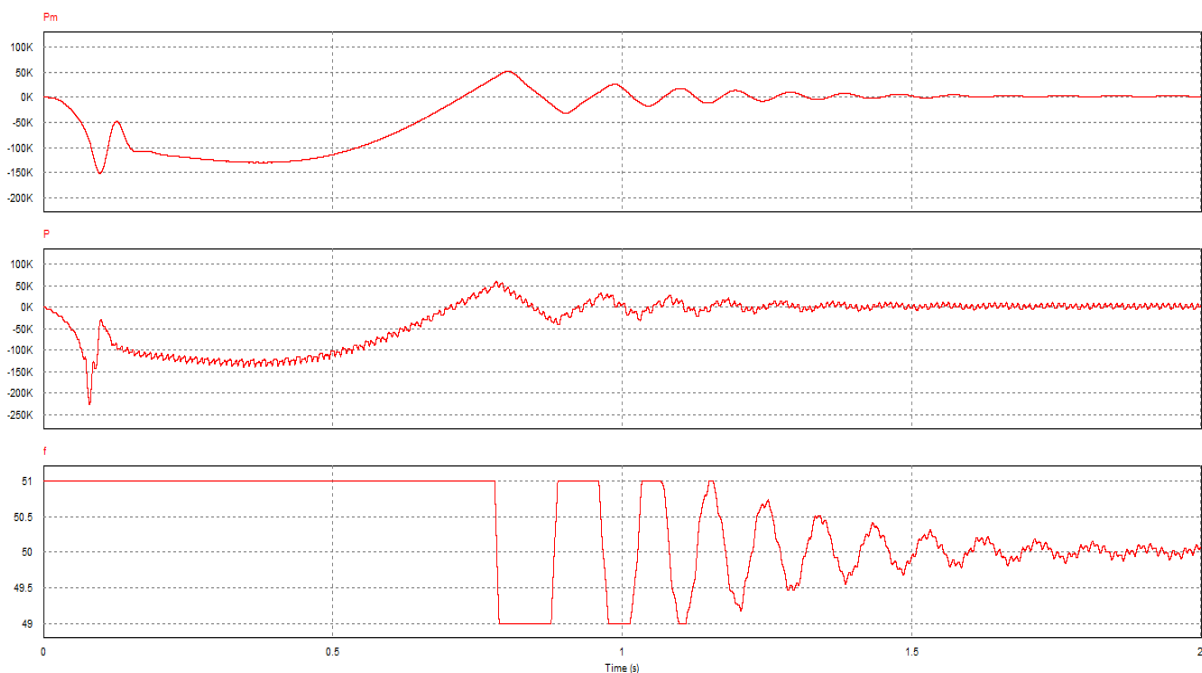
Εικόνα 31: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ημιτονοειδών μέσω ρευμάτων εξόδου της ενεργής και της άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

Στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης στην εικόνα 32, παρουσιάζεται η υπολογισμένη τιμή του ρεύματος εξόδου της ενεργής και της άεργης ισχύος του αντιστροφέα, όπως αυτή προέκυψε από το σύστημα ελέγχου του αισθητήρα του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.



Εικόνα 32: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των ρευμάτων εξόδου ενεργής και άεργης ισχύος του αντιστροφέα.

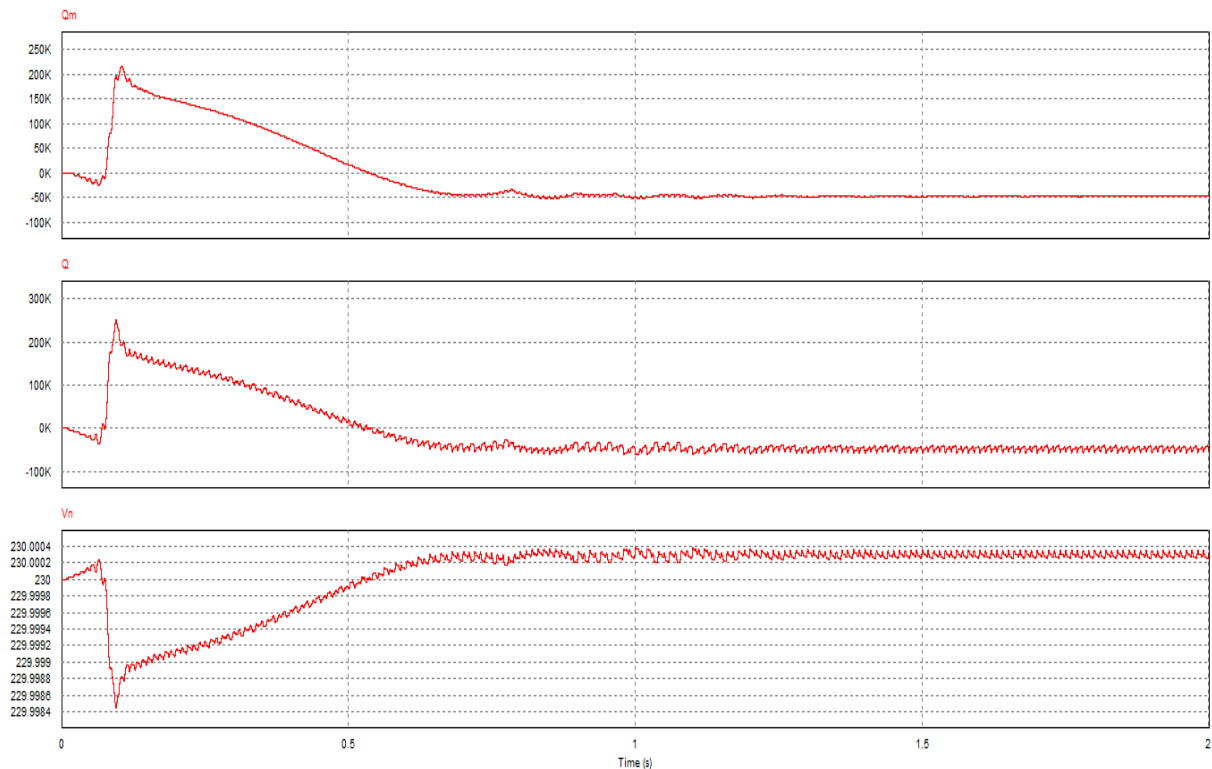
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι η τιμή του ρεύματος εξόδου ενεργής ισχύος μηδενίζεται πλήρως μέσω του PI ελεγκτή του συστήματος ελέγχου του ρεύματος, έτσι και η φόρτιση της μπαταρίας διατηρείται σταθερή μέσω του ίδιου ελέγχου. Στην εικόνα 33 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της ενεργής ισχύος τόσο της μετρούμενης όπως αυτή μετράτε από το βατόμετρο όσο και της υπολογίσιμης τιμής μέσω του συστήματος ελέγχου μας, επίσης παρουσιάζεται και η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.



Εικόνα 33: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης ενεργής ισχύος όπως και της συχνότητας του φορτίου (δικτύου).

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε η τιμή της μετρούμενης και της υπολογισμένης ενεργής ισχύος τροφοδότησης του δικτύου, όπως επίσης και η συχνότητα του δικτύου. Παρατηρώντας στην αρχή η συχνότητα είναι η ονομαστική χωρίς φορτίο στα 51Hz, ενώ όσο η τιμή της συχνότητας του δικτύου μειώνεται τόσο η τιμή την ενεργής ισχύος αυξάνεται, επομένως τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την ανάλυση που έγινε προηγουμένως στην ενότητα 5.1 σχετικά με την καμπύλης της στατικής χαρακτηριστικής μεταξύ ενεργής ισχύος – συχνότητας.

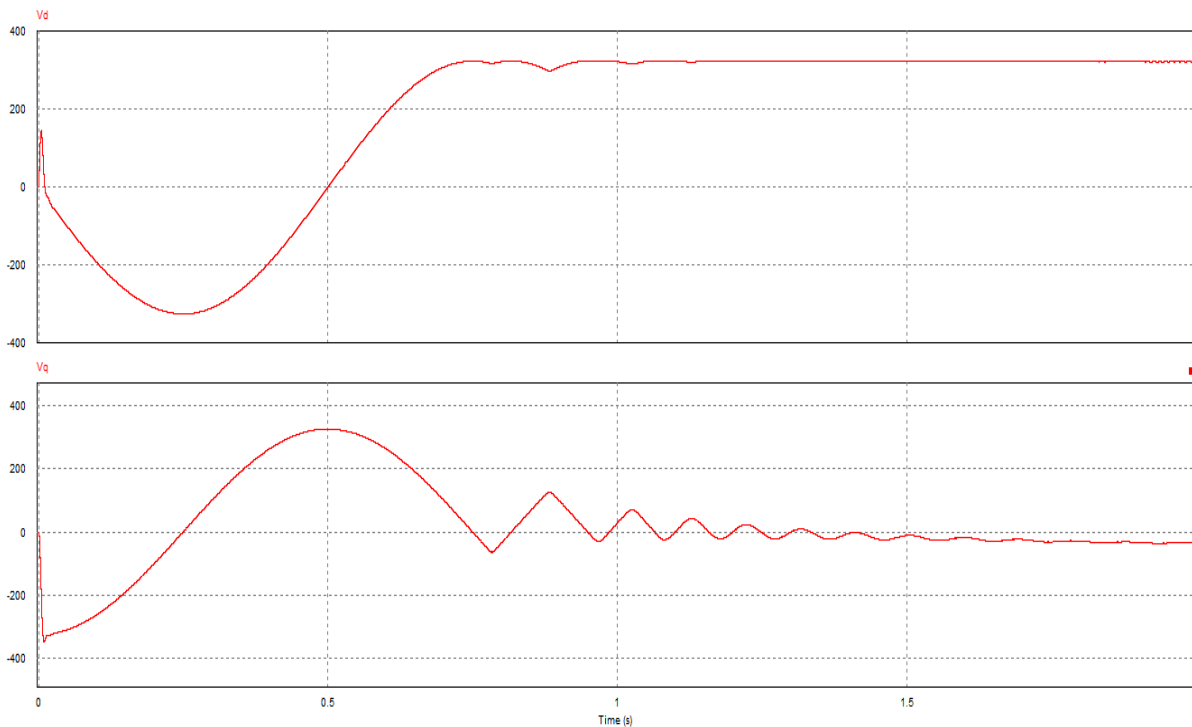
Στην εικόνα 34 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της προσομοίωσης τόσο της μετρούμενης όσο και της υπολογίσιμης τιμής μέσω του συστήματος ελέγχου της άεργης ισχύος του αντιστροφέα που τροφοδοτεί το φορτίο (δίκτυο), όπως επίσης και της μέγιστης τάσης εξόδου αυτού.



Εικόνα 34: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης της μετρούμενης και της υπολογίσιμης τιμής της άεργης ισχύος όπως και της μέγιστης τιμής αναφοράς της τάσης εξόδου (δικτύου).

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι τόσο η μετρούμενη όσο και η υπολογισμένη τιμή μέσω του συστήματος ελέγχου της άεργης ισχύος είναι ίδια. Παρατηρώντας, στην αρχή η τιμή της τάσης δεν είναι η ονομαστική όποτε η τιμή της άεργης ισχύος είναι θετική, ενώ όταν η τιμή της τάσης αυξάνεται στην ονομαστική η τιμή της άεργης ισχύος μειώνεται δηλ. η μπαταρία φορτίζεται.

Επομένως τα αποτελέσματα συμπίπτουν με την ανάλυση που έγινε προηγουμένως στην ενότητα 5.1 σχετικά με την καμπύλη της στατικής χαρακτηριστικής άεργης ισχύος – τάσης. Στην εικόνα 33 παρουσιάζεται η υπολογισμένη μέσω του ελέγχου τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου τόσο του φορτίου όσο και της μέγιστης τιμής αναφοράς άεργης ισχύος.



Εικόνα 35: Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης των υπολογίσιμων μέγιστων τιμών αναφοράς τάσης εξόδου του φορτίου και της άεργης ισχύος.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προέκυψε ότι η μέγιστη τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου είναι 325V, ενώ η μέγιστη τιμή αναφοράς της τάσης της άεργης ισχύος είναι κοντά στο μηδέν. Παρατηρώντας στην αρχή η τιμή της τάσης εξόδου του δικτύου δεν είναι η μέγιστη, οπότε η τιμή της τάσης εξόδου άεργης ισχύος είναι θετική, ενώ όταν η τιμή της τάσης αναφοράς φτάσει την μέγιστη η τιμή της άεργης ισχύος μειώνεται και γίνεται αρνητική κοντά στο μηδέν.

Επομένως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συμπίπτουν με την ανάλυση που έγινε προηγουμένως στην ενότητα 5.1 σχετικά με την μέγιστη τιμή αναφοράς της τάσης εξόδου τόσο του φορτίου όσο και της άεργης ισχύος, ενώ το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει στο 4ο σενάριο είναι ότι η μπαταρία λειτουργεί ως γεννήτρια για να παράγει την αναγκαία τάση επομένως καταναλώνει αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια συνεπώς και άεργη ισχύ λόγω του συντελεστή ισχύος 0.8 (δηλ. εκ φορτίζεται η μπαταρία), ενώ όταν η τιμή της τάσης αναφοράς εξόδου γίνει η μέγιστη τότε απορροφάται ηλεκτρική ενέργεια συνεπώς και άεργη ισχύς δηλ. την φόρτιση της μπαταρίας).

Όσον αφορά την μέγιστη τάση εξόδου σε περίπτωση της τροφοδότησης του δικτύου δηλ. η V_d προκύπτει 325V από την σχέση $V_{rms} * \sqrt{2}$ που ισούται με $230V * 1.41 = 325V$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1. Συμπεράσματα

Με την πάροδο των χρόνων παρατηρείται ολοένα και περισσότερο μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα. Ωστόσο, οι ΑΠΕ λειτουργούν μόνο όταν υπάρχει διαθέσιμη η πρωτεύουσα πηγή (π.χ. άνεμος, ήλιος), ενώ παρουσιάζουν έντονη μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, εφόσον ο ρυθμός αύξησης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό αύξησης των φορτίων, αποσύρονται οι ρυπογόνες συμβατικές μονάδες παραγωγής (π.χ. λιγνιτικές), οι οποίες βασίζονται σε σύγχρονες γεννήτριες. Το αποτέλεσμα είναι να εμφανίζονται πλέον σημαντικά προβλήματα στο ηλεκτρικό σύστημα και δίκτυο, τα οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν οι αντίστοιχοι Διαχειριστές.

Τα προβλήματα αυτά εκτός από τη μείωση της αξιοπιστίας και της ποιότητας ισχύος, αφορούν και προβλήματα στη συχνότητα, την τάση, τη λειτουργία των συστημάτων προστασίας, κτλ.

Μία λύση στα προβλήματα που προαναφέρθηκαν είναι η τοποθέτηση ελεγχόμενων ενεργειακών πόρων, όπως π.χ. μπαταρίες. Οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν την ενέργεια όταν αυτή είναι περίσσεια και να την τροφοδοτούν όταν υπάρχει έλλειψη. Επιπλέον, οι μπαταρίες μπορούν να συνεισφέρουν με την παροχή επικουρικών υπηρεσιών, όπως στήριξη της τάσης και της συχνότητας και συνεισφορά στην εκκαθάριση των σφαλμάτων.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία προσεγγίζει το πρόβλημα των ΑΠΕ προτείνοντας μια μεθοδολογία ελέγχου του αντιστροφέα της μπαταρίας, η οποία θα προσομοιώνει τη λειτουργία των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε ο έλεγχος με στατικές χαρακτηριστικές, σύμφωνα με τον οποίο η συχνότητα ρυθμίζεται με την ενεργό ισχύ ($P-f$) και η τάση με την άεργο ισχύ ($Q-V$). Η κλίση των στατικών χαρακτηριστικών υπολογίστηκε σύμφωνα με την ονομαστική φαινόμενη ισχύ του μετατροπέα της μπαταρίας. Ο σκοπός του ελέγχου είναι να τροφοδοτεί ένα φορτίο με τάση και συχνότητα εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Επιπλέον, να μπορεί να συνδεθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο και να ανταλλάσσει ενεργό και άεργο ισχύ σύμφωνα με τις παραμέτρους του δικτύου.

Το κύκλωμα υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα PSIM. Υλοποιήθηκε ένας μονοφασικός αντιστροφέας 5kW με μονοφασική τάση ελέγχου, ώστε η έξοδος να έχει μειωμένες αρμονικές και να απαιτείται η τοποθέτηση ενός μικρότερου φίλτρου. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι φορτίων: ωμικό φορτίο, ωμικό-επαγωγικό φορτίο και ωμικό-

επαγωγικό-χωρητικό φορτίο. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνεται ότι ο έλεγχος μπορεί να εγχεί την απαιτούμενη ενεργό και άεργο ισχύ που απαιτεί το φορτίο, ώστε να λειτουργεί εντός των ορίων τάσης ($\pm 10\%$) και συχνότητας (49-51Hz). Επιπλέον, όταν συνδέθηκε το ηλεκτρικό δίκτυο, το σύστημα ελέγχου προσαρμόστηκε αυτόματα ώστε να ανταλλάσσει ενεργό και άεργο ισχύ σύμφωνα με τις παραμέτρους του δικτύου (230V, 50Hz).

Βάσει των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, ο έλεγχος που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει τη λειτουργία μιας συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας και άρα να συνεισφέρει στην εξάλειψη των αρνητικών επιπτώσεων των ΑΠΕ και να επιτρέψει στην μεγαλύτερη διείσδυση τους στα ηλεκτρικά δίκτυα.

6.2. Περαιτέρω έρευνα

Ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται η συνεχής διερεύνηση του συνόλου των ζητημάτων καθώς πάντα προκύπτουν νέα στοιχεία από την έρευνα και με τον τρόπο αυτό έχουμε οδηγηθεί στην εξέλιξη της τεχνολογίας. Ιδιαίτερα σημαντικό θα ήταν να ερευνηθεί στο μέλλον ο παραλληλισμός δυο ή περισσότερων τέτοιων αντιστροφών για τροφοδότηση διαφόρων φορτίων με διαφορετικές τιμές των κλίσεων των στατικών χαρακτηριστικών, για διατυπωθεί ο τρόπος με τον οποίο κατανέμεται η ενεργός και η άεργος ισχύς στο φορτίο. Επιπλέον, μελλοντικά θα μπορούσε να προσαρμοστεί ο έλεγχος σε τριφασικό μετατροπέα μπαταρίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Δημουλιάς Χάρης, Σημειώσεις Σύγχρονων Μηχανών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Ξένη Βιβλιογραφία

Abdul A., Altahir A., (2020). Park and Clark Transformations Park and Clark Transformations: A Short Review., DOI: 10.13140/RG.2.2.20287.46241

Benhmad François and Jacques Percebois (2018). Photovoltaic and wind power feed-in impact on electricity prices: The case of Germany, Energy Policy, 119: 317-326.

Boden, T.A., Marland, G. and Andres, R.J. (2009). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001

Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S. (2010). Electric power quality, Ch12. Springer Dordrecht Heidelberg London, ISBN 978- 94 -007-0634 -7

Collins English Dictionary - Complete & Unabridged 2012 Digital Edition © William Collins Sons & Co. Ltd. 1979, 1986 © HarperCollins Publishers 1998, 2000, 2003, 2005, 2006, 2007, 2009, 2012.

Dugan RC, McGranaghan MF, Santoso S, Beaty HW. (2002). Electrical power systems quality. 2nd ed. McGraw-Hill; 2002.

IEA (2002). Impact of power penetration from photovoltaic power systems in distribution networks, International Energy Agency, task V, report IEA-PVPS T5-10: 2002

Krause, P., O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and S. Pekarek. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Piscataway, NJ: Wiley-IEEE Press.

Mettam, G.R., Adams, L.B. (1999). How to prepare an electronic version of your article, in: B.S. Jones, R.Z. Smith (Eds.), Introduction to the Electronic Age, E-Publishing Inc., New York, 281–304.

Oureilidis, K. O., Gkavanoudis S. I., Demoulias, C. S. (2016). Impedance-based adaptive droop method in islanded microgrids with three-phase and single-phase converters for line loss reduction, 2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Trondheim, Norway, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/COMPEL.2016.7556697.

Oureilidis K. O., Demoulias, C. S. (2012). Microgrid wireless energy management with energy storage system, 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Uxbridge, UK, 2012, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC.2012.6398684.

Strunk W., White, Jr., E.B. (1979). The Elements of Style, third ed., Macmillan, New York.

Zahedi A., (2011). A review of drivers, benefits, and challenges in integrating renewable energy sources into electricity grid., Renewable and sustainable energy reviews., 15: 4775-4779.

Πηγές στο Διαδίκτυο

ΑΔΜΗΕ (2023). Η εταιρία με μία ματιά., Διαθέσιμο στο: <https://www.admie.gr/i-etaireia/me-mia-matia>

ΑΠΕ (2011). Μηνιαίο Δελτίο ΑΠΕ, Δεκέμβριος 2011, ΔΕΣΜΗΕ, διαθέσιμο από: <http://www.desmie.gr/ape-sithya/miniaia-deltia-ape/>.

CIA. (2012). The world fact book. Available at: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html>

Δεληγιάννης Κ. (2023). Έχουν γίνει ήδη στο ΔΕΔΔΗΕ 3.900 αιτήσεις σύνδεσης για φωτοβολταϊκά σε στέγες – Τα 1800 αιτήματα περιλαμβάνουν μπαταρίες., Διαθέσιμο στο: <https://energypress.gr/news/stis-3900-oi-aitiseis-syndesis-gia-ta-fotovoltaika-stis-steges-1800-aitimata-gia-oikiaka>

European Environment Agency. (2012). Energy efficiency and energy consumption in the household sector. Copenhagen, Denmark: EEA 2012. Available from: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/energy-efficiency-and-energy-consumption-2/assessment-2>

ΕΛΕΤΑΕΝ (2022). Η στατιστική της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα για το Α΄ εξάμηνο του 2022., Διαθέσιμο στο: <https://eletaen.gr/d-t-statistiki-eletaen-first-semester-2022/>

-
- Human development report (2008). United Nations Development Programme. New York 2007.
http://hdr.undp.org/sites/default/files/reports/268/hdr_20072008_en_complete.pdf
- IEA (2023). Renewable Energy. <http://www.iea.org/aboutus/faqs/renewableenergy/>
- van der Geer, J. Hanraads, J.A.J. Lupton, R.A. (2000). The art of writing a scientific article, *J. Sci. Commun.* 163:51–59.
- Loeb., S. (1975). Osmotic power plants. *Science*. Vol. 189 no. 4203 pp. 654-655. 22 August 1975. <http://www.sciencemag.org/content/189/4203/654>
- MEECC. (2012). Electrical power production. Athens, Greece; Available from: <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=277&language=el-GR>.
- Privacy Shield Framework (2023). Greece country commercial guide - Greece Renewable Energy. Available at: <https://www.privacyshield.gov/article?id=Greece-Renewable-Energy>