



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Μέτρηση Αρμονικών και Υπεραρμονικών Συνιστωσών Ρεύματος  
σε Φ/Β Εγκαταστάσεις, και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων**

**Φοιτητής: ΤΖΑΤΖΑΛΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ**

**ΑΜ: 483 46271**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Σ. ΨΩΜΟΠΟΥΛΟΣ**

**Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Current Harmonic and Supraharmonic Measurements  
on PV Installations, and Evaluation of Results**

**Student: TZATZALAS PARASKEVAS ALEXANDROS**  
**Registration Number: 483 46271**

**Supervisor**

**CONSTANTINOS S. PSOMOPOULOS**  
**Professor**

**ATHENS-EGALEO, JULY 2024**

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

(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)	(Όνοματεπώνυμο), (βαθμίδα)
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

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

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΤΖΑΤΖΑΛΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ,  
ΙΟΥΛΙΟΣ, 2024**

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

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

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η ΤΖΑΤΖΑΛΑΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ του ΣΤΕΦΑΝΟΥ, με αριθμό μητρώου 483 46271 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

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

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

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

Ο/Η Δηλών/ούσα  
Τζατζάλας Παρασκευάς Αλέξανδρος



*Αφιερώνεται σε όλους τους φοιτητές που κατά τη διάρκεια των σπουδών τους είχαν τη δυνατότητα απαλλαγής από πτυχιακές & διπλωματικές εργασίες.*

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Ψωμόπουλο για την εμπιστοσύνη ως προς την ανάθεση του θέματος, καθώς και για την συνέπειά του καθ'όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Δημήτριο Μπάρκα για την συνεισφορά του στο κομμάτι των μετρήσεων, για τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε για να μου εξηγήσει τα μετρητικά όργανα, τη μέθοδο των μετρήσεων αλλά και σημαντικό μέρος του κώδικα και τέλος, για την όλη υποστήριξή του σε θέματα της σχολής και όχι μόνο.

Ευχαριστώ την ακαδημαϊκή υπότροφο κυρία Ανθούλα Μέντη για τις συμβουλές, τις διορθώσεις και την καθοδήγηση ως προς τη συγγραφή του κειμένου της διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου, τους φίλους μου, οποιονδήποτε με βοήθησε και οποιονδήποτε αποτέλεσε κίνητρο για μένα ακόμη και χωρίς να το ξέρει.

Ευχαριστώ τους γονείς και τον αδελφό μου.

## Περίληψη

Στα ηλεκτρικά συστήματα το φαινόμενο της αρμονικής παραμόρφωσης αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα ποιότητας ισχύος. Είναι μια περιοδική διαταραχή που εμφανίζεται στην τάση και στο ρεύμα και επιφέρει άμεσες αλλά και μακροπρόθεσμες επιπτώσεις. Τα μη γραμμικά φορτία όπως οι ηλεκτρονικές συσκευές, οι φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων, οι σύγχρονοι λαμπτήρες κ.α. αποτελούν στοιχεία παραγωγής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος.

Τα διεθνή πρότυπα ποιότητας ισχύος προβλέπουν στις σχετικές οδηγίες μέτρα για την καταστολή της αρμονικής παραμόρφωσης που περιορίζονται σε εύρος έως και τα 2.5 kHz για συστήματα των 50 Hz. Παρόλα αυτά, αρμονικές με σημαντικό μέγεθος παρατηρούνται συστηματικά σε ανώτερες ζώνες και πλέον, από το 2013, λαμβάνουν διαφορετική αντιμετώπιση μπαίνοντας στην κατηγορία των υπεραρμονικών, δηλαδή συνιστώσες από 2 έως 150 kHz.

Στην παρούσα εργασία γίνονται μετρήσεις συνιστωσών ρεύματος σε αυτό το μεγάλο φάσμα συχνοτήτων για το οποίο δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή κανονισμός που να θέτει όρια. Παράλληλα καταγράφονται και οι συμβατικές αρμονικές για να διαπιστωθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με τα ισχύοντα πρότυπα. Το σύστημα που εξετάζεται αποτελείται από συστοιχίες Φ/Β πλαισίων που τροφοδοτούν το δίκτυο μέσω τριφασικού αντιστροφέα ισχύος 10 kW. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση δίνουν την πρόσθετη δυνατότητα λήψης δεδομένων υπό διαφορετικές συνθήκες (περιβαλλοντικές και κατά συνέπεια διαφορετικές συνθήκες παραγωγής), δίνοντας έτσι μια καλύτερη εικόνα για την παραγωγή και τον μηχανισμό διάδοσης των αρμονικών. Οι μετρήσεις ρεύματος γίνονται δειγματοληπτικά μέσω παλμογράφου ενώ η ανάλυση σε αρμονικές συνιστώσες γίνεται με τη βοήθεια του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (αλγόριθμος FFT) μέσω MatLab.

## Λέξεις – κλειδιά

Αρμονική παραμόρφωση, Υπεαρμονικές, Φωτοβολταϊκά, Τριφασικός αντιστροφέας, Διαμόρφωση σήματος, Δείκτης παραμόρφωσης THD%, Μετρήσεις ρεύματος, Ανάλυση Fourier/FFT, Μηχανισμός δημιουργίας υπεαρμονικών.

## **Abstract**

In the field of electrical systems, as far as power quality is concerned, harmonic distortion constitutes one of the most significant problems. Appearing in voltage and current as a periodic phenomenon, harmonic distortion leads to direct and long term negative consequences as well. The non-linear loads such as the electric vehicle chargers, industrial size converters, household devices and so on, produce current harmonic distortion.

In the national power quality standards dealing with harmonic distortion, the guidelines are limited to 2.5 kHz referring on 50 Hz systems. However, harmonics with significant magnitude are recorded in a consistent basis in a spectrum that fluctuates within thousands of kHz and as a result, since 2013, these components are categorized as “supraharmonics” and treated as a special research field. This frequency range is defined between 2–150 kHz.

The present thesis aims at the measurement of current harmonic components in this frequency spectrum for which currently there are no specific guidelines. In the same time, low frequency conventional harmonics are measured in order to verify that they comply with the national standards. The system being considered consists of PV arrays that supply the grid through a 10 kW inverter. As the environmental conditions and the emissions change during the measurement process, the data being captured are varying widely and as a result extensive information is provided that contributes to a deeper understanding of the harmonic propagation. The current signals are being digitally recorded with the appropriate sampling frequency by oscilloscope and current probes, while the technical analysis is being implemented via Matlab and Fast Fourier Transform algorithm.

## **Keywords**

Harmonic Distortion, Supraharmonics, Photovoltaics, Three-phase Inverter, Pulse Width Modulation, Harmonic Distortion Index  $THD_{\%}$ , Current Measurements, Fourier Analysis, Fast Fourier Transform, Supraharmonics Generation and Propagation Mechanism



## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>12</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>13</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>17</b>
<b>Στόχος της εργασίας .....</b>	<b>18</b>
<b>Διάρθρωση.....</b>	<b>18</b>
<b>Ορισμοί .....</b>	<b>19</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Αρμονική Παραμόρφωση.....</b>	<b>23</b>
<b>1.1 Αιτίες Εμφάνισης.....</b>	<b>24</b>
1.1.1 Συσκευές Ηλεκτρικού Τόξου .....	25
1.1.2 Τροφοδοτικά.....	26
1.1.3 Τριφασικοί μετατροπείς .....	27
1.1.4 Συστήματα Οδήγησης Κινητήρων.....	27
1.1.5 Μετασχηματιστές .....	28
<b>1.2 Επιπτώσεις Αρμονικής Παραμόρφωσης.....</b>	<b>29</b>
1.2.1 Θερμική Επίδραση / Αγωγοί.....	30
1.2.2 Ηλεκτρονικά Συστήματα / Τηλεπικοινωνίες.....	30
1.2.3 Σταθμοί/Υποσταθμοί .....	30
1.2.4 Πυκνωτές .....	31
<b>1.3 Δείκτες Αρμονικής Παραμόρφωσης .....</b>	<b>32</b>
1.3.1 Ενεργός Τιμή Μη Ημιτονοειδούς Κατάστασης.....	32
1.3.2 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση - Total Harmonic Distortion.....	33
1.3.3 Παραμόρφωση Ρεύματος TDD - Total Demand Distortion .....	33
<b>1.4 Πρότυπο IEEE 519 - 2022.....</b>	<b>34</b>
1.4.1 Σημείο Κοινής Σύνδεσης - (Point of Common Coupling) .....	34
1.4.2 Προτεινόμενα Όρια.....	35
1.4.3 Συντελεστές Διόρθωσης Μετατροπέων ρ-Παλμών.....	38
<b>1.5 Υπεραρμονικές.....</b>	<b>38</b>
1.5.1 Πηγές.....	38
1.5.2 Εμπέδηση Συστήματος .....	40
1.5.3 Αντιστροφείς Φωτοβολταϊκών .....	41
1.5.4 Μοντέλο n Παράλληλων Αντιστροφέων .....	43
1.5.5 Επιπτώσεις Υπεραρμονικών .....	45
1.5.6 Μοντελοποίηση .....	46
<b>2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Σήματα .....</b>	<b>47</b>
<b>2.1 Περιγραφή στο Πεδίο της Συχνότητας.....</b>	<b>47</b>
<b>2.2 Σειρές Fourier .....</b>	<b>48</b>
<b>2.3 Μετασχηματισμός Fourier .....</b>	<b>50</b>
2.3.1 Ανάλυση.....	50
2.3.2 Ιδιότητες.....	52
2.3.3 Μ/Σ Fourier Διακριτού Χρόνου (DFT) .....	53
<b>2.4 Μετατροπή Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό (Analog to Digital) .....</b>	<b>54</b>
2.4.1 Θεώρημα Δειγματοληψίας.....	54
2.4.2 Κρουστική Παλμοσειρά .....	55
2.4.3 Κβάντιση / Κωδικοποίηση .....	56
<b>2.5 Φίλτρα.....</b>	<b>57</b>
2.5.1 Φίλτρα Επιλογής Συχνοτήτων.....	57

<b>3</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Βασικές Αρχές και Λειτουργία Φ/Β Γεννήτριας.....</b>	<b>59</b>
3.1.1	Λειτουργία .....	60
3.1.2	Μοντελοποίηση Φ/Β Στοιχείου .....	61
3.1.3	Χαρακτηριστικές Καμπύλες .....	63
<b>3.2</b>	<b>Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος.....</b>	<b>64</b>
<b>3.3</b>	<b>Μετατροπέας DC/DC .....</b>	<b>65</b>
<b>3.4</b>	<b>Αντιστροφείς DC/AC.....</b>	<b>66</b>
3.4.1	Τύποι Αντιστροφών.....	68
3.4.2	Βαθμός Απόδοσης .....	71
3.4.3	Τοπολογίες Διασύνδεσης .....	72
<b>3.5</b>	<b>Διαμόρφωση DC/AC.....</b>	<b>73</b>
3.5.1	Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM.....	73
3.5.2	Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών SPWM .....	74
3.5.3	Τεχνική Εξάλειψης Επιλεγμένων Ανώτερων Αρμονικών SHE-PWM .....	75
3.5.4	Τεχνική Διαμόρφωσης Χωρικών Διανυσμάτων SVPWM.....	76
<b>3.6</b>	<b>Φίλτρα .....</b>	<b>77</b>
3.6.1	Γενικές Κατηγορίες .....	78
3.6.2	Φίλτρο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC).....	79
3.6.3	Χαμηλοπερατό Φίλτρο AC Γραμμής LCL.....	80
<b>3.7</b>	<b>Συγχρονισμός με το Δίκτυο .....</b>	<b>82</b>
<b>4</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Τεχνικές Μετρήσεων στην Περιοχή 2-150 kHz .....</b>	<b>84</b>
<b>4.1</b>	<b>Ιδιαιτερότητες Εύρους 2 – 150 kHz .....</b>	<b>84</b>
<b>4.2</b>	<b>Πρότυπα Μετρήσεων .....</b>	<b>85</b>
4.2.1	IEC 61000-4-7 .....	85
4.2.2	IEC 61000-4-30 .....	85
4.2.3	CISPR-16 .....	86
<b>4.3</b>	<b>Τεχνολογία και Όργανα .....</b>	<b>86</b>
4.3.1	Παλμογράφος .....	86
4.3.2	Ομοαξονικό Καλώδιο Μέτρησης Ρεύματος (Current Probe) .....	87
4.3.3	Μετασχηματιστής Ρεύματος (CT) .....	88
4.3.4	Μετρητές ρεύματος με αισθητήρες Hall .....	89
4.3.5	Μηδενισμός της Μαγνητικής Ροής / Zero Flux Method .....	89
4.3.6	Πηνίο Rogowski.....	90
4.3.7	Όργανο Μέτρησης Ηλιακής Ακτινοβολίας (W/m <sup>2</sup> ) .....	91
<b>4.4</b>	<b>FFT - (Fast Fourier Transform) .....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Μετρήσεις &amp; Αποτελέσματα .....</b>	<b>94</b>
5.1.1	Μετρητική Διάταξη .....	94
<b>5.2</b>	<b>Αρμονικές .....</b>	<b>95</b>
5.2.1	Μέτρηση .....	96
<b>5.3</b>	<b>Μετρήσεις Υπεραρμονικών .....</b>	<b>98</b>
5.3.1	Σετ Μετρήσεων [A] .....	99
5.3.2	Σετ Μετρήσεων [B] .....	111
5.3.3	Σετ Μετρήσεων [Γ].....	126
5.3.4	Υπεραρμονικές Συναρτήσσει Παραμέτρων .....	138

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>143</b>
<b>Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση .....</b>	<b>145</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....</b>	<b>146</b>
<b>Παράρτημα Α .....</b>	<b>149</b>
<b>Παράρτημα Β .....</b>	<b>159</b>

## Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 1: Όρια παραμόρφωσης τάσης [9]
- Πίνακας 2: Όρια παραμόρφωσης ρεύματος για συστήματα ονομαστικής τάσης 120 V που τροφοδοτούνται από γραμμή 69 kV [9]
- Πίνακας 3: Όρια παραμόρφωσης ρεύματος για συστήματα ονομαστικής τάσης μεγαλύτερης των 161 kV [9]
- Πίνακας 4: Προτεινόμενοι πολλαπλασιαστές αύξησης ορίων αρμονικών ρεύματος [9]
- Πίνακας A.1: Τεχνικές προδιαγραφές Sunny Tripower 10.0 [45]
- Πίνακας A.2: Τεχνικές προδιαγραφές μοντέλου SDS2304X [50]
- Πίνακας A.3: Τεχνικές προδιαγραφές Elditest CP6220
- Πίνακας A.4: Τεχνικές προδιαγραφές LP471PYRA.03 [49]
- Πίνακας A.5: Τεχνικές προδιαγραφές HD2102.2 [49]

## Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1.1: *Ανάλυση περιοδικού παραμορφωμένου σήματος σε αρμονικές συνιστώσες [2]*
- Εικόνα 1.2: *Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος μη γραμμικού φορτίου*
- Εικόνα 1.3: *Ισοδύναμο κύκλωμα συσκευής ηλεκτρικού τόξου [2]*
- Εικόνα 1.4: *Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος ηλεκτρικού τόξου*
- Εικόνα 1.5: *Κυματομορφή ρεύματος τριφασικού VSI μετατροπέα [2]*
- Εικόνα 1.6: *Συνιστώσες ρεύματος για τριφασικούς μετατροπείς 6-παλμών (πάνω) και 12-παλμών (κάτω) [43]*
- Εικόνα 1.7: *Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης πυρήνα μετασχηματιστή [2]*
- Εικόνα 1.8: *Απόκριση ρεύματος στον πυρήνα μετασχηματιστή [2]*
- Εικόνα 1.9: *Ροή αρμονικών ρεύματος από φορτία διαμέσου ακτινικού δικτύου [2]*
- Εικόνα 1.10: *Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα [2]*
- Εικόνα 1.11: *Ορισμός του σημείου κοινής σύνδεσης (PCC) στην μεριά υψηλής (αριστερά) και χαμηλής τάσης (δεξιά) [9]*
- Εικόνα 1.12: *Συνδυαστικά διαγράμματα χρόνου / συχνότητας για δύο διαφορετικά φορτία [6]*
- Εικόνα 1.13: *Μετρήσεις ρεύματος σε λαμπτήρα (δεξιά) και στο κοινό σημείο τριών λαμπτήρων (αριστερά) [6]*
- Εικόνα 1.14: *Φασματικό διάγραμμα αντιστροφέα Φ/Β για 45 μετρήσεις με εναλλαγή στον αριθμό των γειτονικών συσκευών [6]*
- Εικόνα 1.15: *Φασματικό διάγραμμα ρεύματος για αντιστροφέα Φ/Β που λειτουργεί μόνος (πάνω) και με αυξημένο αριθμό αντιστροφέων σε κοντινή απόσταση (κάτω) [38]*
- Εικόνα 1.16: *Ισοδύναμο μοντέλο δικτύου με αριθμό  $n$  συσκευών [12]*
- Εικόνα 1.17: *Ανηγμένο ρεύμα δικτύου και πυκνωτών σε συνάρτηση με τον αριθμό των παράλληλων αντιστροφέων [12]*
- Εικόνα 1.18: *Μεταβολή της ωμικής αντίστασης αγωγού μέσης τάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα [15]*
- Εικόνα 2.1: *Αναπαράσταση ημιτονικού σήματος στο πεδίο του χρόνου (αριστερά) και*

στο πεδίο συχνοτήτων (δεξιά)

- Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση παραμορφωμένου σήματος στο πεδίο του χρόνου (πάνω) και στο πεδίο της συχνότητας (κάτω)
- Εικόνα 2.3: Δειγματοληψία αναλογικού σήματος με συχνότητα  $1/T_s$
- Εικόνα 2.4: Δομικό διάγραμμα συστήματος προς δειγματοληψία και ανακατασκευή [4]
- Εικόνα 2.5: Φάσμα του σήματος  $x_p(t)$  για συχνότητα δειγματοληψίας  $\omega_s > 2\omega_M$  [4]
- Εικόνα 2.6: Ομοιόμορφη κβάντιση και κωδικοποίηση αναλογικού σήματος σε  $2^3 = 8$  στάθμες
- Εικόνα 2.7: Απόκριση συχνότητας ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου [4]
- Εικόνα 3.1: Δομικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος [31]
- Εικόνα 3.2: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος προερχόμενη από ηλιακή ενέργεια
- Εικόνα 3.3: Βασική δομή Φ/Β στοιχείου
- Εικόνα 3.4: Ηλεκτρικό ισοδύναμο Φ/Β στοιχείου [8]
- Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσεως
- Εικόνα 3.6: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης με παράμετρο την θερμοκρασία και την ηλιακή ένταση
- Εικόνα 3.7: Δομικό διάγραμμα σύνδεσης ελεγκτή MPPT
- Εικόνα 3.8: Κύκλωμα DC/DC μετατροπέα ανύψωσης
- Εικόνα 3.9: Δομικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα DC/AC [5]
- Εικόνα 3.10: Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με διόδους και IGBTs [5]
- Εικόνα 3.11: Παλμοί οδήγησης διακοπών αντιστροφέα πλήρους γέφυρας 2 επιπέδων (bipolar) [5]
- Εικόνα 3.12: Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα [7]
- Εικόνα 3.13: Φασική τάση 5 επιπέδων [7]
- Εικόνα 3.14: Τοπολογία κεντρικού αντιστροφέα [7]
- Εικόνα 3.15: Τοπολογία με αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων [7]

- Εικόνα 3.16: Συγκριτής παραγωγής σημάτων ελέγχου [19]
- Εικόνα 3.17: Φέρον σήμα & ανώτερες αρμονικές με  $m_f(\beta) > m_f(a)$
- Εικόνα 3.18: Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική SHE [7]
- Εικόνα 3.19: Αναπαράσταση χωρικών διανυσμάτων τριφασικού αντιστροφέα με τη μέθοδο SVPWM [7]
- Εικόνα 3.20: Ηλεκτρικό κύκλωμα (αριστερά) και απόκριση συχνότητας (δεξιά) παθητικού χαμηλοπερατού φίλτρου RC 1<sup>ης</sup> τάξης
- Εικόνα 3.21: DC Φίλτρο EMC (Schaffner FN 2200) [46]
- Εικόνα 3.22: LCL χαμηλοπερατό φίλτρο 3Φ γραμμής
- Εικόνα 3.23: Διάγραμμα Bode πλάτους/συχνότητας φίλτρων LCL και L [34]
- Εικόνα 3.24: Μονοφασικό κύκλωμα LCL παθητικής απόσβεσης
- Εικόνα 3.25: Δομή βρόγχου ελέγχου ρεύματος PLL διασυνδεδεμένου αντιστροφέα [35]
- Εικόνα 4.1: Μέτρηση ρεύματος με M/Σ (CT) [48]
- Εικόνα 4.2: Μέτρηση ρεύματος με αισθητήρα Hall [48]
- Εικόνα 4.3: AC/DC Zero flux method με αισθητήρα Hall [48]
- Εικόνα 4.4: Μέτρηση ρεύματος με πηνίο Rogowski [48]
- Εικόνα 4.5: Αισθητήρας πυρανόμετρου για μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Εικόνα 5.1: Διάταξη μετρήσεων ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα
- Εικόνα 5.2: Διάταξη μετρήσεων παραμέτρων
- Εικόνα 5.3: Χρονική συνάρτηση για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 5000 δείγματα
- Εικόνα 5.4: FFT μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 5000 δείγματα
- Εικόνα 5.5: FFT μέτρησης σε γραμμική κλίμακα
- Εικόνες 5.6 - 5.57: Χρονικές συναρτήσεις και FFT των μετρήσεων για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

Εικόνες 5.58 - 5.65: *Συναρτήσεις του ρεύματος με διάφορες παραμέτρους*

Εικόνα Α.1: *Τριφασικός αντιστροφέας SMA Tripower [45]*

Εικόνα Α.2: *Παλμογράφος Siglent Digital SDS2304X [50]*

Εικόνα Α.3: *Current Probe Elditest 6220*

Εικόνα Α.4: *Πυρανόμετρο LP471PYRA.03 [49]*

Εικόνα Α.5: *Ψηφιακό όργανο HD2102.2 [49]*

Εικόνα Α.6: *Θερμόμετρο υπέρυθρων UNI-T UT303B IR*



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξασφάλιση της ομαλής και εύρυθμης λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί μεταξύ άλλων την διαρκή παρατήρηση και έρευνα με στόχο την συνεχή βελτιστοποίηση της ποιότητας ισχύος που ρέει διαμέσου αυτών. Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας αλλά και των απαιτήσεων του καταναλωτικού κοινού, ο αριθμός των τερματικών συσκευών και των στοιχείων ελέγχου ολοένα και αυξάνεται κάνοντας το σύστημα όλο και πιο πολύπλοκο, γεγονός που το καθιστά πιο επιρρεπές σε αστάθειες. Την όσο το δυνατό καθαρότερη ισχύ επιθυμούν τόσο οι καταναλωτές για λόγους ασφάλειας και ομαλής χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών, όσο και κάθε παράγοντας που εμπλέκεται στο δίκτυο για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους.

Η προσπάθεια μείωσης των ρυπογόνων εκπομπών που διοχετεύονται στην ατμόσφαιρα και φαίνεται να προέρχονται από ορυκτά καύσιμα έχει οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών και συνεπώς έχει αυξηθεί τόσο η σχετική τεχνολογική ανάπτυξη των Α.Π.Ε. όσο και η έρευνα με σκοπό την βέλτιστη απόδοση. Συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που ενσωματώνουν τέτοιες τεχνολογίες, παρά την αυξημένη δημοτικότητά τους τα τελευταία χρόνια, δεν στερούνται της εμφάνισης προβλημάτων που σχετίζονται με την ποιότητα της ισχύος, κυρίως λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος από τα οποία κατά κανόνα συνοδεύονται.

Ένα πρόβλημα που υπήρχε ανέκαθεν στην ηλεκτρική ενέργεια είναι η αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος. Παρότι δεν αποτελούσε το μεγαλύτερο πρόβλημα στα πρώτα ηλεκτρικά συστήματα, η ανησυχία για αυτό εντείνεται με την πάροδο των χρόνων. Ο σχεδιασμός κάθε συστήματος από το στάδιο της παραγωγής μέχρι και τις τελικές καταναλώσεις είναι βασισμένος σε συγκεκριμένες λειτουργικές συνθήκες και ονομαστικά μεγέθη. Όταν στη μόνιμη κατάσταση οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος δεν είναι ιδανικές, αλλά για πολλούς λόγους που αναλύονται παρακάτω αποκλίνουν της ημιτονοειδούς μορφής, τότε η παραμόρφωση αυτή μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα αρμονικών συνιστωσών. Η ανοχή και τα επιτρεπτά όρια του ποσοστού παραμόρφωσης για κάθε περίπτωση καθορίζονται στα αντίστοιχα πρότυπα ασφαλείας.

Ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκουν αυτές οι συνιστώσες μπορούν να διακριθούν σε αρμονικές και υπεραρμονικές. Οι αρμονικές συνήθως δεν υπερβαίνουν τα 2500 Hz, δηλαδή για το Ελληνικό σύστημα των 50 Hz είναι συνιστώσες έως και 50<sup>ης</sup> τάξης. Έως και σήμερα οι αρμονικές ανώτερων τάξεων ( $n > 50$ ) θεωρούνται αμελητέες κατά την ανάλυση ενός συστήματος και η μελέτη σε ότι αφορά την ύπαρξη αρμονικής παραμόρφωσης περιορίζεται στην περιοχή των μερικών kHz. Στα πρότυπα ποιότητας ισχύος δεν προβλέπονται οδηγίες για συνιστώσες μεγαλύτερες της 50<sup>ης</sup>. Παρόλα αυτά, αφενός η ύπαρξη τέτοιων συχνοτήτων συναντάται πλέον σε μέρη του δικτύου που καταλαμβάνουν ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης, και αφετέρου η διάδοσή τους φαίνεται να ακολουθεί διαφορετική συμπεριφορά από αυτή

των συμβατικών αρμονικών γεγονός που καθιστά την περαιτέρω διερεύνηση πάνω σε αυτές τις συχνότητες αναγκαία.

Τα συστήματα μετάδοσης τηλεπικοινωνιών, οι φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων που ολοένα πληθαίνουν, ο οδικός φωτισμός, καθώς ακόμα και πολλές οικιακές συσκευές αποτελούν πηγές υπεραρμονικών. Επίσης, σε μια Φ/Β εγκατάσταση καταγράφονται συστηματικά τέτοιες συχνότητες κυρίως λόγω της ύπαρξης των αντιστροφών που κάνουν χρήση μεθόδων διαμόρφωσης παράγοντας υψίσυχνα σήματα. Οι τεχνικές PWM που εφαρμόζονται κάνουν μεθοδευμένη μετατόπιση του φέροντος σήματος σε ανώτερες συχνότητες (τυπικά 15 - 20 KHz) με σκοπό την ευκολότερη αποκοπή των συμβατικών αρμονικών, ενισχύοντας όμως έτσι τις υπεραρμονικές συνιστώσες.

### Στόχος της εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι η μέτρηση και ο εντοπισμός αρμονικών ρεύματος στο εύρος των αρμονικών έως 2.5 kHz αλλά και των υπεραρμονικών μεταξύ 2 - 125 kHz. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στην έξοδο τριφασικού αντιστροφέα μιας διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 10 kW. Θα διεξαχθούν σετ μετρήσεων ρεύματος με ψηφιακά όργανα υπό διαφορετικές συνθήκες και θα γίνει ανάλυση Fourier μέσω Matlab. Στη συνέχεια με βάση τις μετρήσεις και την φασματική ανάλυση:

- Γίνεται εντοπισμός των σημαντικότερων συνιστωσών ρεύματος.
- Γίνεται υπολογισμός των δεικτών αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος για συγκεκριμένο εύρος.
- Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα όρια που θέτουν τα πρότυπα ισχύος για τις συμβατικές αρμονικές.
- Γίνεται προσπάθεια αξιολόγησης των αιτιών εμφάνισης υπεραρμονικών ρεύματος σε συγκεκριμένες ζώνες συχνότητας.
- Γίνεται συσχέτιση των περιβαλλοντικών συνθηκών με τον μηχανισμό παραγωγής υπεραρμονικών.

### Διάρθρωση

Στο **1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του προβλήματος της αρμονικής παραμόρφωσης. Αναλύονται τα αίτια και οι επιπτώσεις, αναφέρονται οι βασικοί δείκτες καθώς επίσης και τα πρότυπα του οργανισμού IEEE που αφορούν στα επιτρεπτά όρια. Τέλος, γίνεται αναφορά στις υπεραρμονικές, δηλαδή το φάσμα εκείνο των αρμονικών που έχει διαφοροποιηθεί τα τελευταία χρόνια από τις συμβατικές και αποτελεί ξεχωριστό αντικείμενο έρευνας.

Στο **2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** αναπτύσσεται η βασική θεωρία σημάτων που σχετίζεται με την μαθηματική ανάλυση της αρμονικής παραμόρφωσης και την μέτρηση ηλεκτρικών σημάτων. Συγκεκριμένα αναλύονται οι σειρές Fourier, ο μετασχηματισμός Fourier, η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, το θεώρημα της

δειγματοληψίας και η μέθοδος καταγραφής αναλογικών σημάτων με ψηφιακά μέσα. Επίσης γίνεται αναφορά στο φίλτρα επιλογής συχνοτήτων, στις βασικές κατηγορίες αυτών και στις σχέσεις από τις οποίες περιγράφονται.

Στο **3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η δομή ενός διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος. Αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των Φ/Β, οι τύποι των αντιστροφών, οι τεχνικές διαμόρφωσης σήματος, ο έλεγχος της παραγόμενης ενέργειας, τα είδη των φίλτρων που εφαρμόζονται και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες μπορεί να γίνει σύνδεση στο δίκτυο.

Το **4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφονται οι τεχνικές μετρήσεων στην περιοχή 2-150 kHz. Γίνεται αναφορά στα υπάρχοντα πρότυπα μετρήσεων που καλύπτουν μέρος του εύρους των υπεραρμονικών, στον γρήγορο Μ/Σ Fourier με τον οποίο θα γίνει η ανάλυση, καθώς και στα είδη των οργάνων που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις ρεύματος.

Το **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιέχει τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Γίνεται παρουσίαση της διάταξης των μετρήσεων, των οργάνων μέτρησης καθώς και των συνθηκών κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν. Με τη βοήθεια του Matlab δίνονται τα αποτελέσματα σε γραφική απεικόνιση στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων, οι γραφικές συναρτήσεις διαφόρων μεταβλητών καθώς και τα βασικά μεγέθη σε απόλυτη και επί τοις εκατό τιμή.

## Ορισμοί

Με στόχο την ευκολότερη ανάγνωση και κατανόηση της εργασίας, παρατίθενται σε αλφαβητική σειρά οι ορισμοί των σημαντικότερων εννοιών.

**Αρμονική παραμόρφωση:** Οποιαδήποτε περιοδική παραμόρφωση εμφανίζεται σε ένα σήμα εξαιτίας της ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών.

**Αρμονική συνιστώσα:** Οποιοδήποτε στοιχείο μιας περιοδικής σειράς Fourier μεγαλύτερης της 1<sup>ης</sup> τάξης με συχνότητα ακέραιου πολλαπλάσιου της θεμελιώδους.

**Δείκτης THD%:** Ο λόγος της ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των RMS τιμών του παραμορφωμένου σήματος για αρμονικές συνιστώσες έως και 50<sup>ης</sup> τάξης, προς την τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας του σήματος εκφρασμένος επί τις εκατό.

**Δείκτης TDD%:** Ο λόγος της ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των RMS τιμών του παραμορφωμένου σήματος για αρμονικές συνιστώσες έως και 50<sup>ης</sup> τάξης, προς την τιμή της μέγιστης ζήτησης ρεύματος εκφρασμένος επί τις εκατό.

**Δευτερογενείς εκπομπές:** Το φάσμα αρμονικών/υπεραρμονικών που οφείλεται σε παράγοντες εκτός της υπό εξέταση συσκευής και προέρχεται από το δίκτυο.

**Διαμόρφωση AM (Amplitude Modulation):** Είναι μια τεχνική διαμόρφωσης κατά την οποία το πλάτος του φέροντος σήματος διαμορφώνεται ανάλογα με την πληροφορία του σήματος.

**Ενδιάμεσες αρμονικές συνιστώσες (interharmonics):** Οι συνιστώσες με συχνότητα μη-ακέραιου πολλαπλάσιου της θεμελιώδους.

**Επιδερμικό φαινόμενο:** Η ανομοιογενής κατανομή της πυκνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος στο εσωτερικό αγωγού με την αύξηση της συχνότητας.

**Ζώνη διέλευσης (passband):** Είναι το εύρος των συχνοτήτων των οποίων επιτρέπεται η διέλευση κατά την εφαρμογή ενός φίλτρου.

**Ζώνη φραγής (stopband):** Είναι το εύρος των συχνοτήτων που εξασθενούν ή αποκόπτονται κατά την εφαρμογή ενός φίλτρου.

**Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC):** Δείκτης που αναφέρεται στο κατά πόσο ένα στοιχείο σε ένα σύστημα Η.Ε. είναι συμβατό με το ηλεκτρομαγνητικό του περιβάλλον. Αυξημένη παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου θα οδηγήσει σε προβλήματα στο δίκτυο, για αυτό το λόγο τα αντίστοιχα επιτρεπτά όρια προβλέπονται στα αντίστοιχα πρότυπα.

**Θεμελιώδης συνιστώσα:** Το στοιχείο  $1^{η}$  τάξης μιας περιοδικής σειράς Fourier.

**Κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική:** Η πρώτη ανώτερη αρμονική συνιστώσα μετά τη θεμελιώδη με πλάτος μεγαλύτερο από 3% της θεμελιώδους. <sup>[5]</sup>

**Λόγος βραχυκύκλωσης:** Ορίζεται ως ο λόγος του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης προς τη μέγιστη ζήτηση ρεύματος της θεμελιώδους συχνότητας με αναφορά ένα συγκεκριμένο σημείο το οποίο μπορεί να είναι το σημείο κοινής σύνδεσης (PCC).

**Μέγιστη ζήτηση ρεύματος:** Η μέγιστη τιμή του ρεύματος που καταγράφεται στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) συμπεριλαμβάνοντας την συνεισφορά όλων εγκατεστημένων των φορτίων.

**Μετασχηματιστές ρεύματος (CT):** Σε αντιστοιχία με έναν Μ/Σ τάσης, ένας CT αναλαμβάνει την αναλογική αύξηση ή μείωση του εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω μαγνητικού πυρήνα και δύο τυλιγμάτων. Χρησιμοποιείται για την μέτρηση ρεύματος σε εφαρμογές χαμηλής και υψηλής τάσης.

**Μη γραμμικό φορτίο:** Ηλεκτρικό φορτίο του οποίου το ρεύμα δεν είναι ανάλογο της τάσης τροφοδοσίας.

**Ολική ηλιακή ακτινοβολία:** Global Horizontal Irradiance (GHI). Είναι η συνολική ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια και προκύπτει από το άθροισμα της άμεσης, της διάχυτης και της ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας.

**Παραμόρφωση:** Οποιαδήποτε απόκλιση από την ημιτονοειδή μορφή μιας ποσότητας εναλλασσόμενου ρεύματος.

**Πρωτογενείς εκπομπές:** Το φάσμα αρμονικών/υπεραρμονικών που οφείλεται στην υπό εξέταση συσκευή.

**Πυρανόμετρο:** Όργανο μέτρησης της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) υπό στερεά γωνία  $2\pi\text{sr}$ , υπολογίζοντας μήκη κύματος μεταξύ 300-3000 nm.

**Σημείο κοινής σύνδεσης (PCC):** Ορίζεται ως το σημείο εκείνο που διαχωρίζει το χώρο ευθύνης του καταναλωτή από αυτόν της διανομής και είναι συνήθως το κοντινότερο σημείο στον χρήστη από το οποίο μπορούν να τροφοδοτηθούν και άλλοι καταναλωτές.

**Συντονισμός:** Ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ταυτίζονται οι συχνότητες του διεγέρτη και του αντικειμένου με αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους. Είναι ένα από τα προβλήματα που προκαλούν οι αρμονικές και εμφανίζεται ως συνέπεια της αλληλοακύρωσης των σύνθετων αντιδράσεων του συστήματος.

**Συχνότητα αποκοπής:** Η συχνότητα στην οποία ένα σήμα φτάνει στο 50% της ισχύος του.

**Συχνότητα συντονισμού:** Η συχνότητα στην οποία εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού.

**Τριπλές αρμονικές (Triplen):** Οι αρμονικές συνιστώσες τάξης πολλαπλασίας του 3. Αποτελούν ειδική περίπτωση μιας και είναι στοιχεία μηδενικής ακολουθίας, δηλαδή ρέουν στον ουδέτερο αγωγό.

**Υπεραρμονικές συνιστώσες (Supraharmonics):** Χαρακτηρίζονται οι αρμονικές συνιστώσες με συχνότητα από 2 έως 150 kHz.

**Υπερδιαμόρφωση:** Παραμόρφωση του διαμορφωμένου σήματος όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι μεγαλύτερος από 1.

**Υποαρμονικές συνιστώσες (Subharmonics):** Χαρακτηρίζονται οι συνιστώσες με συχνότητα μικρότερη της θεμελιώδους.

**Φαινόμενο Hall:** Φαινόμενο που αναφέρεται στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου σε αγωγούς ρεύματος και συγκεκριμένα στην εμφάνιση διαφοράς δυναμικού που είναι κάθετη και στο ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιείται ως αισθητήρας σε πολλές εφαρμογές καθώς και σε μετρητές ρεύματος.

**Φίλτρα διαμόρφωσης συχνοτήτων:** Χαρακτηρίζονται τα γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα που αλλάζουν το πλάτος των συχνοτήτων του σήματος στο οποίο εφαρμόζονται.

**Φίλτρα επιλογής συχνοτήτων:** Χαρακτηρίζονται τα γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα που επιτρέπουν τη διέλευση μέρους των συχνοτήτων του σήματος στο οποίο εφαρμόζονται.

**Φωτοβολταϊκό φαινόμενο:** Η εμφάνιση ρεύματος που οφείλεται στην πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο.

**Current Source Inverters (CSI):** Αντιστροφείς DC/AC που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος.

**Euro Efficiency:** Είναι ένας σταθμισμένος βαθμός απόδοσης που αναφέρεται σε αντιστροφείς Φ/Β. Εισήχθη από τον JRC, αναφέρεται στις κλιματικές συνθήκες της Ίσπρα της Ιταλίας και δίνεται από τους κατασκευαστές μαζί με τον συμβατικό βαθμό απόδοσης.

**FFT:** Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform) είναι αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας διακριτής σειράς Fourier μιας ακολουθίας και το αντίστροφο.

**LTI (Linear Time Invariant):** Χαρακτηρίζονται τα σήματα που είναι γραμμικά και χρονικά ανεξάρτητα.

**MPPT (Maximum Power Point Tracking):** Τεχνική παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος σε φωτοβολταϊκά συστήματα με στόχο τη βέλτιστη απόδοση υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

**S/N Ratio:** Δείκτης που περιγράφει την παρουσία θορύβου σε ένα σήμα. Είναι ο λόγος της ισχύος του κύριου σήματος προς την ισχύ του θορύβου και συνήθως μετράται σε λογαριθμική κλίμακα dB.

**STC:** Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (Standard Test Conditions).

**STFT:** Ο μετασχηματισμός Fourier σύντομου χρόνου (Short Time Fourier Transform) χρησιμοποιείται για την τμηματική ανάλυση χρόνου-συχνότητας ενός σήματος που μεταβάλλεται με το χρόνο.

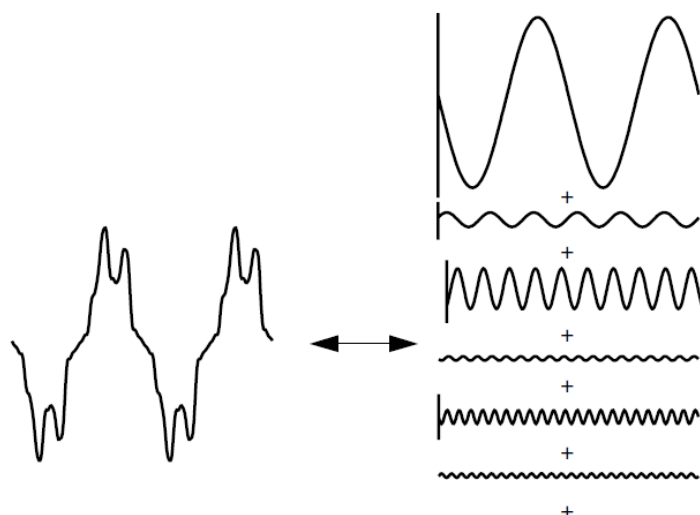
**Voltage Source Inverters (VSI):** Αντιστροφείς DC/AC που τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης.

**VSV:** Χωρικά διανύσματα τάσης (Voltage Space Vectors). Δημοφιλής τεχνική στον έλεγχο ηλεκτρικών σημάτων που πραγματοποιείται μέσω των μετασχηματισμών Clarke και Park.

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Αρμονική Παραμόρφωση

Υπάρχουν πολλών ειδών διαταραχές που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας προκαλώντας ανεπιθύμητες καταστάσεις στους καταναλωτές και προσδίδοντας στο σύστημα επιπλέον έξοδα συντήρησης και αποκατάστασης. Οι διαταραχές αυτές μπορεί να είναι είτε παροδικές (π.χ. βύθιση, υπέρταση, διακοπή κ.α.), είτε να εμφανίζονται κατ' επανάληψη παραμορφώνοντας την τάση ή το ρεύμα (π.χ. περιοδικές ακμές, αρμονικές κ.α.). Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης ή του ρεύματος σε αντίθεση με τις παροδικές διαταραχές είναι ένα φαινόμενο που εμφανίζεται στην μόνιμη κατάσταση και έχει διαρκή παρουσία. Οι εταιρίες παραγωγής και διανομής προσπαθούν να παρέχουν τάση όσο το δυνατόν πιο κοντά γίνεται σε καθαρή μορφή ημιτόνου, ενώ η ανοχή στην απόκλιση από τα ονομαστικά μεγέθη οριοθετείται από τα αντίστοιχα αναγνωρισμένα πρότυπα. Μεγέθη όπως το πλάτος ή η συχνότητα της τάσης επιλέγονται με βάση την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος και διαφέρουν ανά χώρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η συχνότητα, η οποία στις Ευρωπαϊκές χώρες είναι 50 Hz ενώ στην Αμερική 60 Hz. Αρμονική παραμόρφωση μπορεί να υπάρχει στην τάση όπου κατά κύριο λόγο υπεύθυνο θεωρείται ότι είναι το σύστημα παραγωγής και διανομής, ή στο ρεύμα όπου εκεί ευθύνονται οι τερματικές συσκευές. Συνήθως η παρουσία αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος είναι εντονότερη κοντά στην πηγή που την δημιουργεί.

Όπως είναι γνωστό από την θεωρία των σημάτων, ένα περιοδικό σήμα συνεχούς χρόνου μπορεί να εκφραστεί ως ένα πεπερασμένο ή άπειρο άθροισμα ημιτόνων διαφόρων συχνοτήτων και πλάτους όπως συμβαίνει με το παραμορφωμένο σήμα της εικόνας 1.1. Με τον όρο αρμονικές εννοούνται όλες οι ημιτονοειδείς συνιστώσες που εμφανίζονται στην ανάλυση Fourier ενός παραμορφωμένου σήματος με συχνότητα ακέραιου πολλαπλάσιου της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος αυτού. Εάν  $f$  είναι η θεμελιώδης συχνότητα του σήματος, τότε με  $f_h$  συμβολίζεται η αρμονική συνιστώσα με συχνότητα  $f \cdot h$ , όπου  $h$  είναι ακέραιος. Οι αρμονικές συνιστώσες ανάλογα με την τάξη που ανήκουν μπορούν να διακριθούν σε άρτιες ( $2^{\text{η}}$ ,  $4^{\text{η}}$ ,  $6^{\text{η}}$ ..), περιττές ( $5^{\text{η}}$ ,  $7^{\text{η}}$ ,  $11^{\text{η}}$ ..) ή τριπλές ( $3^{\text{η}}$ ,  $9$ ,  $15^{\text{η}}$ ..).



Εικόνα 1.1: Ανάλυση περιοδικού παραμορφωμένου σήματος σε αρμονικές συνιστώσες <sup>[2]</sup>

Επίσης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και το εύρος του φάσματος που προκύπτει από την ανάλυση ενός παραμορφωμένου σήματος μπορούν να οριστούν επιμέρους κατηγορίες όπως:

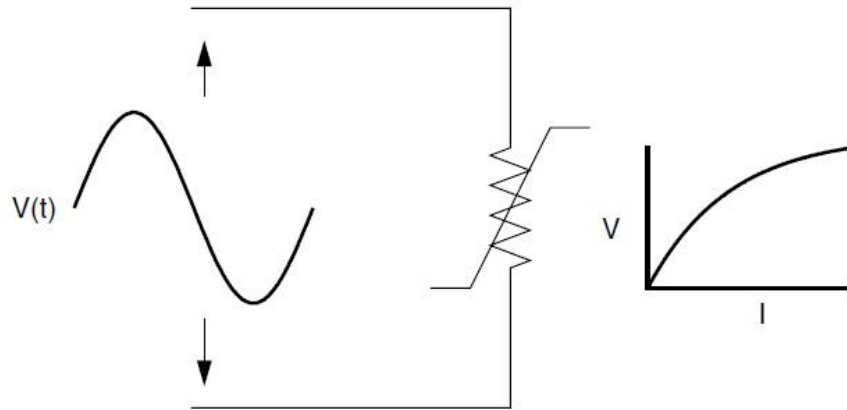
- ενδιάμεσες αρμονικές (interharmonics)
- υπό-αρμονικές (subharmonics)
- υπερ-αρμονικές (supraharmonics).

Η μη γραμμική συμπεριφορά των τερματικών καταναλώσεων φαίνεται να είναι η κύρια αιτία παραγωγής αρμονικής παραμόρφωσης στο ρεύμα. Η αντιμετώπιση και ο περιορισμός του ποσοστού παραμόρφωσης μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές όπως για παράδειγμα με τοποθέτηση κατάλληλων φίλτρων ή με την κατάλληλη συνδεσμολογία σε μετασχηματιστές και μηχανές για την αλληλοαναίρεση των τριπλών αρμονικών, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν πλειοψηφικό ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης.

## 1.1 Αιτίες Εμφάνισης

Ένα φορτίο που τροφοδοτείται από μια ημιτονοειδή τάση μπορεί να εμφανίζει ρεύμα ανάλογο ή μη ανάλογο της τάσης. Όταν το ρεύμα δεν είναι ανάλογο της τάσης όπως στο φορτίο της εικόνας 1.2 τότε το φορτίο χαρακτηρίζεται μη γραμμικό.





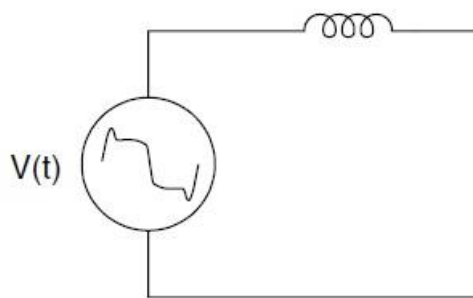
Εικόνα 1.2: Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος μη γραμμικού φορτίου

Μη γραμμικά φορτία είναι μεταξύ άλλων τα παρακάτω:

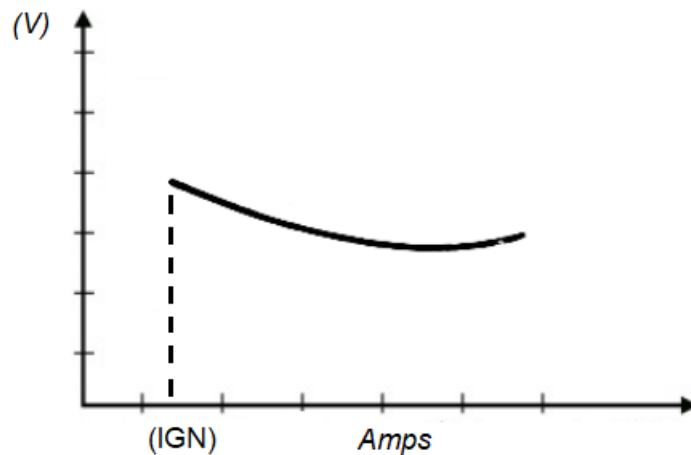
- Ανορθωτικά, αντιστροφείς, μετατροπείς ισχύος, συστήματα αδιάλειπτης παροχής (UPS), κ.α.
- Ηλεκτρονικά συστήματα που αποτελούνται από ημιαγωγά στοιχεία (δίοδοι, τρανζίστορ, FETs κ.α.).
- Συστήματα ελέγχου κινητήρων.
- Συσκευές που λειτουργούν με δημιουργία ηλεκτρικού τόξου (π.χ. λαμπτήρες φθορισμού).
- Μετασχηματιστές που λόγω των ιδιοτήτων του πυρήνα έχουν μη γραμμικές χαρακτηριστικές.

### 1.1.1 Συσκευές Ηλεκτρικού Τόξου

Εφαρμογές που βασίζουν τη λειτουργία τους στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μπορούν να χαρακτηριστούν ως γεννήτριες αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος και περιγράφονται με βάση το μοντέλο της εικόνας 1.3. Από την χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος της εικόνας 1.4 γίνεται φανερή η μη γραμμικότητα του φαινομένου αφού παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα του τόξου, τόσο η τάση μειώνεται λόγω της εν σειρά εμπέδησης δικαιολογώντας έτσι την έννοια της “αρνητικής” αντίστασης.



Εικόνα 1.3: Ισοδύναμο κύκλωμα συσκευής ηλεκτρικού τόξου <sup>[2]</sup>



Εικόνα 1.4: Χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος ηλεκτρικού τόξου

Αν και τα τελευταία χρόνια την θέση των λαμπτήρων φθορισμού έχουν αντικαταστήσει σε πολλές περιπτώσεις λαμπτήρες νέας τεχνολογίας, οι πρώτοι εξακολουθούν να καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης αφού κυριαρχούν στον οδικό φωτισμό αλλά και σε μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα όπως γραφεία και καταστήματα. Για την εκκίνηση του λαμπτήρα και την ηλεκτρική ένωση των ηλεκτροδίων του είναι απαραίτητη μια υψηλή τάση την οποία παράγει κατάλληλο στραγγαλιστικό πηνίο (ballast) που είναι επίσης υπεύθυνο και για τον περιορισμό του ρεύματος κατά την μόνιμη λειτουργία. Αποτελεί κύριο μέρος του λαμπτήρα και μπορεί να είναι μαγνητικό ή ηλεκτρονικό. Η συνολική παραμόρφωση που δημιουργείται από τους λαμπτήρες μαζί με το ballast περιορίζονται με τη χρήση φίλτρων. Ενδεικτικά ποσοστά THD% ενός λαμπτήρα φθορισμού κυμαίνονται μεταξύ 10-20%.

Εκτός από τους λαμπτήρες φθορισμού, σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι μηχανές ηλεκτροσυγκόλλησης καθώς και οι κλίβανοι παραγωγής ή επεξεργασίας μετάλλων ή κραμάτων (π.χ. χάλυβας), όπου το αντικείμενο θερμαίνεται μέσω ηλεκτρικού τόξου. Μια ιδιαιτερότητα που εμφανίζεται σε αυτήν την κατηγορία είναι ότι λόγω των συνεχών μεταβολών του ηλεκτρικού τόξου κατά την διάρκεια λειτουργίας δεν είναι εύκολο να αποκοπούν οι τριπλές αρμονικές μέσω κατάλληλης συνδεσμολογίας του μετασχηματιστή, όπως συμβαίνει στις υπόλοιπες περιπτώσεις.

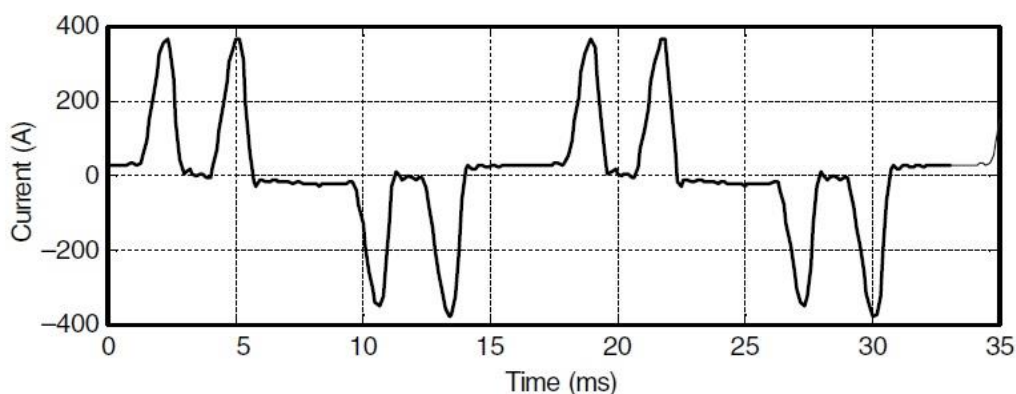
### 1.1.2 Τροφοδοτικά

Συνήθεις καταναλώσεις χαμηλής τάσης όπως οικιακές συσκευές, ηλεκτρονικοί υπολογιστές, ελεγκτές φόρτισης κ.α., συνδέονται στην παροχή χρησιμοποιώντας ειδικά τροφοδοτικά που μετατρέπουν την τάση του δικτύου στην κατάλληλη για την συσκευή. Η τεχνολογία των τροφοδοτικών αυτών περιλαμβάνει κυρίως ημιαγωγούς, δηλαδή μη γραμμικά στοιχεία όπως διόδους, τρανζίστορ, θυρίστορ και άλλους ελεγχόμενους διακόπτες. Πολλές από τις παραπάνω κατηγορίες φορτίων λειτουργούν με μια φάση, πράγμα που σημαίνει ότι η εμφάνιση συνιστωσών ρεύματος σε συχνότητες που δεν προβλέπεται θα επιβαρύνει τις καλωδιώσεις της εγκατάστασης και τον ουδέτερο του τριφασικού συστήματος από το οποίο τροφοδοτείται. Σε κάθε περίπτωση τα

τροφοδοτικά αυτά και ιδιαιτέρως τα μονοφασικά αποτελούν μια από τα μεγαλύτερες πηγές αρμονικών με δείκτη παραμόρφωσης που μπορεί να ξεπερνάει και το 50%.

### 1.1.3 Τριφασικοί μετατροπείς

Τόσο οι μετατροπείς που τροφοδοτούνται από πηγή ρεύματος (CSI) όσο και αυτοί που τροφοδοτούνται από πηγή τάσης (VSI) αποτελούν σημαντική πηγή αρμονικής παραμόρφωσης στο ρεύμα με την δεύτερη κατηγορία να καταγράφει υψηλότερα ποσοστά. Ένα πλεονέκτημα που εμφανίζουν οι τριφασικοί μετατροπείς έναντι των μονοφασικών είναι η έλλειψη των τριπλών αρμονικών. Η τροφοδοσία των VSI μετατροπέων σε αντιστοιχία με αυτήν των συμβατικών τριφασικών ανορθωτικών λαμβάνει ως είσοδο μια τριφασική πηγή τάσης η οποία οδηγείται μέσω ανορθωτικής διάταξης και κάποιου συνδυασμού αυτεπαγωγής - πυκνωτή. Η γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση του πυκνωτή δημιουργεί στο ρεύμα απότομες αυξομειώσεις που ομοιάζουν με ακίδες όπως στο ρεύμα του μετατροπέα της εικόνας 1.5 με αποτέλεσμα όσο πιο απότομες είναι αυτές οι μεταβολές, τόσο μεγαλύτερη να είναι η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος.

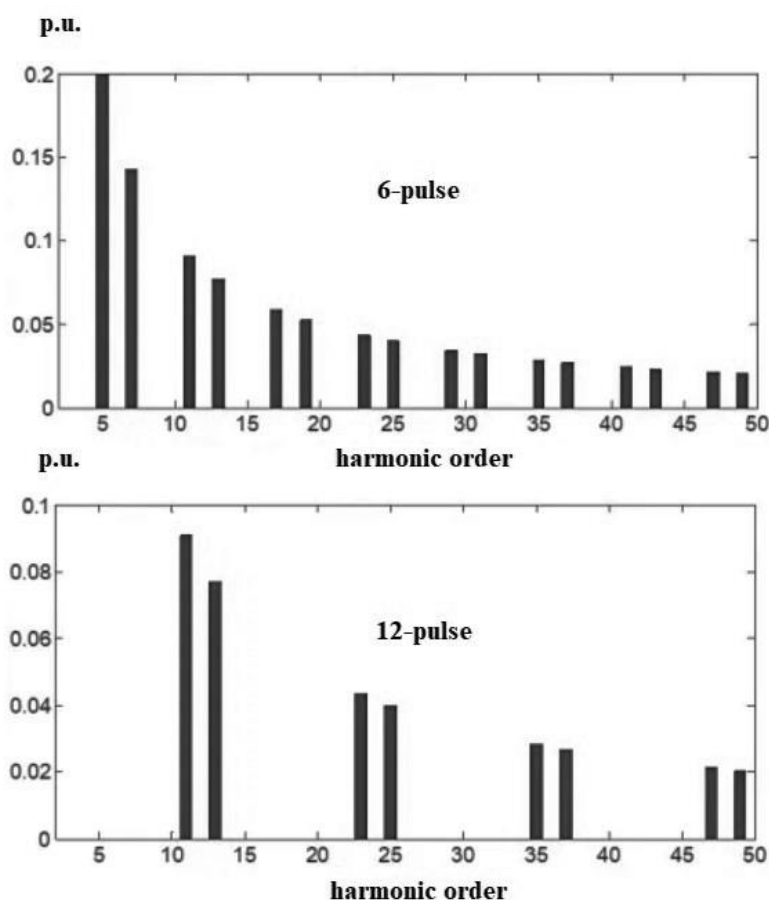


Εικόνα 1.5: Κυματομορφή ρεύματος τριφασικού VSI μετατροπέα [2]

### 1.1.4 Συστήματα Οδήγησης Κινητήρων

Για τον χειρισμό κινητήρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί ελεγκτές. Σε βιομηχανικό επίπεδο όπου οι κινητήρες αποτελούν τη βάση της εγκατάστασης αλλά και σε άλλες εφαρμογές όπως σε ανελκυστήρες κτιρίων, αντλητικά μηχανήματα κ.α., είναι απαραίτητη η ελεγχσιμότητα παραμέτρων του κινητήρα όπως η ταχύτητα περιστροφής ή αποδιδόμενη ροπή. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ρύθμισης της συχνότητας ή της τάσης τροφοδοσίας και υλοποιείται με τη βοήθεια ενός τέτοιου ελεγκτή. Όπως και οι περισσότεροι μετατροπείς, οι ελεγκτές κινητήρων αποτελούνται από ημιαγωγά στοιχεία με ισχύ ανάλογη του κινητήρα και ελέγχονται μέσω ηλεκτρονικών παλμών οδήγησης. Εφαρμόζοντας κατάλληλο σχεδιασμό (π.χ. 6 παλμών, 12 παλμών κ.α.) μπορεί να περιοριστεί σημαντικό μέρος των αρμονικών που δημιουργείται και το οποίο δεν είναι σταθερό,

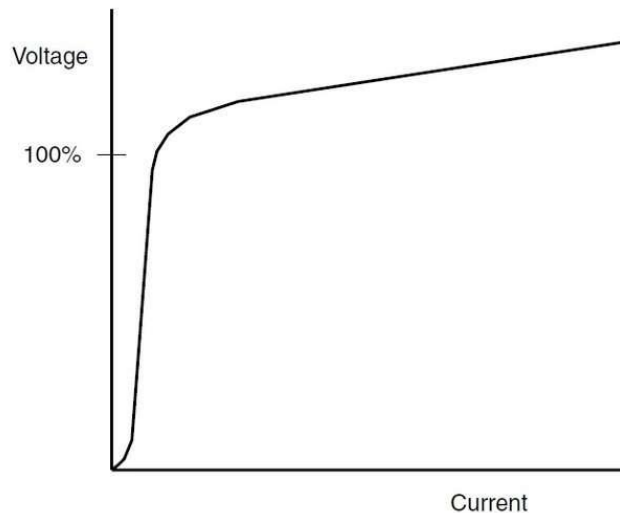
αλλά εξαρτάται από λειτουργικές συνθήκες όπως η ταχύτητα, η ροπή κ.α. Στην εικόνα 1.6 φαίνεται η διαφορά στο αρμονικό περιεχόμενο μεταξύ των τοπολογιών 6 και 12 παλμών.



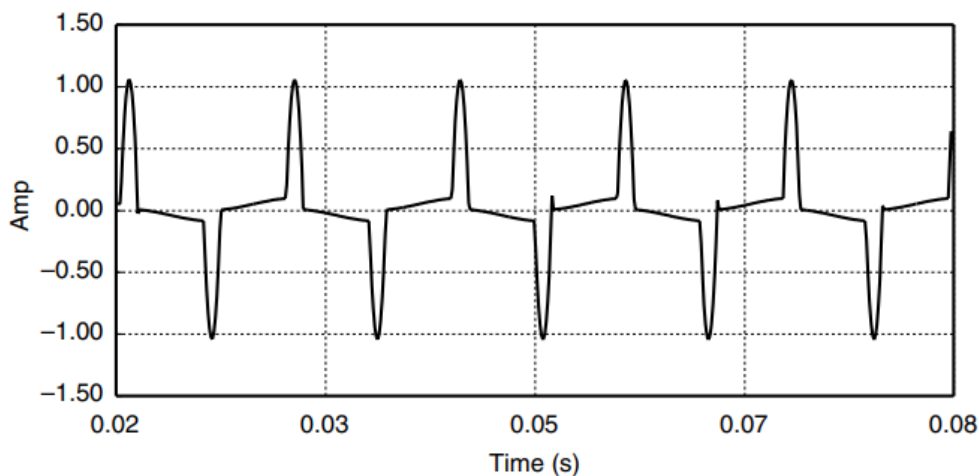
Εικόνα 1.6: Συνιστώσες ρεύματος για τριφασικούς μετατροπείς 6-παλμών (πάνω) και 12-παλμών (κάτω) <sup>[38]</sup>

### 1.1.5 Μετασχηματιστές

Οι χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος στοιχείων που αποτελούνται από πυρήνα σιδήρου, όπως των μετασχηματιστών αλλά και των ηλεκτρικών μηχανών είναι μη γραμμικές εξαιτίας του μαγνητικού κορεσμού που δημιουργείται κατά την διέλευση του ρεύματος. Τυπική χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος σιδηρομαγνητικού υλικού αποτελεί η καμπύλη της εικόνας 1.7, ενώ στην εικόνα 1.8 φαίνεται η απόκριση ρεύματος στον πυρήνα μετασχηματιστή.



Εικόνα 1.7: Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος πυρήνα μετασχηματιστή <sup>[2]</sup>



Εικόνα 1.8: Απόκριση ρεύματος στον πυρήνα μετασχηματιστή <sup>[2]</sup>

Το σημείο λειτουργίας των μετασχηματιστών ισχύος επιλέγεται με βάση παράγοντες όπως οι απώλειες κενού φορτίου, ο θόρυβος κ.α., ενώ συνήθως βρίσκεται ελάχιστα κάτω από το σημείο καμπής της καμπύλης κορεσμού. Παρότι σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας η παραμόρφωση που παράγεται από έναν μετασχηματιστή είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη που παράγεται από έναν μετατροπέα ή μια συσκευή τόξου, η ύπαρξη πολυάριθμων μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ποιότητα του ρεύματος που διαδίδεται μέσα από αυτό.

## 1.2 Επιπτώσεις Αρμονικής Παραμόρφωσης

Συνήθως το ποσοστό της παραμόρφωσης που επιτρέπεται να κυκλοφορεί σε ένα δίκτυο περιορίζεται σε αρκετά μικρά επίπεδα και συνεπώς μεγάλη μερίδα καταναλωτών όπως οι οικιακοί που κάνουν χρήση απλών συσκευών μικρής ισχύος δεν πάσχουν από σοβαρά προβλήματα. Ιδιαίτερη μέριμνα θα πρέπει να λάβουν οι μεγάλοι καταναλωτές όπως οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τα νοσοκομεία, οι επιχειρήσεις τηλεπικοινωνιών, καθώς

λειτουργούν σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος με σαφώς πιο ευαίσθητο εξοπλισμό στην αρμονική παραμόρφωση. Επίσης οι εταιρίες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να φροντίσουν για την προστασία του εξοπλισμού που υπάρχει στις εγκαταστάσεις και τους υποσταθμούς με στόχο την εξασφάλιση της μακροχρόνιας και ομαλής λειτουργίας τους.

### **1.2.1 Θερμική Επίδραση / Αγωγοί**

Υψηλή περιεκτικότητα σε αρμονικές για ένα σύστημα σημαίνει επιπλέον θερμική καταπόνηση στα στοιχεία του. Ιδιαίτερα όταν οι αρμονικές έχουν σημαντικό πλάτος θα πρέπει να αποκόπτονται διότι παρουσία τους προκαλείται υπερθέρμανση στους αγωγούς και αυξημένες απώλειες. Επιπλέον, η ικανότητα μεταφοράς του ρεύματος είναι παράγοντας που καθορίζει την διαστασιολόγηση των ασφαλιστικών στοιχείων. Η ωμική αντίσταση των αγωγών επιφέρει τις ανάλογες απώλειες με τη μορφή θερμότητας. Όταν το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό είναι παραμορφωμένο τότε η τιμή της ωμικής του αντίστασης επηρεάζεται από τις ανώτερες συχνότητες εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου και της αλληλεπίδρασης με άλλους αγωγούς. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι οι συμβατικές αρμονικές συνιστώσες μπορούν να προκαλέσουν απώλειες σε αγωγούς χαμηλής τάσης έως και 30% σε σχέση με την επίδραση της θεμελιώδους.<sup>[15]</sup>

### **1.2.2 Ηλεκτρονικά Συστήματα / Τηλεπικοινωνίες**

Παρεμβολές μπορεί να εμφανιστούν σε ευαίσθητο εξοπλισμό όπως στα ηλεκτρονικά συστήματα που έχουν προγραμματιστεί για να λειτουργούν σε σταθερές συνθήκες και μπορούν να επηρεαστούν ακόμα και από μικρές διακυμάνσεις. Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς, οι μετρητές ενέργειας και οι υπολογιστές επηρεάζονται μέσω ακτινοβολίας. Πολλές φορές αυτό συνεπάγεται αυξημένη ανάγκη συντήρησης ή αντικατάστασης μέρους του εξοπλισμού.

Επίσης, οι υψηλές συχνότητες μπορούν να παρεμποδίζουν την ομαλή μετάδοση δεδομένων τηλεπικοινωνίας. Όταν ένα κανάλι μεταδίδει σήματα μέσω ενός δικτύου διανομής τότε μπορεί να υπάρξει παρεμβολή μεταξύ των δεδομένων αυτών και των αρμονικών του δικτύου είτε μέσω αγωγής είτε επαγωγής. Οι τριπλές αρμονικές αποτελούν και εδώ ιδιαίτερο πρόβλημα αφού στα συστήματα τηλεπικοινωνίας είναι απαραίτητη η λειτουργία με αγωγό ουδέτερης σύνδεσης. Επιπλέον είναι σύνηθες οι επαγόμενες αρμονικές τάσης που παράγονται εξαιτίας του αρμονικού ρεύματος να ανήκουν στο ακουστικό εύρος συχνοτήτων.

### **1.2.3 Σταθμοί/Υποσταθμοί**

Η ροή ανώτερων αρμονικών στα τυλίγματα μιας γεννήτριας ή ενός μετασχηματιστή θα οδηγήσει σε πρώτο στάδιο σε πτώση τάσης και θόρυβο/τρίξιμο, ενώ μακροπρόθεσμα σε πρόωρη γήρανση των μονωτικών στοιχείων και των αγωγών, και σε περιττές απώλειες κάθε είδους όπως υπερθέρμανση ιδιαίτερα στην περίπτωση που επιτρέπεται η

κυκλοφορία και των τριπλών αρμονικών. Η υπερθέρμανση στους μετασχηματιστές που οφείλεται στις αρμονικές ρεύματος εμφανίζεται κυρίως εξαιτίας της επίδρασης:

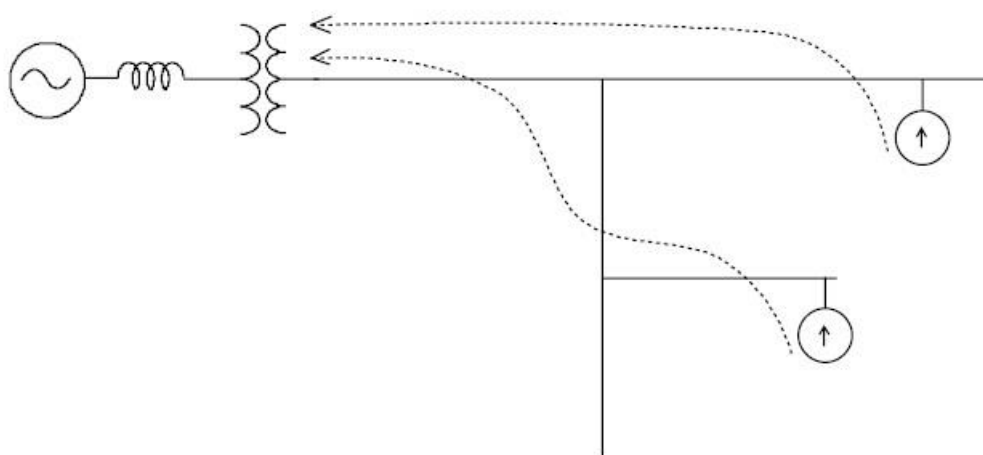
- Της rms τιμής του ρεύματος, η οποία μπορεί υπό συνθήκες αρμονικής παραμόρφωσης να ξεπεράσει τα ονομαστικά όρια του μετασχηματιστή.
- Των δινορευμάτων. Πρόκειται για επαγόμενο ρεύμα που δημιουργείται λόγω της μαγνητικής ροής και ρέει στα μέρη του μετασχηματιστή οδηγώντας σε θερμικές απώλειες.

Οι στρεφόμενες μηχανές υπόκεινται εκτός των άλλων και σε μηχανική καταπόνηση του άξονα λόγω των εναλλαγών στη ροπή εξαιτίας των αντίστροφων μαγνητικών πεδίων που θα εμφανιστούν.

Εκτός από τους μετασχηματιστές και τις μεγάλες στρεφόμενες μηχανές που κινδυνεύουν από τις αρμονικές λόγω τυλιγμάτων, άλλες κατηγορίες που μπορούν να επηρεαστούν αρνητικά είναι οι διακόπτες και οι ασφάλειες λόγω θερμικών παρεμβολών αλλά και οι διατάξεις μόνωσης και αποκοπής όπως οι μονωτήρες ή οι επαφές μεγάλων διακοπών ισχύος και αποζευκτών οι οποίες φθείρονται ευκολότερα παρουσία αρμονικών ρεύματος.

#### 1.2.4 Πυκνωτές

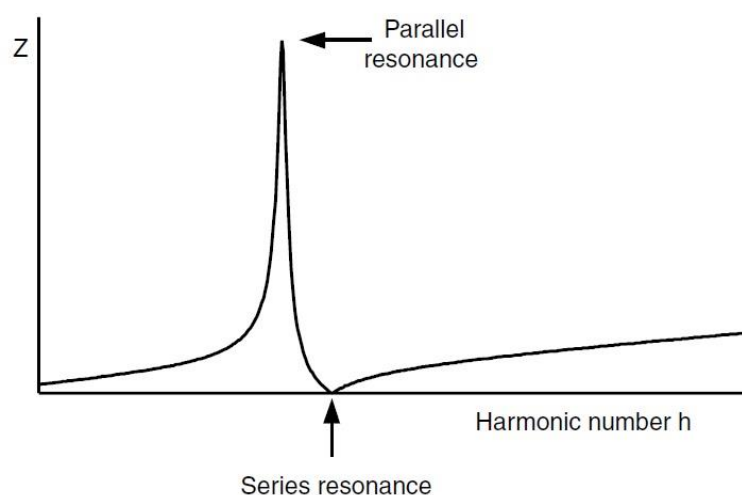
Οι αρμονικές ρεύματος που παράγονται από τα μη γραμμικά φορτία μπορούν να διαδοθούν σε άλλα μέρη του δικτύου δημιουργώντας τις αντίστοιχες αρμονικές συνιστώσες στην τάση (εικόνα 1.9). Το ποσοστό της παραμόρφωσης στην τάση που θα εμφανιστεί σε κάποιο σημείο εξαρτάται από την σύνθετη αντίσταση που αντιπροσωπεύει αφού η διέλευση του ρεύματος θα δώσει την αντίστοιχη πτώση τάσης για κάθε συχνότητα.



Εικόνα 1.9: Ροή αρμονικών ρεύματος από φορτία διαμέσου ακτινικού δικτύου [2]

Η παρουσία πυκνωτών και επαγωγικών στοιχείων στο δίκτυο αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου του συντονισμού. Όταν η αντίδραση του πυκνωτή

συντονιστεί με την αντίδραση του δικτύου σε κάποια συχνότητα, το μιγαδικό μέρος της σύνθετης αντίστασης θα πάρει μια πολύ μικρή τιμή (ή μηδενική) όπως φαίνεται στην εικόνα 1.10 με αποτέλεσμα να εμφανιστεί υπέρταση και κατά συνέπεια απότομη αύξηση του ρεύματος στον πυκνωτή. Η εμφάνιση υπερφόρτισης σε πυκνωτές δεν είναι επιθυμητή για πολλούς λόγους όπως μεταξύ άλλων η αυξημένη πιθανότητα αστοχίας του διηλεκτρικού μέσου, η μείωση της διάρκειας ζωής ή ενδεχομένως και η άμεση καταστροφή.



Εικόνα 1.10: Μεταβολή της σύνθετης αντίστασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα για εν σειρά συνδεσμολογία <sup>[2]</sup>

### 1.3 Δείκτες Αρμονικής Παραμόρφωσης

Η αρμονική παραμόρφωση ενός σήματος μετράται μέσω δεικτών παραμόρφωσης. Σε πρακτικές εφαρμογές οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εμπεριέχουν πάντα αρμονικές συνιστώσες ακόμα κι αν αυτές είναι τόσο μικρές ώστε να μπορούν με καλή προσέγγιση να αγνοηθούν εντελώς. Ωστόσο όταν υπάρχει ανάγκη για ακριβή ανάλυση θα πρέπει να χρησιμοποιείται το μοντέλο που περιλαμβάνει και την επίδραση των αρμονικών. Μεγέθη όπως η ενεργός και η μέση τιμή διαφέρουν σημαντικά μεταξύ ιδανικής και μη ιδανικής κατάστασης.

#### 1.3.1 Ενεργός Τιμή Μη Ημιτονοειδούς Κατάστασης

Στην ημιτονοειδή κατάσταση η ενεργός τιμή της τάσης με πλάτος  $V_{max}$  εκφράζει την συνεχή τάση η οποία εάν εφαρμοστεί σε ωμική αντίσταση  $R$  θα έχει την ίδια θερμική επίδραση με την εφαρμογή της  $V_{max}\cos(\omega t)$  στην ίδια αντίσταση. Αντίστοιχα και για το ρεύμα. Αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{RMS} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.1)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} \quad (1.2)$$



Όταν η κυματομορφή δεν είναι ημιτονοειδής και περιέχει αρμονικές συνιστώσες, η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος αποδεικνύεται ότι προκύπτει από τις σχέσεις (1.3) και (1.4) αντίστοιχα.

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1} (\frac{1}{\sqrt{2}} V_h)^2} \quad (1.3)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1} (\frac{1}{\sqrt{2}} I_h)^2} \quad (1.4)$$

Όπου  $V_h$ ,  $I_h$  τα πλάτη και  $h$  είναι η τάξη της κάθε συνιστώσας αντίστοιχα.

### 1.3.2 Ολική Αρμονική Παραμόρφωση - Total Harmonic Distortion

Ο δείκτης ολικής αρμονικής παραμόρφωσης THD (total harmonic distortion) είναι μια αναλογία της ενεργού τιμής των παραμορφωμένων συνιστωσών του σήματος ως προς την ενεργό τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας αυτού. Ποιοτικά ο δείκτης εκφράζει το ποσοστό των ανεπιθύμητων αρμονικών που έχουν παρουσία στο σύστημα σε σύγκριση με την θεμελιώδη συνιστώσα.

Για την τάση και το ρεύμα αντίστοιχα υπολογίζεται ως εξής:

$$THD_V\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} V_h^2}}{V_f} \times 100 \quad (1.5)$$

$$THD_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_f} \times 100 \quad (1.6)$$

όπου στις παραπάνω εξισώσεις τα μεγέθη  $V$ ,  $I$  αντιπροσωπεύουν τιμές rms, ενώ οι δείκτες  $h$ ,  $f$  αντιπροσωπεύουν την τάξη της αρμονικής συνιστώσας και την θεμελιώδη αντίστοιχα.

Ένα ιδανικό ημιτονοειδές σήμα χωρίς παραμόρφωση θα έχει δείκτη  $THD\% = 0\%$ . Συνήθεις τιμές κυμαίνονται από 0 έως 15%, ενώ θεωρητικά, π.χ. σε ένα σήμα ρεύματος με υψηλή περιεκτικότητα σε αρμονικές μπορεί να εμφανιστεί κατά πολύ αυξημένος σε σχέση με τις συνηθισμένες τιμές ή ακόμα και να ξεπεράσει το 100%.

### 1.3.3 Παραμόρφωση Ρεύματος TDD - Total Demand Distortion

Υπό συνθήκες ομαλής λειτουργίας και σταθερού φορτίου όπου το ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί σταθερό οι δείκτες THD τόσο της τάσης όσο και του ρεύματος θεωρούνται αξιόπιστοι. Κατά την περίπτωση όπου υπάρχουν συνθήκες με μεταβαλλόμενα φορτία το ρεύμα δεν παραμένει σταθερό και επομένως ο δείκτης THD είναι ανακριβής. Για παράδειγμα, όταν το ρεύμα μειώνεται λόγω αποσύνδεσης φορτίων τότε ο δείκτης THD

προκύπτει μεγάλος ενώ στην πραγματικότητα δεν υπάρχει πρόβλημα αφού πρόκειται για αρμονικές αμελητέου μεγέθους. Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της παραμόρφωσης του ρεύματος έχει οριστεί ο δείκτης TDD, ο οποίος σε αντιστοιχία με τον THD εκφράζει το σύνολο των αρμονικών ως προς τη μέγιστη τιμή ρεύματος που θα εμφανιστεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και όχι την θεμελιώδη.<sup>[10]</sup>

$$TDD_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2} I_h^2}}{I_m} \times 100 \quad (1.7)$$

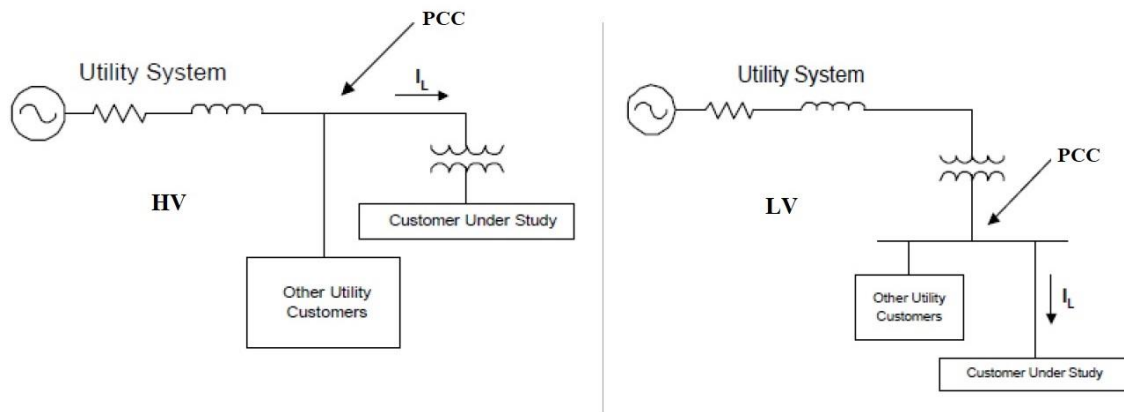
Όπου  $I_m$  είναι το μέγιστο ρεύμα που θα μετρηθεί στο σημείο κοινής σύνδεσης, δηλαδή η μέγιστη ζήτηση ρεύματος.

## **1.4 Πρότυπο IEEE 519 - 2022**

Στόχος των προτύπων είναι η δημιουργία συνθηκών κοινής αναφοράς για όλο το σύστημα και η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας. Στην ηλεκτρική ενέργεια δύο από τις γνωστότερες οικογένειες προτύπων που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι τα πρότυπα των οργανισμών IEEE και IEC. Το 1981 δημοσιεύτηκε πρώτη φορά το πρότυπο IEEE - 519 που αναφέρεται στην οριοθέτηση της παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος, ενώ από τότε έχει εξελιχθεί και αναδιαμορφωθεί με τελευταία αναθεώρηση το 2022. Σε αυτό δίνονται οι σχετικές κατευθυντήριες οδηγίες και γίνεται αναφορά στις συνθήκες που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία ενός συστήματος και στις προτεινόμενες πρακτικές που αφορούν στον περιορισμό των αρμονικών.

### **1.4.1 Σημείο Κοινής Σύνδεσης - (Point of Common Coupling)**

Η αρμονική παραμόρφωση που εμφανίζεται σε ένα σημείο μπορεί να προέρχεται είτε από την παραμόρφωση του ρεύματος που προκαλούν τα φορτία, είτε από την αλληλεπίδραση του ρεύματος με την εμπέδηση του συστήματος. Ανάμεσα στην παραγωγή και τις τελικές καταναλώσεις ορίζεται ένα χαρακτηριστικό σημείο (PCC) που καθιστά διακριτή την κάθε περιοχή. Η επιλογή του είναι καθοριστικής σημασίας μιας και αποτελεί το σημείο εκείνο που αφενός καθορίζει τον τομέα ευθύνης περιορισμού των αρμονικών της παραγωγής και των καταναλωτών αντίστοιχα, και αφετέρου το σημείο από το οποίο γίνεται η λήψη μετρήσεων και δεδομένων.



Εικόνα 1.11: Ορισμός του σημείου κοινής σύνδεσης (PCC) στην μεριά υψηλής (αριστερά) και χαμηλής τάσης (δεξιά) <sup>[9]</sup>

Συνήθως αποτελεί σημείο του συστήματος από το οποίο εκτός από τον εξεταζόμενο τροφοδοτούνται και άλλοι καταναλωτές, ενώ μπορεί ανάλογα με την περίπτωση να οριστεί στην μεριά υψηλής ή χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή παροχής. Ενδεικτικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.11, σε μεγάλες εγκαταστάσεις όπως εργοστάσια, βιομηχανίες κ.λπ., που λειτουργούν με παροχή μέσης τάσης, το σημείο κοινής σύνδεσης ορίζεται στην μεριά υψηλής τάσης (πρωτεύον Μ/Σ), ενώ σε καταναλώσεις χαμηλής τάσης όπως πολυκαταστήματα, γραφεία, κατοικίες κ.α. ορίζεται στην μεριά χαμηλής τάσης (δευτερεύον Μ/Σ).

#### 1.4.2 Προτεινόμενα Όρια

Οι τιμές που αναγράφονται στους αντίστοιχους πίνακες αναφέρονται πάντα στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) και αποτελούν τα όρια μέσα στα οποία το σύστημα λειτουργεί ομαλά και χωρίς προβλήματα.

Η παραμόρφωση της φασικής τάσης μεταξύ γραμμής και ουδετέρου περιορίζεται ως εξής:

- Σε καθημερινή βάση, οι τάσεις που ανήκουν στο 1% των συνιστωσών με την μεγαλύτερη τιμή και είναι πολύ σύντομης διάρκειας (3 sec) να είναι μικρότερες από 1.5 φορές των τιμών του πίνακα 1.
- Σε εβδομαδιαία βάση, οι τάσεις που ανήκουν στο 5% των συνιστωσών με την μεγαλύτερη τιμή και είναι σύντομης διάρκειας (10 min) να είναι μικρότερες από τις τιμές του πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Όρια παραμόρφωσης τάσης <sup>[9]</sup>

<b>Bus Voltage V at PCC</b>	<b>Individual Harmonic % <math>h \leq 50</math></b>	<b>Total Harmonic Distortion THD %</b>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} > V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Συστήματα υψηλής τάσης μπορούν να εμφανίσουν THD μέχρι και 2%, όπου η αιτία είναι τερματικές συσκευές υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος, των οποίων η επίδραση θα έχει εξασθενήσει στα σημεία στα οποία θα συνδεθούν ενδεχομένως στο μέλλον νέοι καταναλωτές.

Επιπλέον:

- Ο υπολογισμός του δείκτη TDD υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν μέχρι και την συνιστώσα 50<sup>ης</sup> τάξης.
- Η μέγιστη ζήτηση ρεύματος ορίζεται στο σημείο PCC ως το άθροισμα των ρευμάτων που αντιστοιχούν στη μέγιστη ζήτηση κάθε ενός από τους προηγούμενους δώδεκα μήνες διαιρούμενο δια δώδεκα.

Η παραμόρφωση του ρεύματος περιορίζεται ως εξής:

- Σε καθημερινή βάση, τα ρεύματα που ανήκουν στο 1% των συνιστωσών με την μεγαλύτερη τιμή και είναι πολύ σύντομης διάρκειας (3 sec) να είναι μικρότερα από 2 φορές των τιμών των πινάκων 2 και 3.
- Σε εβδομαδιαία βάση, τα ρεύματα που ανήκουν στο 1% των συνιστωσών με την μεγαλύτερη τιμή και είναι σύντομης διάρκειας (10 min) να είναι μικρότερα από 1.5 φορές των τιμών των πινάκων 2 και 3.
- Σε εβδομαδιαία βάση, τα ρεύματα που ανήκουν στο 5% των συνιστωσών με την μεγαλύτερη τιμή και είναι σύντομης διάρκειας (10 min) να είναι μικρότερα από αυτά των πινάκων 2 και 3.

**Πίνακας 2.** Όρια παραμόρφωσης ρεύματος για συστήματα ονομαστικής τάσης 120 V που τροφοδοτούνται από γραμμή 69 kV <sup>[9]</sup>

Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος σε αναλογία με το $I_L$						
Τάξη αρμονικής (περιττές αρμονικές) <sup>b</sup>						
$I_{SC} / I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20$ <sup>c</sup>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$> 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

<sup>a</sup> Οι άρτιες αρμονικές τάξης  $h \leq 6$  περιορίζονται στο 50% του πίνακα.

<sup>b</sup> Δεν επιτρέπεται παραμόρφωση ρεύματος που καταλήγει σε μετατόπιση ΣΡ.

<sup>c</sup> Όλος ο εξοπλισμός παραγωγής ενέργειας περιορίζεται στα όρια του πίνακα αναφορικά με τον λόγο  $I_{SC} / I_L$ .

$I_{SC}$  είναι το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σημείο κοινής σύνδεσης

$I_L$  είναι το μέγιστο ζητούμενο ρεύμα στο σημείο κοινής σύνδεσης υπό συνθήκες κανονικού φορτίου

**Πίνακας 3.** Όρια παραμόρφωσης ρεύματος για συστήματα ονομαστικής τάσης μεγαλύτερης των 161 kV <sup>[9]</sup>

Μέγιστη αρμονική παραμόρφωση ρεύματος σε αναλογία με το $I_L$						
Τάξη αρμονικής (περιττές αρμονικές) <sup>b</sup>						
$I_{SC} / I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 25$ <sup>c</sup>	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
$25 < 50$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

<sup>a</sup> Οι άρτιες αρμονικές τάξης  $h \leq 6$  περιορίζονται στο 50% του πίνακα.

<sup>b</sup> Δεν επιτρέπεται παραμόρφωση ρεύματος που καταλήγει σε μετατόπιση ΣΡ.

<sup>c</sup> Όλος ο εξοπλισμός παραγωγής ενέργειας περιορίζεται στα όρια του πίνακα αναφορικά με τον λόγο  $I_{SC} / I_L$ .

$I_{SC}$  είναι το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σημείο κοινής σύνδεσης

$I_L$  είναι το μέγιστο ζητούμενο ρεύμα στο σημείο κοινής σύνδεσης υπό συνθήκες κανονικού φορτίου

### 1.4.3 Συντελεστές Διόρθωσης Μετατροπέων p-Παλμών

Οι παραπάνω πίνακες είναι εφαρμόσιμοι για γενικές περιπτώσεις αλλά και για μετατροπείς έως 6 παλμών. Όταν εμπλέκονται μετατροπείς που κάνουν χρήση περισσότερων από 6 παλμών εφαρμόζονται οι συντελεστές διόρθωσης του πίνακα 4. Οι προτεινόμενοι πολλαπλασιαστές εφαρμόζονται ανεξάρτητα από την μέθοδο περιορισμού των αρμονικών συμπεριλαμβάνοντας ακόμα και αρμονικές τάξης που περιορίζονται κάτω από 25% των τιμών των πινάκων 2 και 3.

Ο πολλαπλασιαστής  $m$  είναι ίσος με:

$$m = \sqrt{\frac{p}{6}} \quad (1.8)$$

**Πίνακας 4.** Προτεινόμενοι πολλαπλασιαστές αύξησης ορίων αρμονικών ρεύματος <sup>[9]</sup>

Τάξη των αρμονικών που περιορίζονται στο 25% των τιμών των πινάκων 2 και 3	Πολλαπλασιαστής
5,7	1.4
5,7,11,13	1.7
5,7,11,13,17,19	2.0
5,7,11,13,17,19,23,25	2.2

## 1.5 Υπεραρμονικές

Στο πεδίο των Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Υπεραρμονικές (Supraharmonics) χαρακτηρίζονται οι αρμονικές συνιστώσες από 2 έως 150 kHz. Με βάση τα υπάρχοντα πρότυπα ποιότητας ισχύος όπως των οργανισμών IEEE και IEC οι συχνότητες που εξετάζονται φτάνουν έως τα 2 - 3 kHz. Παρότι υπάρχουν κάποιες αναφορές για έως και 9 kHz, επί της ουσίας δεν υπάρχουν κανονισμοί για τις συνιστώσες άνω των 2.5 kHz αφήνοντας έτσι ελεύθερο ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων στο οποίο εντοπίζονται συστηματικά σημαντικά μεγέθη ρεύματος. Η πρώτη αναφορά στον όρο “supraharmonics” έγινε το 2013 σε συνεδρίαση του οργανισμού IEEE. <sup>[11] [21]</sup>

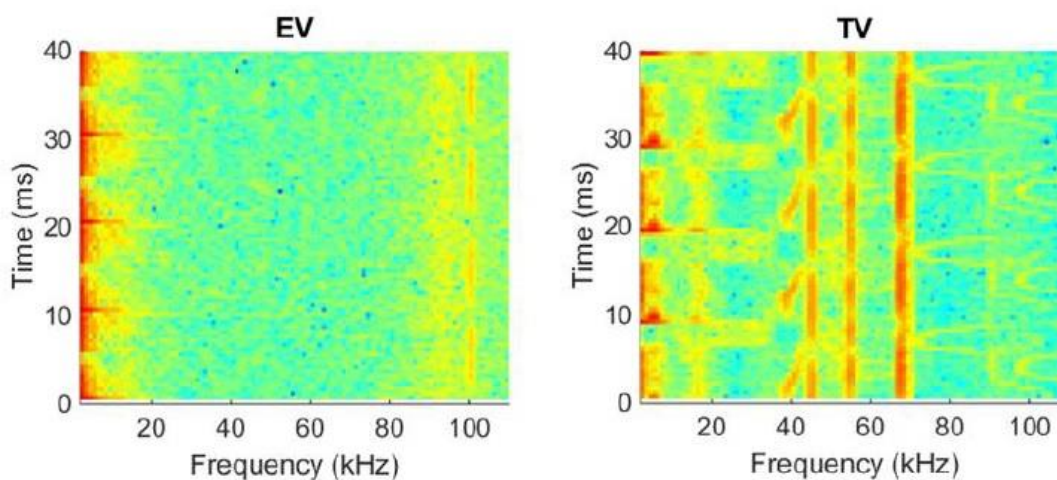
### 1.5.1 Πηγές

Υπεραρμονικές συνιστώσες έχει παρατηρηθεί ότι εισάγονται σε ένα σύστημα είτε παρασιτικά ως συνέπεια της λειτουργίας μη γραμμικών φορτίων, είτε σκοπίμως όπως στην περίπτωση των εκπομπών τηλεπικοινωνίας οι οποίοι εκμεταλλεύονται αυτές τις πολύ μεγάλες συχνότητες για να λειτουργήσουν. Διατάξεις που έχουν σχεδιαστεί για να περιορίζουν την αρμονική παραμόρφωση της τάσης και του ρεύματος στις χαμηλές

συχνότητες, παρότι αποκόπτουν αποτελεσματικά τις συμβατικές αρμονικές, ενισχύουν τις ανωτέρας τάξης αρμονικές εμφανίζοντας αυξημένες εκπομπές. Παραδείγματα τέτοιων διατάξεων αποτελούν τα κυκλώματα υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων που περιλαμβάνονται σε αντιστροφείς, τα τροφοδοτικά και οι ηλεκτρικοί φορτιστές νέας τεχνολογίας. Η εμφάνισή τους ποικίλλει ανά περιοχή και είδος εγκατάστασης, ενώ αυξημένοι δείκτες έχουν καταγραφεί κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας. Χαρακτηριστικές πηγές υπεραρμονικών αποτελούν: <sup>[6] [14]</sup>

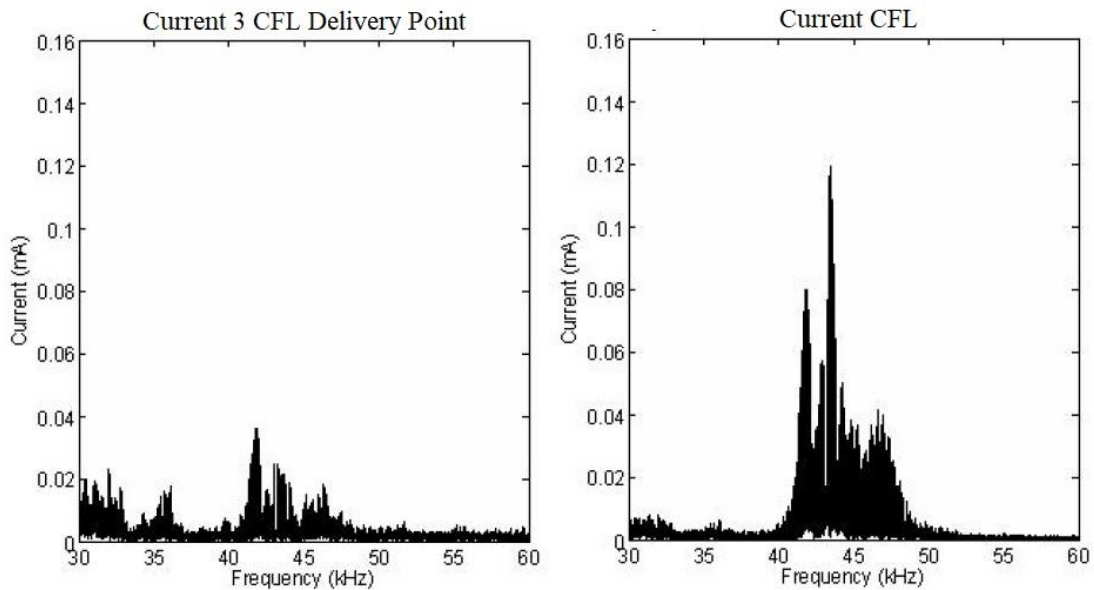
Βιομηχανικοί μετατροπείς	9 - 150	kHz
Λαμπτήρες οδικού φωτισμού	έως 20	kHz
Φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων	15 - 100	kHz
Αντιστροφείς Φ/Β	4 - 20	kHz
Οικιακές συσκευές	2 - 150	kHz
Γραμμές τηλεπικοινωνίας	9 - 95	kHz

Για μια πιο τεκμηριωμένη ανάλυση του εκπεμπόμενου φάσματος χρησιμοποιούνται τα συνδυαστικά διαγράμματα χρόνου/συχνότητας, όπως αυτά της εικόνας 1.12 όπου παρατηρούνται διακυμάνσεις στο πλάτος και τη συχνότητα του ρεύματος δύο διαφορετικών καταναλώσεων σε βάθος χρόνου (ή αριθμού μετρήσεων) ακολουθώντας περιοδικό μοτίβο.



Εικόνα 1.12: Συνδυαστικά διαγράμματα χρόνου/ συχνότητας για δύο διαφορετικά φορτία <sup>[6]</sup>

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων της εικόνας 1.13 που πραγματοποιήθηκαν σε εγκατάσταση με μεγάλο αριθμό λαμπτήρων (με ballast) γίνεται φανερό ότι οι συνιστώσες ρεύματος με συχνότητα της τάξης των kHz εντοπίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό στην ίδια τη συσκευή από ότι στο κοινό σημείο σύνδεσης με άλλες όμοιες συσκευές.



Εικόνα 1.13: Μετρήσεις ρεύματος σε λαμπτήρα (δεξιά) και στο κοινό σημείο τριών λαμπτήρων (αριστερά) [6]

Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις της εικόνας 1.13 έγιναν ταυτόχρονα. Παρόμοια διαδικασία επαναλήφθηκε με μεγαλύτερο αριθμό λαμπτήρων και τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια, δηλαδή το ρεύμα στην περιοχή 40-50 kHz (η διακοπτική συχνότητα των ballast των συγκεκριμένων λαμπτήρων) ήταν μικρότερο για το σύνολο της εγκατάστασης από αυτό του κάθε λαμπτήρα χωριστά.

Ανάλογα με το είδος των εκπομπών διακρίνονται οι εξής υποκατηγορίες:

- Φάσμα συχνοτήτων χωρίς διακυμάνσεις
- Φάσμα συχνοτήτων με μεγάλη διακύμανση
- Φάσμα συχνοτήτων με μικρή διακύμανση

Η διαδικασία διάδοσης στις υπεραρμονικές διαφέρει σημαντικά από αυτή των συμβατικών < 2 kHz συνιστωσών. Με βάση τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις αλλά και μετρήσεις που έχουν γίνει σε εγκαταστάσεις με πολυάριθμες συσκευές, το συνολικό πλάτος της παραμόρφωσης που εμφανίζεται σε μια εγκατάσταση φαίνεται να είναι αρκετά μικρότερο από αυτό των επιμέρους συσκευών, ενισχύοντας έτσι την υπόθεση ότι σε αυτό το εύρος συχνοτήτων η παραμόρφωση τείνει να παραμένει εντός του συστήματος των συσκευών με σημαντικό παράγοντα την μεταξύ τους αλληλεπίδραση. [11]

### 1.5.2 Εμπέδηση Συστήματος

Αρμονική παραμόρφωση στην τάση μπορεί να προκύψει από την αλληλεπίδραση του παραμορφωμένου ρεύματος με την εμπέδηση του συστήματος η οποία μπορεί να είναι επαγωγική ή χωρητική ανάλογα με την περίπτωση. Η τιμή της σύνθετης αντίδρασης



ενός συστήματος είναι συνάρτηση της γωνιακής συχνότητάς του (rad/sec). Για ιδανικό επαγωγικό ή χωρητικό φορτίο υπολογίζεται με βάση τις εξισώσεις (1.9) και (1.10) αντίστοιχα.

$$\bar{Z}_L = j\omega L \quad (1.9)$$

$$\bar{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (1.10)$$

Όπου:

L, είναι η τιμή της αυτεπαγωγής σε Henry  
C, είναι η τιμή της χωρητικότητας σε Farad  
 $\omega = 2\pi f$ , είναι η γωνιακή συχνότητα

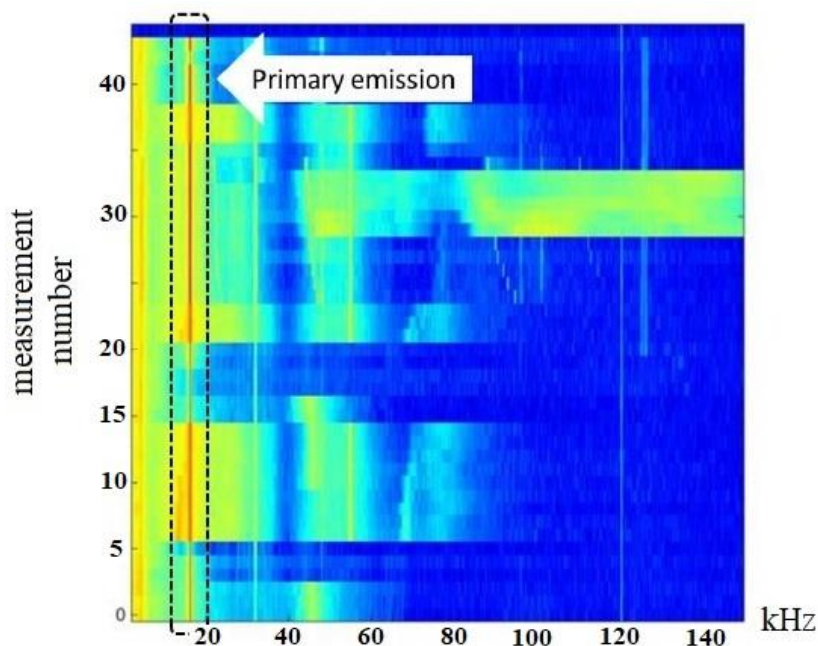
Είναι φανερό ότι στα φορτία που έχουν κυρίως επαγωγικό χαρακτήρα, η εμπέδηση είναι ανάλογη της συχνότητας (Hz). Υψηλές υπεραρμονικές ρεύματος σε ένα σύστημα μεταφοράς οδηγεί σε υψηλή παραμόρφωση τάσης μιας και οι γραμμές μεταφοράς έχουν κατεξοχήν επαγωγική συμπεριφορά. Από την άλλη, όταν στη διεπαφή του φορτίου με το δίκτυο παρεμβάλλονται πυκνωτές αντιστάθμισης ισχύος ή κάποιο φίλτρο EMC όπως πυκνωτές μεταξύ φάσης και ουδέτερου, η εμπέδηση του δικτύου μειώνεται όλο και περισσότερο με την αύξηση της συχνότητας. Επομένως σε αυτή την περίπτωση οι υψηλές αρμονικές στην τάση θα οδηγήσουν στην εμφάνιση σχετικά μεγάλων τιμών ρεύματος διαμέσου των πυκνωτών.

### 1.5.3 Αντιστροφείς Φωτοβολταϊκών

Όσο αυξάνεται η χρήση των φωτοβολταϊκών συσκευών ως μέσο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των μετατροπέων που εισάγονται σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Οι αντιστροφείς παράγουν αρμονική παραμόρφωση έως και σε πολύ υψηλές συχνότητες και είναι ταυτόχρονα δέκτες των πιθανών συνεπειών που αυτή μπορεί να προκαλέσει. Η δυσκολία στην επεξήγηση της διάδοσης των υπεραρμονικών έγκειται στην παρουσία των πολύ μεγάλων διακοπτικών συχνοτήτων που εισάγουν οι τεχνικές διαμόρφωσης σε συνδυασμό με τις συνεχείς βραχυπρόθεσμες εναλλαγές των συνθηκών λειτουργίας. Το είδος της διαμόρφωσης που θα εφαρμοστεί (μονοπολική, διπολική κ.α.) καθώς και η τοπολογία του κάθε αντιστροφέα (μονοφασικός, τριφασικός) επηρεάζουν το μέγεθος και το εύρος των εκπομπών. Ένα γεγονός που καταδεικνύει τους μετατροπείς ως υπεύθυνους για την έγχυση υπεραρμονικών συχνοτήτων σε ένα σύστημα είναι η παρατήρηση της απουσίας των συχνοτήτων αυτών τις βραδυνές ώρες. [10] [20]

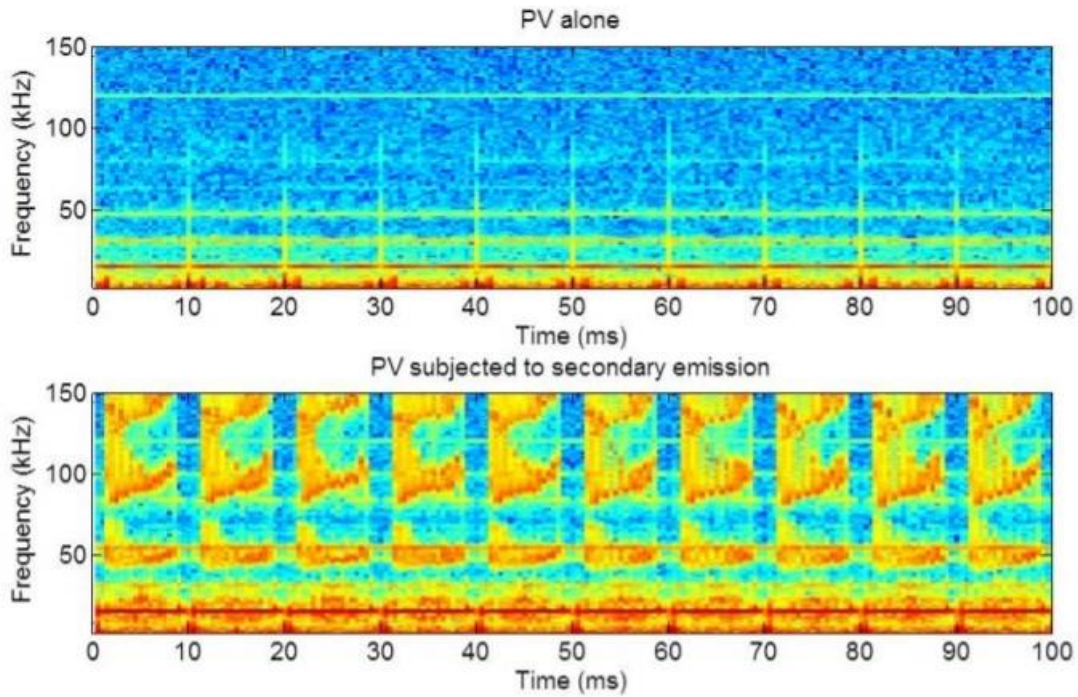
Όπως έχει αναφερθεί, οι συμβατικές PWM τεχνικές που εφαρμόζονται στον έλεγχο των αντιστροφέων ενισχύουν τις ανώτερες αρμονικές. Είναι φανερό εκ του αποτελέσματος ότι αρμονικές με μη αμελητέο πλάτος εμφανίζονται κοντά στη συχνότητα του φέροντος σήματος και των ακέραιων πολλαπλασίων αυτής. Ενδεικτικά σε μικρούς αντιστροφείς

Φ/B εντοπίζονται συνήθως μεταξύ 15 και 20 KHz, ενώ σε αντιστροφείς μεγαλύτερης ισχύος το εύρος αυτό ξεκινάει από τα 2 kHz. Στο συνδυαστικό διάγραμμα χρόνου/συχνότητας της εικόνας 1.14 φαίνεται ότι σε συγκεκριμένο αριθμό μετρήσεων υπάρχουν μεταβολές τόσο στην εκπεμπόμενη συχνότητα όσο και στο πλάτος ανάλογα με τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών. Η πρωτογενής εκπομπή του αντιστροφέα διακρίνεται με κόκκινο χρώμα κοντά στα 16 kHz.



Εικόνα 1.14: Φασματικό διάγραμμα αντιστροφέα Φ/B για 45 μετρήσεις με εναλλαγή στον αριθμό των γειτονικών συσκευών <sup>[6]</sup>

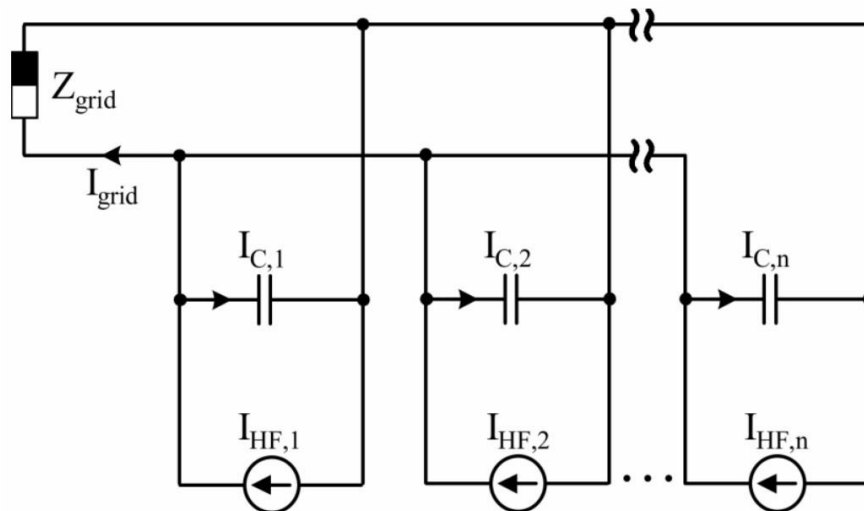
Τον καθοριστικό ρόλο που έχει ο αριθμός των συσκευών και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση φανερώνουν οι μετρήσεις της εικόνας 1.15 όπου φαίνεται η αύξηση που έχει προκαλέσει στις ανώτερες συνιστώσες ρεύματος η ταυτόχρονη λειτουργία μεγάλου αριθμού αντιστροφέων πλησίον του κεντρικού (μετρούμενου αντιστροφέα).



Εικόνα 1.15: Φασματικό διάγραμμα ρεύματος για αντιστροφέα  $\Phi/B$  που λειτουργεί μόνος (πάνω) και με αυξημένο αριθμό αντιστροφέων σε κοντινή απόσταση (κάτω) [34]

#### 1.5.4 Μοντέλο $n$ Παράλληλων Αντιστροφέων

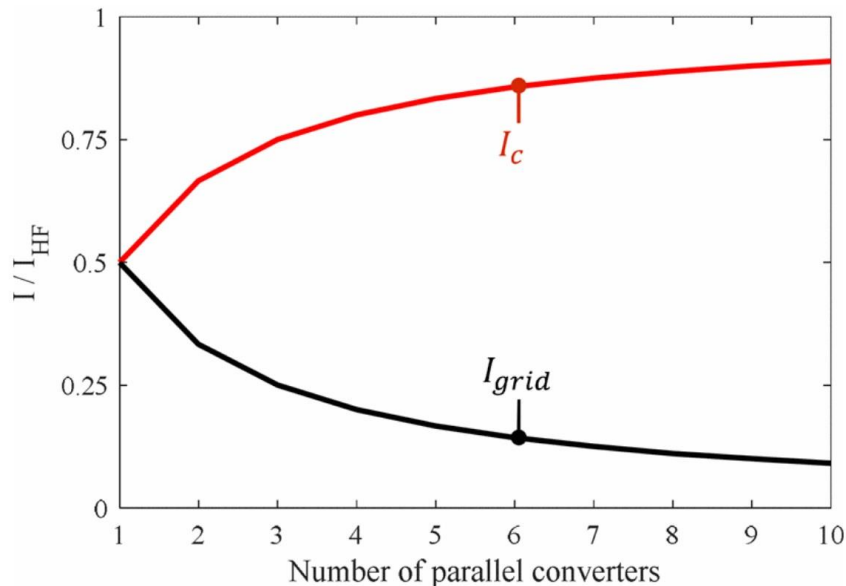
Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η εμφάνιση υπεραρμονικών συχνοτήτων που οφείλονται στην αλληλεπίδραση των συσκευών μεταξύ τους αλλά και με το δίκτυο, όπως π.χ. για μεγάλο αριθμό αντιστροφέων σε παράλληλη λειτουργία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ισοδύναμο μοντέλο της εικόνας 1.16.



Εικόνα 1.16: Ισοδύναμο μοντέλο δικτύου με αριθμό  $n$  συσκευών [12]

Θεωρώντας την εμπέδηση του δικτύου σταθερή, οι  $n$  αντιστροφείς του δικτύου αναπαρίστανται με μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος υπεραρμονικής συχνότητας  $I_{HF,n}$  και μια χωρητικότητα  $C_n$  που αντιπροσωπεύει το φίλτρο εξόδου του κάθε αντιστροφέα. Ο υπολογισμός των ρευμάτων είναι εφικτός όταν οι παράμετροι  $Z_{grid}$  και  $C_n$  πάρουν σταθερές τιμές οι οποίες επιλέγονται με βάση ήδη υπάρχουσες μετρήσεις που έχουν γίνει για συγκεκριμένη συχνότητα στο δίκτυο και στα φίλτρα των αντιστροφέων αντίστοιχα. Το ρεύμα του δικτύου  $I_{grid}$  και των πυκνωτών  $I_{c,n}$  επηρεάζεται από τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών και όπως φαίνεται στην εικόνα 1.17 η μεταβολή αυτή είναι μη γραμμική. Όταν βρίσκεται σε λειτουργία ένας μόνο αντιστροφέας τότε η αντίδρασή του ισούται με αυτήν του δικτύου. Με την προσθήκη όλο και περισσότερων, ο αριθμός των παράλληλων χωρητικοτήτων αυξάνεται, πράγμα που σημαίνει μείωση της συνολικής αντίδρασης.

Από τα παραπάνω και με βάση την εικόνα 1.17 προκύπτει ένα σημαντικό συμπέρασμα. Στην περίπτωση λειτουργίας με έναν αντιστροφέα, οι συνιστώσες υπεραρμονικού ρεύματος ισομοιράζονται στον ίδιο και στο υπόλοιπο δίκτυο. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των παράλληλων αντιστροφέων που συνδέονται, οι συνιστώσες αυτές έχουν την τάση να μένουν κοντά στους αντιστροφείς λόγω της μείωσης της σύνθετης αντίστασης του συνόλου των αντιστροφέων, ενώ η εμφάνισή τους στο δίκτυο μειώνεται. Θεωρητικά, για έναν άπειρο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, οι υπεραρμονικές συχνότητες δεν θα εντοπίζονται σε άλλα μέρη του δικτύου αλλά θα συσσωρεύονται αποκλειστικά εντός των αντιστροφέων.



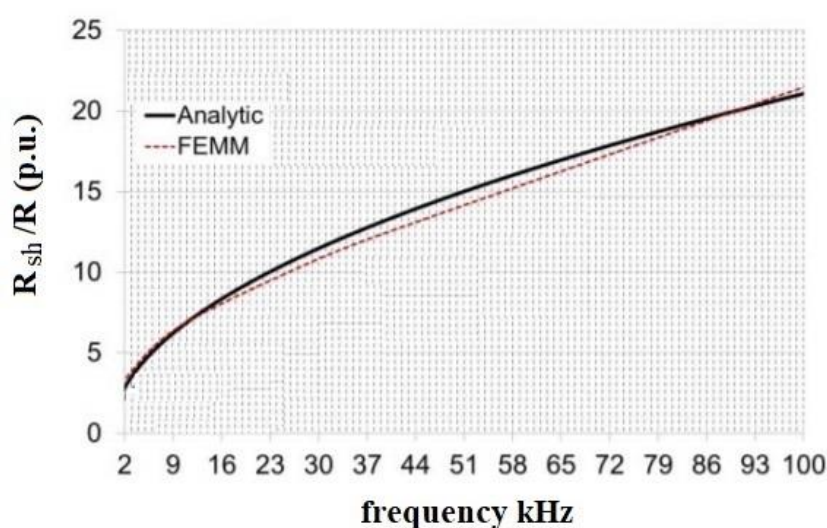
Εικόνα 1.17: Ανηγμένο ρεύμα δικτύου και πυκνωτών σε συνάρτηση με τον αριθμό των παράλληλων αντιστροφέων <sup>[12]</sup>

Οι παραπάνω καμπύλες μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις παραμέτρους της εγκατάστασης καθώς επίσης και να εμφανίσουν ασυμμετρία εάν προέρχονται από

διαφορετικό κατασκευαστή. Σε κάθε περίπτωση και παρά τις διαφοροποιήσεις η ολική συμπεριφορά ακολουθεί το ίδιο μοτίβο. <sup>[12]</sup>

### 1.5.5 Επιπτώσεις Υπεαρμονικών

Τα πλάτη των υπεαρμονικών συνιστώσων μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να μην είναι εξίσου μεγάλα με αυτά των < 2kHz αρμονικών, ωστόσο δεν παύουν να υπάρχουν και να παρατηρούνται σταθερά. Βασική επίπτωση είναι η υπερθέρμανση σε πυκνωτές, μετασχηματιστές και γενικότερα στα δομικά στοιχεία του συστήματος. Υπό συνθήκες έντονης αρμονικής παραμόρφωσης έχουν παρατηρηθεί αστοχίες αγωγών, γεγονός που οδηγεί στον επανασχεδιασμό του συστήματος και οφείλεται εν μέρη στο επιδερμικό φαινόμενο το οποίο εντείνεται με την διείσδυση όλο και μεγαλύτερων συχνοτήτων. Το γράφημα της εικόνας 1.18 δείχνει τη μεταβολή της ωμικής αντίστασης αγωγού 3 x 1 x 150/25 mm<sup>2</sup> σε εύρος συχνοτήτων 2 - 100 kHz.



Εικόνα 1.18: Μεταβολή της ωμικής αντίστασης αγωγού μέσης τάσης σε συνάρτηση με τη συχνότητα <sup>[15]</sup>

Άλλες επιπτώσεις παρατηρούνται:

- σε ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές που χρησιμοποιούνται σε φίλτρα για τον περιορισμό ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.
- στην μετάδοση τηλεπικοινωνιακών δεδομένων όπου καταγράφονται παρεμβολές και αλλοίωση.
- ασφαλιστικές διατάξεις εκδηλώνοντας απρόβλεπτες ενέργειες.
- στην λειτουργία των λαμπτήρων LED.
- σε δίκτυα φωτοβολταϊκών.

Ένα πρόβλημα που έχει αναφερθεί από καταναλωτές είναι η εμφάνιση θορύβου κατά τη λειτουργία των συσκευών. Ενδεικτικά παραδείγματα αποτελούν οι τηλεοράσεις, οι

επαγωγικές κουζίνες και τα ηλεκτρικά οχήματα που υπό την παρουσία συνιστωσών με πλάτος ακόμα και 0.5% του πλάτους της θεμελιώδους και με συχνότητες που φτάνουν έως και τα όρια του ακουστικού φάσματος (16 - 20 kHz), παρουσιάζουν ηχητικές αντιδράσεις όπως βόμβους και τρίζιμο. Επίσης ένα φαινόμενο που αποδίδεται πιθανόν στις υπεραρμονικές είναι οι αυξομειώσεις στο παραγόμενο φως ανεξάρτητων λαμπτήρων LED αλλά και άλλων λαμπτήρων κατά τη διάρκεια φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Εδώ πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η τοπολογία του συστήματος φωτισμού, καθώς είναι αυτή που θα καθορίσει την τελική ποιότητα λειτουργίας. <sup>[14][15]</sup>

### **1.5.6 Μοντελοποίηση**

Κατά τη σύνδεση ενός φωτοβολταϊκού στη χαμηλή τάση του δικτύου, ο VSI αντιστροφείας αλλά και η τάση του δικτύου μπορούν να παρασταθούν με την ισοδύναμη τάση Thevenin μαζί με τις αντίστοιχες τιμές εμπέδησης. Το μοντέλο που θα εφαρμοστεί πρέπει να εξετάσει το γεγονός ότι η εκπομπή κάθε συσκευής μπορεί να επηρεαστεί από άλλες πηγές. Στην πραγματικότητα η αρμονική παραμόρφωση και ποιότητα του ρεύματος που εμφανίζεται κοντά σε μια συσκευή δεν είναι ανεξάρτητη ποσότητα αλλά εκτός από την ίδια τη συσκευή επηρεάζεται και από την ποιότητα της τερματικής τάσης. Παρόλα αυτά στην διαδικασία μοντελοποίησης και υπολογισμού, η παραδοχή ότι η τάση είναι καθαρή και χωρίς παραμόρφωση διευκολύνει την διαδικασία και βοηθά στην αποφυγή χρονοβόρων και σύνθετων υπολογισμών. Επιπλέον, πραγματοποιώντας μια μελέτη, δεν υπάρχουν όλες οι λεπτομερείς πληροφορίες για τις τερματικές συσκευές, και ο τρόπος με τον οποίο επιδρά η τάση στο ρεύμα δεν έχει διερευνηθεί απόλυτα. Για τους παραπάνω λόγους είθισται η απεικόνιση μιας υπεραρμονικής συνιστώσας στο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα να αναπαριστάται με μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος με συχνότητα ίση με την συχνότητα της εκάστοτε συνιστώσας, όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές αρμονικές. <sup>[10][22]</sup>

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Σήματα

Τα φυσικά φαινόμενα μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά με την μορφή ενός σήματος το οποίο απεικονίζει ένα μέγεθος σε συνάρτηση με μία ή περισσότερες μεταβλητές. Ανάλογα με τις ιδιότητές του μπορεί να ενταχθεί σε διάφορες κατηγορίες. Μια βασική διάκριση είναι μεταξύ των σημάτων συνεχούς και διακριτού χρόνου. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή μπορεί να είναι χρονοσυνεχής παίρνοντας οποιαδήποτε τιμή ή να είναι διακριτή παίρνοντας σταθμισμένες τιμές. Άλλοι χαρακτηρισμοί που μπορούν να αποδοθούν είναι:

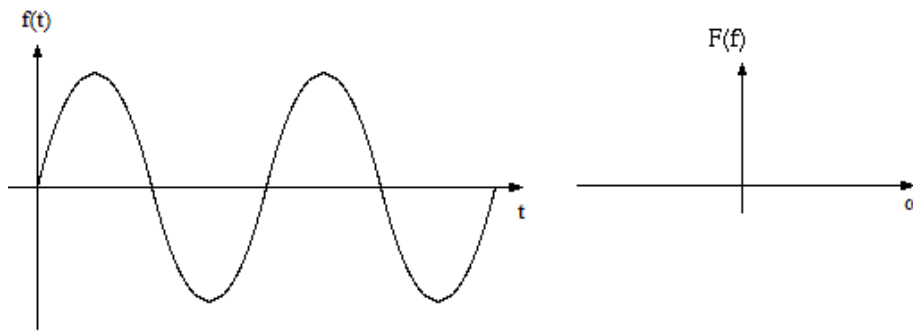
Αναλογικά	Ψηφιακά
Πραγματικά	Μιγαδικά
Άρτια	Περιττά
Περιοδικά	Μη περιοδικά
Γραμμικά	Μη γραμμικά
Χρονικά εξαρτημένα	Χρονικά ανεξάρτητα
Πεπερασμένης ενέργειας	Πεπερασμένης ισχύος

Μια μεγάλη κατηγορία είναι τα γραμμικά, χρονικώς ανεξάρτητα σήματα (LTI). Πολλές φορές σήματα που δεν ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία τροποποιούνται έτσι ώστε να μετατραπούν με καλή προσέγγιση σε LTI, διότι είναι σήματα που μπορούν εύκολα να μοντελοποιηθούν ενώ ταυτόχρονα οι ιδιότητες τους τα καθιστά διαχειρίσιμα και επιλύσιμα με απλές πράξεις όταν μεταφερθούν στο πεδίο της συχνότητας. <sup>[1] [4]</sup>

### 2.1 Περιγραφή στο Πεδίο της Συχνότητας

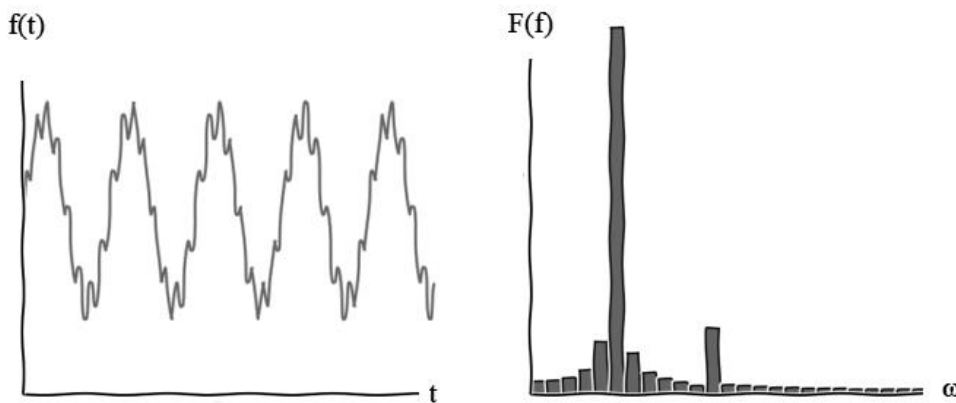
Σε ότι αφορά στην ανάλυση της αρμονικής παραμόρφωσης σε ένα σήμα, είναι χρήσιμη τόσο η απεικόνιση του σήματος σε συνάρτηση με τον χρόνο προκειμένου να γίνονται γνωστές πληροφορίες για τα βασικά στοιχεία και τις ιδιότητές του, όσο και στο πεδίο της συχνότητας έτσι ώστε να υπάρχει μια πλήρης εικόνα του φάσματός του. Επίσης, η απόκριση συχνότητας αποτελεί απαραίτητη πληροφορία για τον χαρακτηρισμό συστημάτων όπως μεταξύ άλλων και των φίλτρων. Η μαθηματική μετάβαση ενός σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας και το αντίστροφο μπορεί να γίνει τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier.

Είναι προφανές ότι από την ανάλυση ενός καθαρού ημιτονικού σήματος προκύπτει μόνο η θεμελιώδης συνιστώσα, και οι απεικονίσεις του σήματος αυτού θα ομοιάζουν με αυτές της εικόνας 2.1 συναρτήσεως του χρόνου ( $t$ ) και της γωνιακής συχνότητας ( $\omega$ ) αντίστοιχα:



Εικόνα 2.1: Αναπαράσταση ημιτονικού σήματος στο πεδίο του χρόνου (αριστερά) και στο πεδίο συχνοτήτων (δεξιά)

Για ένα σύνθετο σήμα, δηλαδή ένα σήμα το οποίο αναλύεται σε άθροισμα  $N$  αρμονικών συνιστωσών πέραν της θεμελιώδους και άρα θα έχει έναν θετικό δείκτη THD, οι αντίστοιχες απεικονίσεις θα είναι της μορφής της εικόνας 2.2.



Εικόνα 2.2: Αναπαράσταση παραμορφωμένου σήματος στο πεδίο του χρόνου (αριστερά) και στο πεδίο της συχνότητας (δεξιά)

Ο περιορισμός των αρμονικών επιτυγχάνεται με την χρήση φίλτρων τα οποία ανάλογα με τον σχεδιασμό τους επιτρέπουν την κυκλοφορία μόνο του εύρους των επιθυμητών συχνοτήτων.

## 2.2 Σειρές Fourier

Ένας τρόπος που προσφέρει μια απλή μορφή ως προς την ανάλυση και το περιεχόμενο ενός σήματος είναι η αναπαράστασή του ως γραμμικός συνδυασμός μιγαδικών εκθετικών.

Ένα σήμα συνεχούς χρόνου  $x(t)$  είναι περιοδικό όταν για θετικό ακέραιο αριθμό  $T$  ισχύει:



$$x(t) = x(t + T) \quad (2.1)$$

Όπου:  $T_0$ , είναι η θεμελιώδης περίοδος του σήματος  $x(t)$  και η μικρότερη θετική τιμή του  $T$ .

Η σειρά Fourier σε μιγαδική εκθετική αναπαράσταση ενός περιοδικού σήματος  $x(t)$  είναι:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad (2.2)$$

με:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0},$$

$$c_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt$$

Ενώ, ως προς το αρμονικό περιεχόμενο και αναλύοντας τον εκθετικό όρο σε τριγωνομετρικούς αριθμούς, το σήμα  $x(t)$  με θεμελιώδη περίοδο  $T_0$  εκφράζεται:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)) \quad (2.3)$$

Με τους συντελεστές Fourier  $a_k$  και  $b_k$ :

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_{T_0} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

Είναι προφανές ότι τα άρτια σήματα αναλύονται σε συνιστώσες συνημιτόνων ενώ τα περιττά, όπως τα ημιτονικά σήματα αναλύονται αποκλειστικά σε μια σειρά ημιτονικών όρων.

Αντίστοιχα ένα σήμα (ή διαδοχή) διακριτού χρόνου  $x[n]$  είναι περιοδικό όταν για θετικό ακέραιο αριθμό  $N$  ισχύει:

$$x[n] = x[n + N] \quad (2.4)$$

Όπου:  $N_0$ , είναι η θεμελιώδης περίοδος του σήματος  $x[n]$  και η μικρότερη θετική τιμή του  $N$ .

Και σε σύνθετη εκθετική μορφή:

$$x[n] = e^{j\omega_0 n} \quad (2.5)$$

με:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$$

Η σειρά Fourier σε μιγαδική εκθετική αναπαράσταση ενός περιοδικού σήματος  $x[n]$  είναι:

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N_0-1} c_k e^{jk\omega_0 n} \quad (2.6)$$

με:

$$c_k = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} x[n] e^{-jk\omega_0 n} \quad (2.7)$$

## 2.3 Μετασχηματισμός Fourier

Ένα σήμα σε συνάρτηση με τον χρόνο που ικανοποιεί πρώτα κάποιες μαθηματικές συνθήκες μπορεί με τη χρήση του μετασχηματισμού Fourier να παρασταθεί σαν συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας ( $\omega$ ) και κατά προέκταση της συχνότητας ( $f$ ). Ο Μ/Σ Fourier μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε σήματα συνεχούς όσο και σε διακριτού χρόνου.

### 2.3.1 Ανάλυση

Έστω ένα μη περιοδικό σήμα διακριτού χρόνου  $x[n]$  πεπερασμένης ενέργειας για το οποίο ισχύει για θετικό ακέραιο  $T_1$ :

$$x[n] = 0, \quad |n| > T_1 \quad (2.8)$$

Και  $\tilde{x}[n]$  η επαναλαμβανόμενη περιοδική επέκταση του σήματος αυτού με θεμελιώδη περίοδο  $T_0$ . Όσο η περίοδος  $T_0$  μεγαλώνει, τόσο τα σήματα  $x[n]$  και  $\tilde{x}[n]$  τείνουν να εξισωθούν με αποτέλεσμα για  $T_0 \rightarrow \infty$  να ισχύει:

$$x[n] = \tilde{x}[n]$$

Η διακριτή σειρά Fourier του  $\tilde{x}[n]$  δίνεται:

$$\tilde{x}[n] = \sum_{k=T_0} c_k e^{jk\omega_0 n} \quad (2.9)$$

με:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0},$$

$$c_k = \frac{1}{T_0} \sum_{n=T_0} \tilde{x}[n] e^{-jk\omega_0 n}$$

Δεδομένου ότι  $x[n] = \tilde{x}[n]$  στο διάστημα  $|n| \leq T_1$ , η εξίσωση  $c_k$  μπορεί να γραφτεί ως:

$$c_k = \frac{1}{T_0} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-jk\omega_0 n} \quad (2.10)$$

Εάν ο μετασχηματισμός Fourier του  $x[n]$  οριστεί ως:

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (2.11)$$

Τότε οι συντελεστές Fourier μπορούν να εκφραστούν ως:

$$c_k = \frac{1}{T_0} X(k\omega_0) \quad (2.12)$$

Με την αύξηση του  $T_0$ , μειώνεται το  $\omega_0$ . Όταν το  $T_0$  τείνει στο άπειρο το άθροισμα της σειράς Fourier μετατρέπεται σε ολοκλήρωμα που αναπαριστά απειροστά διαδοχικά διαστήματα διαφοράς  $\omega_0$  και πλάτους  $X(k\omega_0)e^{jk\omega_0 n}$ . Το διάστημα ολοκλήρωσης θα είναι σταθερό και ίσο με  $2\pi$  και συνεπώς με αντικατάσταση προκύπτει ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier. Τελικά:

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] e^{-j\omega n}$$

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\omega) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.13)$$

Η συνάρτηση  $X(\omega)$  είναι περιοδική με περίοδο  $2\pi$ , και άρα το ίδιο ισχύει για το γινόμενο  $X(\omega)e^{j\omega n}$ . Επίσης, είναι μιγαδική ποσότητα και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$X(\omega) = |X(\omega)|e^{j\varphi_0}$$

Όπου:  $|X(\omega)|$ , είναι το φάσμα μεγέθους

$\varphi_0$ , είναι το φάσμα φάσης

Σημειώνεται ότι όταν το σήμα  $x[n]$  είναι πραγματικό τότε το  $|X(\omega)|$  είναι άρτια συνάρτηση της συχνότητας και το  $\varphi_0$  περιττή. <sup>[1][4]</sup>

### 2.3.2 Ιδιότητες

Οι βασικές ιδιότητες του διακριτού μετασχηματισμού Fourier με εξαίρεση κάποιες μικρές διαφορές είναι κοινές με τις αντίστοιχες συνεχούς χρόνου. Μερικές από τις πιο βασικές είναι:

- Περιοδικότητα:

Ο χρονοδιακριτός μετασχηματισμός Fourier ενός σήματος  $x[n]$  είναι περιοδική συνάρτηση της γωνιακής ταχύτητας ( $\omega$ ) με περίοδο  $2\pi$ . Επομένως ισχύει:

$$X(e^{j(\omega+2\pi)}) = X(e^{j\omega}) \quad (2.14)$$

- Γραμμικότητα:

Αν:

$$x_1[n] \xrightarrow{F} X_1(e^{j\omega}) \quad (2.15)$$

$$x_2[n] \xrightarrow{F} X_2(e^{j\omega}) \quad (2.16)$$

Τότε:

$$\alpha x_1[n] + \beta x_2[n] \xrightarrow{F} \alpha X_1(e^{j\omega}) + \beta X_2(e^{j\omega}) \quad (2.17)$$

- Μετατόπιση Χρόνου & Συχνότητας:

Αν:

$$x[n] \xrightarrow{F} X(e^{j\omega}) \quad (2.18)$$

Τότε:

$$x[n - n_0] \xrightarrow{F} e^{-j\omega n_0} X(e^{j\omega}) \quad (2.19)$$

$$e^{j\omega_0 n} x[n] \xrightarrow{F} X(e^{j(\omega - \omega_0)}) \quad (2.20)$$

Για το πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα.

- Συνελικτική ιδιότητα:

Αν η χρονική απόκριση  $y[n]$  ενός σήματος περιγράφεται στην εξίσωση (2.21) από την συνέλιξη της εισόδου  $x[n]$  με την κρουστική απόκριση  $h[n]$ , τότε στο πεδίο των συχνοτήτων προκύπτει άμεσα από το γινόμενο των αντίστοιχων μετασχηματισμάτων.

$$y[n] = x[n] * h[n] \quad (2.21)$$

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot H(\omega) \quad (2.22)$$

Γενικεύοντας, με αναγωγή σε δύο τυχαία σήματα  $x_1[n]$  και  $x_2[n]$  ισχύει:

$$x_1[n] * x_2[n] \leftrightarrow X_1(\omega) \cdot X_2(\omega) \quad (2.23)$$

- Χρονική αναστροφή
- Χρονική επέκταση
- Πολλαπλασιασμός
- Παραγωγήιση
- Σύζευξη

### 2.3.3 Μ/Σ Fourier Διακριτού Χρόνου (DFT)

Ο Μ/Σ Fourier διακριτού χρόνου υπολογίζεται εύκολα μέσω του αλγόριθμου FFT και παράλληλα αποτελεί τον πλέον προσηλή τρόπο για πραγματοποίηση σε ψηφιακά υπολογιστικά συστήματα έχοντας πεπερασμένο μήκος τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας.

Σήμα  $x[n]$  έχει μηδενική τιμή στο διάστημα  $0 \leq n \leq N - 1$ .

Ο χρονοδιακριτός Μ/Σ Fourier του  $x[n]$  δίνεται:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^k \quad (2.24)$$

με:

$$W_N = e^{-j\omega n k}$$

$$k = 0, 1, \dots, N - 1$$

Και ο αντίστροφος:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-k} \quad (2.25)$$

με:

$$n = 0, 1, \dots, N - 1$$

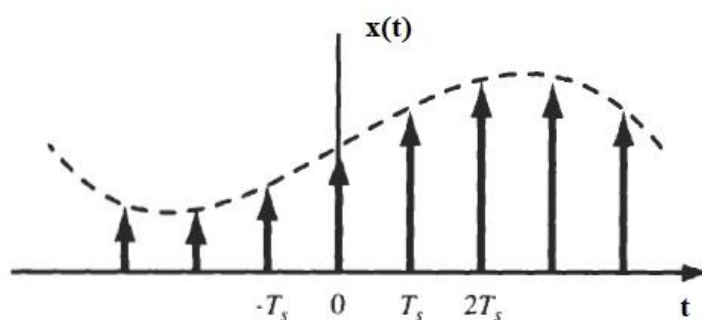
## 2.4 Μετατροπή Αναλογικού Σήματος σε Ψηφιακό (Analog to Digital)

Τα ηλεκτρικά σήματα τάσης και ρεύματος είναι από τη φύση τους αναλογικά σήματα, δηλαδή μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή καθ' όλη την χρονική τους διάρκεια. Πολλές φορές η επεξεργασία ενός τέτοιου σήματος στο πεδίο του διακριτού χρόνου παρουσιάζει αρκετά οφέλη όπως η εύκολη υλοποίηση και το χαμηλό υπολογιστικό κόστος. Η μετατροπή ενός τέτοιου σήματος από την αναλογική στην ψηφιακή μορφή εξυπηρετεί έτσι ώστε το σήμα να μεταφερθεί ή να αναπαραχθεί σε ψηφιακά κανάλια. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται ψηφιοποίηση, επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα AD και γίνεται σε τρία στάδια:

- Δειγματοληψία
- Κβάντιση
- Κωδικοποίηση

### 2.4.1 Θεώρημα Δειγματοληψίας

Σύμφωνα με την θεωρία της δειγματοληψίας, ένα σήμα συνεχούς χρόνου μπορεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να αναπαρασταθεί και να ανακτηθεί από μια ακολουθία δειγμάτων. Κατά την διαδικασία της δειγματοληψίας το αρχικό χρονοσυνεχές σήμα μετατρέπεται σε σήμα διακριτού χρόνου με τη βοήθεια ενός διακοπτικού επιλογέα ο οποίος έχει ρυθμιστεί στην κατάλληλη συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$ . Το σήμα που θα προκύψει αποτελείται από δείγματα τιμών του αρχικού σήματος, ισαπέχοντα στον χρόνο (όχι απαραίτητα) κατά την επιθυμητή περίοδο  $T_s$ . Κατά τις επόμενες διαδικασίες της ψηφιοποίησης, την κβάντιση και την κωδικοποίηση, το σήμα παίρνει την τελική του ψηφιακή μορφή. <sup>[1][4]</sup>



Εικόνα 2.3: Δειγματοληψία αναλογικού σήματος με συχνότητα  $1/T_s$

Ζωνοπερατό σήμα  $x(t)$  με  $X(j\omega) = 0$  για  $|\omega| > \omega_M$ , προσδιορίζεται και ανακατασκευάζεται με ακρίβεια από τα δείγματα της  $x(nT)$  αν,

$$\omega_s > 2\omega_M.$$

Όπου:

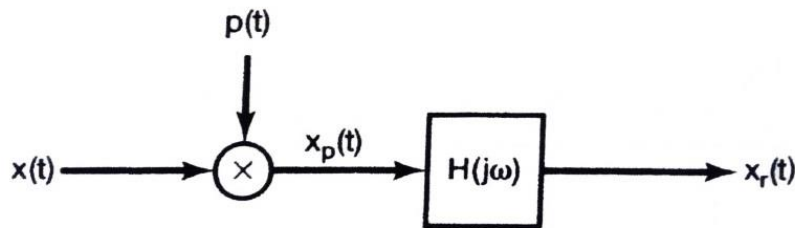
$\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ , καλείται και ρυθμός Nyquist

Στην περιοδική παλμοσειρά εφαρμόζεται ιδανικό βαθυπερατό φίλτρο με κέρδος  $T$  και συχνότητα αποκοπής μεταξύ  $\omega_M$  και  $\omega_s - \omega_M$ .

#### 2.4.2 Κρουστική Παλμοσειρά

Ένας τρόπος αναπαράστασης ενός χρονοσυνεχούς σήματος  $x(t)$  από ισαπέχοντα δείγματα είναι η εφαρμογή μιας περιοδικής ακολουθίας κρουστικών παλμών  $p(t)$ .

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) \quad (2.26)$$



Εικόνα 2.4 : Δομικό διάγραμμα συστήματος προς δειγματοληψία και ανακατασκευή <sup>[4]</sup>

Η συνάρτηση δειγματοληψίας  $p(t)$  με συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$  πολλαπλασιάζεται με το σήμα  $x(t)$ , δίνοντας:

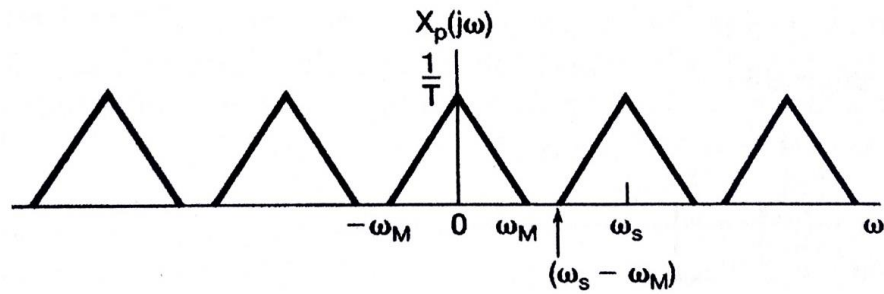
$$x_p(t) = x(t) \cdot p(t) \quad (2.27)$$

Η παραπάνω πράξη θα έχει ως αποτέλεσμα την καταγραφή δειγμάτων με πλάτος του σήματος  $x(t)$  στα σημεία όπου ορίζεται η  $p(t)$ , δηλαδή:

$$x_p(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT) \cdot \delta(t - nT) \quad (2.28)$$

$$X_p(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} X(j(\omega - k\omega_s)) \quad (2.29)$$

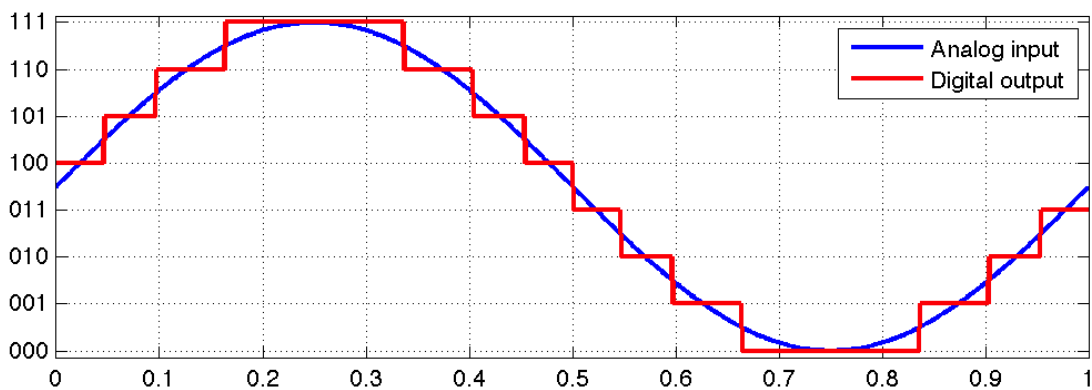
Η  $X_p(j\omega)$  όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.5 είναι περιοδική και αποτελείται από μια υπέρθεση της επαναλαμβανόμενης συνάρτησης  $X_p$  μετατοπισμένης κατά  $1/T_s$ . Παρατηρείται ότι εάν  $\omega_s < 2\omega_M$  εμφανίζεται το φαινόμενο της επικάλυψης, ενώ αν  $\omega_s > 2\omega_M$  το κάθε αντίγραφο παραμένει ανεξάρτητο χωρίς να εισχωρεί στο χώρο των γειτονικών του. <sup>[1][4]</sup>



Εικόνα 2.5 : Φάσμα του σήματος  $x_p(t)$  για συχνότητα δειγματοληψίας  $\omega_s > 2\omega_M$  [4]

### 2.4.3 Κβάντιση / Κωδικοποίηση

Οι τιμές που θα προκύψουν από τη διαδικασία της δειγματοληψίας ενός αναλογικού σήματος παίρνουν τυχαίες τιμές μέσα σε ένα θεωρητικά άπειρο εύρος μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης καταγεγραμμένης. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα που σχετίζονται με την αποθήκευση των δεδομένων αυτών. Η διαδικασία κατά την οποία οι τιμές του αρχικού σήματος που προέκυψε από τη δειγματοληψία ορίζονται σε συγκεκριμένες στάθμες ονομάζεται κβάντιση. Η περιγραφή της κάθε στάθμης γίνεται από έναν δυαδικό αριθμό που αποτελείται από  $N$  bits. Το μέγεθος του αριθμού αυτού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα του αποτελέσματος.



Εικόνα 2.6: Ομοιόμορφη κβάντιση και κωδικοποίηση αναλογικού σήματος σε  $2^3 = 8$  στάθμες

Η κβάντιση χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω παραμέτρους:

- Το πλήθος των επιπέδων  $L$  του κάθετου άξονα, δηλαδή ο αριθμός των δυνατών διαφορετικών τιμών που μπορεί να πάρει η εξαρτημένη μεταβλητή. Αν κάθε στάθμη περιγράφεται από  $N$  bits, τότε  $L = 2^N$ .
- Βήμα κβάντισης. Ο ορισμός μίας τιμής σε στάθμη μπορεί να είναι ομοιόμορφος, δηλαδή με σταθερό βήμα ή ανομοιόμορφος δηλαδή να ακολουθεί διαφορετικό μοτίβο ανάλογα με την περίπτωση. Στην εικόνα 2.6 περιγράφεται ομοιόμορφη κβάντιση με κωδικοποίηση τριών bit. Χαρακτηριστικό παράδειγμα



ανομοιόμορφου κβαντισμού αποτελεί η ψηφιοποίηση της ανθρώπινης φωνής όπου τα πλάτη είναι κυρίως μικρά. Έτσι εφαρμόζεται μικρό βήμα στα μικρά πλάτη και μεγαλύτερο βήμα στα μεγαλύτερα πλάτη.

- Σφάλμα/θόρυβος κβάντισης, σε κάθε περίπτωση εμφανίζεται το αντίστοιχο σφάλμα κβάντισης το οποίο μειώνεται με την αύξηση του πλήθους των ψηφίων περιγραφής και κατ' επέκταση των στάθμεων.
- SN ratio, αποδεικνύεται ότι ο λόγος σήματος-θορύβου βελτιώνεται κατά περίπου 6dB για κάθε bit που προστίθεται στη “λέξη” περιγραφής των επιπέδων.

## 2.5 Φίλτρα

Όταν υπάρχει ανάγκη για επεξεργασία του φάσματος ενός σήματος τότε γίνεται εφαρμογή κατάλληλων γραμμικών χρονικά αμετάβλητων σημάτων (filtering). Το είδος του φίλτρου που θα εφαρμοστεί επιλέγεται ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής όπως για παράδειγμα τη διαμόρφωση του πλάτους ή την αποκοπή μέρους συχνοτήτων από το φάσμα του σήματος. Από την παραπάνω διαφοροποίηση έχουν προκύψει δύο βασικές κατηγορίες, τα φίλτρα διαμόρφωσης και τα φίλτρα επιλογής συχνοτήτων. Ειδικότερες κατηγορίες που βρίσκουν εφαρμογή σε μετατροπείς Φ/Β εγκαταστάσεων αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.5.1 Φίλτρα Επιλογής Συχνοτήτων

Τα φίλτρα επιλογής συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για την επιλεκτική διέλευση συγκεκριμένων ζωνών και την μερική ή ολική αποκοπή άλλων. Αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι πολλών εφαρμογών όπως μεταξύ άλλων της τεχνολογίας τηλεπικοινωνιών, και συγκεκριμένα των συστημάτων AM όπου γίνεται μεταφορά σημάτων από πολλαπλά κανάλια ταυτόχρονα.

Ένα φίλτρο χαρακτηρίζεται μεταξύ άλλων με βάση το εύρος συχνοτήτων που επιλέγει. Η ζώνη των συχνοτήτων που επιτρέπεται ονομάζεται ζώνη διέλευσης (passband), ενώ η ζώνη των συχνοτήτων που αποκόπτονται ονομάζεται ζώνη φραγής (stopband). Τα όρια μεταξύ των δύο ζωνών καθορίζονται από τις συχνότητες αποκοπής (cutoff frequencies). Τυπικές κατηγορίες είναι:

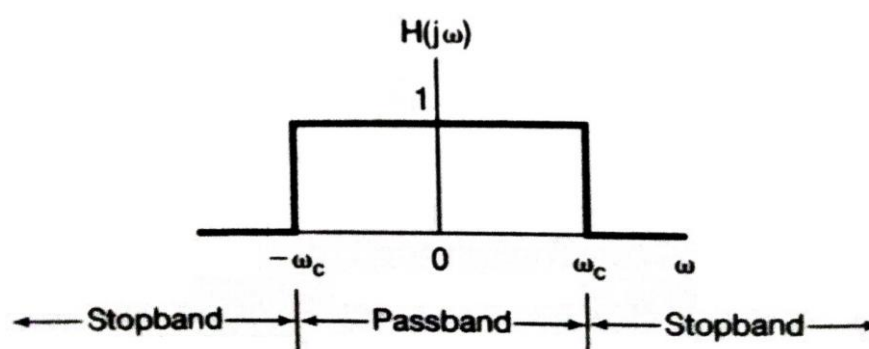
- **Βαθυπερατό** (lowpass), ή χαμηλοπερατό φίλτρο είναι αυτό που επιτρέπει τις χαμηλές συχνότητες και απορρίπτει τις υψηλές.
- **Υψιπερατό** (highpass), είναι το φίλτρο από το οποίο διέρχονται μόνο οι υψηλές συχνότητες.
- **Ζωνοπερατό** (bandpass), χαρακτηρίζεται ένα φίλτρο που επιτρέπει τη διέλευση σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων και αποκόπτει τις υπόλοιπες που βρίσκονται άνω και κάτω από τη ζώνη διέλευσης.

Σε πραγματικές συνθήκες, φίλτρα με ιδανικά χαρακτηριστικά δεν είναι δυνατό να κατασκευαστούν. Παράμετροι από τις οποίες χαρακτηρίζεται η ποιότητα ενός φίλτρου

είναι τα ποσοστά κάλυψης στις ζώνες διέλευσης και φραγής, τα ποσοστά της μέγιστης και ελάχιστης κυμάτωσης, καθώς και η κλίση της περιοχής μετάβασης από τη μια ζώνη σε άλλη.

Συνοπτικά ένα φίλτρο χαρακτηρίζεται από:

- Τη συχνότητα αποκοπής  $f_c$  & τη συχνότητα ζώνης  $f_s$
- Την κυμάτωση στη ζώνη διέλευσης
- Την κυμάτωση στη ζώνη αποκοπής
- Τον βαθμό επιλεκτικότητας  $f_c / f_s$
- Τη μεταβατική ζώνη μεταξύ των ζωνών διέλευσης και αποκοπής.



Εικόνα 2.7 : Απόκριση συχνότητας ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου <sup>[4]</sup>

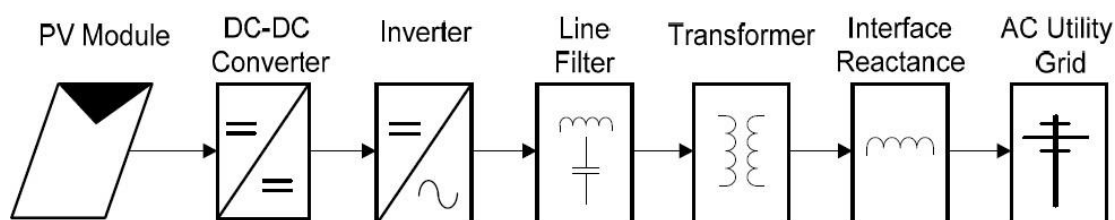
Η απόκριση της συχνότητας ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου της εικόνας 2.7 περιγράφεται:

$$H(j\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \omega_c \\ 0, & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (2.30)$$

Παρατηρείται ότι η φασματική απόκριση των φίλτρων παρουσιάζει συμμετρία έχοντας δύο ζώνες διέλευσης με συχνότητες αποκοπής  $\omega_c$  και  $-\omega_c$ . Επίσης, στα φίλτρα διακριτού χρόνου, σε αντίθεση με τα χρονοσυνεχή, η απόκριση συχνότητας είναι περιοδική με  $T = 2\pi$ . <sup>[4]</sup>

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Διασυνδεδεμένα Φ/Β Συστήματα

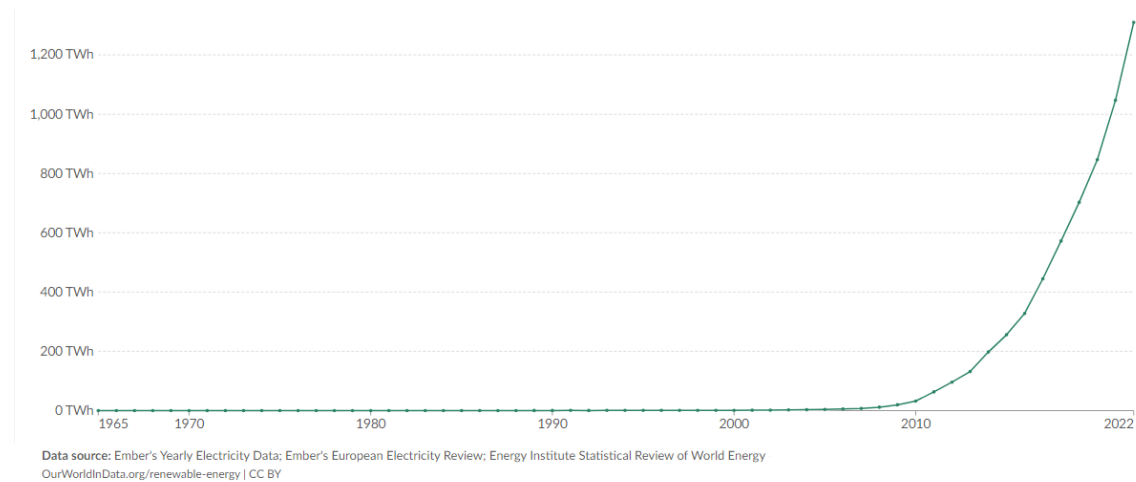
Τα ενεργά φωτοβολταϊκά συστήματα που λειτουργούν παγκοσμίως είναι στην πλειοψηφία τους συνδεδεμένα σε κάποιο δίκτυο από όπου η ενέργεια μπορεί να διανεμηθεί απευθείας προς κατανάλωση. Το δομικό διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1. Πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν σε σχέση με τις εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν μόνο μπαταρίες είναι το χαμηλότερο κόστος και οι μειωμένες ανάγκες συντήρησης. Ωστόσο, ο αριθμός των διασυνδεδεμένων συσκευών επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά και τη λειτουργική κατάσταση του δικτύου καθώς μπορεί να εμφανιστούν απρόβλεπτα μεταβατικά φαινόμενα. Επιπλέον, η υψηλή διείσδυση φωτοβολταϊκών μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην ισορροπία των φάσεων, στον έλεγχο της τάσης αλλά και γενικότερα στην κατεύθυνση και την ποιότητα της ισχύος που κυκλοφορεί στο δίκτυο. [16]



Εικόνα 3.1 : Δομικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος [31]

#### 3.1 Βασικές Αρχές και Λειτουργία Φ/Β Γεννήτριας

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί μια από τις επικρατέστερες πηγές βιώσιμης ενέργειας. Βασισμένο στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και με σχεδόν μηδενικό κόστος παραγωγής, ένα φωτοβολταϊκό δέχεται την ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας και την μετατρέπει σε ένα ποσοστό σε ηλεκτρική. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 3.2, και ιδιαιτέρως την τελευταία πενταετία ο ρυθμός αύξησης της εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας προς παραγωγή ηλεκτρικής σε παγκόσμια κλίμακα είναι μεγάλος. Στην Ελλάδα, περιοχή με καλό ηλιακό δυναμικό, η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς σήμερα υπερβαίνει τα 3.000 MW εκ των οποίων η πλειοψηφία προέρχεται από διασυνδεδεμένα συστήματα, ενώ από την συνολική παραγόμενη ενέργεια τα Φ/Β καλύπτουν μόλις το 10-15% τη στιγμή που το 50% της ενέργειας παράγεται σε θερμικούς σταθμούς. [45]



Εικόνα 3.2 : Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά έτος προερχόμενη από ηλιακή ενέργεια

Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν ένα ευέλικτο είδος ηλεκτρικής γεννήτριας που βρίσκει εφαρμογή τόσο σε αστικά κέντρα όσο και σε απομονωμένες περιοχές, ενώ η ενέργεια που παράγεται είτε τροφοδοτεί απευθείας τις καταναλώσεις, είτε αποθηκεύεται σε κατάλληλους συσσωρευτές για εφεδρεία. Ωστόσο, και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας επιτυγχάνεται μέσω συστημάτων ελέγχου και ρυθμιστές φόρτισης. Η διάρκεια ζωής ενός πλαισίου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική προσεγγίζοντας τα 20-30 έτη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόνομα για την κάλυψη ενός μέρους των αναγκών μιας εγκατάστασης ή συνδυαστικά με κάποιο άλλο σύστημα παραγωγής (π.χ. μικρή ανεμογεννήτρια). Επίσης τόσο οικιακοί όσο και βιομηχανικοί καταναλωτές μπορούν να υιοθετήσουν το σύστημα της αυτοπαραγωγής συνδέοντας το φωτοβολταϊκό σύστημα στο δίκτυο. Εν συντομία κάποια από τα πλεονεκτήματα των Φ/Β είναι: <sup>[3]</sup>

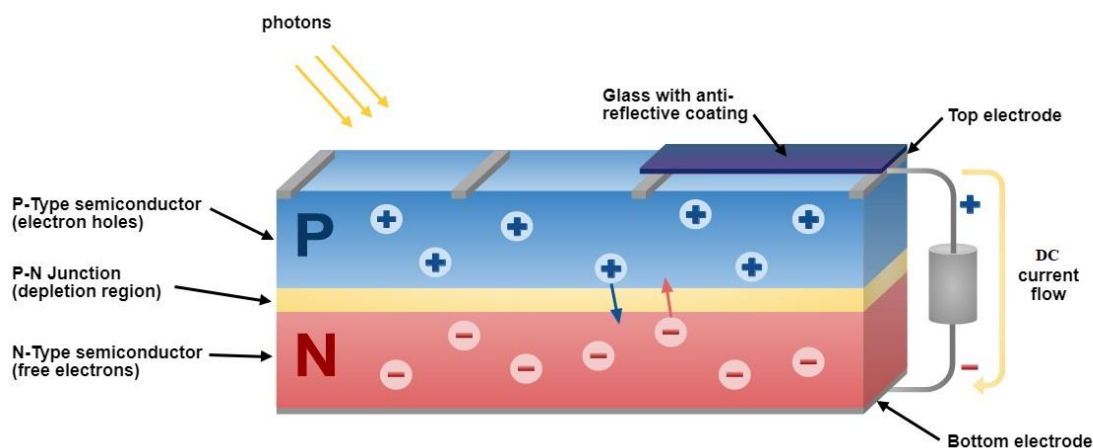
- Σχεδόν μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας
- Φιλικά προς το περιβάλλον
- Μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης
- Εύκολη εγκατάσταση / Δυνατότητα επεκτασιμότητας
- Αθόρυβη λειτουργία
- Δυνατότητα συνδυασμού με άλλες μονάδες παραγωγής

### 3.1.1 Λειτουργία

Η βάση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών είναι τα στοιχεία του (φωτοβολταϊκά στοιχεία). Αποτελούνται από ημιαγωγικές πλάκες οι οποίες μπορεί να είναι προσμίξεις πυριτίου, και ανάλογα με την σύστασή τους τα στοιχεία διακρίνονται σε μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, άμορφα, αλλά και σχετικά νέων τεχνολογιών όπως λεπτού υμενίου και από οργανικά/πολυμερή. Το κάθε είδος έχει την δική του απόδοση και χρησιμότητα, ενώ η καταλληλότητα για τον κάθε καταναλωτή έγκειται

στις ανάγκες του και τη χρήση που θα κάνει. Ενδεικτικές αποδόσεις που κυκλοφορούν στην αγορά κυμαίνονται μεταξύ 5-20%. [3] [8]

Οι ημιαγώγιμες πλάκες συνδέονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε με την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας σε αυτές και την κινητοποίηση των ηλεκτρονίων να δημιουργείται στην επαφή τους ένα δυναμικό χάσμα.



Εικόνα 3.3: Βασική δομή Φ/Β στοιχείου

Με την σύνδεση των δύο αυτών πλακών μέσω ενός αγωγού θα ξεκινήσει η ροή ηλεκτρονίων από την μια πλάκα στην άλλη. Ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο της τάσης, τα στοιχεία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά δημιουργώντας πλαίσια και τα πλαίσια με τη σειρά τους μια συστοιχία.

Μια αυτόνομη φωτοβολταϊκή εγκατάσταση αποτελείται από τα πλαίσια που θα μετατρέψουν την ηλιακή σε ηλεκτρική ενέργεια, τους συσσωρευτές για αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, τους ρυθμιστές φόρτισης για να ελέγχεται η φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών, και τους αντιστροφείς οι οποίοι μετατρέπουν την συνεχή τάση που παράγεται σε εναλλασσόμενη και καθορίζουν την μέγιστη ισχύ που θα είναι διαθέσιμη προς εκμετάλλευση.

Σε ένα συνδεδεμένο φ/β σύστημα η παραγόμενη ενέργεια αξιοποιείται για την άμεση κάλυψη των αναγκών της εγκατάστασης ενώ όταν αυτή υπερκαλύπτεται ή δεν είναι αρκετή τότε η παραγόμενη ενέργεια ενσωματώνεται στο δίκτυο ή αντλείται από αυτό αντίστοιχα. Και εδώ κεντρικό μέρος του συστήματος αποτελεί ο αντιστροφέας που μεσολαβεί μεταξύ των Φ/Β και του δικτύου και ελέγχει την αμφίδρομη ροή ισχύος.

### 3.1.2 Μοντελοποίηση Φ/Β Στοιχείου

Το ρεύμα που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο υπό ιδανικές συνθήκες μπορεί να υπολογιστεί εύκολα αφού προκύπτει από την διαφορά του ρεύματος που προκαλείται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας με το ρεύμα της αντιπαράλληλης διόδου που αντιπροσωπεύει την επαφή του ημιαγωγού.

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Όπου:

$I_{cell}$ , το ρεύμα του στοιχείου

$I_{ph}$ , το φωτόρευμα, ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

$I_o$ , το ρεύμα κόρου της διόδου

$q$ , το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου  $1.6 \times 10^{-19} C$

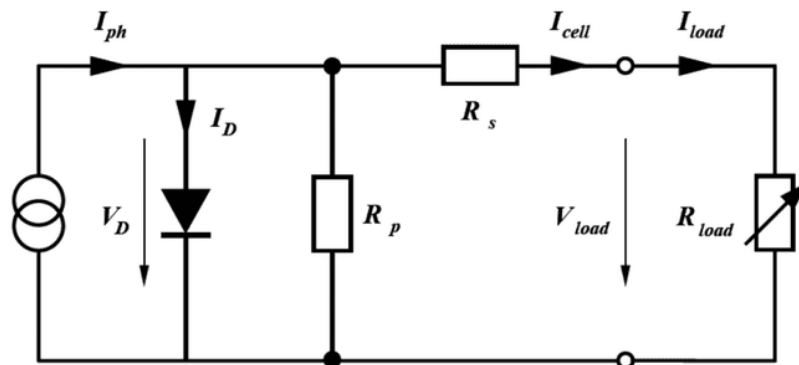
$V$ , η τάση στα άκρα του στοιχείου

$k$ , σταθερά Boltzmann

$T$ , η θερμοκρασία σε Kelvin

Είναι φανερό από την εξίσωση (3.1) και από την εικόνα 3.6 ότι το ρεύμα που παράγεται εξαρτάται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, επομένως καθοριστικής σημασίας είναι η σωστή επιλογή του τύπου εγκατάστασης και ο προσανατολισμός.

Σε πραγματικές συνθήκες η εξίσωση (3.1) μπορεί να γίνει πιο σύνθετη αν μεταξύ των στοιχείων και της κατανάλωσης παρεμβληθούν μια παράλληλη και μια αντίσταση σειράς όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4 : Ηλεκτρικό ισοδύναμο Φ/Β στοιχείου [8]

Με την καλύτερη αυτή προσέγγιση το παραγόμενο ρεύμα μπορεί να υπολογιστεί ως: [8]

$$I_{cell} = I_{ph} - I_o \left( e^{\frac{q}{kT}(V_{load} + I_{cell}R_s)} - 1 \right) - \frac{V_{load} + I_{cell}R_s}{R_p} \quad (3.2)$$

Όπου:

$R_s$ , η αντίσταση σειράς

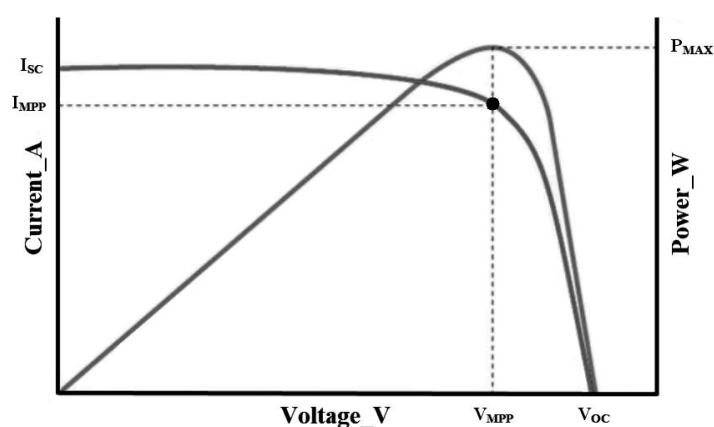
$R_p$ , η παράλληλη αντίσταση

$R_{load}$ , η αντίσταση του φορτίου

### 3.1.3 Χαρακτηριστικές Καμπύλες

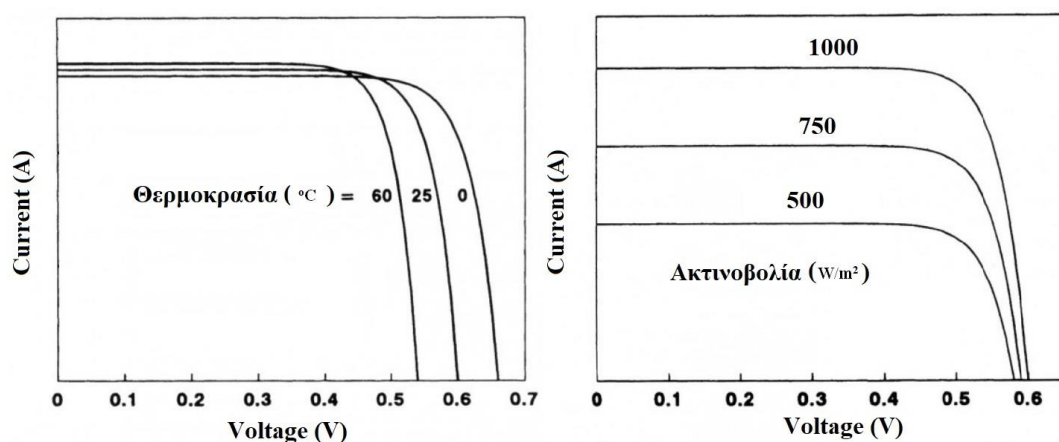
Μια από τις πιο χρήσιμες πληροφορίες που δίνονται για ένα φωτοβολταϊκό είναι οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης I-V και ισχύος-τάσης P-V οι οποίες απεικονίζουν τις δυνατότητες και τις λειτουργικές συνθήκες για τις οποίες προορίζεται η χρήση του και διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος και τον κατασκευαστή. Η κοινή αναφορά των ονομαστικών στοιχείων ενός πλαισίου γίνεται με βάση τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (Standard Test Conditions) οι οποίες ορίζουν:

- Ένταση προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας  $1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Μάζα αέρα 1.5



Εικόνα 3.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος και ισχύος συναρτήσει της τάσεως

Οι μέγιστη δυνατότητα ισχύος της γεννήτριας  $P_{MAX}$  καθορίζεται από την καμπύλη ισχύος και αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο συνδυασμό πάνω στην χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος, η οποία σχεδιάζεται για διαφορετικές τιμές τάσης με ακραία σημεία την κατάσταση βραχυκυκλώματος (sc) και ανοιχτού κυκλώματος (os).<sup>[8]</sup>



Εικόνα 3.6: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης με παράμετρο την θερμοκρασία και την ηλιακή ένταση

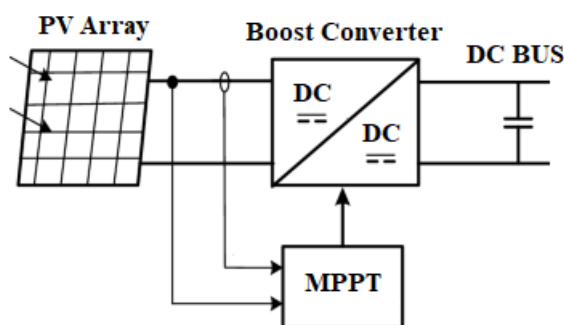
Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου ενός φ/β στοιχείου όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6 επηρεάζει κατά κύριο λόγο την παραγόμενη τάση. Το ρεύμα μεταβάλλεται σε τέτοιο βαθμό που μπορεί να αγνοηθεί. Αντιθέτως η ένταση της ακτινοβολίας όχι μόνο επηρεάζει την παραγωγή ρεύματος αλλά αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα. Η μεταβολή των παραπάνω μεγεθών ανά βαθμό Kelvin για ένα φ/β πλαίσιο δίνεται από τον κατασκευαστή και απεικονίζει την αξιοπιστία του.

Συνοπτικά, τα στοιχεία μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας αναφέρονται πάντα στις STC συνθήκες και αναγράφονται πάνω σε κάθε μονάδα. Κάποια από τα πιο συνηθισμένα είναι:

- Ονομαστική ισχύς  $P_{MAX}$
- Τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{OC}$
- Ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$
- Τάση μέγιστης ισχύος  $V_{MPP}$
- Ρεύμα μέγιστης ισχύος  $I_{MPP}$
- Απόδοση πλαισίων %
- Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίων
- Όρια θερμοκρασίας  $T_{MIN} \div T_{MAX}$
- Θερμοκρασιακοί συντελεστές  $P_{MAX}, V_{OC}, I_{SC}$  σε % /  $C^{\circ}$

### 3.2 Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος

Η παραγόμενη ενέργεια των Φ/Β χαρακτηρίζεται από μεγάλες εναλλαγές κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου αφού εξαρτάται άμεσα από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, τη θερμοκρασία και άλλους μεταβαλλόμενους παράγοντες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ο αντιστροφέας θα έχει τη μέγιστη δυνατή απόδοση καθ' όλον τον κύκλο λειτουργίας του, έχουν ενσωματωθεί συστήματα παρακολούθησης και ανίχνευσης του σημείου μέγιστης απόδοσης (MPPT), λειτουργία που αποτελεί στοιχείο ανάδρασης μεταξύ της παραγόμενης τάσης και του μετατροπέα DC/DC όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7: Δομικό διάγραμμα σύνδεσης ελεγκτή MPPT



Το χαρακτηριστικό αυτό σημείο λειτουργίας βρίσκεται πάνω στην καμπύλη  $I-V$  και μάλιστα η εξάρτησή του από τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν είναι μη γραμμική. Η ανίχνευση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κάποιου αλγόριθμου, οι πιο διαδεδομένοι εκ των οποίων είναι:

- Perturbation and Observation (P & O)
- Hill Climbing (HC)
- Incremental Conductance (INC)

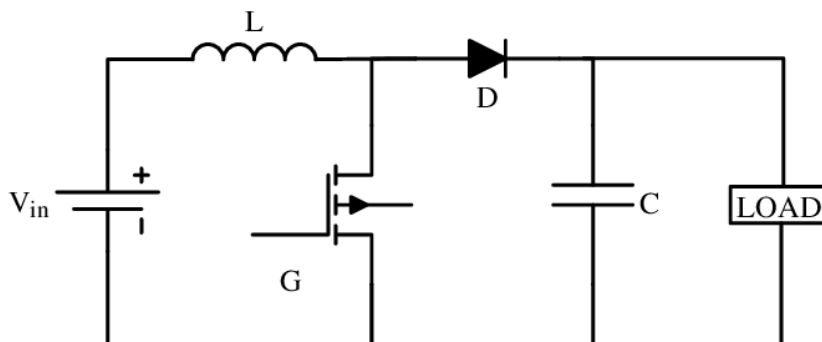
Οι παραπάνω αλγόριθμοι ανήκουν στους λεγόμενους συμβατικούς. Μια άλλη κατηγορία που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι αυτή της τεχνητής νοημοσύνης (AI) με χαρακτηριστική και πιο δημοφιλή τεχνική ελέγχου την Fuzzy Logic. Όλες οι παραπάνω μέθοδοι διαφέρουν ως προς το κόστος, την πολυπλοκότητα, την ταχύτητα σύγκλισης και άλλους παράγοντες. Κάποια από τα βασικά θετικά και αρνητικά χαρακτηριστικά τους παρατίθενται στον πίνακα 5.

**Πίνακας 5.** Σύγκριση αλγορίθμων MPPT

Αλγόριθμος	Αναλογικός/ Ψηφιακός	Ταχύτητα σύγκλισης	Πολυπλοκότητα υλοποίησης	Μέθοδος παρακολούθησης
P & O	και τα 2	μέτρια	χαμηλή	επαναληπτική
HC	και τα 2	χαμηλή	χαμηλή	επαναληπτική
INC	ψηφιακός	ποικίλλει	μέτρια	μαθηματικός υπολογισμός
FL	ψηφιακός	υψηλή	υψηλή	ευφυής πρόβλεψη

### 3.3 Μετατροπείας DC/DC

Η παραγόμενη συνεχής τάση από το κάθε πλαίσιο δεν τηρεί πάντα τις απαιτούμενες προδιαγραφές, επομένως πριν περάσει στην διαδικασία της μετατροπής DC/AC πρέπει να σταθεροποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κάποιου ρυθμιστή που συνήθως είναι ένας DC/DC μετατροπέας. Αυτός ο μετατροπέας είναι απαραίτητος σε πολλές εφαρμογές όπως π.χ. σε τροφοδοτικά και σε ελεγκτές στροφών ηλεκτρικών κινητήρων. Μετατρέπει μία συνεχή τάση σε συνεχή σταθερής ή μεταβαλλόμενης τιμής προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις. Οι μετατροπείς αυτοί χαρακτηρίζονται με βάση το κέρδος τάσης που μπορούν να αποδώσουν και διακρίνονται σε αυτούς που περιλαμβάνουν μετασχηματιστή και σε αυτούς που δεν περιλαμβάνουν. Οι πρώτοι παρέχουν γαλβανική απομόνωση αφού δεν επιτρέπουν την άμεση μεταφορά ρεύματος μεταξύ εισόδου και εξόδου και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής της εξόδου αφού δεν υπάρχει καθορισμένο δυναμικό στους ακροδέκτες της. Οι δεύτεροι καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και είναι οικονομικότεροι.



Εικόνα 3.8: Κύκλωμα DC/DC μετατροπέα ανύψωσης

Όταν το επίπεδο της παραγόμενης τάσης ενός φωτοβολταϊκού είναι χαμηλότερο από αυτό του δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί, το είδος του μετατροπέα που επιλέγεται είναι αυτό του μετατροπέα ανύψωσης (boost ή step-up) έτσι ώστε η τάση των γεννητριών να προσαρμοστεί με αυτήν του δικτύου. Αποτελείται από ημιαγωγούς διακόπτες και περιλαμβάνει τουλάχιστον δύο στοιχεία αποθήκευσης ενέργειας. Η τοπολογία του κυκλώματος της εικόνας 3.8 αποτελεί κλασική περίπτωση ενός τέτοιου μετατροπέα. Όσο η διόδος δεν άγει το φορτίο συντηρείται από την αποθηκευμένη ενέργεια του πυκνωτή, ενώ όταν η παραγόμενη τάση μαζί με την συσσωρευμένη του πηνίου ξεπεράσει το φράγμα της διόδου, εμφανίζεται στο φορτίο η ζητούμενη αυξημένη τάση.

### 3.4 Αντιστροφείς DC/AC

Οι αντιστροφείς DC/AC αποτελούν τον συνδυαστικό κρίκο μεταξύ συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Τροφοδοτούμενοι από πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος αναλαμβάνουν την παροχή εναλλασσόμενης τάσης απευθείας σε φορτία ή στο δίκτυο το οποίο συνδέονται. Σε μία φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι μεταξύ άλλων υπεύθυνοι για:

- Την παροχή καθαρής ισχύος σύμφωνα με τα πρότυπα.
- Τον έλεγχο και την επιτήρηση των συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασία, ακτινοβολία κ.α.)
- Την τήρηση των κριτηρίων ασφαλείας.

Διακρίνονται σε μονοφασικούς και τριφασικούς, ενώ μπορούν να ενταχθούν σε πολλές υποκατηγορίες ανάλογα με τον σχεδιασμό και τον τρόπο ελέγχου. Βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τεχνολογικούς τομείς όπως για παράδειγμα σε:

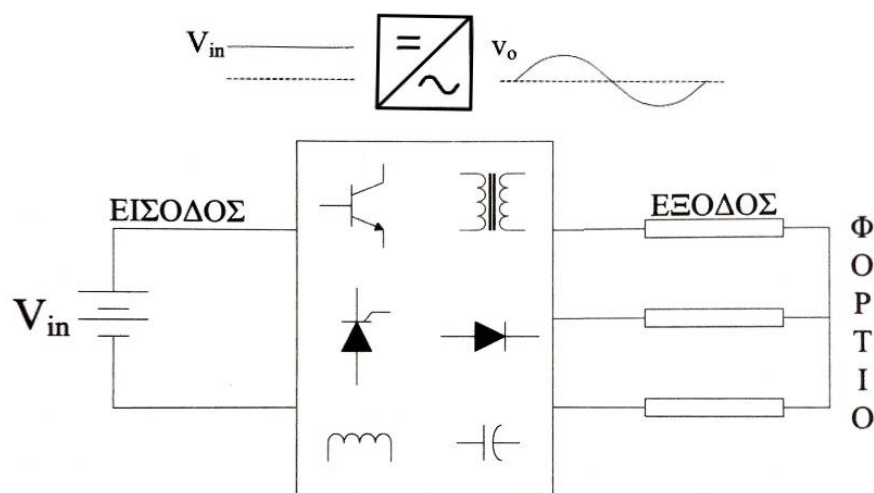
- Εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. (Φ/Β, Αιολικές κ.α.)
- Συστήματα κίνησης και ελέγχου ηλεκτρικών οχημάτων
- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. υποβρύχια HVDC)
- Συστήματα UPS, λοιπά τροφοδοτικά

Από το συνολικό κόστος της Φ/Β εγκατάστασης οι αντιστροφείς καταλαμβάνουν το 10 με 15%. Αυτοί που χρησιμοποιούνται σε διασυνδεδεμένα συστήματα είναι συνήθως VSI με τεχνικές ελέγχου του ρεύματος και λειτουργούν με ενδεικτικές τιμές φέροντος σήματος σε ένα εύρος συχνοτήτων από 2 έως 20 kHz. Κατάλληλος για χρήση κρίνεται ένας αντιστροφέας εφόσον ικανοποιεί συνθήκες συμβατότητας με το δίκτυο σύνδεσης. Τέτοιες συνθήκες σχετίζονται με:

- Τον συντελεστή ισχύος
- Τη δυνατότητα συγχρονισμού
- Την έγχυση αρμονικών
- Την έγχυση συνεχούς ρεύματος
- Τον έλεγχο της συχνότητας
- Τη συνεισφορά του αντιστροφέα στο ρεύμα σφάλματος
- Την απόκριση σε διαταραχές του δικτύου

Από απαιτήσεις προστασίας ο αντιστροφέας θα πρέπει να είναι σε θέση να προβλέπει και να ανιχνεύει γρήγορα ανεπιθύμητες καταστάσεις και να απομονώνει τη γεννήτρια από το δίκτυο σε περιπτώσεις υπέρτασης, διακοπής ή αστάθειας της συχνότητας. Επίσης θα πρέπει να παρέχει προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης σύμφωνα με το πρότυπο VDE 0126 και γενικότερα να εξασφαλίζει ότι τηρούνται οι κανόνες ασφαλείας για την αποφυγή καταστάσεων που θέτουν σε κίνδυνο το προσωπικό. [8]

Η είσοδος τους είναι μια συνεχής τάση, όπως π.χ. η έξοδος ενός μετατροπέα ανύψωσης, ενώ το κυρίως μέρος αποτελείται από το σύστημα ελέγχου και τα ημιαγωγά στοιχεία που αναλαμβάνουν πρακτικά το στάδιο της μορφοποίησης της εξόδου. Επίσης τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο υπάρχουν φίλτρα σταθεροποίησης και αποκοπής αρμονικών αντίστοιχα (π.χ. χαμηλοπερατό LC).



Εικόνα 3.9 : Δομικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα DC/AC [5]

Ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ, τις προδιαγραφές του αντιστροφέα και το περιβάλλον για το οποίο προορίζεται η λειτουργία του (θερμοκρασία, όγκος κ.α.), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του στοιχεία αντίστοιχων δυνατοτήτων, όπως θυρίστορ ή GTOs για εφαρμογές μεγάλων ρευμάτων και χαμηλών συχνοτήτων, και IGBTs και MOSFETs για εφαρμογές σε πολύ υψηλότερες συχνότητες.

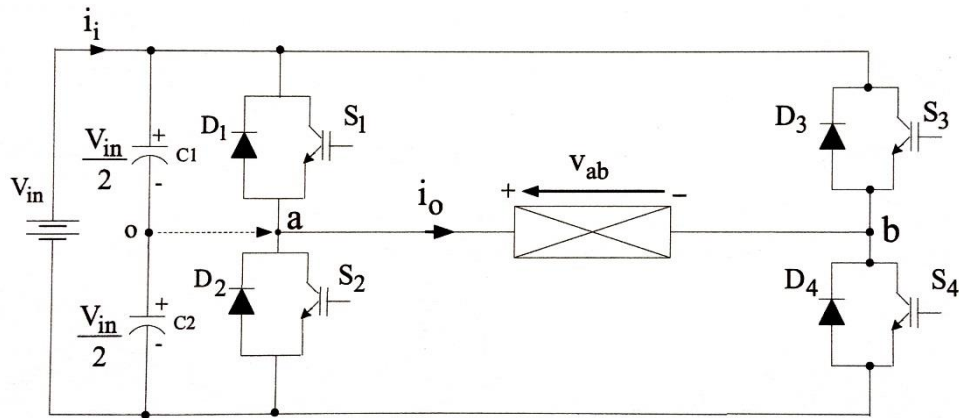
### 3.4.1 Τύποι Αντιστροφέων

Δύο βασικά είδη αποτελούν οι αντιστροφείς μεταγωγής γραμμής (Line Commutated) και οι αυτόματοι (Self-Commutated). Στην πρώτη κατηγορία η μεταγωγή των διακοπών εξαρτάται από τις συνθήκες του δικτύου. Αντιθέτως, στους αυτόματους αντιστροφείς ο έλεγχος των διακοπών βασίζεται στον προγραμματισμό που έχει καθορίζει ο χρήστης καθιστώντας τους έτσι πλήρως ελέγξιμους ως προς την τάση ή το ρεύμα εξόδου. Επιπλέον, οι αυτόματοι επηρεάζονται λιγότερο από τυχόν διαταραχές και έχουν καλύτερη απόδοση ως προς τον περιορισμό της αρμονικής παραμόρφωσης στο ρεύμα. Η χρήση τους προτιμάται για εφαρμογή σε συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα και οι περαιτέρω διακρίσεις αποτελούν υποκατηγορίες των SC αντιστροφέων. Μια τέτοια διάκριση αναφέρεται στο είδος της τροφοδοσίας, δηλαδή σε αυτούς που τροφοδοτούνται από πηγή τάσης (VSI), και αυτούς που τροφοδοτούνται από πηγή ρεύματος (CSI). Κατά γενική παραδοχή οι VSI υπερτερούν στα παρακάτω σημεία:

- Μειωμένες απώλειες
- Ευκολότερος έλεγχος
- Μειωμένες απαιτήσεις φίλτρων
- Παρέχουν καλύτερη ποιότητα ισχύος

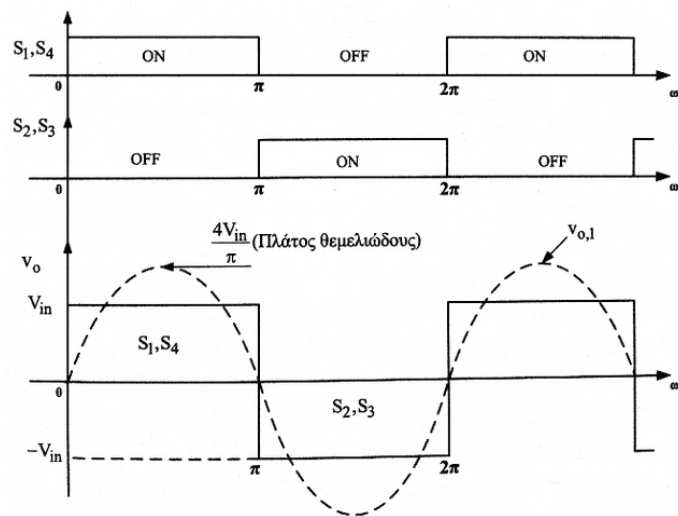
Ως προς την παρεχόμενη ισχύ, οι αντιστροφείς που κυκλοφορούν στην αγορά ξεκινούν από μερικά kW για μικρές εγκαταστάσεις, και φτάνουν μέχρι αρκετές εκατοντάδες kW όταν πρόκειται για σταθμούς παραγωγής Η.Ε. Άλλες διαφοροποιήσεις αφορούν στις φάσεις (μονοφασικοί, τριφασικοί), στα επίπεδα του αντιστροφέα (π.χ. δύο, τριών ή περισσότερων), στη δυνατότητα για μονόδρομη ή αμφίδρομη ροή ισχύος και στον σχεδιασμό, ο οποίος μπορεί να γίνει με πολλούς εναλλακτικούς τρόπους, όπως π.χ. με συνδεσμολογία ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας.

Η πιο απλή μορφή είναι αυτή του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας. Έχει τον λιγότερο σύνθετο σχεδιασμό, αλλά για λόγους μειωμένων δυνατοτήτων και καταπόνησης των στοιχείων έχει υπερισχύσει ο τύπος πλήρους γέφυρας (εικόνα 3.10).



Εικόνα 3.10 : Μονοφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με διόδους και IGBTs [5]

Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από την συνεχή τάση εισόδου  $V_{in}$ , πυκνωτές σταθεροποίησης και διόδους αντιπαράλληλα με τους ελεγχόμενους ημιαγωγούς-διακόπτες. Η αγωγή των ημιαγωγών διακοπών ελέγχεται μέσω ρυθμισμένων παλμών οδήγησης όπως αυτών της εικόνας 3.11, με στόχο την μορφοποίηση της επιθυμητής τάσης εξόδου, ενώ η διάδος ελευθέρως ροής αφενός επιτρέπει την ροή ισχύος από το φορτίο στην πηγή και αφετέρου αποτρέπει τις υπερτάσεις στα άκρα των διακοπών.

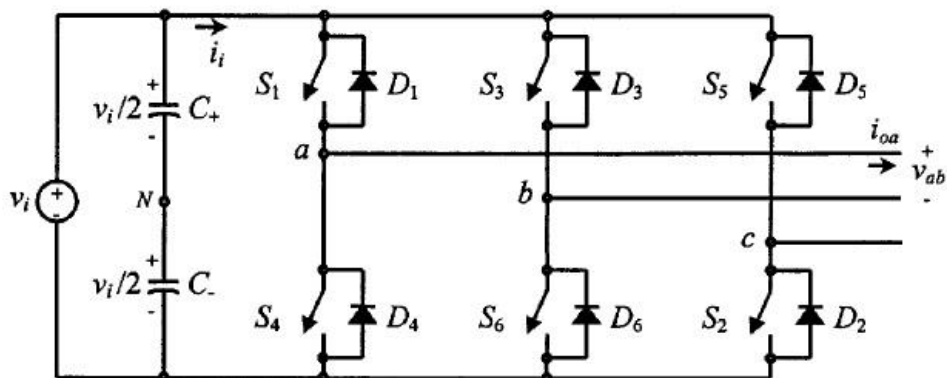


Εικόνα 3.11 : Παλμοί οδήγησης διακοπών αντιστροφέα πλήρους γέφυρας 2 επιπέδων (bipolar) [5]

Οι διακόπτες που οδηγούνται από το ζεύγος παλμών της εικόνας 3.11 άγουν για  $180^\circ$  διαδοχικά και δίνουν τάση δύο επιπέδων (τετραγωνικό παλμό). Παρά το χαμηλό επίπεδο ισχύος που καλύπτουν, συνήθιζαν να χρησιμοποιούνται τα παλαιότερα χρόνια σε εφαρμογές όπως μονοφασικά τροφοδοτικά αλλά πλέον έχουν αντικατασταθεί λόγω υψηλού δείκτη THD%.

Οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις ισχύος είναι μεγαλύτερες και οι μονοφασικοί δεν μπορούν να τις καλύψουν αλλά και όπου

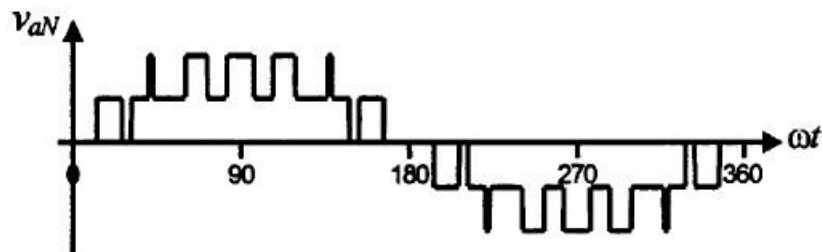
εμπλέκονται συστήματα κίνησης και ηλεκτρικές μηχανές. Το βασικό κύκλωμα ενός τριφασικού αντιστροφέα είναι αυτό της εικόνας 3.12.



Εικόνα 3.12 : Τοπολογία τριφασικού αντιστροφέα <sup>[7]</sup>

Η τάση που παράγεται μπορεί να είναι ορθής ή ανάστροφης διαδοχής ενώ η συχνότητα και μέση τιμή εξόδου ελέγχονται πάντα από την αγωγή των διακοπών. Όπως και στους μονοφασικούς, πρέπει και εδώ να εξασφαλίζεται ότι οι διακόπτες που είναι σε σειρά (π.χ. το ζεύγος  $S_1, S_4$ ) δεν άγουν ταυτόχρονα διότι θα εμφανιστεί βραχυκύκλωμα στα άκρα της συνεχούς τάσης εισόδου. Σε ότι αφορά στην ποιότητα ισχύος και στην συμπεριφορά τους ως προς την αρμονική παραμόρφωση διαφέρουν από τους μονοφασικούς διότι δεν παράγουν τριπλές αρμονικές οι οποίες καταλαμβάνουν μεγάλο ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης.

Από την ανάλυση ενός σήματος δύο επιπέδων όπως ένας τετραγωνικός παλμός, προκύπτουν πλάτη αρμονικών σε χαμηλές συχνότητες που οδηγούν σε σημαντικό THD%. Από την διαίρεση της τάσης εισόδου σε περισσότερα επίπεδα με την βοήθεια περισσότερων πυκνωτών μπορεί να δημιουργηθεί μια καλύτερη προσέγγιση του ημιτόνου όπως το σήμα της εικόνας 3.13. Αυτό συνεπάγεται βελτίωση του δείκτη παραμόρφωσης και δυνατότητα για παραγωγή υψηλότερων τάσεων με τις ίδιες διακοπτικές συχνότητες. Οι αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος παρουσιάζοντας καλύτερη απόδοση από τους αντίστοιχους δύο επιπέδων λόγω διακοπτικών απωλειών.



Εικόνα 3.13 : Φασική τάση 5 επιπέδων <sup>[7]</sup>

Ένα μειονέκτημα είναι ότι για την κατασκευή τους χρειάζεται πολλαπλάσιος αριθμός διόδων και διακοπτικών στοιχείων. Μπορεί να είναι τριών, πέντε, εννέα κ.α. επιπέδων μεριμνώντας πάντα για την τήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Τύποι τέτοιων αντιστροφών είναι: <sup>[5]</sup>

- Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού (DCMI)
- Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων με αιωρούμενους πυκνωτές (FCMI)
- Αντιστροφείς πολλαπλών επιπέδων από μονοφασικούς αντιστροφείς σε σειρά (SDCSMI)

### 3.4.2 Βαθμός Απόδοσης

Η απόδοσή των σύγχρονων αντιστροφών αναφέρεται στην μέγιστη καταγεγραμμένη απόδοση και είναι ιδιαιτέρως υψηλή σε ποσοστά που ξεπερνούν και το 95%. Για τους DC/AC αντιστροφείς ισχύει:

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \quad (3.3)$$

Οι απώλειες που εμφανίζονται μπορεί να οφείλονται στα ημιαγωγά στοιχεία, στην ωμική αντίσταση των εξαρτημάτων κ.α. Ένα γεγονός που παρατηρείται είναι ότι οι ημιαγωγοί παρότι στην αναλογική περιοχή είναι καταναλωτές ενέργειας, στις περιοχές αποκοπής και κορεσμού όπου και συμπεριφέρονται ως διακόπτες δεν εμφανίζουν σημαντικές απώλειες.

Οι αντιστροφείς με μετασχηματιστή εμφανίζουν μειωμένη απόδοση γεγονός που οφείλεται στις ωμικές και μαγνητικές απώλειες. Παρά το κόστος ανά μονάδα ισχύος και τον όγκο που καταλαμβάνουν, αποτρέπουν την έγχυση DC συνιστωσών στο δίκτυο και το πιο σημαντικό είναι ότι προσφέρουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου, και συνεπώς καλύπτουν το επίπεδο ασφάλειας που απαιτείται σε πολλές εφαρμογές. Μια εναλλακτική λύση για τη μείωση του απαιτούμενου όγκου είναι οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας (HFT), οι οποίοι συνήθως ενσωματώνονται στην DC πλευρά του αντιστροφέα. Οι αντιστροφείς που αντικαθιστούν τους μετασχηματιστές με άλλες τοπολογίες χρησιμοποιώντας περισσότερα ηλεκτρονικά στοιχεία έχουν καλύτερη απόδοση αλλά είναι πιο επιρρεπείς σε αστάθειες μιας και είναι πιο πολύπλοκες κατασκευές. Ενδεικτικές τιμές απόδοσης για τις παραπάνω κατηγορίες είναι:

- Με συμβατικό Μ/Σ απομόνωσης, 92 - 94 %
- Με Μ/Σ απομόνωσης υψηλής συχνότητας (HFT), > 94 - 95 %
- Χωρίς Μ/Σ, > 96 %

Κατά τη διαστασιολόγηση ενός αντιστροφέα σε ένα ολοκληρωμένο Φ/Β σύστημα θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα αντίστοιχα διαγράμματα που υποδεικνύουν τις περιοχές λειτουργίας μέγιστης απόδοσης και αντιστοιχούν σε κατάλληλες συνθήκες

όπως η DC τάση ή η ισχύς. Όσο υπάρχει λανθασμένη διαστασιολόγηση, η αποδιδόμενη ισχύς δεν θα είναι μέγιστη ενώ επίσης ενδέχεται να υπάρχει διαθέσιμη παραγόμενη ισχύς που να μην μπορεί να αξιοποιηθεί. Γενικά η αναλογία της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα προς την ισχύ των Φ/Β πλαισίων κυμαίνεται μεταξύ 0.9 και 1.1 και εξαρτάται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος, το είδος των πλαισίων κ.α.

Από τους κατασκευαστές εκτός από τον βαθμό απόδοσης ενός αντιστροφέα δίνεται και ένας ακόμα σταθμισμένος δείκτης ο οποίος περιλαμβάνει την απόδοση του αντιστροφέα για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης με τους αντίστοιχους συντελεστές βαρύτητας σε κάθε μία. Ορίζεται ως εξής:

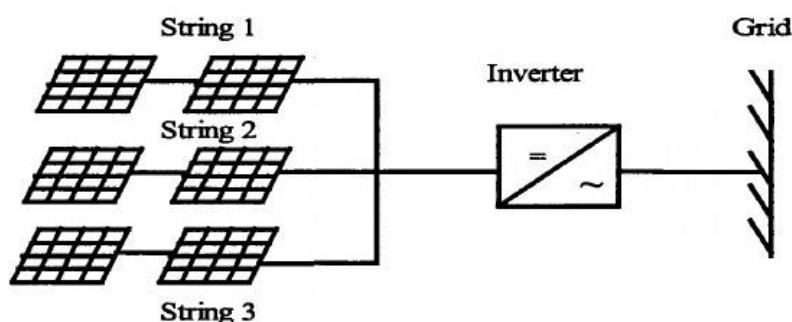
$$n_{EE} = 0.03n_{5\%} + 0.06n_{10\%} + 0.13n_{20\%} + 0.10n_{30\%} + 0.48n_{50\%} + 0.20n_{100\%} \quad (3.4)$$

Ο  $n_{EE}$  καλείται ευρωπαϊκός βαθμός απόδοσης (euro efficiency) και παρουσιάζει απόκλιση της τάξης 1 – 2 % από τον βαθμό απόδοσης  $n$ .<sup>[5][8]</sup>

### 3.4.3 Τοπολογίες Διασύνδεσης

Ο τρόπος διασύνδεσης των αντιστροφέων παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα του συστήματος επηρεάζοντας την επαγωγική του αντίδραση και την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας. Ανάλογα με τοπολογία των Φ/Β πλαισίων και των αντιστροφέων διακρίνονται οι εξής κατηγορίες:<sup>[8][17]</sup>

- Κεντρικοί αντιστροφέες, χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλους σταθμούς μιας και υποστηρίζουν τα υψηλότερα επίπεδα ισχύος από δεκάδες kW έως μερικά MW. Υπό περιπτώσεις συνοδεύονται από μετασχηματιστές μέσης τάσης για την απευθείας σύνδεσή τους στο δίκτυο. Χάρη στις υψηλές διακοπτικές συχνότητες των IGBTs και στις εξελιγμένες τεχνολογίες διαμόρφωσης δίνουν καλή ποιότητα ρεύματος με μειωμένες απαιτήσεις φίλτρων. Η τοπολογία της εικόνας 3.14 περιλαμβάνει έναν κεντρικό αντιστροφέα για το σύνολο της εγκατάστασης.



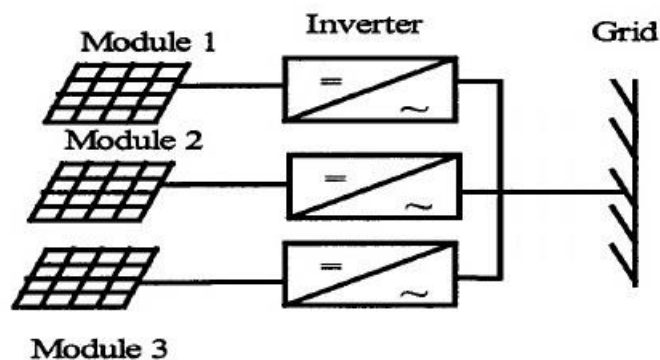
Εικόνα 3.14 : Τοπολογία κεντρικού αντιστροφέα<sup>[7]</sup>

Άλλα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η ευκολότερη υλοποίηση στην εγκατάσταση και τον σχεδιασμό, και τα χαμηλά έξοδα συντήρησης. Ωστόσο σε μεγάλες εγκαταστάσεις η ροή υψηλών τιμών συνεχούς ρεύματος από τα πλαίσια



μέχρι τον κεντρικό μετατροπέα οδηγεί αφενός σε αυξημένο κόστος καλωδιώσεων και αφετέρου σε μειωμένη ασφάλεια καθώς η διακοπή του συνεχούς ρεύματος υπό συνθήκες σφάλματος είναι δυσκολότερη.

- Αντιστροφείς κλάδων/πολλαπλών κλάδων, Είναι πιο διαδεδομένοι σε εγκαταστάσεις μικρής και μέσης ισχύος και προσφέρονται με ή χωρίς μετασχηματιστή για μονοφασική ή τριφασική σύνδεση. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι υποστηρίζουν την παράλληλη σύνδεση πολλαπλών κλάδων φωτοβολταϊκών, είτε όμοιων είτε διαφορετικών ονομαστικών χαρακτηριστικών και συνθηκών παραγωγής ενέργειας (π.χ. κλίση, σκίαση κ.λπ.). Το γεγονός αυτό τους καθιστά πιο ευέλικτους από τους κεντρικούς ως προς τον εντοπισμό του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).



Εικόνα 3.15 : Τοπολογία με αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων <sup>[7]</sup>

- Ενσωματωμένοι σε Φ/Β πλαίσιο, συνδέονται αποκλειστικά με ένα πλαίσιο και καλύπτουν ανάγκες χαμηλής ισχύος όπως για παράδειγμα μιας οικιακής εγκατάστασης.

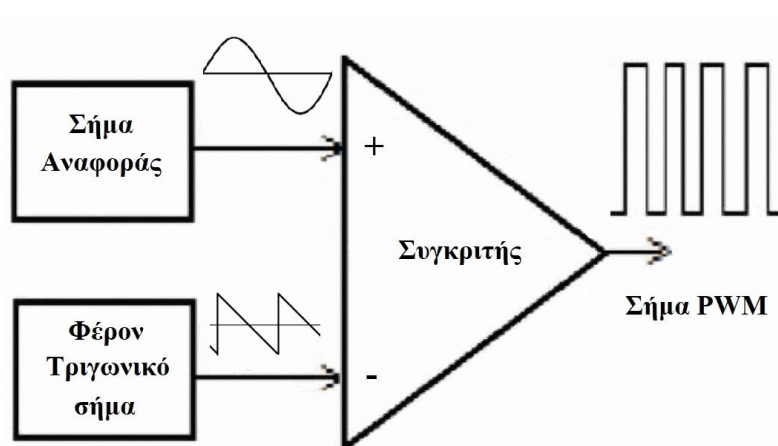
### 3.5 Διαμόρφωση DC/AC

Εκτός από την παροχή ημιτονοειδούς τάσης σύμφωνα με τα πρότυπα, ένας αντιστροφέας πρέπει να είναι ελέγξιμος και να προσφέρει τη δυνατότητα ανάδρασης μεταξύ εισόδου και εξόδου. Η ίδια η μορφή του ανεστραμμένου σήματος αλλά και σχεδόν όλα τα σημαντικά του μεγέθη όπως η μέγιστη, η μέση, η ενεργός τιμή και η συχνότητα καθορίζονται από το χρόνο και τη διάρκεια αγωγής των διακοπών. Ο έλεγχος αυτός εξασφαλίζεται με διάφορες τεχνικές μέσω του κέντρου ελέγχου, ίσως το πιο σημαντικό μέρος ενός αντιστροφέα.

#### 3.5.1 Διαμόρφωση Εύρους Παλμών PWM

Η κλασική τεχνική διαμόρφωσης PWM είναι γνωστή για την αποδοτικότητα της αλλά και την επιλογή της ως κατάλληλη για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των αντιστροφέων μιας και αποτελεί την βάση πάνω στην οποία έχουν αναπτυχθεί

εναλλακτικές μέθοδοι διαμόρφωσης. Ανήκει στις τεχνικές σταθερής διακοπτικής συχνότητας και υλοποιείται με ολοκληρωμένα ψηφιακά ή αναλογικά κυκλώματα. Στόχος είναι η έξοδος να μένει σταθερή και ανεπηρέαστη από τις διακυμάνσεις της εισόδου και αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη δυνατότητα ελέγχου του εύρους παλμών των διακοπών. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει γεννήτριες δύο ηλεκτρικών σημάτων. Μια για το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς με πλάτος  $A_r$  και συχνότητα  $f_r$ , και μια το τριγωνικό φέρον σήμα με  $A_c$  και  $f_c$  αντίστοιχα. Τα δύο αυτά σήματα περνούν από δύο συγκριτές όπως αυτόν της εικόνας 3.16, οι οποίοι παράγουν το σήμα ελέγχου των διακοπών.



Εικόνα 3.16 : Συγκριτής παραγωγής σημάτων ελέγχου <sup>[19]</sup>

$$m_A = \frac{A_r}{A_c} \quad (3.5)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (3.6)$$

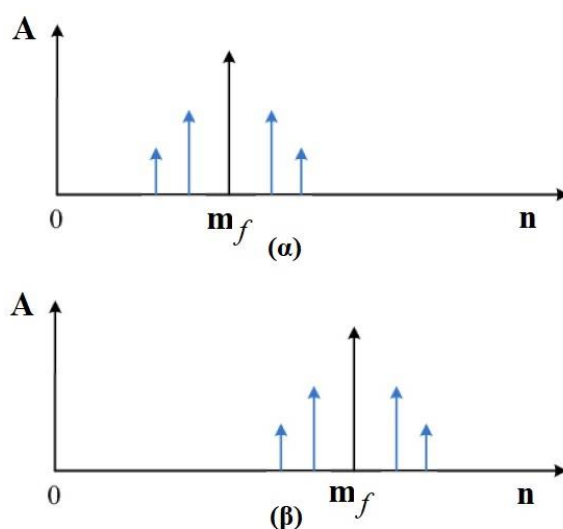
Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους  $m_A$  επηρεάζει το εύρος των παλμών εξόδου και κατά συνέπεια τη μέση τάση και το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας, ενώ ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  επηρεάζει τη συχνότητα. Το σήμα αναφοράς καλείται και σήμα ελέγχου αφού μέσω της ρύθμισής του ελέγχεται η μορφή του τελικού σήματος. Ανάλογα με τη μορφή του σήματος αναφοράς διακρίνονται οι εξής υποκατηγορίες: <sup>[5][18]</sup>

- Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM)
- PWM με έγχυση τρίτης αρμονικής (THIPWM)
- Διαμόρφωση εύρους παλμών 60° (SDPWM)
- Τραπεζοειδής (TRPWM)

### 3.5.2 Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών SPWM

Όπως και στην κλασική PWM τεχνική, τα σήματα ελέγχου των διακοπών παράγονται από δύο συγκριτές. Σε αυτήν την περίπτωση παράγεται ένα φέρον σήμα τριγωνικής

μορφής και δύο σήματα αναφοράς με διαφορά φάσης  $180^\circ$ , ένα για κάθε ημιπερίοδο. Η παραγόμενη τάση εξόδου χαρακτηρίζεται διπολική (bipolar) για εναλλακτικές τιμές μεταξύ δύο επιπέδων (π.χ.  $V_{in}/2, -V_{in}/2$ ), και μονοπολική (unipolar) για εναλλαγές μεταξύ του μηδενός (π.χ.  $V_{in}/2, 0, -V_{in}/2$ ). Η μονοπολική τεχνική παρουσιάζει μικρότερο THD% από τη διπολική. Τα σημεία τομής του φέροντος με τα σήματα αναφοράς καθορίζουν τα σήματα ελέγχου και για αυτό το λόγο ο συντελεστής διαμόρφωσης  $m_A$  δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας γιατί θα εμφανιστεί το φαινόμενο της υπερδιαμόρφωσης. Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής στην έξοδο εξαρτάται και εδώ από το πλάτος του σήματος αναφοράς με μέγιστη τιμή για  $m_A = 1$ , ενώ ο αριθμός των παλμών της τάσης εξόδου εξαρτάται από τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  ο οποίος επιλέγεται να είναι ακέραιος περιττός αριθμός για την αποφυγή εμφάνισης ενδιάμεσων αρμονικών και άρτιων συνιστωσών αντίστοιχα.

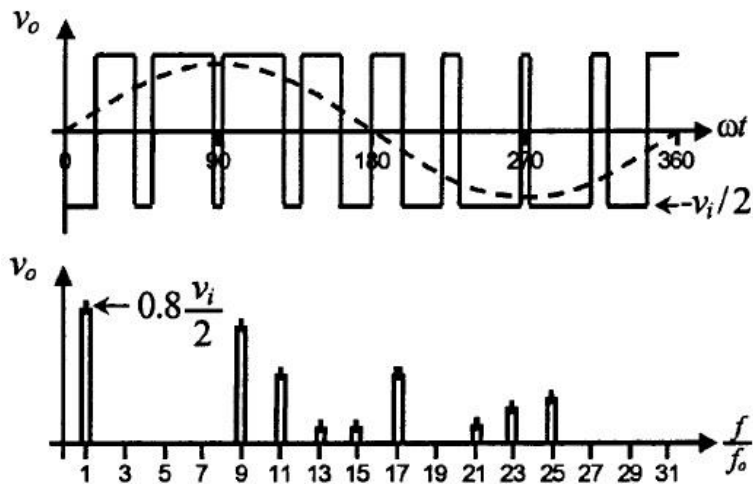


Εικόνα 3.17: Φέρον σήμα & ανώτερες αρμονικές με  $m_f(\beta) > m_f(\alpha)$

Στην προσπάθεια περιορισμού του κόστους και του όγκου των χαμηλοπερατών φίλτρων επιδιώκεται η κυριαρχούσα ανώτερη αρμονική συνιστώσα να απέχει από την θεμελιώδη όσο το δυνατόν περισσότερο. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετατόπιση της συχνότητας του φέροντος σήματος σε ανώτερες συχνότητες. Πρακτικά, παρά την αύξηση των διακοπτικών απωλειών, η συχνότητα του φέροντος είναι πολλαπλάσια της συχνότητας του σήματος αναφοράς με αναλογία  $m_f > 9$ . [5] [19]

### 3.5.3 Τεχνική Εξάλειψης Επιλεγμένων Ανώτερων Αρμονικών SHE-PWM

Η κεντρική ιδέα είναι η εξάλειψη των κυριότερων αρμονικών χαμηλών συχνοτήτων, δηλαδή 3<sup>ης</sup> τάξης, 5<sup>ης</sup>, κ.λπ. αξιοποιώντας μαθηματικές μεθόδους. Για διαμόρφωση με N παλμούς σε κάθε ημιπερίοδο αποδεικνύεται ότι εξαλείφονται N-1 συνιστώσες από το φάσμα συχνοτήτων. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στο φάσμα του διαμορφωμένου σήματος της εικόνας 3.18 που εμφανίζει 4 παλμούς ανά ημιπερίοδο, απουσιάζουν η 3<sup>η</sup>, 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> συνιστώσα, δηλαδή οι 3 (4-1) πρώτες αρμονικές μετά τη θεμελιώδη.



Εικόνα 3.18 : Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική SHE <sup>[7]</sup>

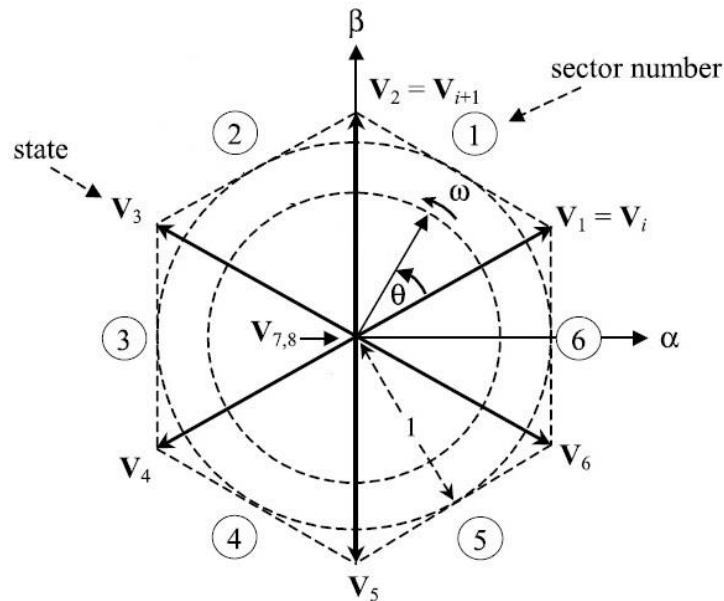
Ο καλύτερος έλεγχος των παλμών οδήγησης για την προσαρμογή των παλμών στην απαιτούμενη συμμετρική θέση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ψηφιακών επεξεργασιών και επαναληπτικών μεθόδων όπως της Newton-Raphson. Ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που καταναλώνεται για τη δημιουργία πινάκων ανάκτησης καθιστά την τεχνική αυτή πιο προσφιλή σε εφαρμογές που δεν έχουν αυξημένες απαιτήσεις δυναμικής απόκρισης. Σε χαμηλές διακοπτικές συχνότητες και συστήματα υψηλής ισχύος φαίνεται να έχει καλύτερη επίδοση από άλλες τεχνικές παρουσιάζοντας χαμηλό δείκτη παραμόρφωσης. Χρήση της τεχνικής γίνεται ενδεικτικά σε εφαρμογές του δικτύου διανομής, σε στατούς αντισταθμιστές ισχύος αλλά και σε αντιστροφείς φωτοβολταϊκών. [5] [7] [19]

### 3.5.4 Τεχνική Διαμόρφωσης Χωρικών Διανυσμάτων SVPWM

Είναι τεχνική που αντιμετωπίζει την τάση του αντιστροφέα σαν σταθερό χωρικό διάνυσμα. Εμφανίζει καλύτερο δείκτη παραμόρφωσης από την κλασική PWM τεχνική και η χρήση της ενδείκνυται για τριφασικούς αντιστροφείς σε εφαρμογές όπου ο αντιστροφέας δεν μπορεί να αποτελείται από τρεις μονοφασικούς. Υλοποιείται με ψηφιακούς μικροεπεξεργαστές με απαιτήσεις μεγάλου υπολογιστικού όγκου και είναι αποτελεσματική όταν η συχνότητα δεν είναι σταθερή, όπως στον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών.

Η συνηθισμένη τοπολογία του αντιστροφέα δύο επιπέδων περιλαμβάνει έξι διακόπτες, δηλαδή δύο για κάθε ζεύγος. Τα τρία ζεύγη μπορούν να δώσουν  $2^3 = 8$  διαφορετικές διακοπτικές καταστάσεις από τις οποίες η πρώτη [000] και η τελευταία [111] δίνουν μηδενικό αποτέλεσμα. Οι υπόλοιπες έξι καταστάσεις δημιουργούν το διφασικό επίπεδο διαιρώντας το σε έξι ίσα μέρη των  $60^\circ$ . Για τη μετάβαση από την τριφασική κατάσταση a-b-c στο διφασικό πεδίο  $\alpha$ - $\beta$  γίνεται με τη βοήθεια των μετασχηματισμών Clarke και Park. Υπό συνθήκες συμμετρίας η φασική τάση του αντιστροφέα της εικόνας 3.12 μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή διανύσματος (εξίσωση 3.7).

$$\bar{V} = \frac{2}{3}(V_{aN} + V_{bN}e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{cN}e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \quad (3.7)$$



Εικόνα 3.19: Αναπαράσταση χωρικών διανυσμάτων τριφασικού αντιστροφέα με τη μέθοδο SVPWM<sup>[7]</sup>

Συνδυάζοντας την εξίσωση (3.7) με το διάνυσμα των δύο νέων διαστάσεων  $\bar{V} = V_{\alpha} + jV_{\beta}$ , προκύπτει ο μετασχηματισμός Clarke σε μορφή πίνακα που συνδέει τις τριφασικές τάσεις a, b, c με τις διφασικές  $\alpha, \beta$ :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

### 3.6 Φίλτρα

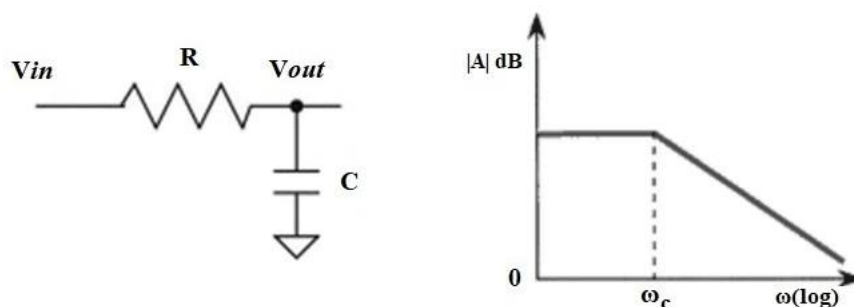
Τα φίλτρα που εφαρμόζονται στην είσοδο και έξοδο των αντιστροφέων είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες του αντιστροφέα, ενώ παράλληλα επηρεάζουν άμεσα το κόστος και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (μέγεθος, βάρος). Ο σχεδιασμός των φίλτρων γίνεται με γνώμονα την εξασφάλιση της τήρησης των κανονισμών στη δυσμενέστερη λειτουργική κατάσταση. Αυστηρές απαιτήσεις σε προδιαγραφές όπως η κλίση της απόκρισης της συχνότητας στη μεταβατική ζώνη και η ανοχή στην κυμάτωση στις ζώνες διέλευσης και αποκοπής, οδηγούν σε αυξημένο κόστος και μεγάλες φυσικές διαστάσεις φίλτρων. Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητό οι συχνότητες που πρόκειται να αποκοπούν να απέχουν σε ικανοποιητικό βαθμό από την συχνότητα αποκοπής του φίλτρου. Αυτό συνεπάγεται την

εισαγωγή ανώτερων συχνοτήτων από τους αντιστροφείς γεγονός που έπειτα θα οδηγήσει στη διέγερση υπεραρμονικών συνιστωσών.

### 3.6.1 Γενικές Κατηγορίες

Με βάση τα δομικά τους στοιχεία τα φίλτρα διακρίνονται σε παθητικά, ενεργά και υβριδικά. Με βάση την τοπολογία τους διακρίνονται σε τάξεις (1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup>, κ.λπ.), ενώ με βάση το φάσμα συχνοτήτων που αποκόπτουν διακρίνονται σε χαμηλοπερατά, ζωνοπερατά και υψιπερατά.

Κλασικές περιπτώσεις παθητικών φίλτρων αποτελούν οι συμβατικές τοπολογίες που περιλαμβάνουν παθητικά στοιχεία όπως πηνία, ωμικές αντιστάσεις και πυκνωτές (π.χ. LC, RL, κ.α.) και οι οποίες έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπουν την διέλευση συγκεκριμένων ζωνών. Μειονεκτήματα των παθητικών φίλτρων αποτελούν οι σχετικά μεγάλες διαστάσεις και η αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης συντονισμού στο σύστημα. [5]



Εικόνα 3.20: Ηλεκτρικό κύκλωμα (αριστερά) και απόκριση συχνότητας (δεξιά) παθητικού χαμηλοπερατού φίλτρου RC 1<sup>ης</sup> τάξης

Το κύκλωμα της εικόνας 3.20 είναι κλασική περίπτωση παθητικού χαμηλοπερατού φίλτρου 1<sup>ης</sup> τάξης με συνάρτηση μεταφοράς  $H(s)$  και συχνότητα αποκοπής  $\omega_c$  αντίστοιχα:

$$H(s) = \frac{1}{RCs+1} \quad (3.8)$$

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (3.9)$$

Παρατηρείται ότι για τιμές της συχνότητας κάτω από μια κρίσιμη τιμή, το κέρδος του φίλτρου είναι ίσο με τη μονάδα. Όσο αυξάνεται η συχνότητα, από την συχνότητα αποκοπής και μετά, ξεκινά η μείωση του κέρδους αποκόπτοντας έτσι τις συχνότητες αυτές.

Από την άλλη, ο στόχος των ενεργών φίλτρων εκτός από την επιλεκτική αποκοπή μέρους των συχνοτήτων είναι και η δυνατότητα ενίσχυσης μέρους άλλων. Μπορούν να εγκατασταθούν με τρία καλώδια, κυρίως για εφαρμογή σε συστήματα ελέγχου

στρεφόμενων μηχανών, καθώς επίσης και με τέσσερα καλώδια όταν υπάρχει ανάγκη εξάλειψης των τριπλών αρμονικών οι οποίες συσσωρεύονται στον ουδέτερο αγωγό. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ενεργών φίλτρων έναντι των παθητικών είναι:

- Η αυτόματη προσαρμογή της τάσης
- Μειωμένος κίνδυνος υπερφόρτισης
- Δυνατότητα εξάλειψης αρμονικών ρεύματος
- Ευέλικτη σύνδεση στα μέρη του δικτύου / επεκτασιμότητα
- Χαμηλό βάρος

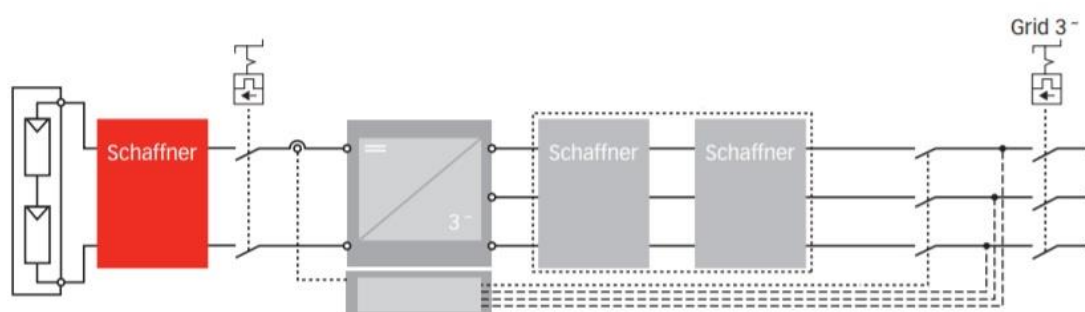
Σημεία στα οποία μειονεκτούν είναι:

- Μεγαλύτερη πολυπλοκότητα / ευαισθησία
- Ανάγκη εξωτερικής τροφοδοσίας
- Υψηλότερο κόστος

Τέλος, η προσθήκη των φίλτρων στους αντιστροφείς μπορεί να γίνει σε σειρά, παράλληλα ή συνδυαστικά. Τα παράλληλα ενεργά φίλτρα χαρακτηρίζονται από απλά κυκλώματα ελέγχου, χαμηλό κόστος εφαρμογής, ενώ η επιλογή τους προτιμάται για την διαχείριση των αρμονικών ρεύματος, και τον έλεγχο της αέργου ισχύος και της τάσης αιχμής. Από την άλλη, η εν σειρά τοπολογία πλεονεκτεί στην διαχείριση αρμονικών τάσης, στην ρύθμιση τάσης, και στον έλεγχο υπερτάσεων. [5]

### 3.6.2 Φίλτρο Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας (EMC)

Είναι σύνηθες στην DC πλευρά να εμφανίζονται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές καθώς και διαρροή ανεπιθύμητου DC ρεύματος.



Εικόνα 3.21 : DC Φίλτρο EMC (Schaffner FN 2200) [46]

Τα φίλτρα που τοποθετούνται στην DC πλευρά αμέσως μετά το Φ/Β πλαίσιο, όπως στην τοπολογία της εικόνας 3.21, βοηθούν στη μείωση της έντασης της ακτινοβολίας που δημιουργείται στην διεπαφή του πλαισίου και επίσης δρουν κατασταλτικά για τα

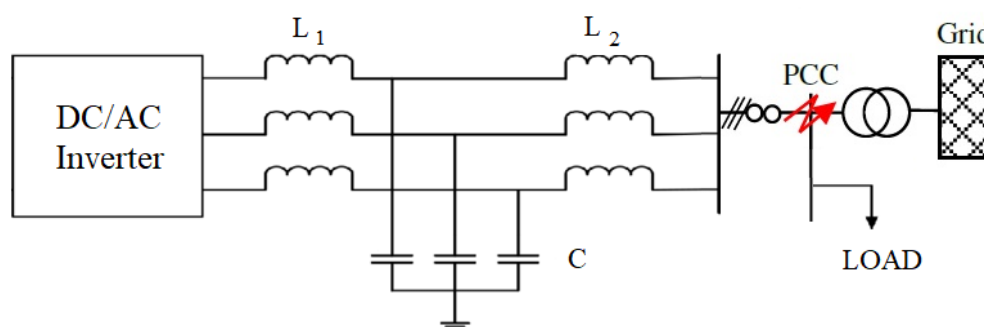
ρεύματα διαρροής που κυκλοφορούν και επηρεάζουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής των πλαισίων.

Οδηγίες σχετικές για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα δίνονται στα:

- IEC EN 61000-6-3
- IEC EN 61000-6-4
- EN55014-1
- CISPR 11

### 3.6.3 Χαμηλοπερατό Φίλτρο AC Γραμμής LCL

Στην AC πλευρά, μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου παρεμβάλλεται χαμηλοπερατό φίλτρο με σκοπό την αποκοπή των αρμονικών που εισάγονται εξαιτίας των υψηλών διακοπτικών συχνοτήτων που εφαρμόζονται κατά τη διαμόρφωση του σήματος.



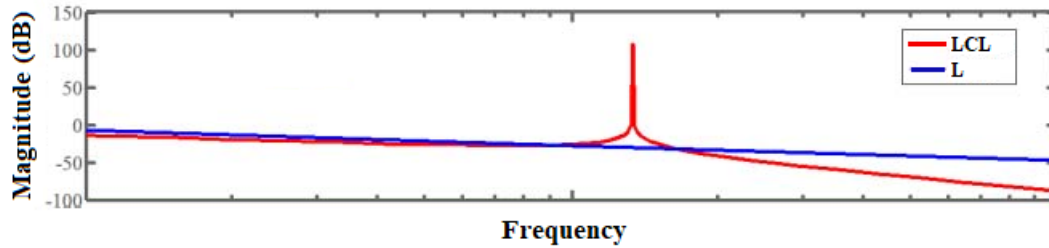
Εικόνα 3.22: LCL χαμηλοπερατό φίλτρο 3Φ γραμμής

Το φίλτρο της εικόνας 3.22 (φίλτρο T) χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα Α.Π.Ε. (Φ/Β, Αιολικά κ.λπ.) και υπερτερεί έναντι των συμβατικών 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης στα εξής:

- Έχει καλύτερη απόδοση ως προς την απόσβεση ανώτερων αρμονικών με ρυθμό 60dB/dec.
- Ομαλή ζεύξη με την εμπέδηση του δικτύου δημιουργώντας μικρότερη κυμάτωση στο ρεύμα.
- Μειωμένο βάρος & όγκος.

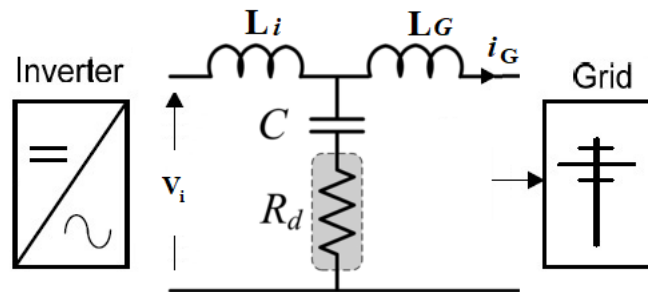
Ένα αρνητικό χαρακτηριστικό που συνοδεύει τα LCL φίλτρα είναι ότι ως σύστημα 3<sup>ης</sup> τάξης και παρά την γρήγορη δυναμική του απόκριση παρουσιάζει αυξημένη πιθανότητα συντονισμού. Από το διάγραμμα Bode της εικόνας 3.23 φαίνεται η διαφορά της απόκρισης μεταξύ φίλτρου L (1<sup>ης</sup> τάξης) και LCL (3<sup>ης</sup> τάξης).





Εικόνα 3.23 : Διάγραμμα Bode πλάτους/συχνότητας φίλτρων LCL και L <sup>[32]</sup>

Η αποκοπή των συνιστωσών από την συχνότητα αποκοπής και μετά είναι με διαφορά αποτελεσματικότερη για το φίλτρο LCL. Παρόλα αυτά, η ακμή που βρίσκεται στην συχνότητα συντονισμού για το φίλτρο αυτό είναι η αιτία δημιουργίας ταλαντώσεων στο σύστημα με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η συνδυαστική εφαρμογή του με ένα μέσο για την πρόληψη ασταθειών που θα προκληθούν στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να είναι είτε ένα παθητικό στοιχείο είτε ένας ελεγκτής ενεργής απόσβεσης. Τα παθητικά στοιχεία όπως ωμικές αντιστάσεις, πηνία και πυκνωτές αν και αποτελεσματικά παρουσιάζουν απώλειες. Ένα τέτοιο είδος παρατίθεται στην εικόνα 3.24. Από την άλλη, οι ενεργές μέθοδοι επιτυγχάνουν μείωση της επικινδυνότητας συντονισμού παρουσιάζοντας καλύτερη δυναμική συμπεριφορά και χωρίς να καταναλώνουν επιπλέον ενέργεια. Ως αρνητικά χαρακτηριστικά σημειώνονται η πολυπλοκότητα αφού περιλαμβάνουν κυκλώματα ελέγχου του ρεύματος, και το αυξημένο κόστος.



Εικόνα 3.24: Μονοφασικό κύκλωμα LCL παθητικής απόσβεσης

Το μονοφασικό κύκλωμα της εικόνας 3.24 αποτελεί φίλτρο LCL παθητικής απόσβεσης με ενσωματωμένη ωμική αντίσταση  $R_d$ . Στην προσέγγιση αυτή έχει παραληφθεί κάθε αντίδραση του συστήματος εκτός από την παθητική αντίσταση απόσβεσης η οποία τοποθετείται σε σειρά με τον πυκνωτή. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς  $H(s)$ :

$$H(s) = \frac{i_G(s)}{V_i(s)} = \frac{(C \cdot R_d)s + 1}{(L_i L_G C)s^3 + CR_d(L_i + L_G)s^2 + (L_i + L_G)s} \quad (3.10)$$

Μια σημαντική παράμετρος του φίλτρου είναι η συχνότητα αποκοπής  $f_c$ . Η τιμή της πρέπει να είναι μικρότερη από το ήμισυ της διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα καθώς για τιμές κοντά σε αυτήν παρατηρείται ενίσχυση της αρμονικής παραμόρφωσης. Ταυτόχρονα υπάρχει και περιορισμός στην ελάχιστη τιμή αφού θα πρέπει να απέχει σημαντικά και από την συχνότητα του δικτύου. Η τιμή της αποδεικνύεται ότι εξαρτάται αποκλειστικά από τα στοιχεία του φίλτρου και με την προσέγγιση ότι δεν υπάρχει ωμικό στοιχείο απόσβεσης προκύπτει:

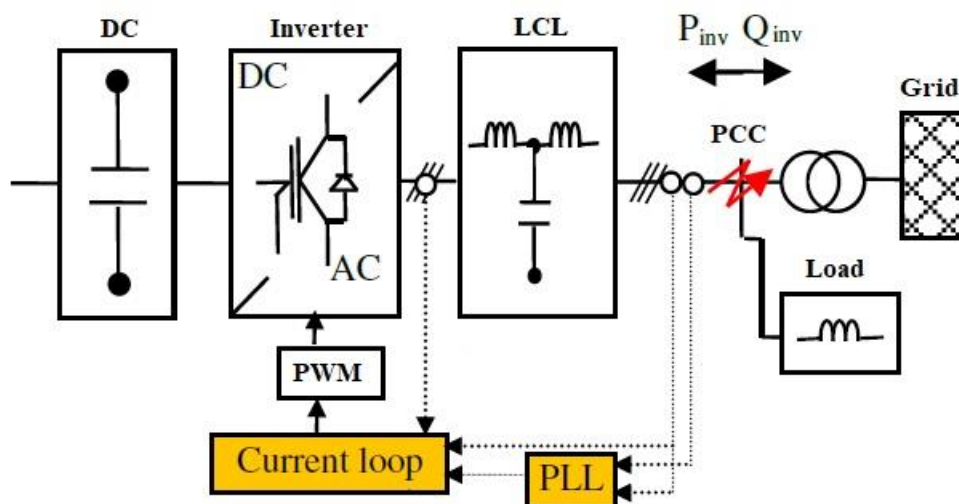
$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_G}{L_i \cdot L_G \cdot C}} \quad (3.11)$$

### 3.7 Συγχρονισμός με το Δίκτυο

Για να συνδεθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ένα δίκτυο διανομής αποτελεσματικά αλλά και με ασφάλεια θα πρέπει να είναι συντονισμένο με τις λειτουργικές συνθήκες του δικτύου αυτού. Συγκεκριμένες παράμετροι για τις οποίες η έξοδος του αντιστροφέα θα πρέπει να εποπτεύεται και να συγκρίνεται με αυτές του δικτύου είναι:

- Το πλάτος της τάσης
- Η συχνότητα
- Η διαδοχή των φάσεων (για 3Φ σύστημα)
- Η γωνίες των φάσεων

Η παρακολούθηση των παραπάνω συνθηκών είναι συνεχής καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας και γίνεται από τον ίδιο τον αντιστροφέα μέσω βρόχων ανάδρασης τάσης και ρεύματος. Με τη βοήθεια του βρόγχου ελέγχου τάσης ρυθμίζεται η ροή της παραγόμενης ισχύος (από το πλαίσιο στο δίκτυο ή το αντίστροφο). Ο βρόγχος ελέγχου ρεύματος ρυθμίζει την έγχυση του ρεύματος στο δίκτυο με στόχο την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Ανάμεσα στις υπάρχουσες τεχνικές, η πλέον δημοφιλής που συνδυάζεται με τριφασικούς αντιστροφείς είναι εφαρμογή ενός PI ελεγκτή.



Εικόνα 3.25 : Δομή βρόγχου ελέγχου ρεύματος PLL διασυνδεδεμένου αντιστροφέα <sup>[33]</sup>

Σύμφωνα με αυτήν ο ελεγκτής μετράει το παραγόμενο ρεύμα των Φ/Β και το συγκρίνει με το επιθυμητό ρεύμα του δικτύου προσπαθώντας έτσι να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα μεταξύ τους. Η γωνίες των φάσεων ελέγχονται από ένα σύστημα παρακολούθησης κλειστού βρόγχου (PLL). Η βασική δομή ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.25. Η λειτουργία του βασίζεται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς d, q όπου προκύπτει με τη βοήθεια των μετασχηματισμών Clarke & Park. Μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν την τεχνική αυτή είναι:

- Μπορεί να ενισχύσει τη συχνότητα συντονισμού του LCL φίλτρου.
- Όταν υπάρχει αρμονική παραμόρφωση στην τάση του δικτύου παράγονται οι αντίστοιχες αρμονικές και στο ρεύμα.
- Οι μετασχηματισμοί μεταξύ των συστημάτων ABC και d, q ενισχύουν την υπολογιστική πολυπλοκότητα αλλά και την πιθανότητα σφάλματος.

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Τεχνικές Μετρήσεων στην Περιοχή 2-150 kHz

Είναι ευνόητο ότι όσο αυξάνεται το εύρος συχνοτήτων, τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του μετρητικού συστήματος και ως αποτέλεσμα στις υπεραρμονικές συχνότητες δεν υπάρχει η ίδια ευκολία στην μοντελοποίηση και στην ακρίβεια των δεδομένων που καταγράφονται όπως συμβαίνει με τις χαμηλότερης τάξης αρμονικές. Σύμφωνα με ήδη γνωστές μετρήσεις σε αυτήν την περιοχή, τα σήματα παρουσιάζουν μεταβολές στο πλάτος αλλά και τη συχνότητα σε βάθος χρόνου (της τάξης των μερικών ms) και ως εκ τούτου για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα το σήμα θα πρέπει να εξετάζεται επαναλαμβανόμενα και όχι στιγμιαία. Μια τυπική μέθοδος ανάλυσης μπορεί να γίνει με μαθηματικές τεχνικές όπως ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) ή ο M/Σ Fourier σύντομου χρόνου (STFT). Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο FFT. Είναι ένα κατάλληλο εργαλείο για την απεικόνιση του φάσματος ενός σήματος με διάστημα ανάλυσης που εξαρτάται από την συχνότητα δειγματοληψίας και το πλήθος των δειγμάτων. <sup>[22] [23]</sup>

### 4.1 Ιδιαιτερότητες Εύρους 2 – 150 kHz

Τα ηλεκτρικά σήματα σε υψηλές συχνότητες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα υπόλοιπα ως προς τα χαρακτηριστικά τους αλλά και τον τρόπο διάδοσής τους. Η δυσκολία που εμφανίζεται στις μετρήσεις υπεραρμονικών έγκειται στην αστάθεια που συνοδεύει τις υψηλές συχνότητες σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα σχετικά μικρά σε πλάτος μετρούμενα μεγέθη μεταβάλλονται με τον χρόνο. Σε αντίθεση με την κατανομή των συμβατικών αρμονικών που εμφανίζεται με πυκνή συγκέντρωση σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, οι ανώτερες αρμονικές εντοπίζονται συνήθως σε στενές ζώνες σε χαρακτηριστικά σημεία του συστήματος. <sup>[23]</sup>

Όπως αναφέρεται στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, η παραμόρφωση που θα εμφανιστεί κοντά σε ένα σημείο είναι ένας συνδυασμός από την παραμόρφωση που προκαλείται από το περιβάλλον δίκτυο με αυτήν της συσκευής κοντά στο σημείο. Από τη βασική αυτή παραδοχή διαχωρίζουμε τις εκπομπές αρμονικών σε πρωτογενείς (συσκευή) και δευτερογενείς (περιβάλλον) αντίστοιχα. Πρωτογενείς χαρακτηρίζονται οι εκπομπές ρεύματος μιας συσκευής όταν αυτή τροφοδοτείται από πηγή τάσης ημιτονοειδούς μορφής με μηδενική παραμόρφωση. Η δεύτερη κατηγορία συνδέεται περισσότερο με τη διάδοση υπεραρμονικών. Ο διαχωρισμός των εκπομπών σε πρωτογενείς και δευτερογενείς δεν είναι εύκολος στην πράξη αφενός γιατί το σύνολο των μετρήσεων δεν πραγματοποιείται την ίδια χρονική στιγμή και αφετέρου η αλληλεπίδραση μεταξύ των συσκευών δεν είναι γνωστή, γεγονός που επιφέρει σφάλμα ιδίως σε ένα δίκτυο με μεγάλη συγκέντρωση συσκευών. Μετρήσεις στο παρελθόν έχουν αποδείξει ότι η παραμόρφωση που εντοπίζεται κοντά σε ένα σημείο διαφέρει σε σημαντικό βαθμό ανάλογα με το είδος και τον αριθμό των καταναλώσεων που βρίσκονται κοντά σε αυτό. <sup>[12] [20]</sup>

## 4.2 Πρότυπα Μετρήσεων

Οι μετρήσεις αρμονικών στο εύρος 2 - 150 kHz μπορούν να βασιστούν στα διεθνή πρότυπα IEC 61000-4-7 και IEC 61000-4-30 που περιέχουν πληροφορίες για τις τεχνικές μετρήσεων αρμονικών και ποιότητας ισχύος καθώς και στο CISPR-16. Οι διαδικασίες που περιγράφονται στα παραπάνω πρότυπα έχουν διαφορές μεταξύ τους και δεν καλύπτουν απόλυτα όλες τις ανάγκες για όλες τις περιπτώσεις, αποτελούν ωστόσο τις σημαντικότερες υπάρχουσες πηγές πληροφοριών για μετρήσεις σε αυτό το εύρος. <sup>[10]</sup>  
<sup>[23]</sup>

Σημαντικό ρόλο δεν έχει μόνο ο τρόπος λήψης δεδομένων αλλά και ο τρόπος σύμπτυξης και ανάλυσης των δεδομένων αυτών. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι:

- Το είδος του φίλτρου που θα εφαρμοστεί στο σήμα
- Το μήκος (διαδοχικό χάσμα) μεταξύ των μετρήσεων
- Το εύρος απεικόνισης των συχνοτήτων (π.χ. 5 Hz, 200 Hz)

### 4.2.1 IEC 61000-4-7

Αυτό το πρότυπο βασίζεται κυρίως στους παραδοσιακούς αλγόριθμους εντοπισμού και ασχολείται με μεθόδους μέτρησης για αρμονικές και ενδιάμεσες αρμονικές στην περιοχή συχνοτήτων 2-9 kHz. Παρά το γεγονός ότι προορίζεται κυρίως για τη μέτρηση των εκπομπών συσκευών και εξοπλισμού, είναι επίσης ευρέως αποδεκτό και για τη μέτρηση διαταραχών του δικτύου. Σύμφωνα με αυτό, για την μέτρηση των αρμονικών γίνεται δειγματοληψία του αναλογικού σήματος στο πεδίο του χρόνου για χρονικό διάστημα 10 φορές μεγαλύτερο της θεμελιώδους περιόδου του σήματος. Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή του καταγεγραμμένου σήματος σε διακριτή σειρά Fourier και απεικονίζεται η περιεκτικότητά του σε κανάλια των 5 Hz. Λόγω του μεγάλου εύρους των μεγεθών η απεικόνιση του πλάτους μπορεί να γίνει σε λογαριθμική κλίμακα. <sup>[25]</sup>

### 4.2.2 IEC 61000-4-30

Το πρότυπο αυτό καθορίζει μεθόδους μέτρησης τάσης και ρεύματος στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές συχνοτήτων 2-9 kHz και 9-150 kHz. Για μετρήσεις στο εύρος συχνοτήτων 9-150 kHz προτείνεται συχνότητα δειγματοληψίας 1024 kHz και φίλτρο υψηλής διέλευσης για την απόσβεση των συνιστωσών κάτω των 9 kHz. Με την εφαρμογή γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) αναλύονται τα ισοκατανεμημένα δείγματα για διαστήματα μετρήσεων των 0.5 ms με αποτέλεσμα η ανάλυση συχνότητας να είναι ίση με 2 kHz. <sup>[25]</sup>

Μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι:

- Η ανάλυση των 2 kHz θεωρείται σχετικά μεγάλη και μη ικανοποιητική για το εύρος 2 – 150 kHz.

- Δεν προβλέπεται συγκεκριμένο μήκος των κενών διαστημάτων με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοροποιήσεων στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων ανάλογα με την επιλογή.

### 4.2.3 CISPR-16

Η μέθοδος που περιγράφεται στο πρότυπο CISPR-16 προσδιορίζει έναν τρόπο μέτρησης των εκπομπών σε συχνότητες > 9 kHz. Υποστηρίζει την εφαρμογή ενός δέκτη ο οποίος σαρώνει τις υπάρχουσες συχνότητες αναζητώντας καθορισμένα σημεία με κριτήρια όπως η ενεργός τιμή, η τιμή κορυφής κ.α. Απαιτεί εύρος ανάλυσης τουλάχιστον 100 Hz και επικάλυψη τουλάχιστον 75%. Χαρακτηρίζεται ως τεχνική υψηλής ακρίβειας, ενώ ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι οι περιορισμένες πληροφορίες που παρέχει για το πεδίο του χρόνου. <sup>[25]</sup>

## 4.3 Τεχνολογία και Όργανα

Σύμφωνα με την θεωρία της δειγματοληψίας του Nyquist, για να προκύψει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα απαιτείται από το μετρητικό όργανο (παλμογράφος) συχνότητα δειγματοληψίας τουλάχιστον διπλάσια από την μέγιστη συχνότητα του σήματος που μετράται. Τα όργανα μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν είναι καθοριστικής σημασίας καθώς σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην ίδια εγκατάσταση με διαφορετικά όργανα παρατηρήθηκε ότι προκύπτουν διαφορές ιδιαίτερα μετά τα 10 kHz.

### 4.3.1 Παλμογράφος

Είναι όργανο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση και την απεικόνιση κυματομορφών ηλεκτρικών σημάτων. Υπάρχουν αναλογικοί και ψηφιακοί, διαφοροποιούνται ως προς τον αριθμό των παράλληλων καναλιών που υποστηρίζουν και χαρακτηρίζονται από μια σειρά από παραμέτρους που αφορούν στην ακρίβεια. Επίσης υπάρχουν διαφοροποιήσεις μεταξύ των παλμογράφων μονής και διπλής δέσμης.

Βασικές λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε ένα ηλεκτρικό εργαστήριο μέσω παλμογράφου είναι:

- Ανάλυση βασικών χαρακτηριστικών του σήματος (DC, peak, rms, περίοδος κ.α.)
- Φασματική ανάλυση σήματος / FFT
- Σύγκριση και σύνθεση πολλαπλών σημάτων
- Καμπύλες Lissajous

Στους αναλογικούς παλμογράφους η απεικόνιση των σημάτων γίνεται με αναλογικό τρόπο εφαρμόζοντας βολή δέσμης ηλεκτρονίων μέσω του καθοδικού σωλήνα, οριζόντιους και κάθετους πυκνωτές και πριονωτό σήμα ρυθμιζόμενης συχνότητας για τη διαμόρφωση του ίχνους στην οθόνη. Οι αναλογικοί παλμογράφοι αν και θεωρούνται ξεπερασμένοι χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα σε εργαστήρια για λόγους κόστους αλλά και επαρκούς αξιοπιστίας.

Αντίθετα οι ψηφιακοί παλμογράφοι χρησιμοποιούν έναν A/D μετατροπέα και επεξεργάζονται το σήμα σε ψηφιακή μορφή. Η λειτουργία του A/D μετατροπέα στηρίζεται στην δειγματοληψία του αρχικού σήματος με συχνότητα που καθορίζεται από το ρολόι του παλμογράφου.

Χαρακτηριστικά με βάση τα οποία επιλέγεται ένας παλμογράφος είναι:

- Το εύρος ζώνης συχνοτήτων (Bandwidth). Για να θεωρηθεί μία απεικόνιση ικανοποιητική θα πρέπει το εύρος ζώνης του παλμογράφου να είναι τουλάχιστον πέντε φορές μεγαλύτερο από την θεμελιώδη συχνότητα του εν λόγω σήματος. Τυπικά είναι της τάξης των MHz.
- Ψηφιακή ανάλυση (Digital resolution). Μία συνηθισμένη τιμή για τους περισσότερους παλμογράφους είναι τα 8 bit. Αυτό σημαίνει ότι σε έναν τέτοιο παλμογράφο το πλάτος του σήματος θα κατανεμηθεί σε  $2^8 = 256$  στάθμες.
- Ο χρόνος ανόδου. Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος ειδικά για κυκλώματα με παλμούς, απότομες ακμές και γενικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων.
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας. (Sampling rate) βλ. 2.3.1 *Θεώρημα Δειγματοληψίας*.

Οι μετρήσεις που έγιναν στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου τεσσάρων καναλιών SDS2304X της SIGLENT DIGITAL. Πληροφορίες και τεχνικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

#### 4.3.2 Ομοαξονικό Καλώδιο Μέτρησης Ρεύματος (Current Probe)

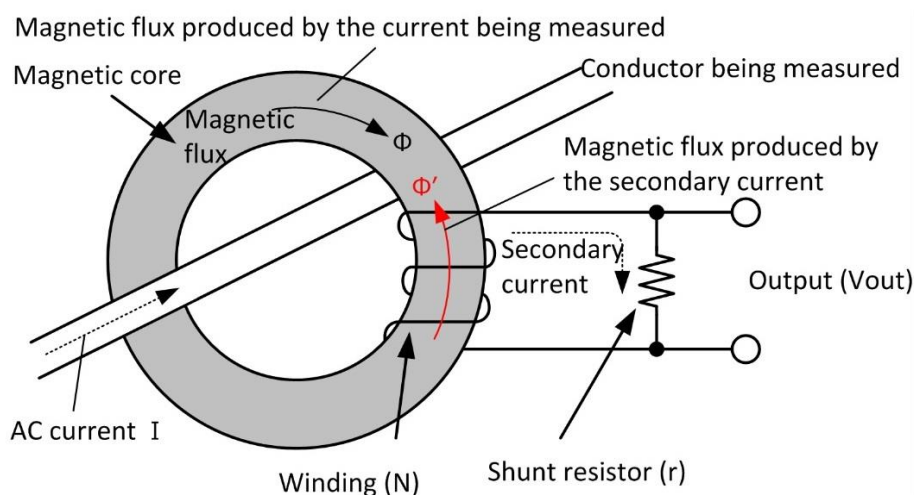
Η επαφή του παλμογράφου με το κύκλωμα και η μεταφορά του σήματος σε αυτόν γίνεται μέσω των probes. Διακρίνονται σε παθητικά και ενεργά και η σύνδεσή τους επιτυγχάνεται μέσω τυπικού βύσματος BNC. Η επιλογή τους γίνεται επίσης με βάση τις επιθυμητές προδιαγραφές ενώ είθισται η αντίσταση τους να είναι πολλαπλάσια της αντίστασης εισόδου του παλμογράφου με στόχο την επίτευξη ικανοποιητικής εξασθένισης. Για την καταγραφή του ρεύματος μέσω παλμογράφου χρησιμοποιούνται probes που συνδυάζονται με μία τσιμπίδα στο τερματικό άκρο. Η τσιμπίδα αποτελείται από μαγνητικό πυρήνα και εφαρμόζεται περιμετρικά του καλωδίου του οποίου το ρεύμα είναι προς μέτρηση.

Η μέθοδος που θα εφαρμοστεί εξαρτάται από τις προδιαγραφές και τις ανάγκες της μέτρησης. Δημοφιλείς τεχνολογίες αποτελούν οι M/Σ ρεύματος, τα στοιχεία Hall κ.α. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται περιμετρικά του καλωδίου. Όταν οι μετρήσεις περιλαμβάνουν μικρές τιμές υπάρχει ο κίνδυνος της αλλοίωσης του αποτελέσματος λόγω θορύβου. Ένας τρόπος καταστολής αυτού του φαινομένου είναι η αύξηση της μαγνητικής έντασης η οποία επιτυγχάνεται με επαναληπτική περιέλιξη του αγωγού διαμέσου του πυρήνα (τσιμπίδα). Πλεονεκτούν έναντι άλλων οργάνων στο σημείο ότι μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται άμεσα από το κύκλωμα εν ώρα λειτουργίας. Αυτό τα καθιστά πιο

ευέλικτα από άλλα όργανα όπως το πολύμετρο που απαιτούν την διακοπή της λειτουργίας του κυκλώματος για να προσαρμοστούν σε αυτό.

### 4.3.3 Μετασηματιστής Ρεύματος (CT)

Είναι ένας μετασηματιστής που αποτελείται από πρωτεύον, δευτερεύον κύκλωμα και πυρήνα και χρησιμοποιείται για την μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στον μετασηματισμό του μετρούμενου ρεύματος από τον κύριο αγωγό σε έναν δεύτερο βοηθητικό αγωγό  $N$  σπειρών μέσω μαγνητικής επαγωγής. Τα δύο ρεύματα συνδέονται ανάλογα με τον αριθμό σπειρών  $N$ . Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1 η ζητούμενη τιμή του ρεύματος μετράται έμμεσα μέσω του ρεύματος του βοηθητικού αγωγού. Το ρεύμα που κυκλοφορεί στο δευτερεύον τύλιγμα του  $M/\Sigma$  είναι τέτοιο έτσι ώστε η μαγνητική ροή που δημιουργείται στον πυρήνα να ακυρώνει αυτήν που υπήρχε εξαιτίας του ρεύματος του κύριου αγωγού. Η τιμή του μπορεί να βρεθεί εύκολα από την τάση εξόδου του δευτερεύοντος και εφόσον η τιμή της αντίστασης εξόδου είναι γνωστή.



Εικόνα 4.1 : Μέτρηση ρεύματος με  $M/\Sigma$  (CT) <sup>[42]</sup>

Για τους  $M/\Sigma$  ρεύματος ισχύουν:

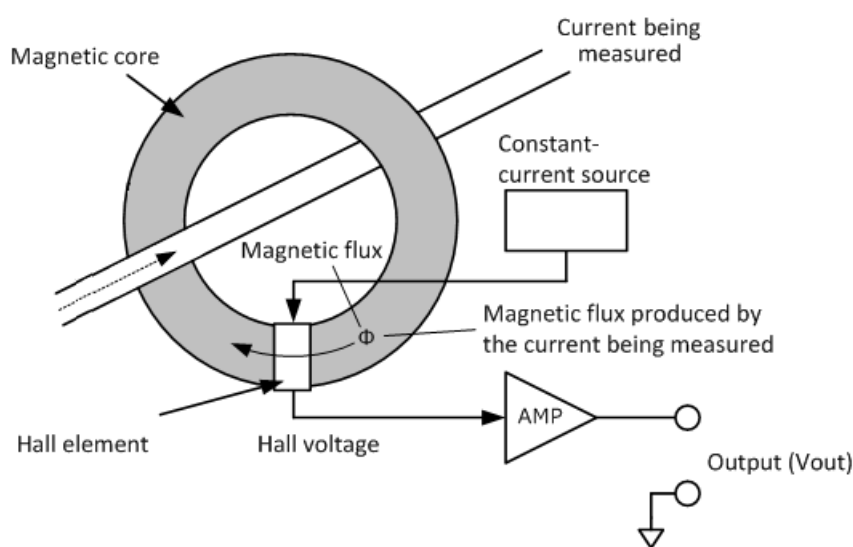
- Μπορούν να μετρήσουν μόνο εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Χρησιμοποιούνται κυρίως για συμβατικές συχνότητες (50, 60 Hz).
- Παρουσιάζουν σχετικά γραμμικές χαρακτηριστικές.

Οι μετρήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου Elditest CT 6220. Πληροφορίες και τεχνικές προδιαγραφές περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.



#### 4.3.4 Μετρητές ρεύματος με αισθητήρες Hall

Η λειτουργία των μετρητών αυτών βασίζεται στην μετατροπή της μαγνητικής ροής που εμφανίζεται στον πυρήνα εξαιτίας του μετρούμενου ρεύματος, σε τάση μέσω του φαινομένου Hall. Οι αισθητήρες Hall αποτελούνται συνήθως από αγώγιμα στοιχεία σε σχήμα πλακιδίου και εφαρμόζονται στο διάκενο του μαγνητικού πυρήνα του Μ/Σ. Σύμφωνα με αυτό και όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2 ένα στοιχείο Hall τοποθετείται στον πυρήνα παράγοντας μια τάση Hall η οποία εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της μαγνητικής ροής που πέρασε από μέσα του. Ένας ενισχυτής κρίνεται απαραίτητος αφού η παραγόμενη τάση Hall είναι πολύ μικρή, αλλά όπως και στην περίπτωση του CT, ανάλογη του ρεύματος του κύριου αγωγού.



Εικόνα 4.2 : Μέτρηση ρεύματος με αισθητήρα Hall <sup>[42]</sup>

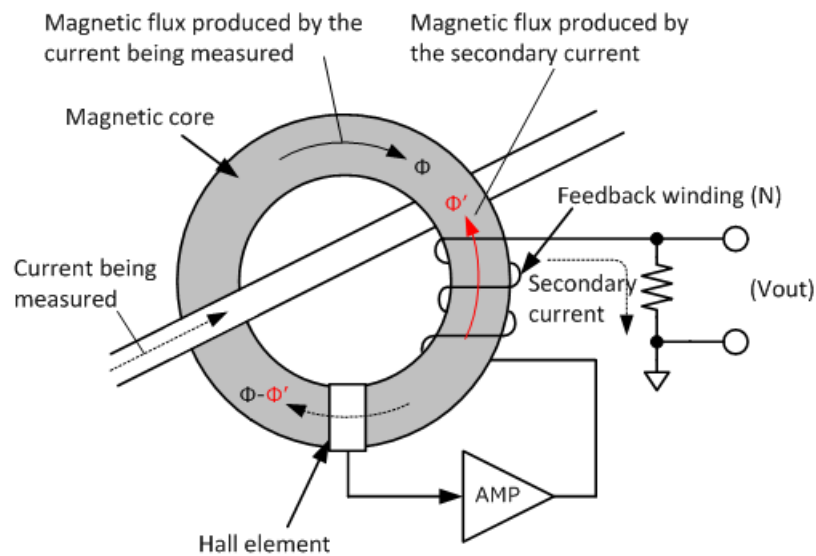
Για τους μετρητές ρεύματος που λειτουργούν με αισθητήρα Hall ισχύουν:

- Μπορούν να μετρήσουν συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Δεν είναι η καλύτερη επιλογή για μετρήσεις μεγάλης διάρκειας αφού επηρεάζονται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία.
- Δεν μπορούν να υποστηρίξουν αποτελεσματικά μετρήσεις πολύ μεγάλων συχνοτήτων.
- Χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρή ακρίβεια.

#### 4.3.5 Μηδενισμός της Μαγνητικής Ροής / Zero Flux Method

Το σφάλμα που εμφανίζεται στις μετρήσεις ρεύματος και οφείλεται στον μαγνητικό πυρήνα του οργάνου μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη ενός επιπλέον βοηθητικού κυκλώματος που καλείται κύκλωμα ανίχνευσης. Στις χαμηλές συχνότητες οι μαγνητικές ροές που δημιουργεί το κύριο και το δευτερεύον κύκλωμα δεν αλληλοαναιρούνται πλήρως. Ο ρόλος του τυλίγματος ανίχνευσης είναι να εντοπίσει αυτή τη διαφορά και

μέσα από μια διαδικασία ενίσχυσης του αντίστοιχου ρεύματος να οδηγήσει στο μικρότερο δυνατό σφάλμα της μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης που υιοθετούν τη μέθοδο αυτή έχουν γραμμικές χαρακτηριστικές, μικρές τιμές εμπέδησης και μικρότερο σφάλμα σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων.



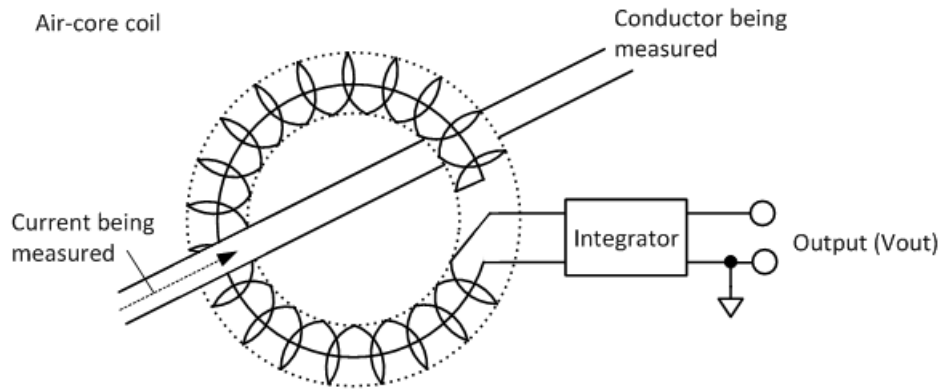
Εικόνα 4.3 : AC/DC Zero flux method με αισθητήρα Hall <sup>[42]</sup>

Όταν η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μετρητές με στοιχεία Hall όπως στην εικόνα 4.3, το αποτέλεσμα επί τις ουσίας είναι ένας συνδυασμός M/Σ ρεύματος με αισθητήρα Hall. Πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν αυτή τη μέθοδο είναι:

- Ανιχνεύει συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα.
- Έχει καλή ακρίβεια ακόμα και σε μικρές τιμές ρεύματος.
- Παρέχει υψηλό συντελεστή σήματος/θορύβου σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων.
- Χαρακτηρίζεται από καλή γραμμικότητα και μικρές τιμές σύνθετης αντίστασης.

#### 4.3.6 Πηνίο Rogowski

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες μεθόδους που αναφέρθηκαν, το στοιχείο του πηνία αυτής της μετρητικής διάταξης είναι ο αέρας. Στα άκρα του πηνίου μέσα από το οποίο διέρχεται ο κύριος αγωγός εμφανίζεται τάση εξ επαγωγής. Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση που εμφανίζεται είναι διαφορική, επομένως προκειμένου το ζητούμενο ρεύμα να συνδέεται ανάλογα με την τάση του πηνίου, μεταξύ αυτού και της εξόδου μεσολαβεί ένας ολοκληρωτής (εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4 : Μέτρηση ρεύματος με πηνίο Rogowski <sup>[42]</sup>

Για τους μετρητές ρεύματος με πηνίο Rogowski ισχύουν συνοπτικά:

- Είναι δυνατή η μέτρηση μόνο εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Μπορούν να μετρηθούν μεγάλες τιμές ρεύματος χωρίς να υπάρχει κίνδυνος μαγνητικού κορεσμού ή υστέρησης αφού ο πυρήνας δεν είναι μεταλλικός.
- Δεν υπάρχει κίνδυνος αύξησης της θερμοκρασίας.
- Χαρακτηρίζονται ως μικρές και ευέλικτες κατασκευές και παρουσιάζουν μικρή εμπέδηση.
- Είναι ευαίσθητοι στον εξωτερικό θόρυβο.

#### 4.3.7 Όργανο Μέτρησης Ηλιακής Ακτινοβολίας ( $W/m^2$ )

Για την μέτρηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πυρανόμετρο. Εκτός από τις εφαρμογές ηλιακής ενέργειας όπως τα Φ/Β, η παρουσία τέτοιων οργάνων μέτρησης θεωρείται απαραίτητη σε πεδία όπως:

- Μετεωρολογία
- Περιβαλλοντικές / κλιματικές έρευνες
- Γεωργία
- Υδρολογία
- Δοκιμές υλικών

Αποτελείται από τον αισθητήρα, ένα συμβατό ψηφιακό όργανο από το οποίο λαμβάνεται η ένδειξη και το κατάλληλο καλώδιο για την μεταξύ τους σύνδεση. Ο αισθητήρας ενός τέτοιου συστήματος (εικόνα 4.5) είναι μια επίπεδη θερμική στήλη ικανή να απορροφά μήκη κύματος ακτινοβολίας μεταξύ 300-3000 nm και περιβάλλεται από διάφανο ομόκεντρο επικάλυμμα το οποίο το προφυλάσσει από την έκθεση σε σκόνη αλλά κυρίως καθιστά την εφαρμογή του ανεξάρτητη των καιρικών συνθηκών. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μεταξύ

δύο επιφανειών και η οποία σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck μετατρέπεται σε διαφορά δυναμικού.



Εικόνα 4.5: Αισθητήρας πυρανόμετρου για μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας

Για την λήψη αποτελεσμάτων με υψηλή ακρίβεια είναι αναγκαία η σωστή τοποθέτηση του οργάνου η οποία σύμφωνα με τις οδηγίες των κατασκευαστών θα πρέπει να είναι μακριά από οποιαδήποτε σκίαση και επίπεδη στην μετρούμενη επιφάνεια, δηλαδή παράλληλη στο έδαφος για την μέτρηση της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στην επιφάνεια της γης ή παράλληλα σε ένα Φ/Β πλαίσιο για την μέτρηση της ακτινοβολίας που πέφτει πάνω στην επιφάνεια του πλαισίου.

Οι μετρήσεις που έγιναν στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου 03 της σειράς LP471PYRA και του ψηφιακού μοντέλου DeltaOHM HD2102.2 το οποίο δίνει απ' ευθείας την ένδειξη σε  $W/m^2$ . Πληροφορίες για τα παραπάνω περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

#### 4.4 FFT - (Fast Fourier Transform)

Κυρίαρχη τεχνική για την φασματική ανάλυση ενός σήματος θεωρείται ο γρήγορος Μ/Σ Fourier (FFT), παρ' όλα αυτά υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι που μπορούν να επιλεγούν με στόχο την καλύτερη δυνατή ανακατασκευή των μετρούμενων σημάτων και διαφοροποιούνται σε σημεία όπως ο τρόπος καταγραφής και απεικόνισης. Η βασική ιδέα στηρίζεται στον κλασικό μετασχηματισμό Fourier διακριτού χρόνου με βάση τον οποίο έχουν αναπτυχθεί αλλά και εξελίσσονται συνεχώς νέες τεχνικές όπως: <sup>[26]</sup>

- Πολλαπλών μετρήσεων διανυσμάτων (MMV)
- Ορθογωνικής αναζήτησης (OMP)
- Συμπιεσμένης ανίχνευσης Bayes (BCS)
- Ευέλικτων ατομικών φίλτρων (FAF)

Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) είναι μια συνάρτηση που υπολογίζει τον διακριτό Μ/Σ Fourier ενός σήματος, υλοποιείται εύκολα σε περιβάλλον matlab και επίσης υποστηρίζεται από την πλειοψηφία των παλμογράφων. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα εφαρμογής του αλγόριθμου FFT έναντι του συμβατικού Μ/Σ Fourier διακριτού χρόνου

είναι η μειωμένη πολυπλοκότητα και ο μειωμένος χρόνος υπολογισμού. Εκτός από την ανάλυση αρμονικής παραμόρφωσης είναι χρήσιμος για:

- Την ανίχνευση πηγών θορύβου.
- Την απόκριση συστημάτων.
- Την ανάλυση ευστάθειας.

Μία παράμετρος που χαρακτηρίζει έναν αλγόριθμο Μ/Σ είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου (SNR). Στον θόρυβο αυτό περιλαμβάνονται τα σφάλματα που εμφανίζονται λόγω του Α/Δ μετατροπέα, του σήματος αναφοράς και των ενισχυτών. <sup>[10] [25]</sup>

## 5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Μετρήσεις & Αποτελέσματα

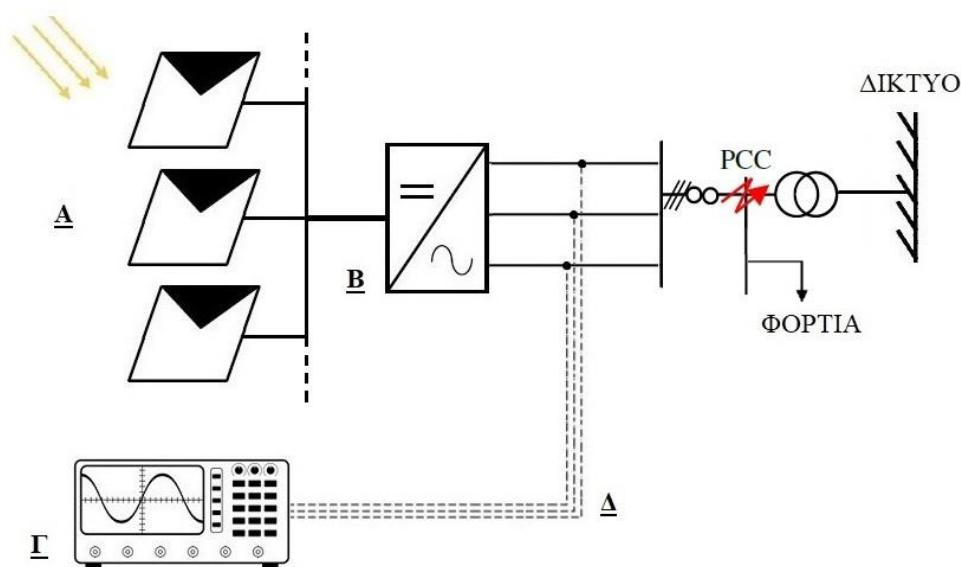
Οι μετρήσεις του ρεύματος πραγματοποιήθηκαν με μετασχηματιστή ρεύματος (CT) και παλμογράφο. Για την ανάλυση των αρμονικών (< 2 kHz) οι μετρήσεις έγιναν σε μία φάση, ενώ για την ανάλυση υπεραρμονικών (> 2 kHz) ελήφθησαν σειτ μετρήσεων και στις τρεις φάσεις του αντιστροφέα για διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Οι διατάξεις των μετρήσεων περιγράφονται παρακάτω στις εικόνες 5.1 και 5.2. Η κάθε μέτρηση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο ρυθμό δειγματοληψίας (Sa/sec) καθώς και πλήθος δειγμάτων (N), στοιχεία από τα οποία προκύπτει το βήμα συχνότητας στην ανάλυση Fourier. Για τις παρακάτω μετρήσεις ισχύουν:

		< 2 kHz	> 2 kHz
Ρυθμός δειγματοληψίας	kSa/sec	250	250
Αριθμός δειγμάτων	Sam	5000	4000
Ανάλυση συχνότητας FFT	Hz	50	62.5

Πληροφορίες για όλα τα όργανα και τα στοιχεία των μετρητικών διατάξεων περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

### 5.1.1 Μετρητική Διάταξη

Οι μετρήσεις του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα έγιναν με probes ρεύματος και τα δεδομένα ελήφθησαν απευθείας από τον παλμογράφο σε μορφή αρχείου “.csv”. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και των γραφημάτων έγινε μέσω MatLab. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Β.

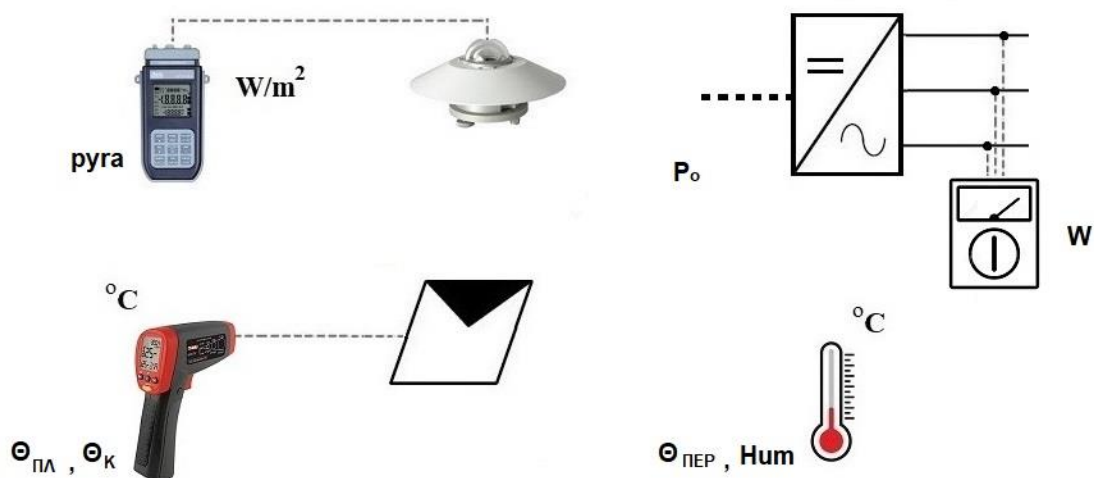


Εικόνα 5.1: Διάταξη μετρήσεων ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα

Όπου:

<b>A:</b>	Φ/Β πλαίσια	-
<b>B:</b>	Inverter	SMA Sunny 3power 10kW
<b>Γ:</b>	Παλμογράφος	Siglent Digital SDS2304X
<b>Δ:</b>	Probe ρεύματος	ELDITEST CP6220

Η λήψη μέρους των μετρήσεων έγινε υπό την ταυτόχρονη καταγραφή των παρακάτω παραμέτρων:



Εικόνα 5.2: Διάταξη μετρήσεων παραμέτρων

Όπου:

<b>P<sub>0</sub></b>	: Ισχύς αντιστροφή	W	Sunny TriPower 3.0
<b>Pyra</b>	: Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας	W/m <sup>2</sup>	DeltaOHM LP471PYRA.03
<b>Θ<sub>Κ</sub></b>	: Θερμοκρασία κυψελών	°C	UNI-T UT303B IR
<b>Θ<sub>ΠΛ</sub></b>	: Θερμοκρασία πλαισίου	°C	UNI-T UT303B IR
<b>Θ<sub>ΠΕΡ</sub></b>	: Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°C	-
<b>Hum</b>	: Υγρασία	%	-

## 5.2 Αρμονικές

Η μέτρηση για τις αρμονικές έγινε σε μία φάση με ρυθμό δειγματοληψίας 250 kSa/sec, και πλήθος 5000 δειγμάτων. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το χρονικό παράθυρο της μέτρησης είναι 20 ms και το βήμα συχνότητας στην ανάλυση Fourier 50 Hz.

Η ανάλυση, τα διαγράμματα και όλα τα αποτελέσματα για τη συγκεκριμένη μέτρηση έχουν προκύψει έπειτα από αναγωγή στον διορθωτικό παράγοντα “k” ο οποίος είναι

ίσος με τον λόγο της μέγιστης τιμής ρεύματος όπως έχει προκύψει θεωρητικά από τη μέτρηση της ισχύος (W), προς την μέγιστη μετρούμενη τιμή του ρεύματος:

$$k = \frac{I_{peak}}{I_{max}} \quad (5.1)$$

Η εξίσωση (5.1) χρησιμοποιήθηκε για να παρακαμφθούν σφάλματα που οφείλονται στο probe ρεύματος θέτοντας ως γνώμονα για τη μέτρηση την μετρούμενη ισχύ. Παρακάτω υπολογίζονται:

- Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος.
- Η συνιστώσες ρεύματος με το μεγαλύτερο μέγεθος.
- Ο δείκτης THD% που προκύπτει υπολογιζομένων όλων των συνιστωσών από 50 έως 2500 Hz (δηλαδή μέχρι την 50<sup>η</sup> συνιστώσα όπως προβλέπεται στο IEEE 519 2022).

Ο κατασκευαστής του αντιστροφέα σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές δίνει:

Total harmonic distortion of the output current with total harmonic distortion of the AC voltage < 2%, and AC Power > 50% of the rated power.	< 3 %
---	-------

Σημειώνεται ότι:

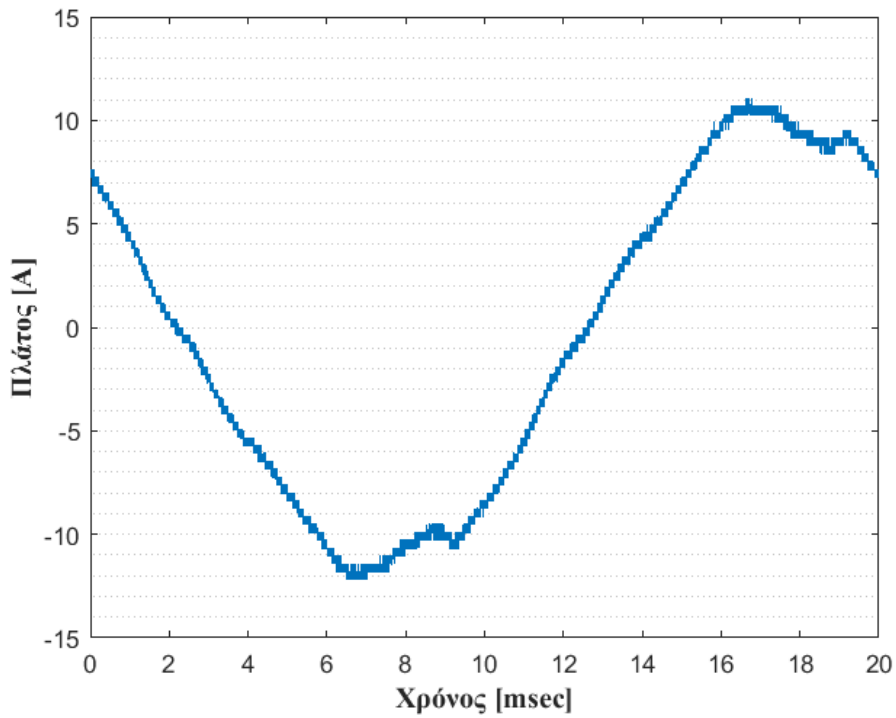
- Η πραγματική ισχύς (W) που μετρήθηκε υπερβαίνει το 50% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα.
- Δεν μετρήθηκε ούτε έχει γίνει εκτίμηση για την παραμόρφωση στην τάση.
- Δεν μετρήθηκε το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , επομένως η παρακάτω σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα όρια του IEEE 519 2022 έγινε με την παραδοχή ότι  $I_{sc} / I_L < 20$ . (όπου  $I_L$  είναι το ονομαστικό ρεύμα)

### 5.2.1 Μέτρηση

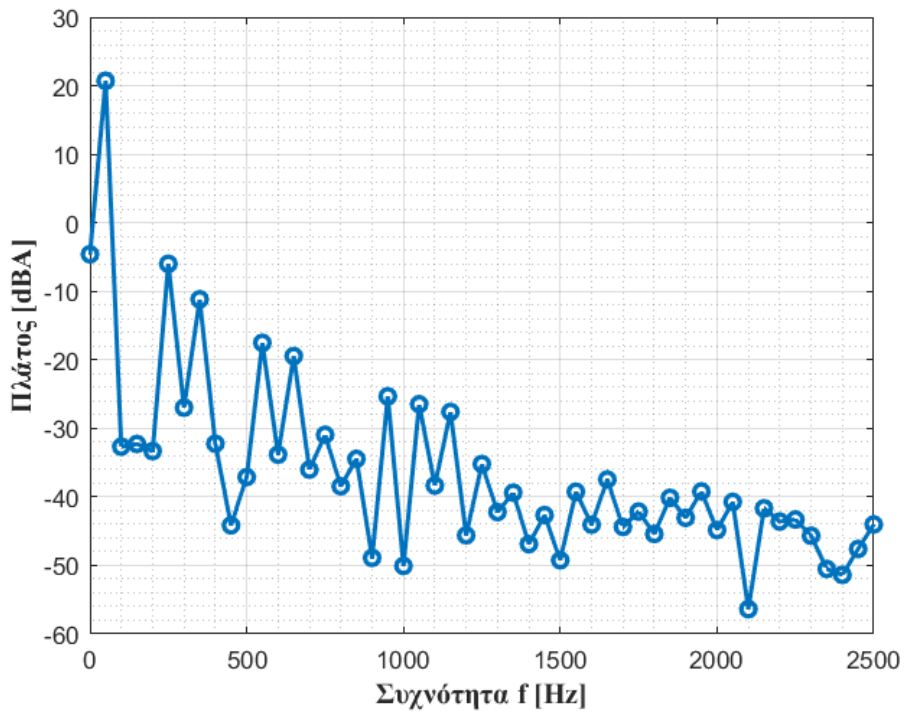
Ημερομηνία : 06/10/2017  
Ωρα : 19:05  
Ισχύς (3Φ) : 5412 Watt

---

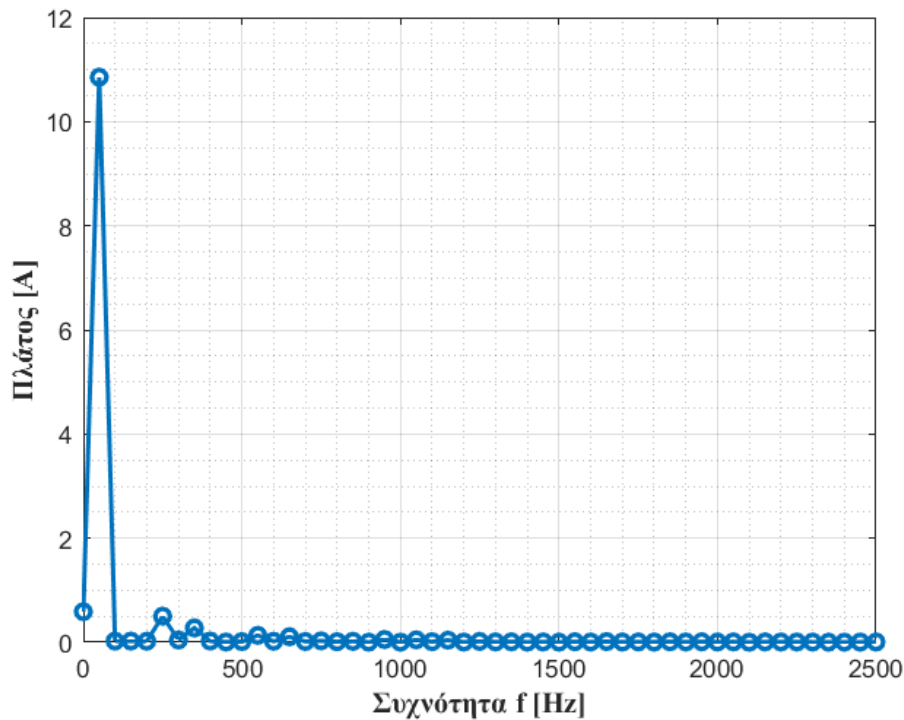




Εικόνα 5.3: Χρονική συνάρτηση για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 5000 δείγματα



Εικόνα 5.4: FFT μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 5000 δείγματα



Εικόνα 5.5: FFT μέτρησης σε γραμμική κλίμακα

	$I_{\max} (A)_{\text{peak}}$	$I_{\max} (A)_{\text{rms}}$
1st:	10.853847	7.674829
5th:	0.502117	0.355050
7th:	0.276484	0.195503
11th:	0.133053	0.094083
DC	0.589006	

	Μέγιστες αρμονικές ανά φάση επί % του $I_L$ στο διάστημα 0-2.5 kHz					TDD %
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	
1 <sup>η</sup> Φάση	4.6	1.2	0.5	0.4	0.1	5.6
IEEE 519 2022	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

### 5.3 Μετρήσεις Υπεαρμονικών

Το εύρος που μπορεί να εξεταστεί με ρυθμό δειγματοληψίας 250 kSa/sec περιλαμβάνει συχνότητες από 0 έως 125 kHz, ωστόσο η παρακάτω ανάλυση και απεικόνιση έχει επικεντρωθεί στην περιοχή 2 – 40 kHz όπου και παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές ρεύματος.

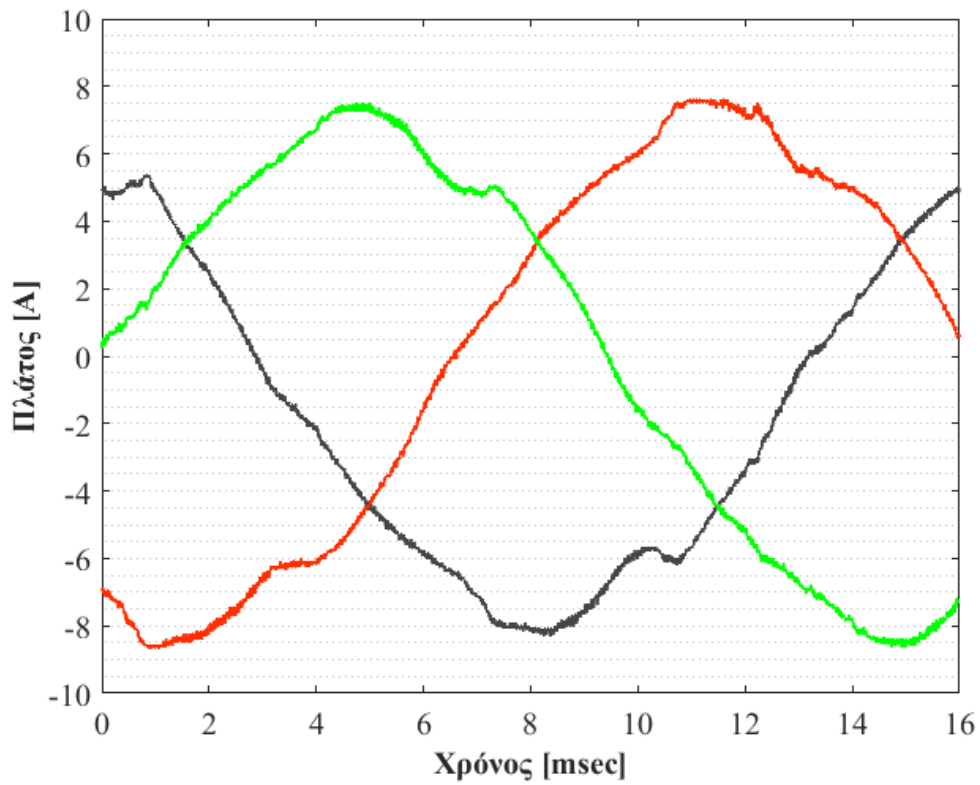
Για κάθε μέτρηση υπολογίζονται:

- Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος ανά φάση.
- Η μέγιστη συνιστώσα ρεύματος κοντά στα 16 kHz.
- Η μέγιστη συνιστώσα ρεύματος κοντά στα 32 kHz.
- Ο δείκτης THD% που προκύπτει υπολογιζομένων όλων των συνιστωσών από 2 έως 125 kHz.

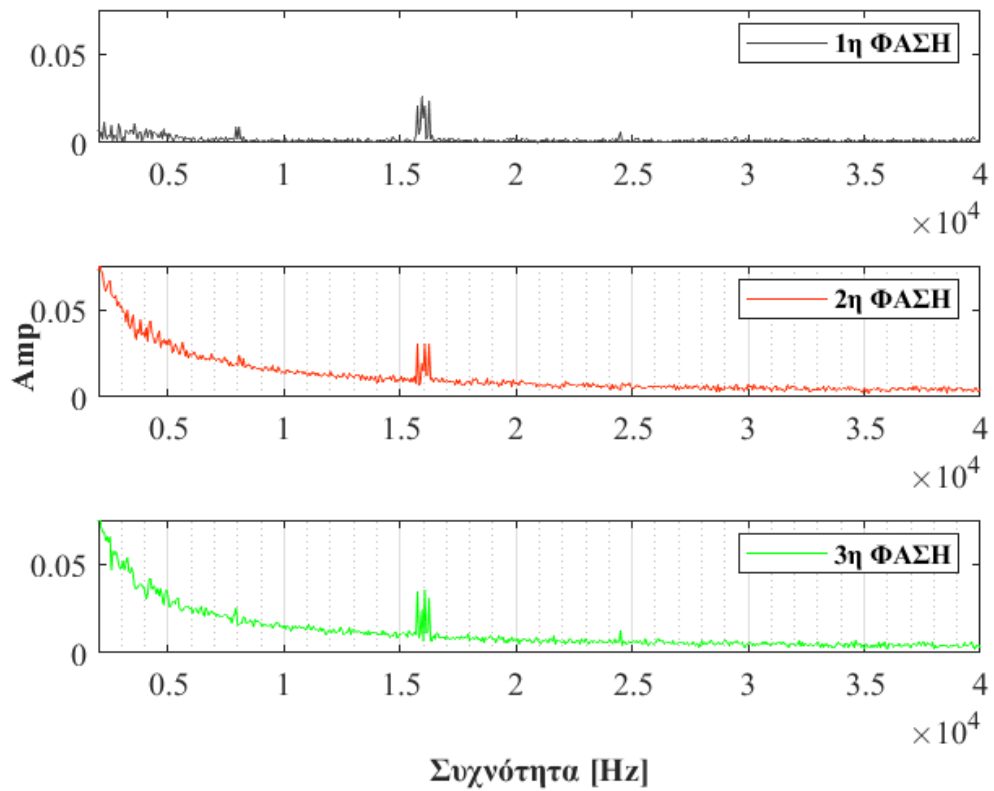
### 5.3.1 Σετ Μετρήσεων [A]

Ημερομηνία : 25/06/2022  
 Διάρκεια : 10:20 – 12:45  
 Καιρικές Συνθήκες : Πλήρης ηλιοφάνεια

25/06/22, 10:20						
1	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	3600	616.7	20	40	32.6	44
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	6.116907	0.026088	0.002719		1.473598	
2 <sup>η</sup> Φάση	7.652548	0.030300	0.007496		5.783422	
3 <sup>η</sup> Φάση	7.396034	0.036013	0.007236		6.050549	

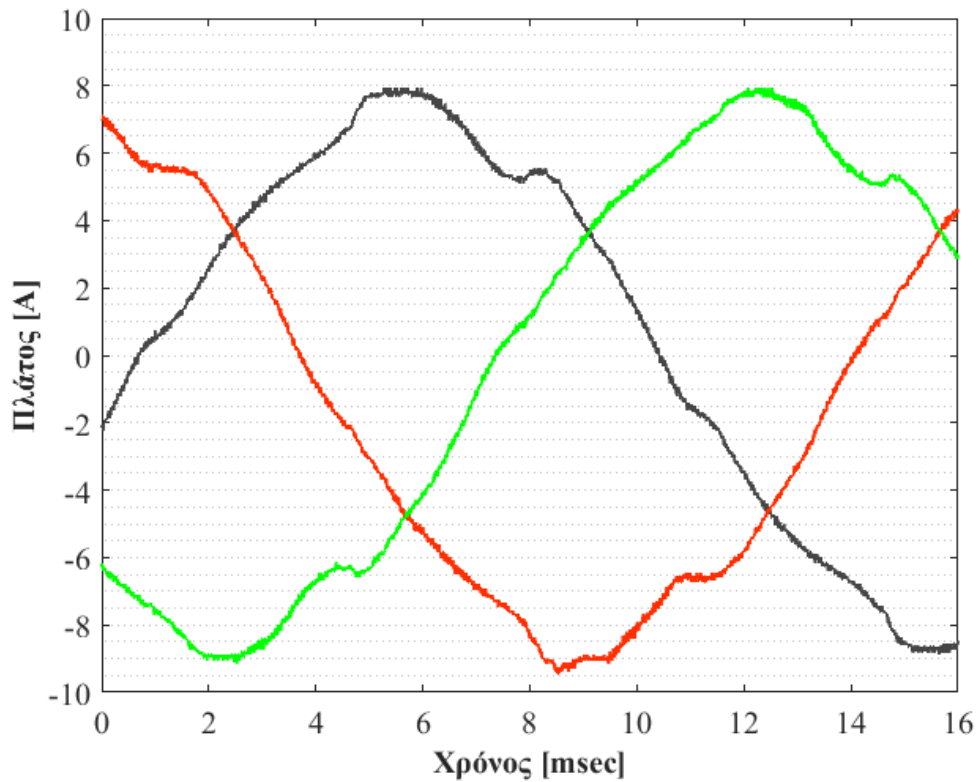


Εικόνα 5.6: Χρονική συνάρτηση  $I^{ns}$  μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

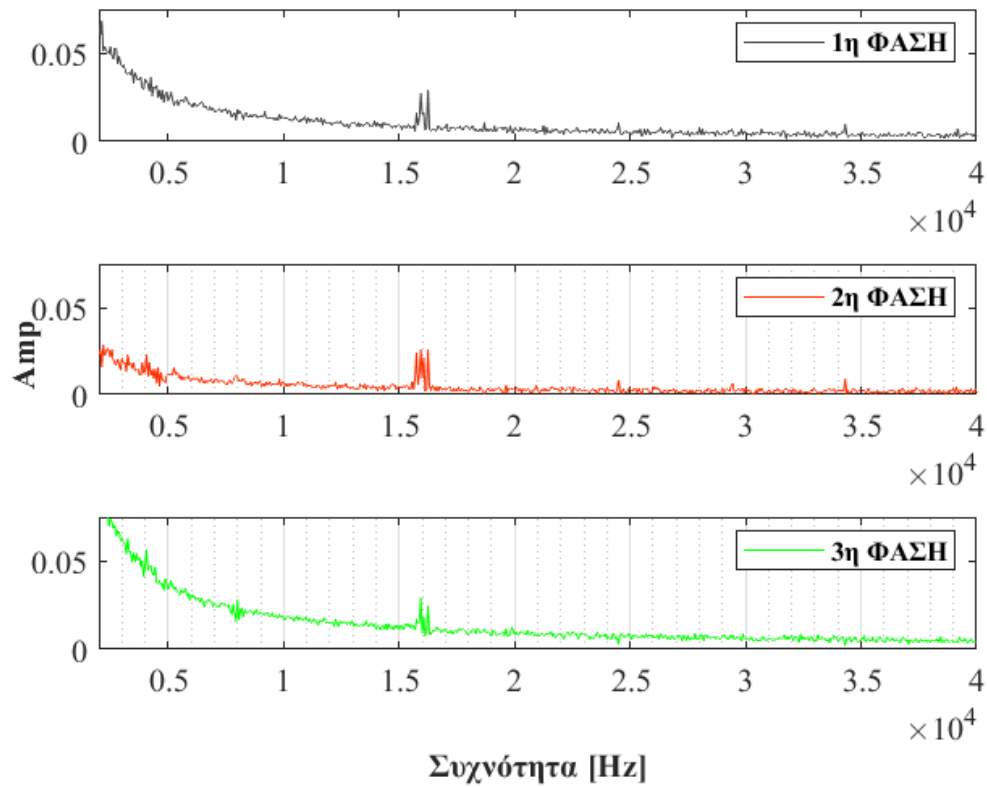


Εικόνα 5.7: FFT  $I^{ns}$  μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 10:35						
2	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	3827	633.1	24.8	41.5	32.6	44
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	7.246393	0.029341	0.009644	5.253182		
2 <sup>η</sup> Φάση	6.988111	0.025728	0.008838	2.557519		
3 <sup>η</sup> Φάση	8.172001	0.029090	0.008660	6.552799		

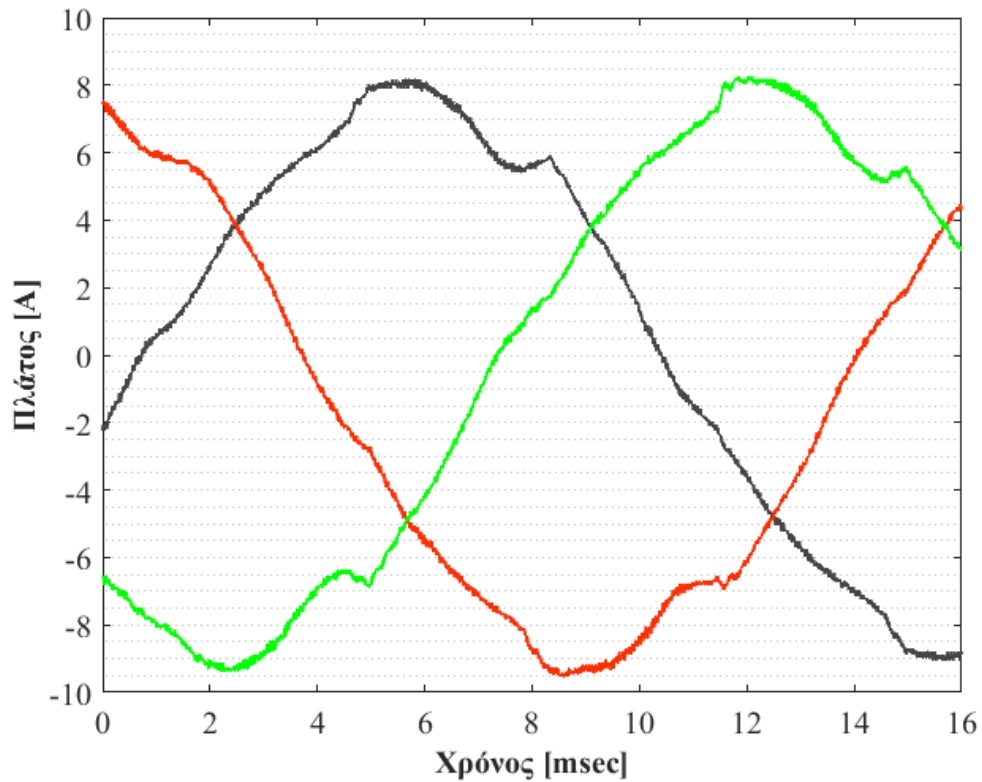


Εικόνα 5.8: Χρονική συνάρτηση 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

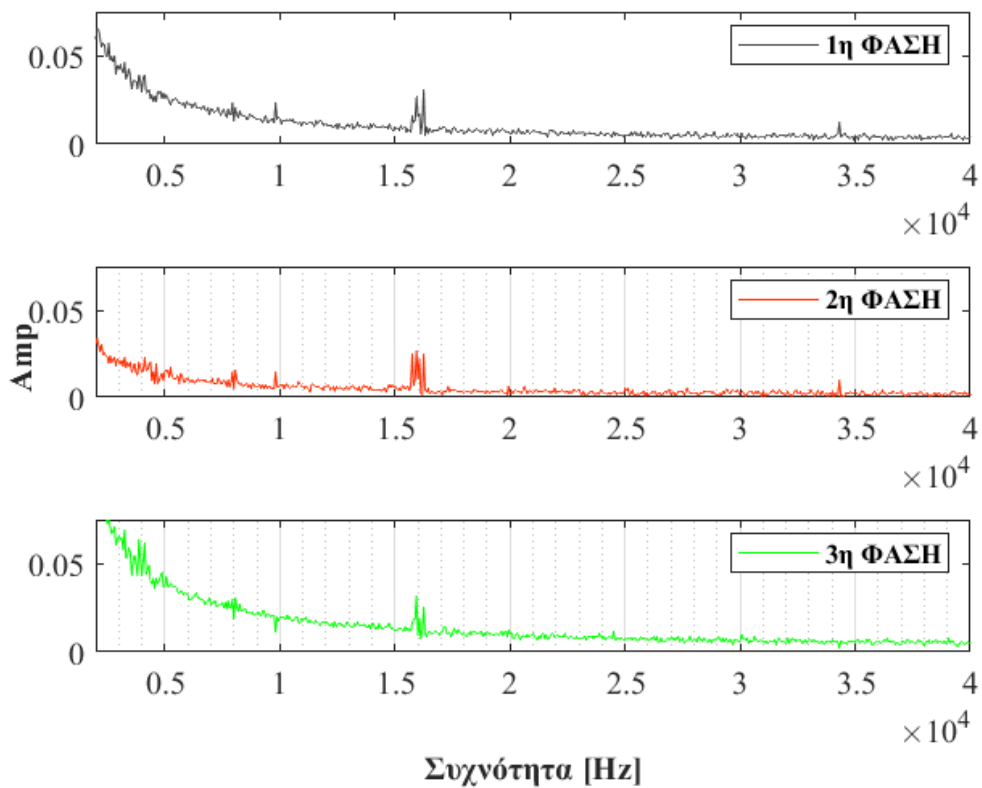


Εικόνα 5.9: FFT 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 10:50						
3	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4050	652.5	29.5	42.8	31.8	37.5
	I <sub>nmax</sub> (A)			THD %		
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	7.505321	0.030917	0.012265	5.238075		
2 <sup>η</sup> Φάση	7.273666	0.027007	0.009772	2.713798		
3 <sup>η</sup> Φάση	8.482361	0.031941	0.009994	6.687106		

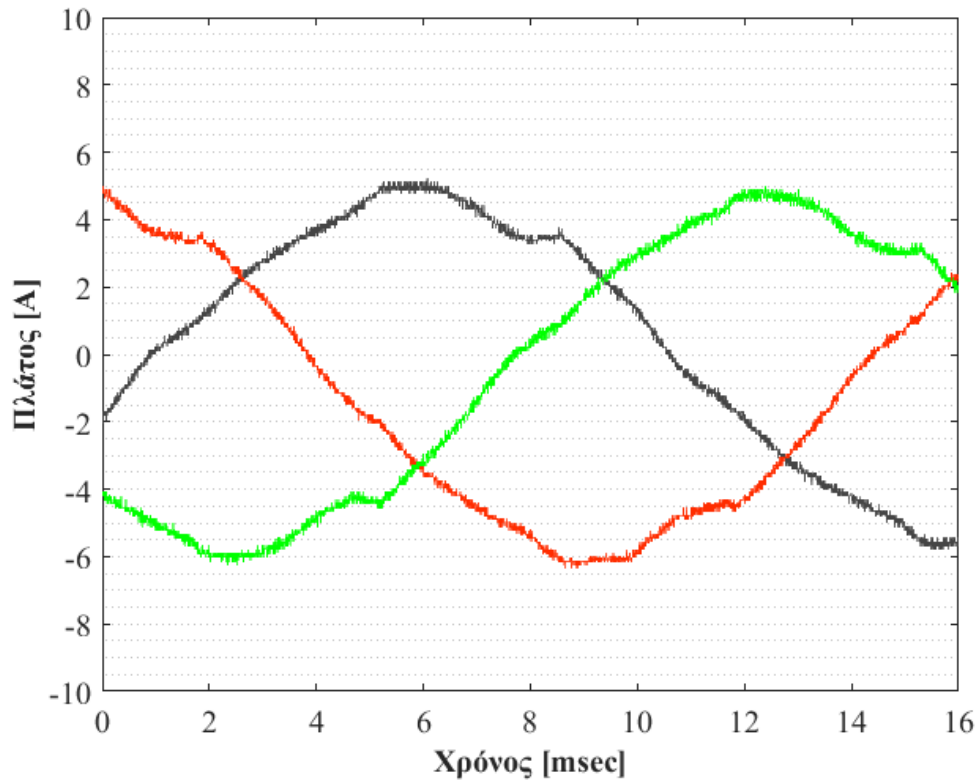


Εικόνα 5.10: Χρονική συνάρτηση 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



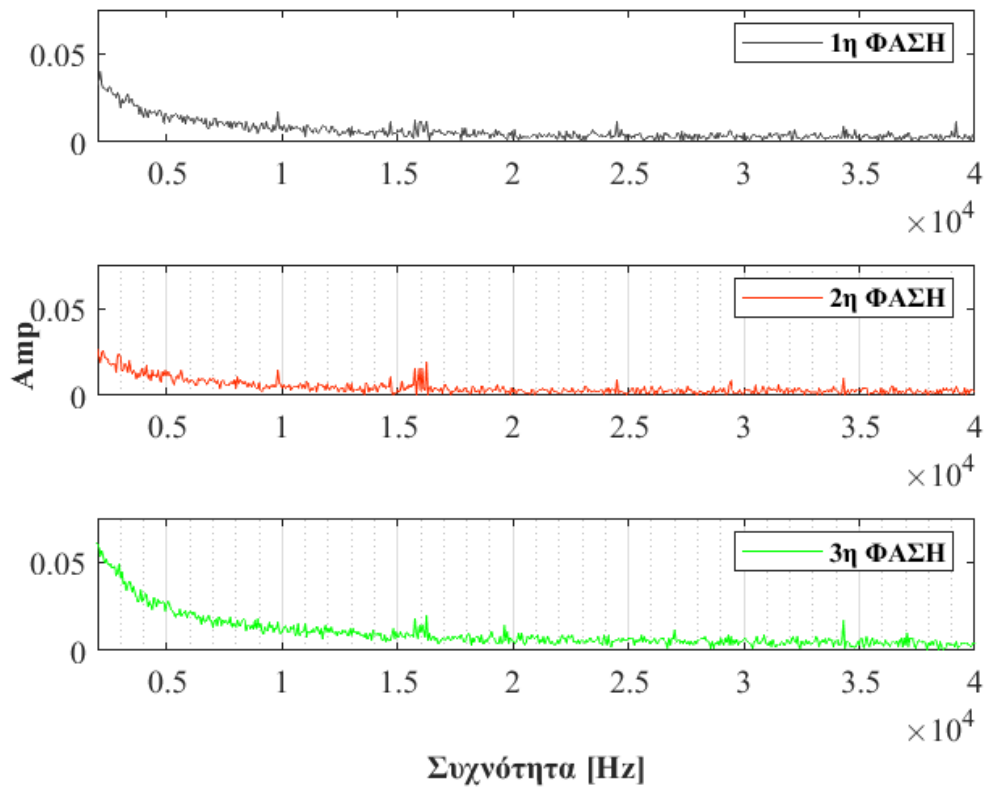
Εικόνα 5.11: FFT 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 11:05						
4	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4400	687.6	32	43	31.9	36.5
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	4.595701	0.012296	0.009170	5.229575		
2 <sup>η</sup> Φάση	4.650913	0.019049	0.009500	3.939931		
3 <sup>η</sup> Φάση	5.314338	0.019725	0.016681	7.053058		



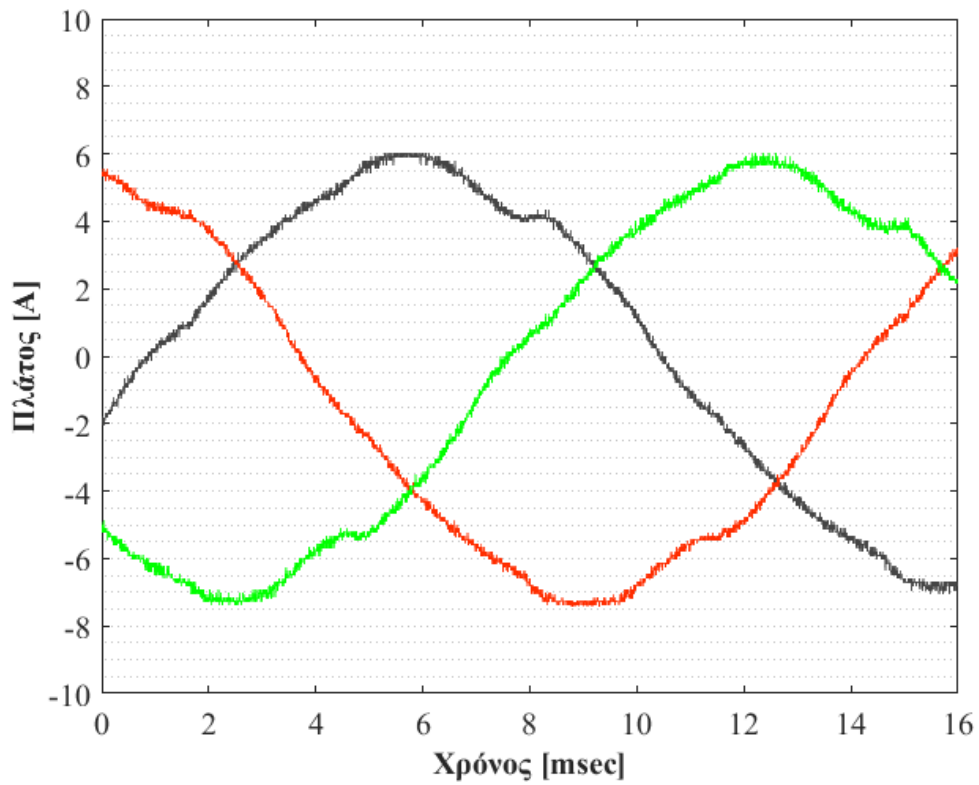
Εικόνα 5.12: Χρονική συνάρτηση 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



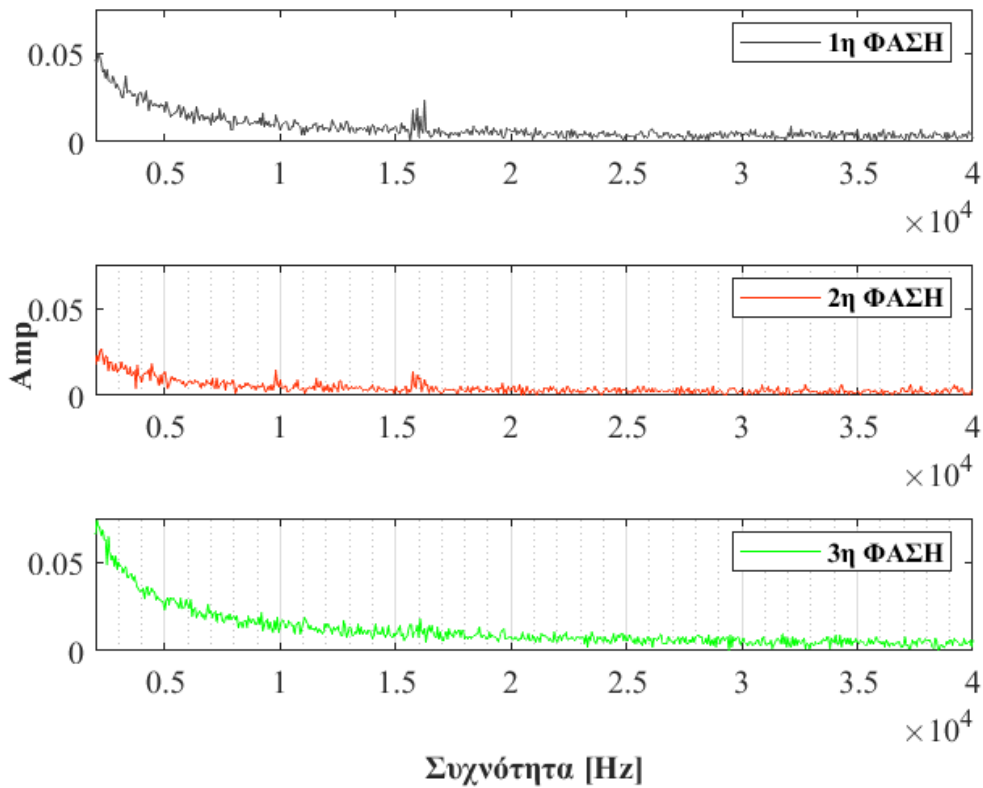


Εικόνα 5.13: FFT 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

5	25/06/22, 12:00					
	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρ</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5185	808.5	33	47.6	33.7	29.2
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	5.646855	0.023515	0.008421	5.297770		
2 <sup>η</sup> Φάση	5.600058	0.013792	0.006558	3.053035		
3 <sup>η</sup> Φάση	6.452699	0.018216	0.009697	6.808757		

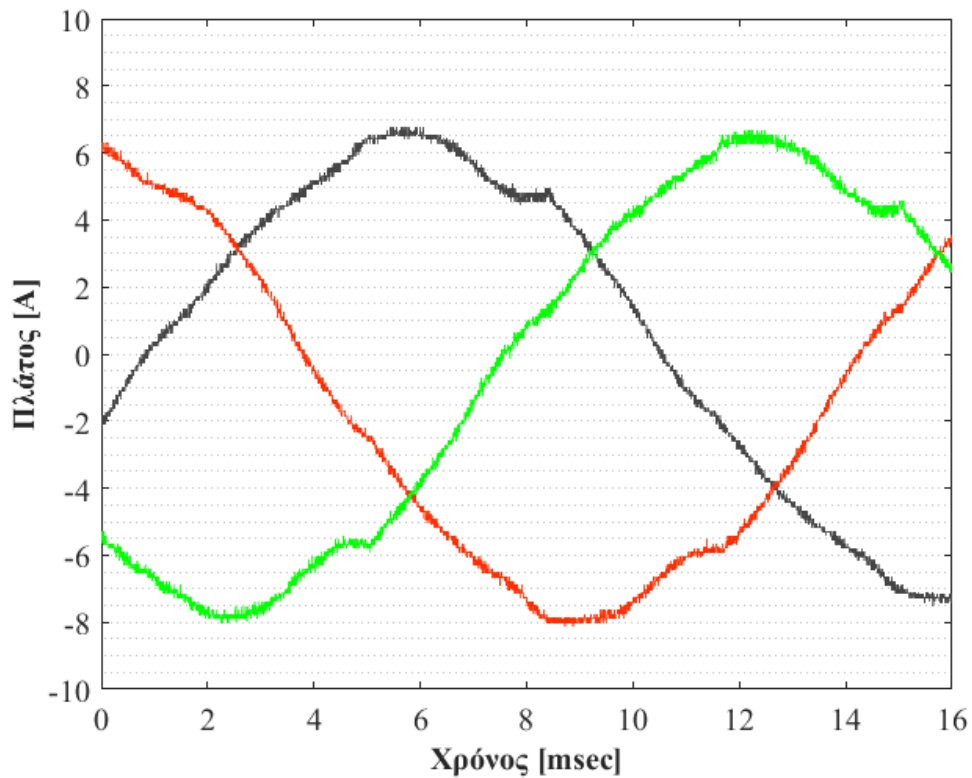


Εικόνα 5.14: Χρονική συνάρτηση 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

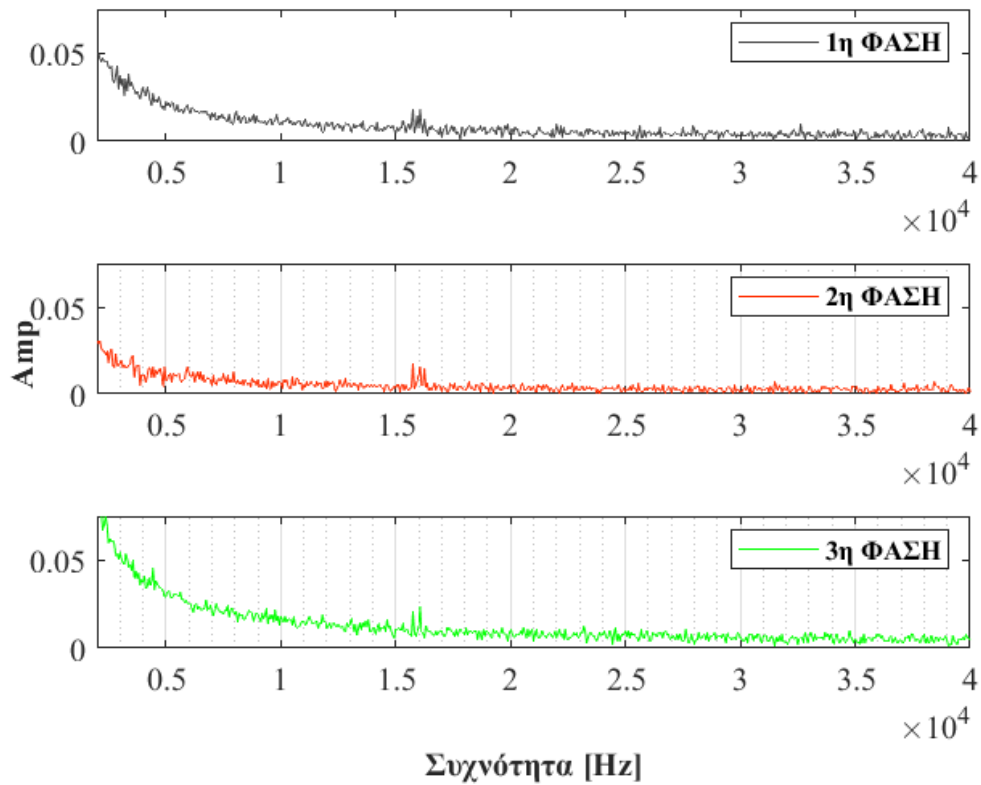


Εικόνα 5.15: FFT 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 12:15						
6	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5452	828	38	50.4	37.2	24.3
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	6.146876	0.018300	0.009430	5.296309		
2 <sup>η</sup> Φάση	6.172088	0.017582	0.006918	3.184204		
3 <sup>η</sup> Φάση	7.075747	0.023389	0.010251	6.822451		

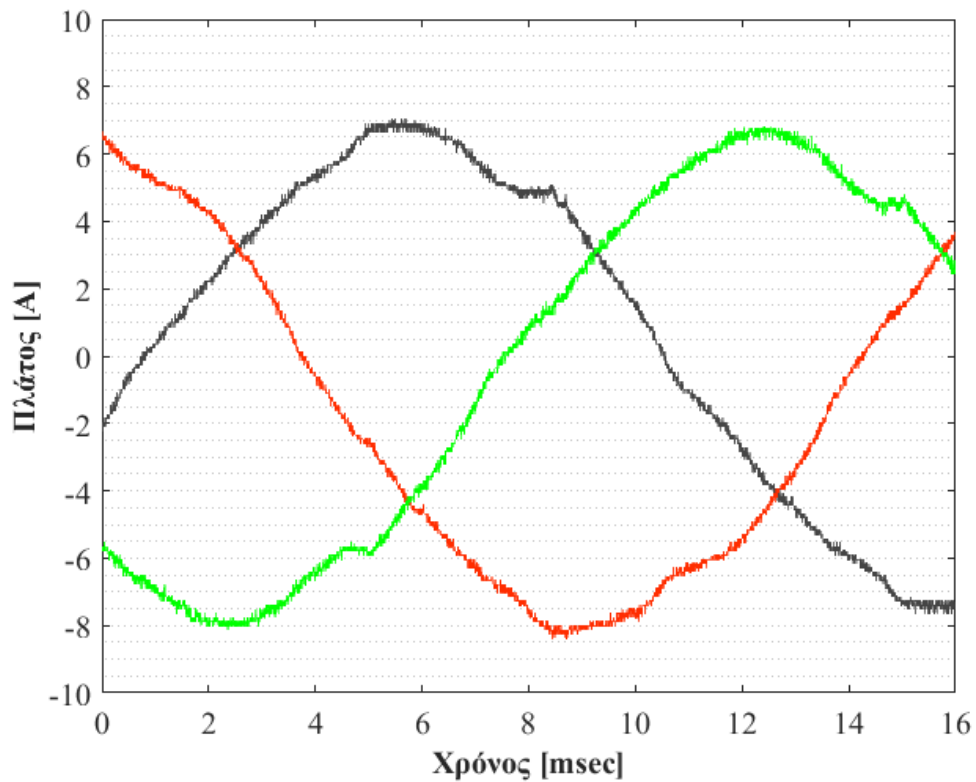


Εικόνα 5.16: Χρονική συνάρτηση 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

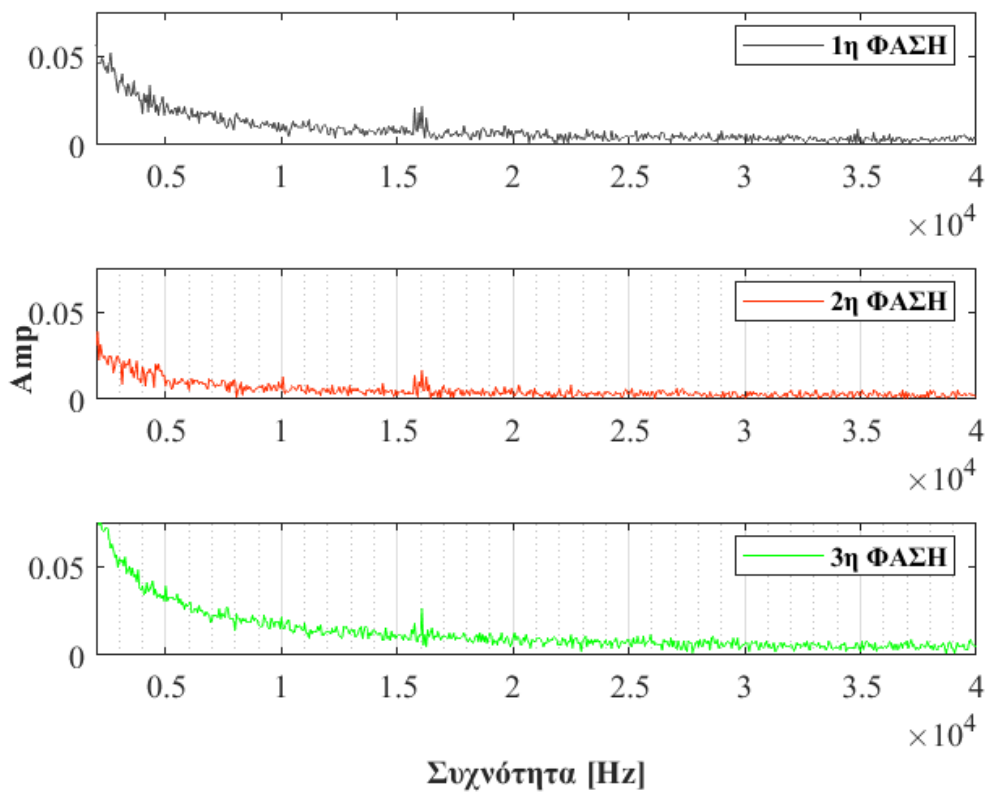


Εικόνα 5.17: FFT 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 12:30						
7	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5567	839.4	34.4	47.5	42.6	20.3
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	6.340509	0.021496	0.008521	5.243638		
2 <sup>η</sup> Φάση	6.326926	0.016269	0.005676	3.236635		
3 <sup>η</sup> Φάση	7.273213	0.026296	0.007917	6.771285		

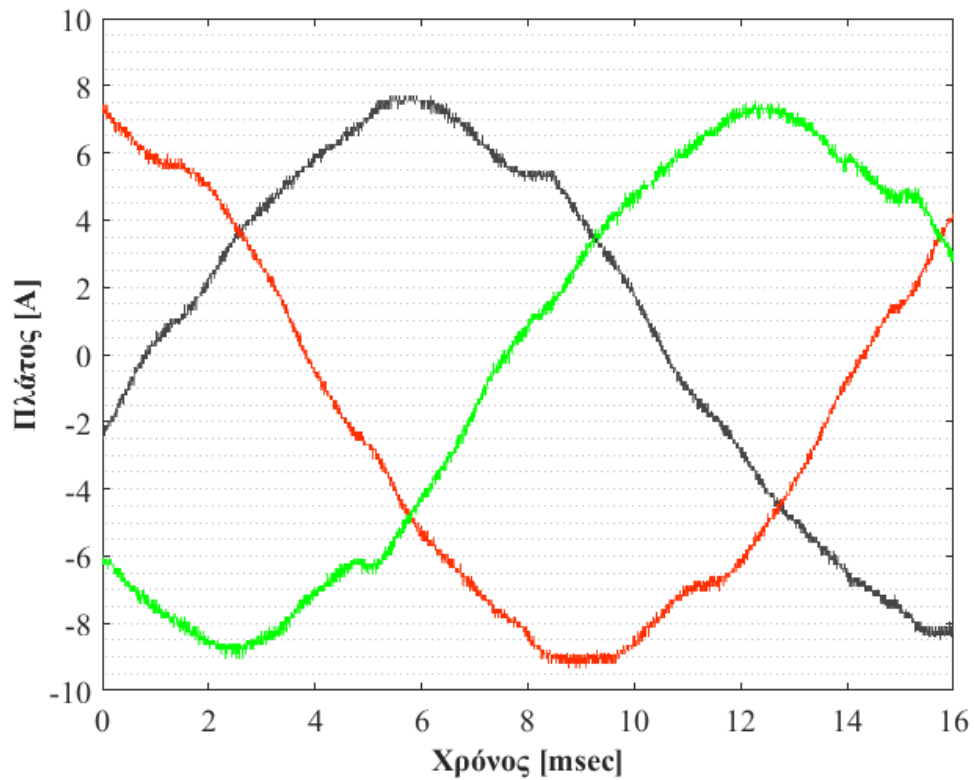


Εικόνα 5.18: Χρονική συνάρτηση 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

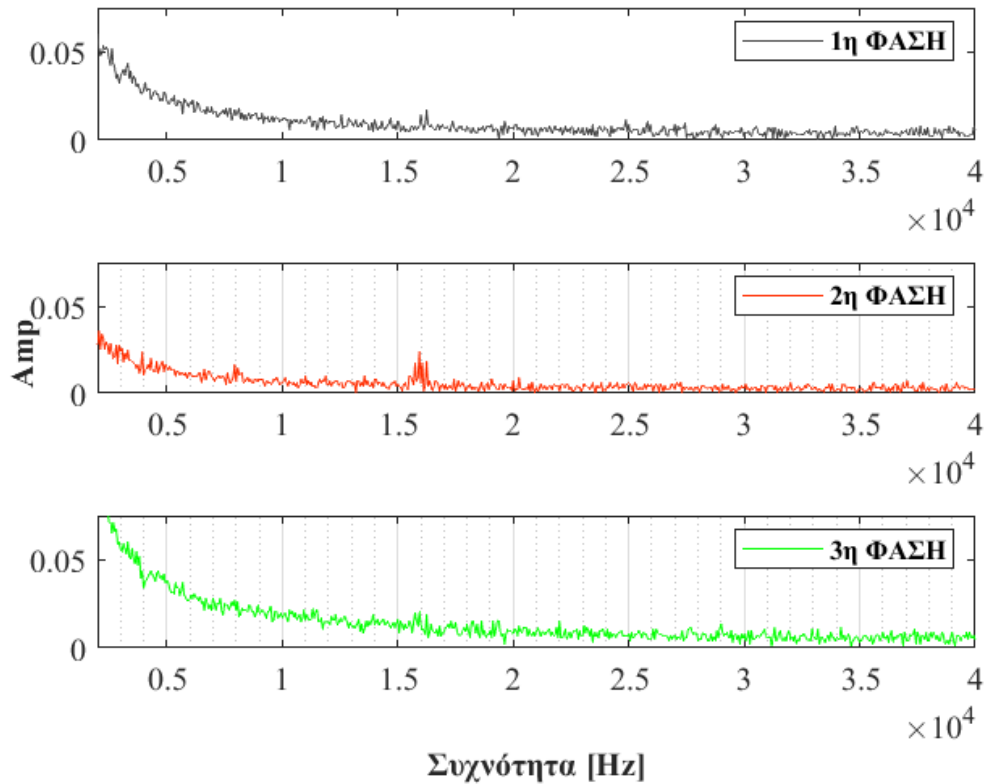


Εικόνα 5.19: FFT 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

25/06/22, 12:45						
8	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5709	852.6	35.2	53.6	44.5	15.8
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	6.931860	0.016737	0.007772	5.174926		
2 <sup>η</sup> Φάση	7.120432	0.023808	0.006087	3.178745		
3 <sup>η</sup> Φάση	7.970506	0.020615	0.011753	6.749548		



Εικόνα 5.20: Χρονική συνάρτηση 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

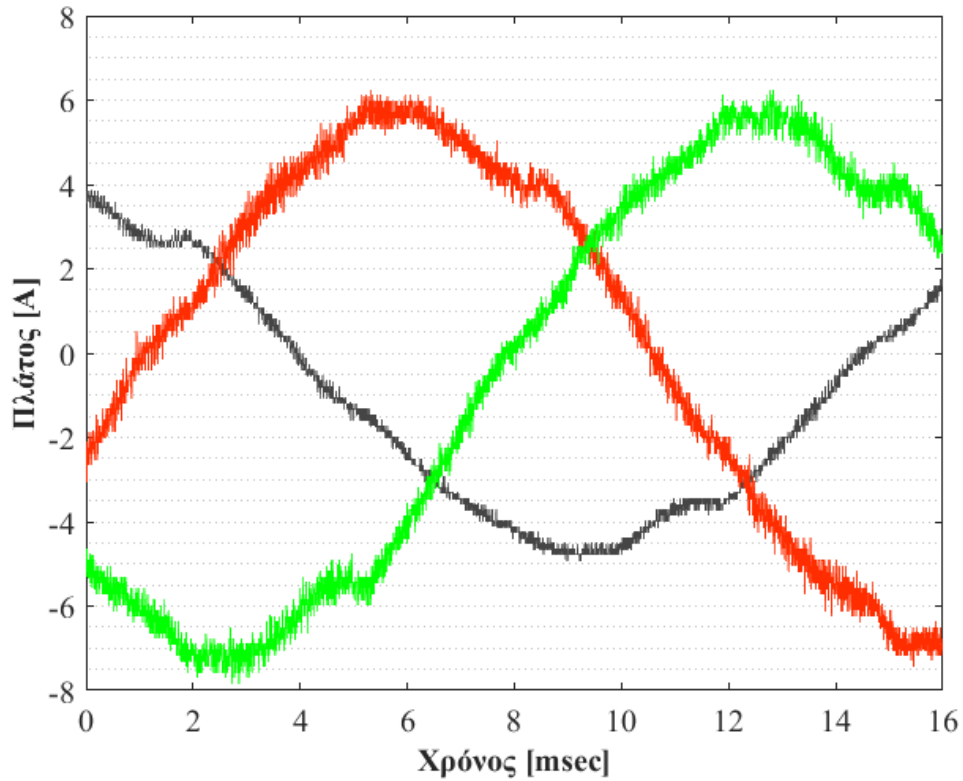


Εικόνα 5.21: FFT 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

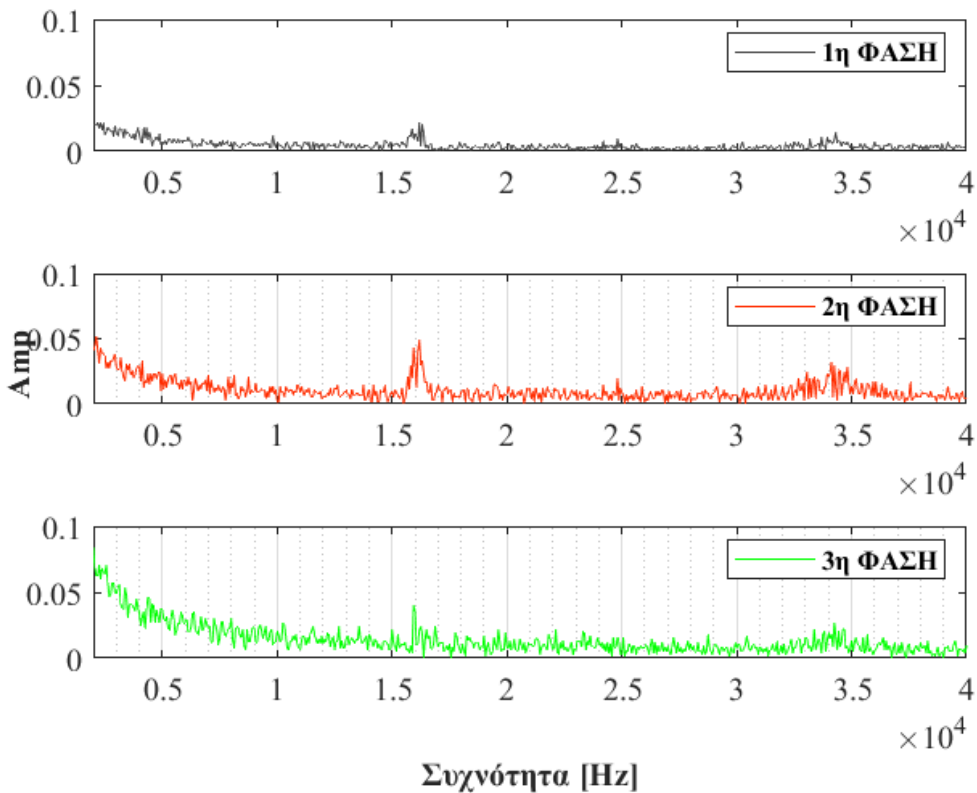
### 5.3.2 Σετ Μετρήσεων [B]

Ημερομηνία : 17/08/2022  
 Διάρκεια : 16:00 – 18:15  
 Καιρικές Συνθήκες : Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά

17/08/22, 16:00						
1	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γ</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4600	853.5	44	55.6	50	12.1
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	3.604937	0.021953	0.013825	5.149731		
2 <sup>η</sup> Φάση	5.615176	0.048759	0.032490	7.361971		
3 <sup>η</sup> Φάση	6.449525	0.040305	0.027202	8.292953		



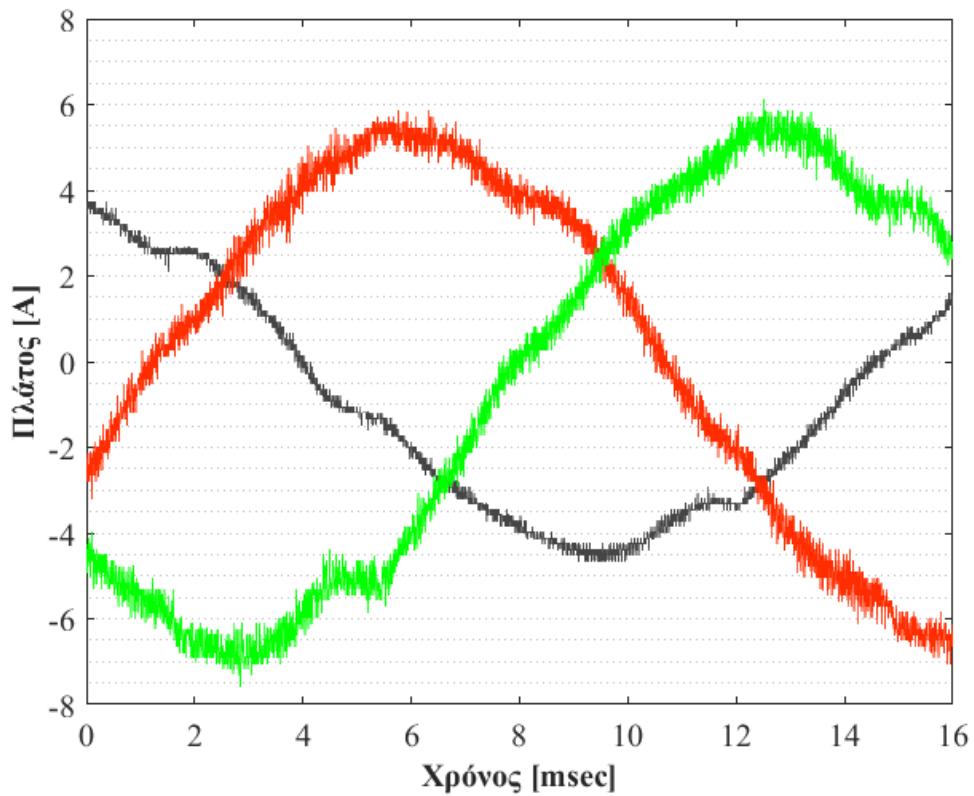
Εικόνα 5.22: Χρονική συνάρτηση 1<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



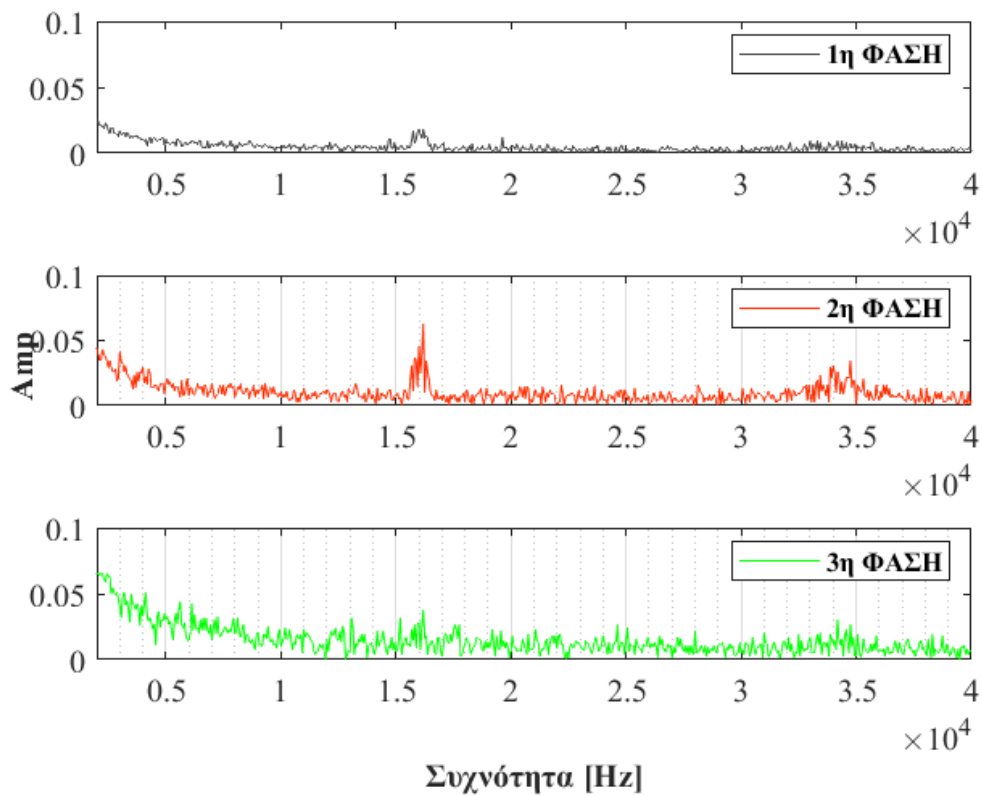
Εικόνα 5.23: FFT 1<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



17/08/22, 16:15						
2	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4377	779.7	42	52.5	50	12.1
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	3.425152	0.018132	0.009221	5.472035		
2 <sup>η</sup> Φάση	5.239930	0.062388	0.034334	7.713426		
3 <sup>η</sup> Φάση	6.079060	0.037937	0.029972	8.858630		

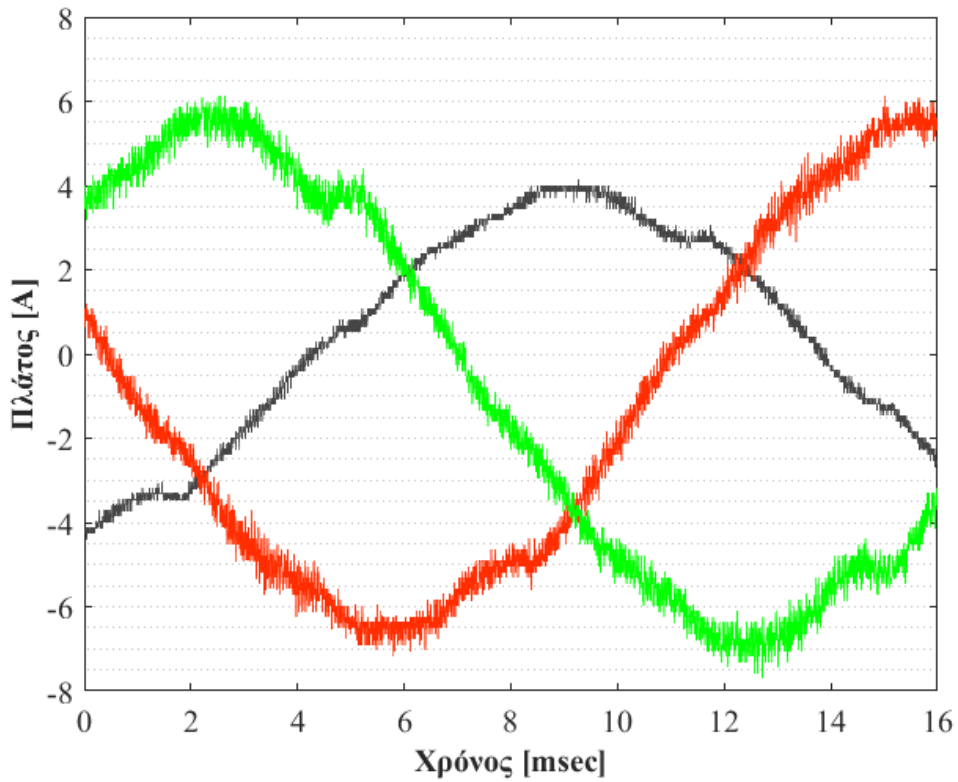


Εικόνα 5.24: Χρονική συνάρτηση 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

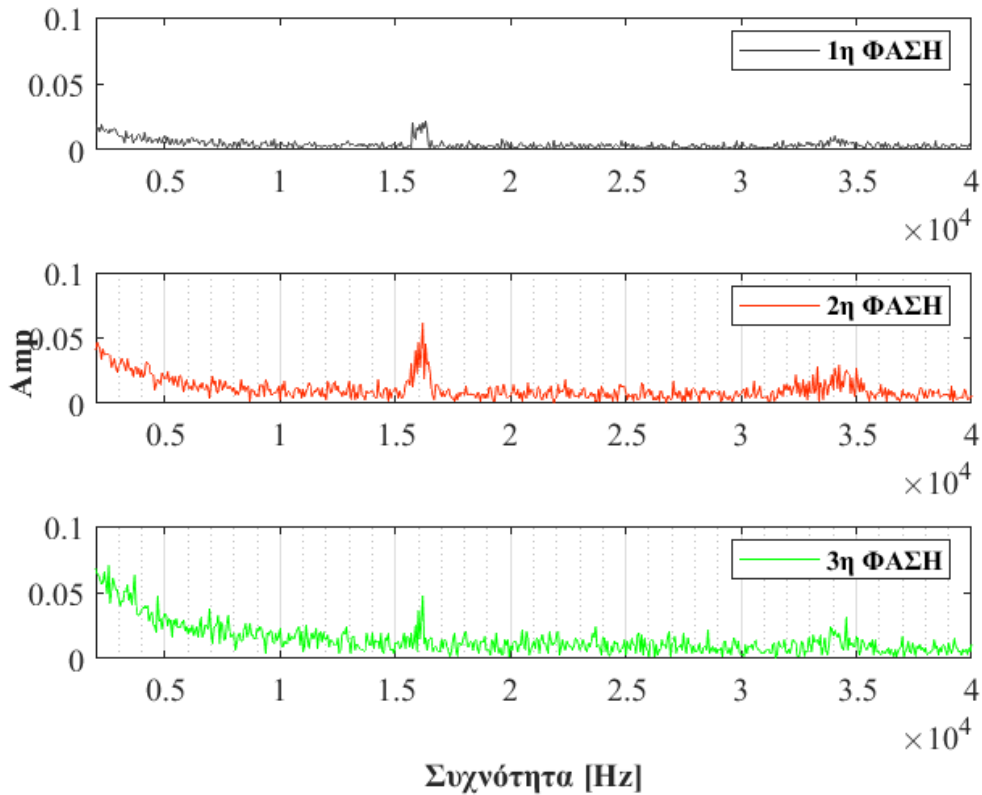


Εικόνα 5.25: FFT 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 16:30						
3	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4528	787.3	44.9	57.2	50	10.3
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	3.491488	0.021516	0.010721	4.846719		
2 <sup>η</sup> Φάση	5.430078	0.061004	0.029694	7.695675		
3 <sup>η</sup> Φάση	6.175120	0.047541	0.030888	8.648368		

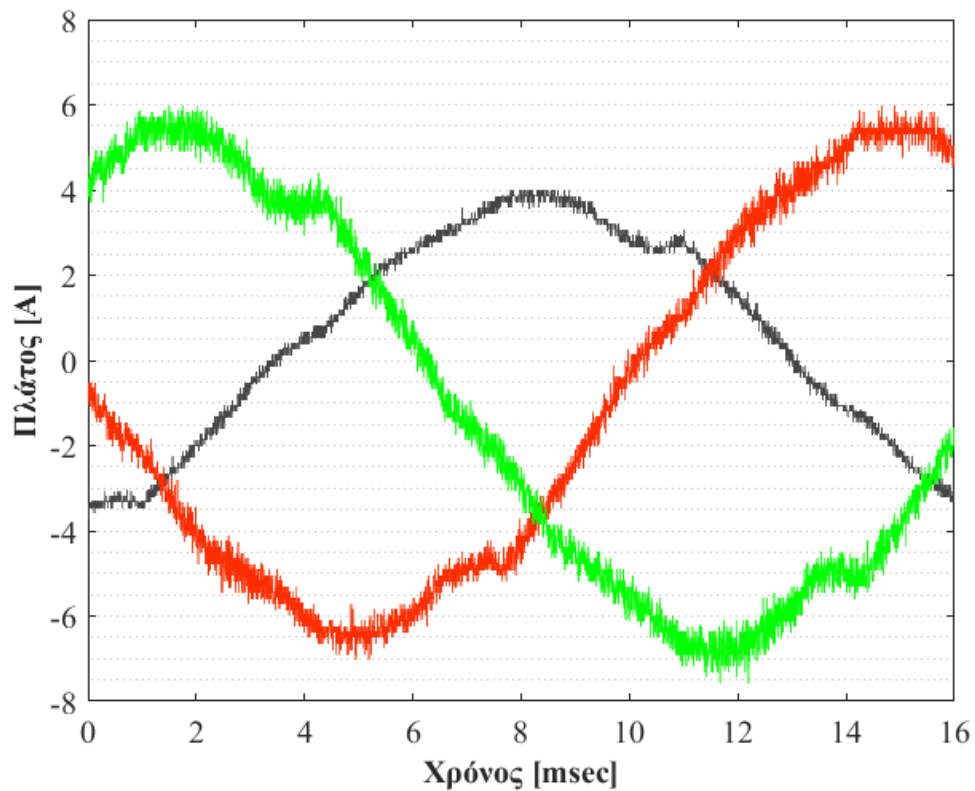


Εικόνα 5.26: Χρονική συνάρτηση 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

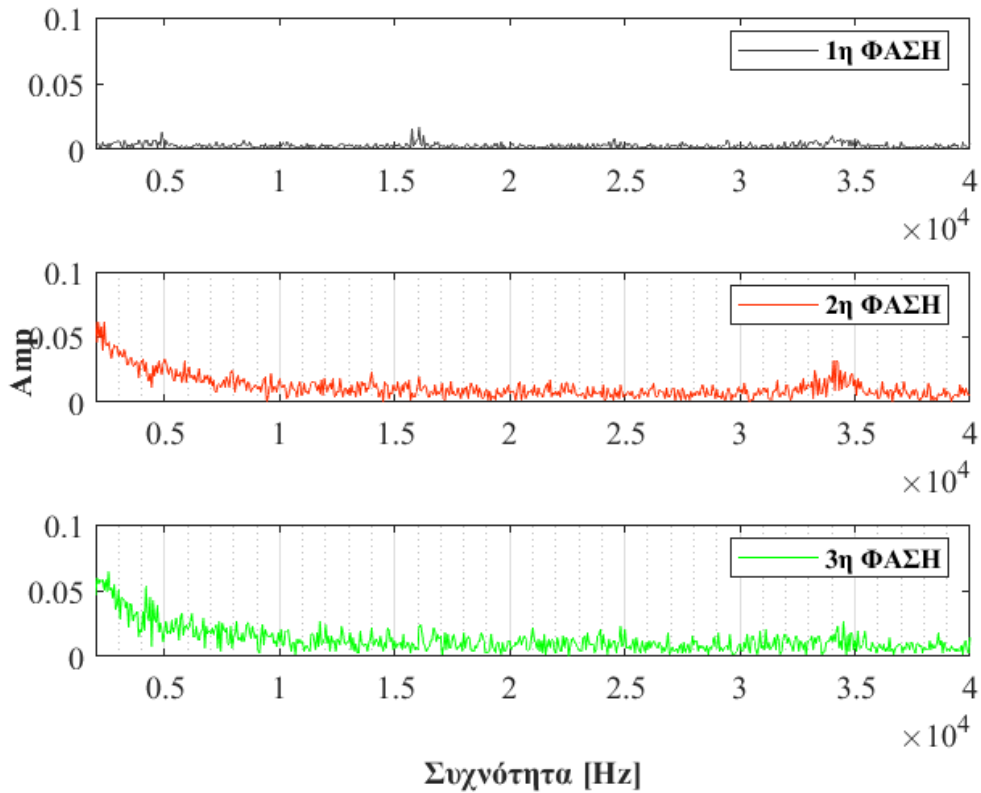


Εικόνα 5.27: FFT 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 16:45						
4	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	4477	725	40.7	54.1	50	11.5
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	3.335611	0.016652	0.010453	4.037882		
2 <sup>η</sup> Φάση	5.622376	0.022371	0.032580	7.795739		
3 <sup>η</sup> Φάση	5.906798	0.024188	0.025923	8.273500		

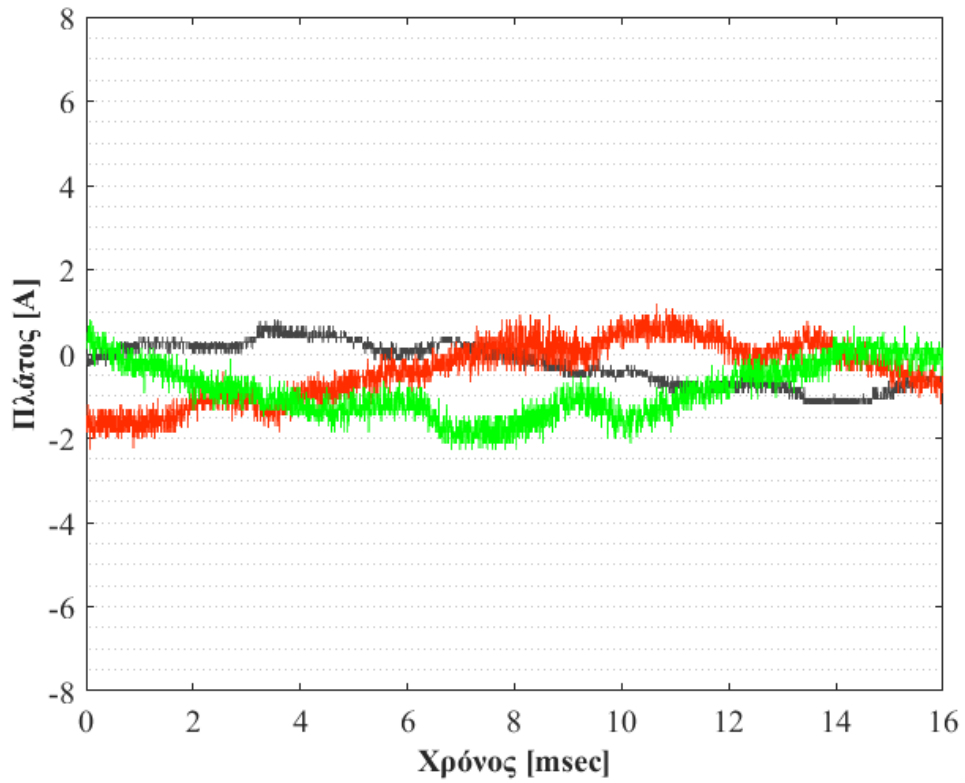


Εικόνα 5.28: Χρονική συνάρτηση 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

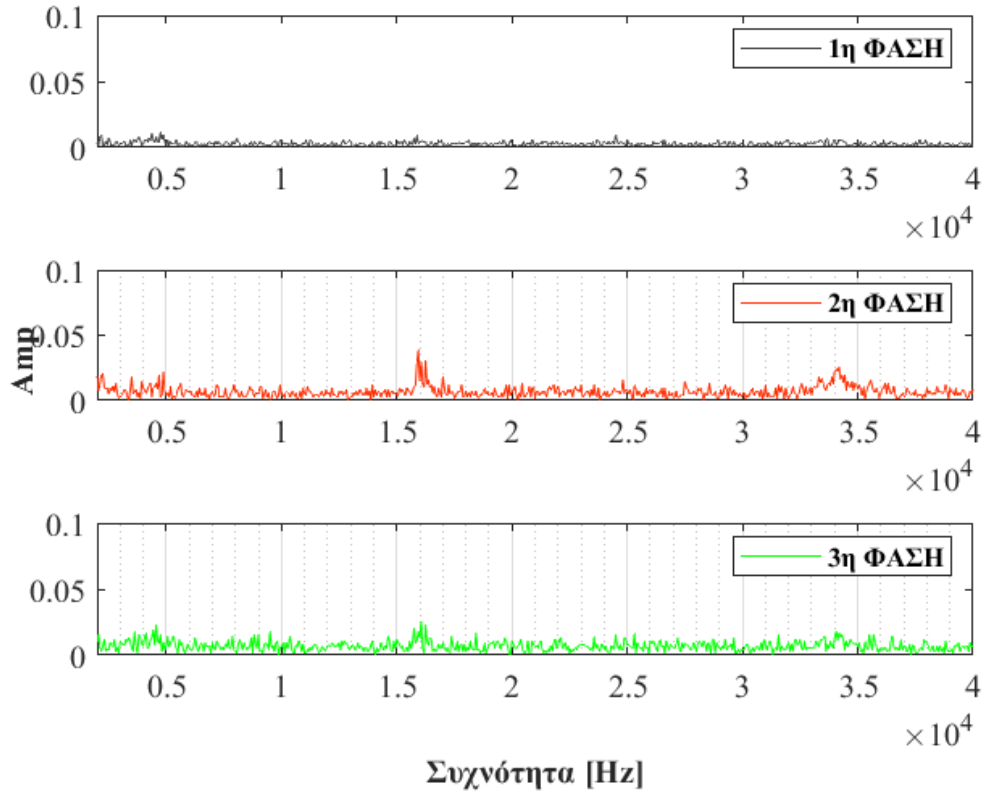


Εικόνα 5.29: FFT 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 17:00						
5	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	985	130	38.7	48.4	50	12.3
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	0.671379	0.009260	0.006582	19.825515		
2 <sup>η</sup> Φάση	0.906382	0.038816	0.026037	32.452899		
3 <sup>η</sup> Φάση	0.867649	0.026034	0.017974	33.444690		

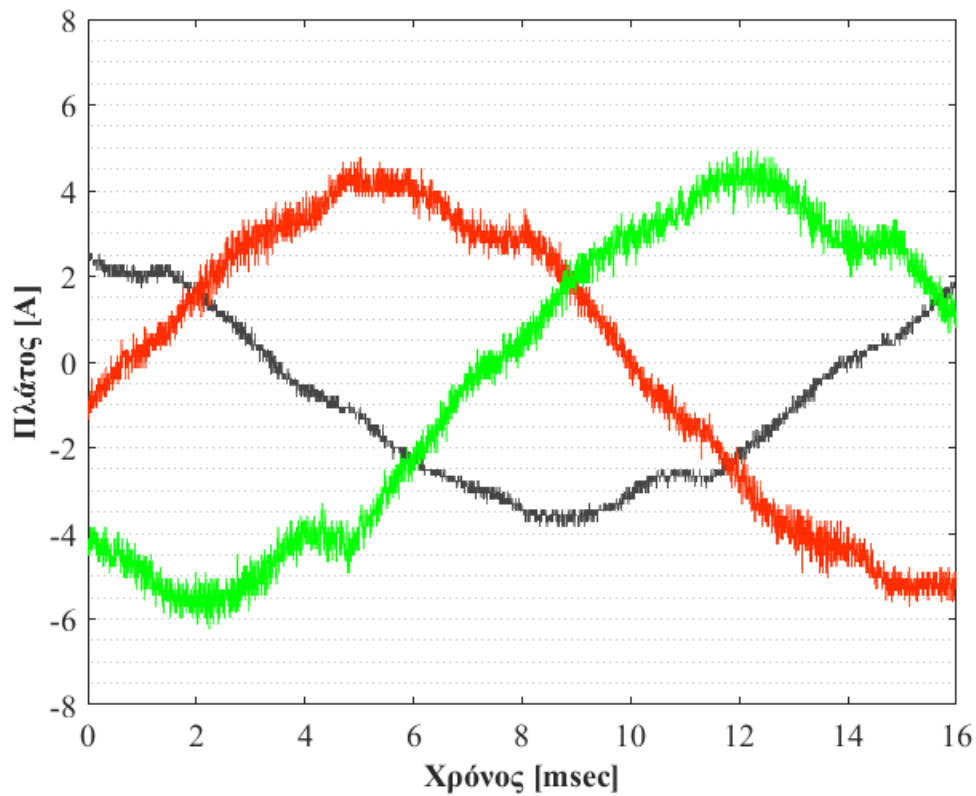


Εικόνα 5.30: Χρονική συνάρτηση 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

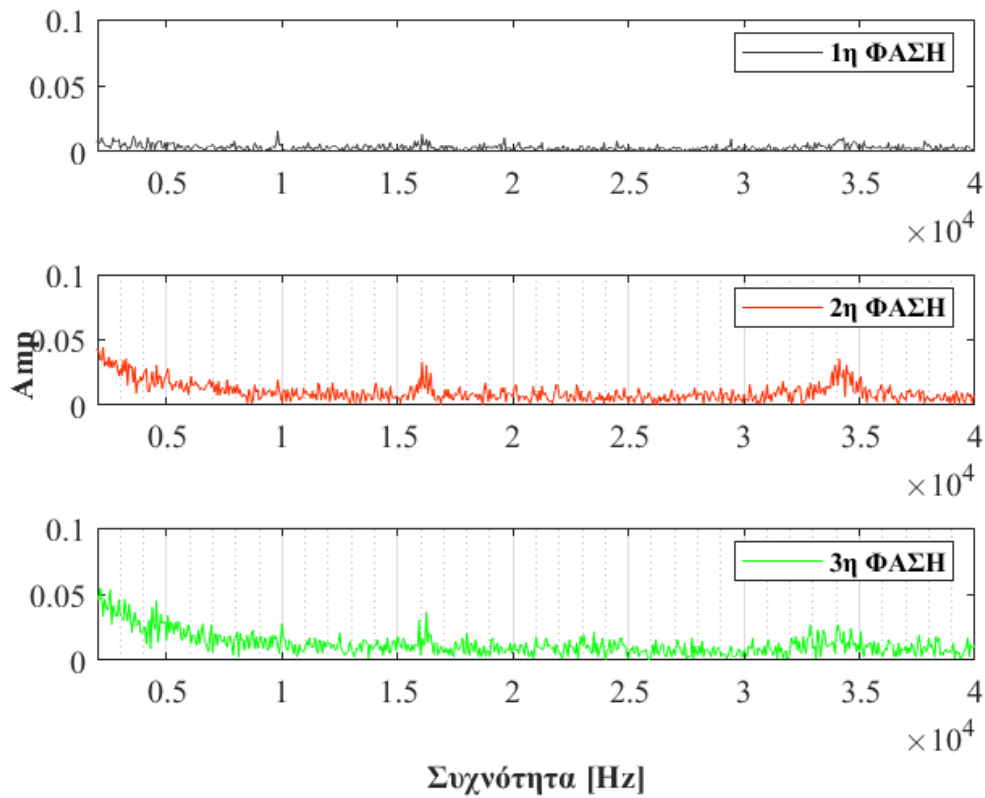


Εικόνα 5.31: FFT 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 17:15						
6	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	3519	603.8	39.2	50.2	50	12.2
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	2.667395	0.013354	0.010301	5.301201		
2 <sup>η</sup> Φάση	4.318599	0.032676	0.035602	8.927695		
3 <sup>η</sup> Φάση	4.773770	0.035922	0.027148	9.484065		



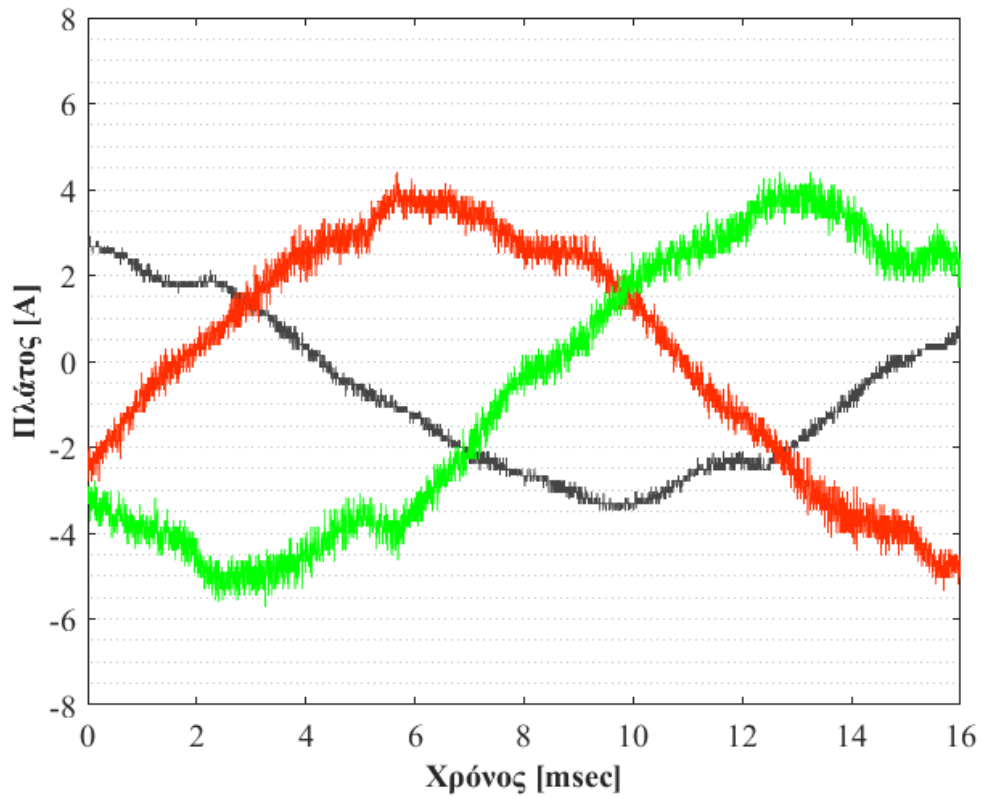
Εικόνα 5.32: Χρονική συνάρτηση 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



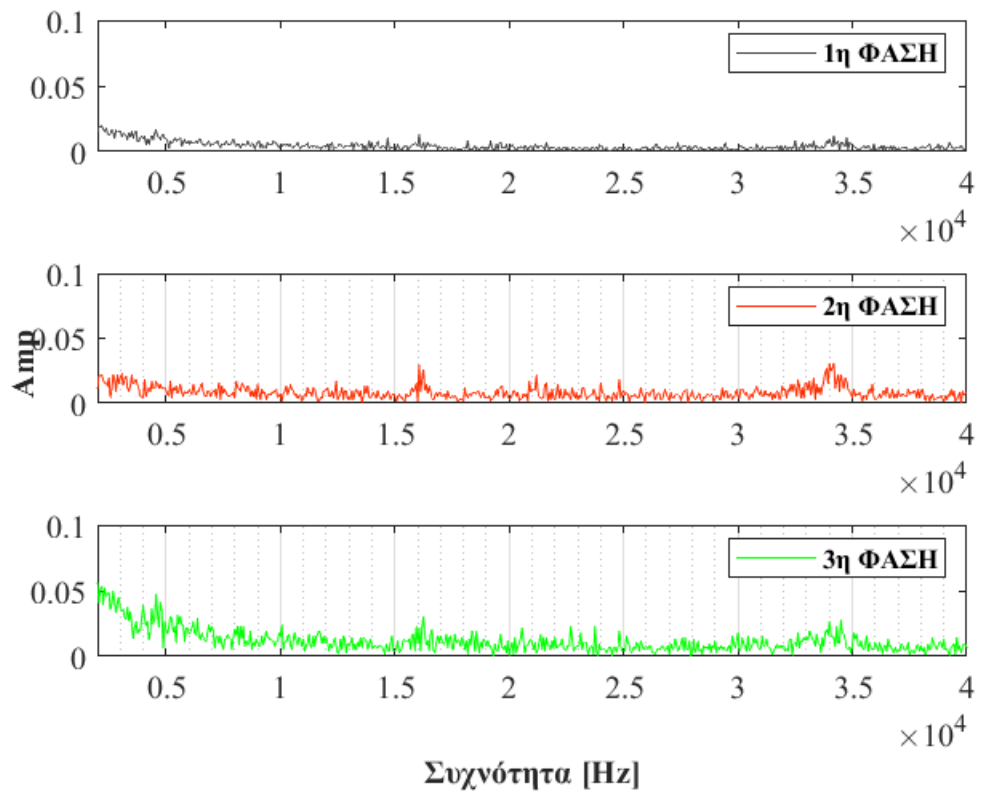
Εικόνα 5.33: FFT 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 17:30						
7	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	3134	559.5	40.2	51	50	12.2
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	2.519714	0.012837	0.012588	6.869758		
2 <sup>η</sup> Φάση	3.640919	0.029294	0.031216	9.162978		
3 <sup>η</sup> Φάση	4.313765	0.030523	0.027467	10.601028		



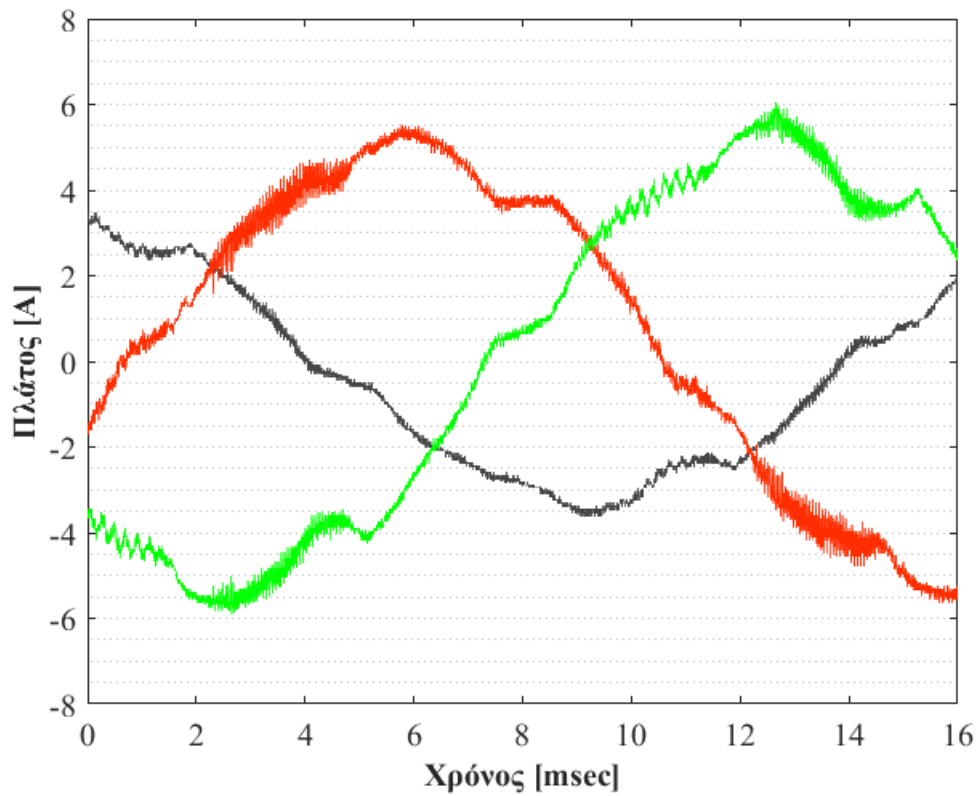


Εικόνα 5.34: Χρονική συνάρτηση 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

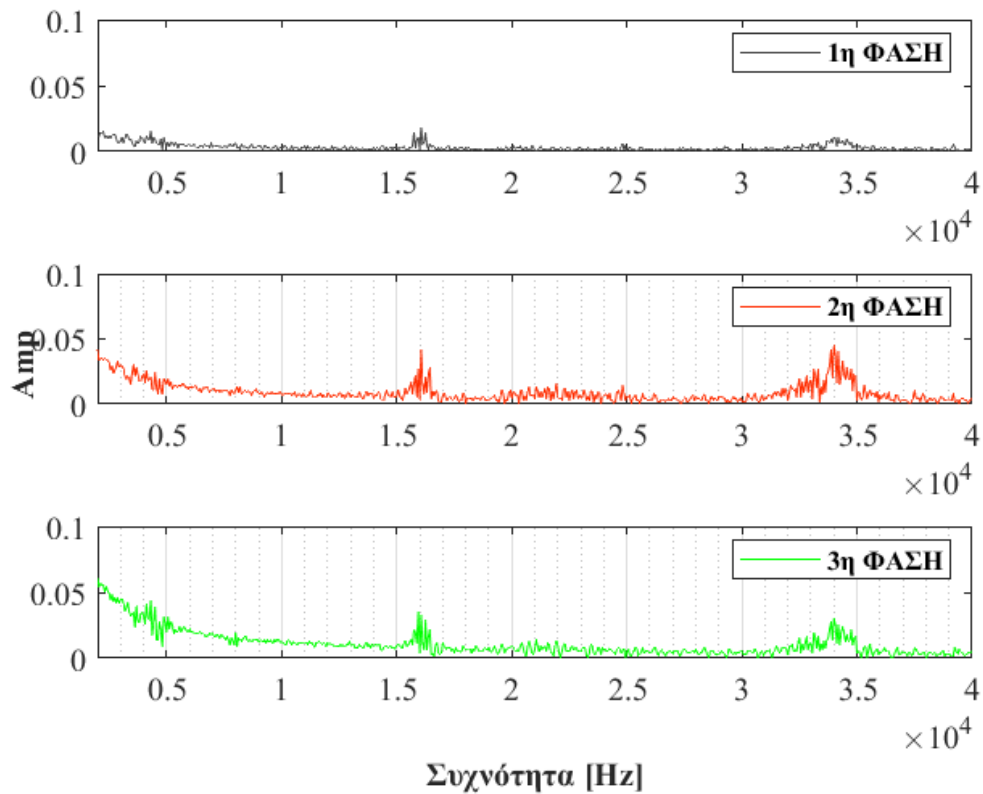


Εικόνα 5.35: FFT 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 17:45						
8	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	2855	505.5	37.6	49.5	50	12.6
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	2.853633	0.018606	0.011165	4.238744		
2 <sup>η</sup> Φάση	4.660068	0.042416	0.045081	6.754858		
3 <sup>η</sup> Φάση	5.333073	0.035509	0.030436	7.300866		

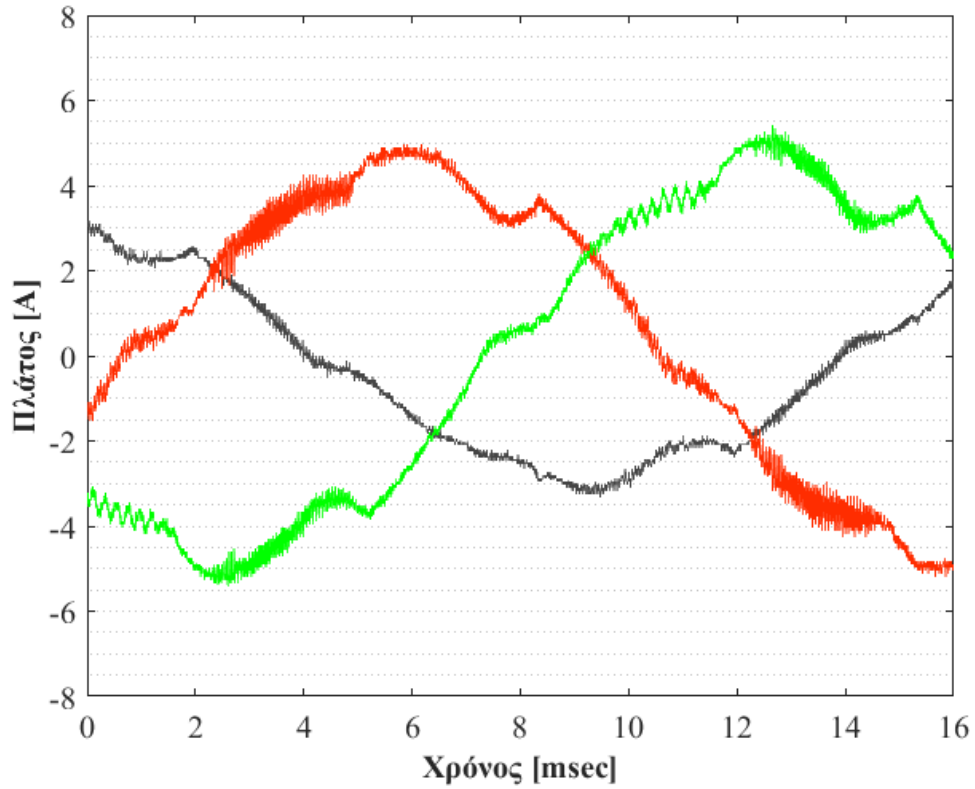


Εικόνα 5.36: Χρονική συνάρτηση 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

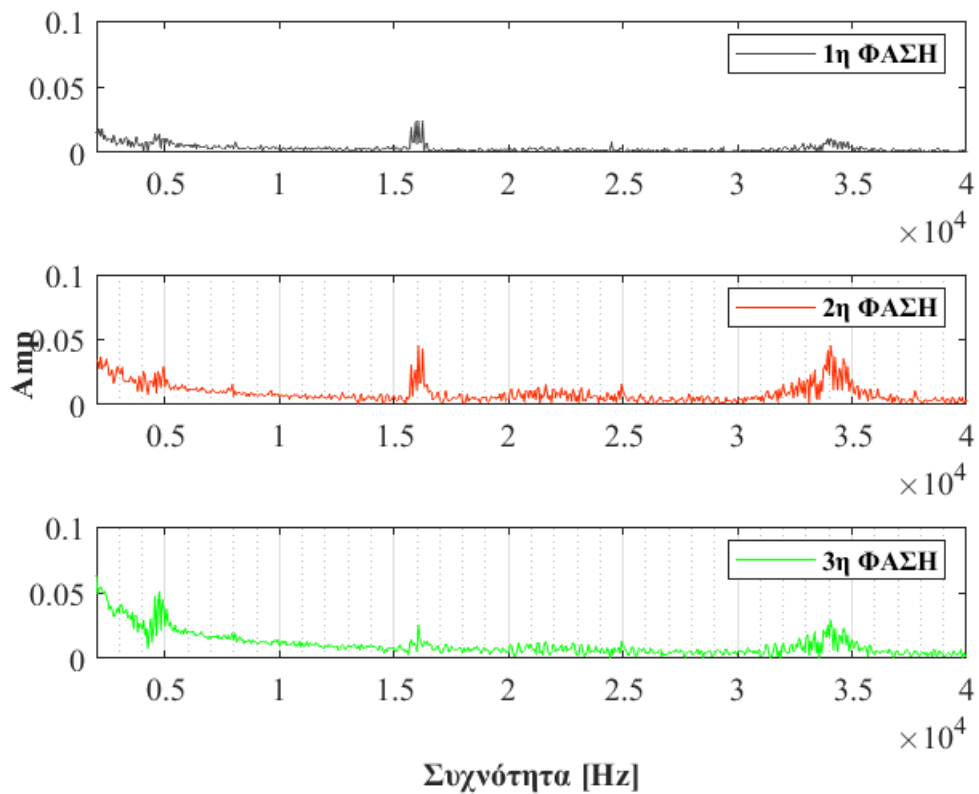


Εικόνα 5.37: FFT 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

9	17/08/22, 18:00					
	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	2569	448	39.2	47.8	50	14.2
	I <sub>ηmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	2.557806	0.023880	0.010738	4.932520		
2 <sup>η</sup> Φάση	4.181026	0.046221	0.045398	7.362393		
3 <sup>η</sup> Φάση	4.788273	0.025239	0.029138	7.738820		

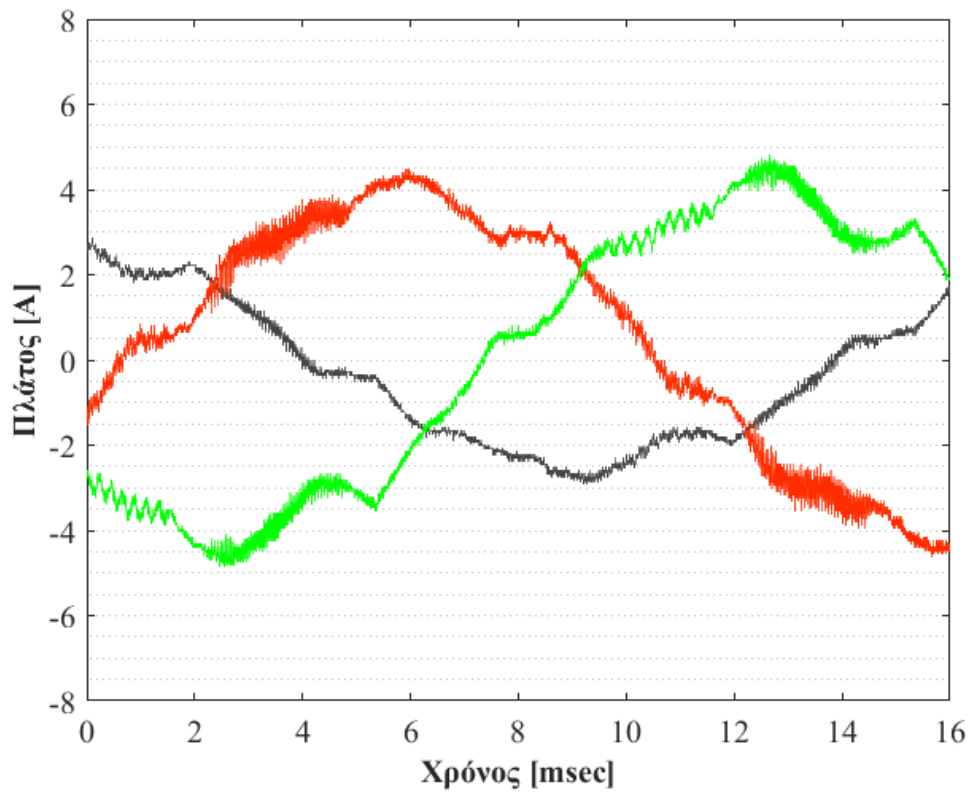


Εικόνα 5.38: Χρονική συνάρτηση 9<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

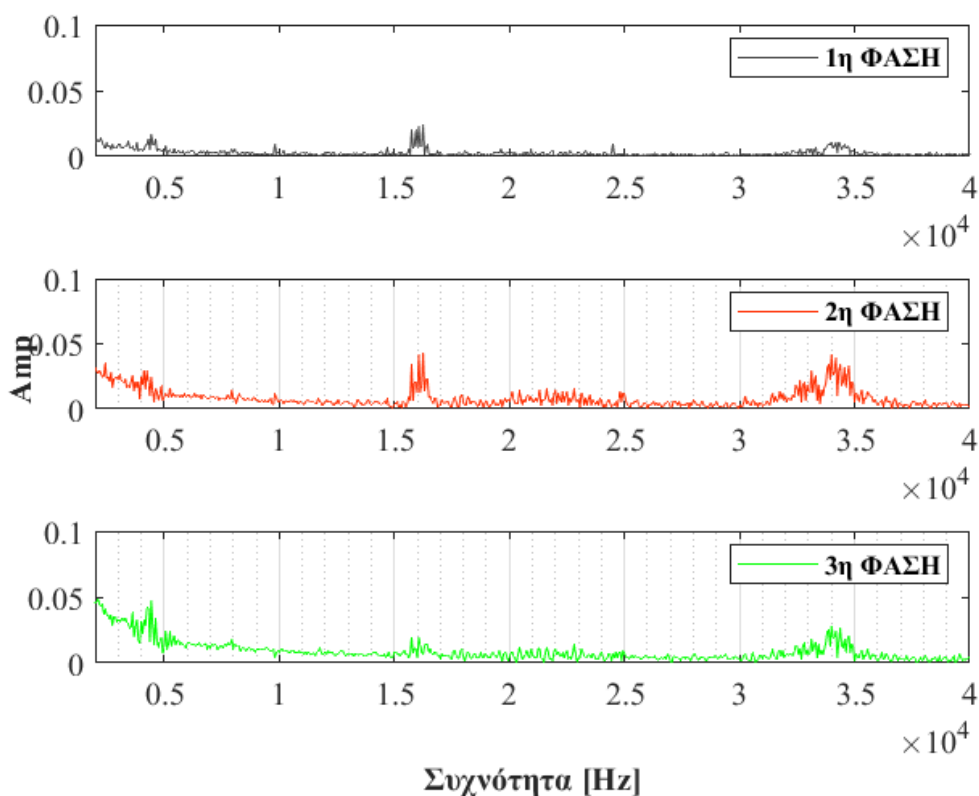


Εικόνα 5.39: FFT 9<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

17/08/22, 18:15						
10	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	2245	398.2	37.4	45.7	48.7	11.1
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	2.233459	0.023667	0.011236	5.185643		
2 <sup>η</sup> Φάση	3.692617	0.043162	0.042258	7.962380		
3 <sup>η</sup> Φάση	4.190446	0.019256	0.028315	7.655564		



Εικόνα 5.40: Χρονική συνάρτηση 10<sup>η</sup>ς μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα.

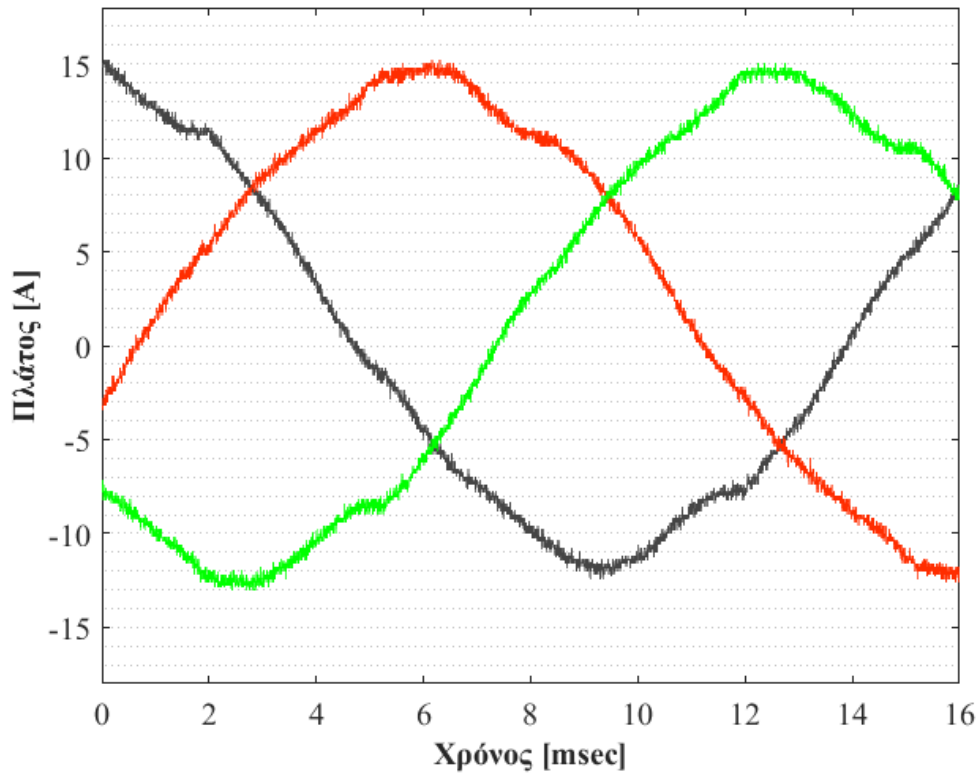


Εικόνα 5.41: FFT  $10^{15}$  μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

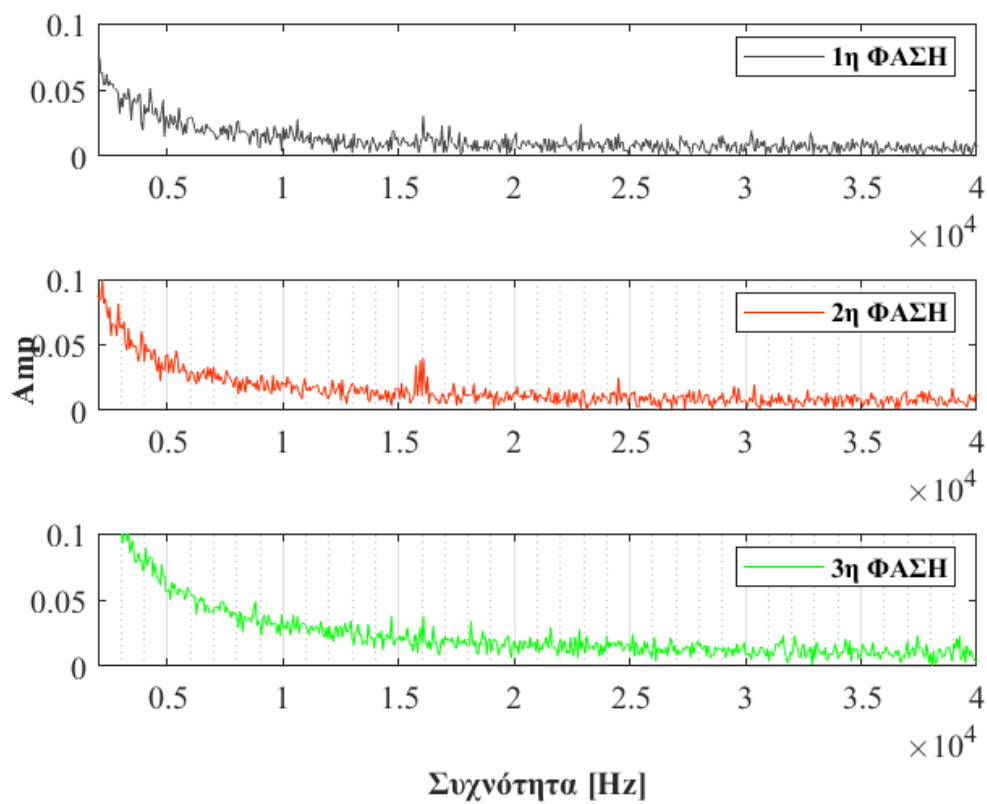
### 5.3.3 Σετ Μετρήσεων [Γ]

Ημερομηνία : 04/09/2022  
 Διάρκεια : 12:30 – 14:00  
 Καιρικές Συνθήκες : Ηλιοφάνεια με αραιή συννεφιά

04/09/22, 12:30						
1	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γ</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6328	851.4	42	55.4	46	16.5
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	11.402746	0.029874	0.018596	4.276175		
2 <sup>η</sup> Φάση	11.773944	0.039896	0.019367	5.050355		
3 <sup>η</sup> Φάση	13.527884	0.038009	0.022622	6.987129		

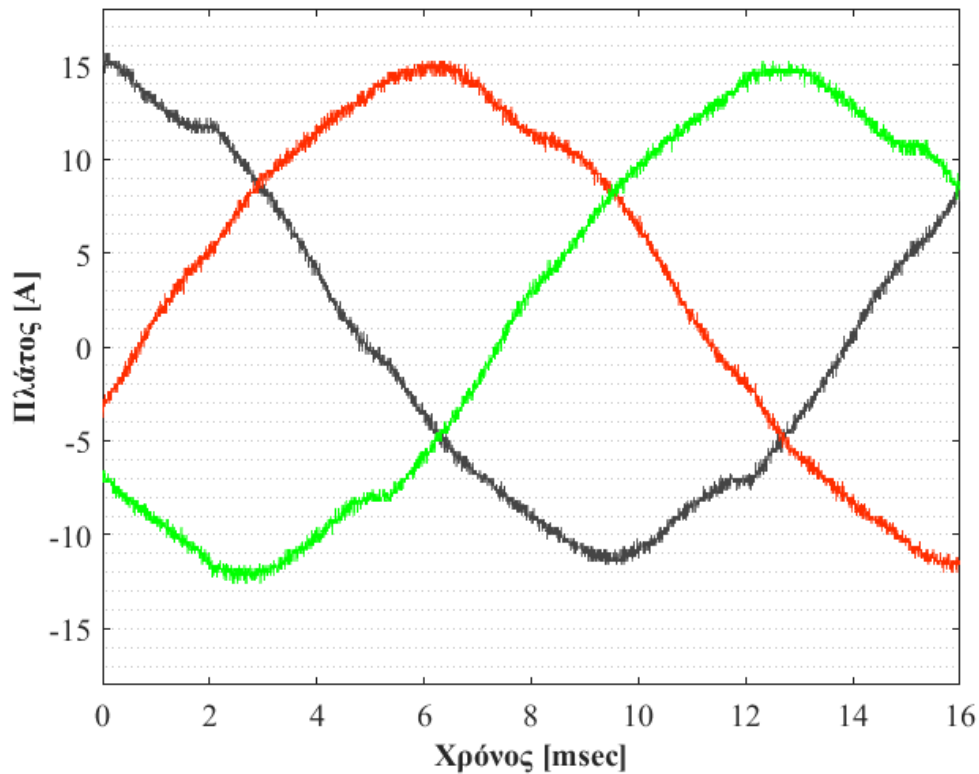


Εικόνα 5.42: Χρονική συνάρτηση 1<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



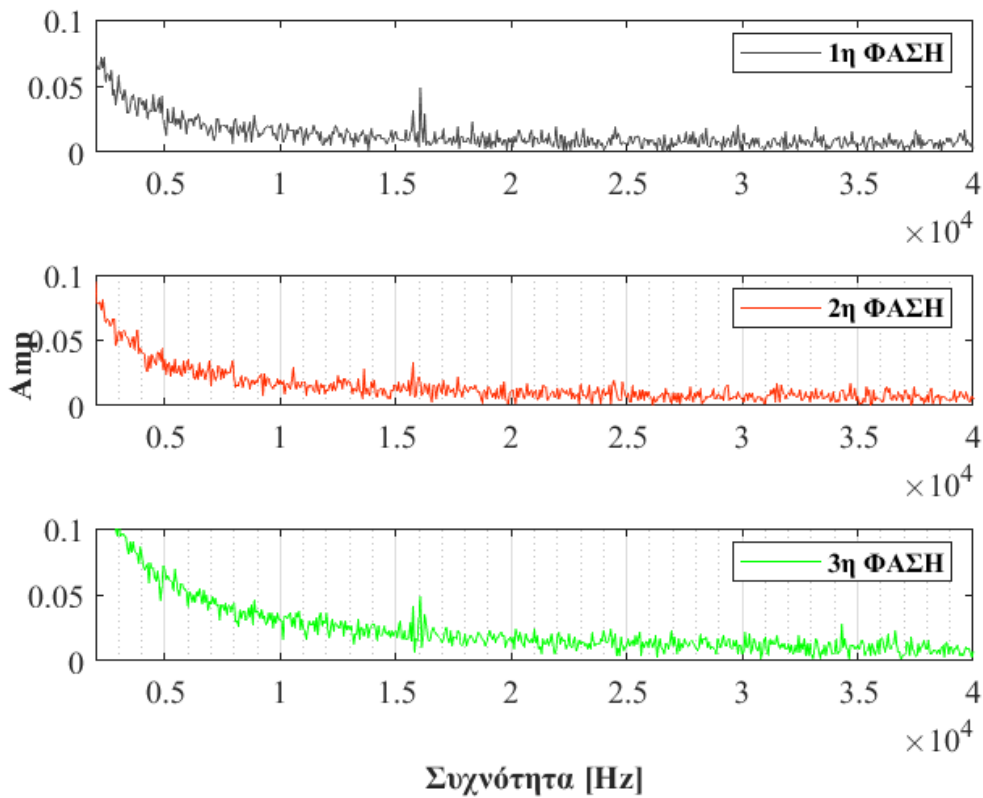
Εικόνα 5.43: FFT 1<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 12:45						
2	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6223	696	44.2	57.7	46	16.6
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	11.291833	0.049175	0.018814	4.429077		
2 <sup>η</sup> Φάση	11.551499	0.032377	0.017483	4.888330		
3 <sup>η</sup> Φάση	13.338751	0.048744	0.027354	6.905346		



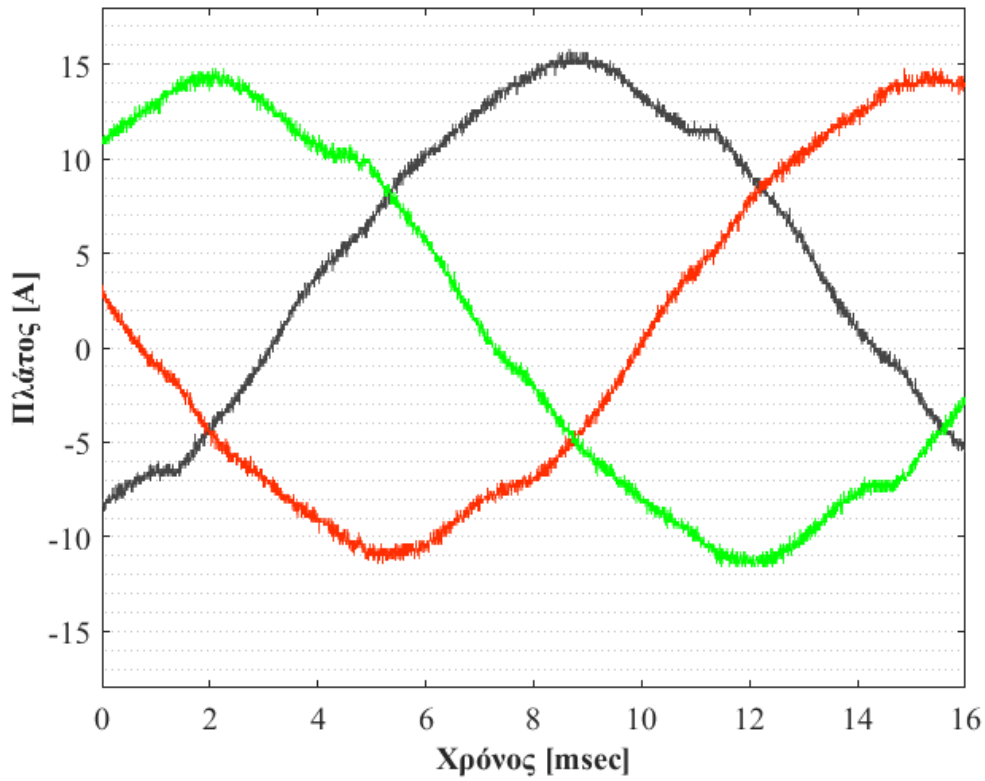
Εικόνα 5.44: Χρονική συνάρτηση 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



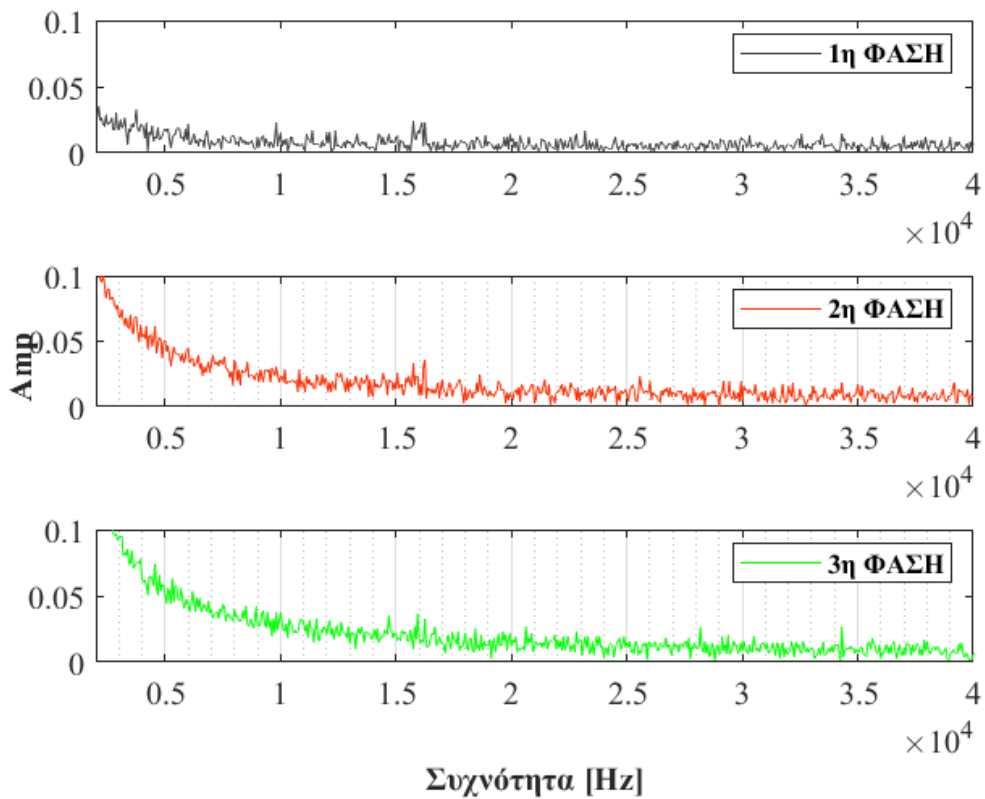


Εικόνα 5.45: FFT 2<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 13:00						
3	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6315	825	42.8	59.1	50	14.2
	I <sub>ηmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	10.323326	0.023457	0.014670	3.201514		
2 <sup>η</sup> Φάση	11.482291	0.035901	0.019108	6.090594		
3 <sup>η</sup> Φάση	12.450036	0.036500	0.025965	6.765311		

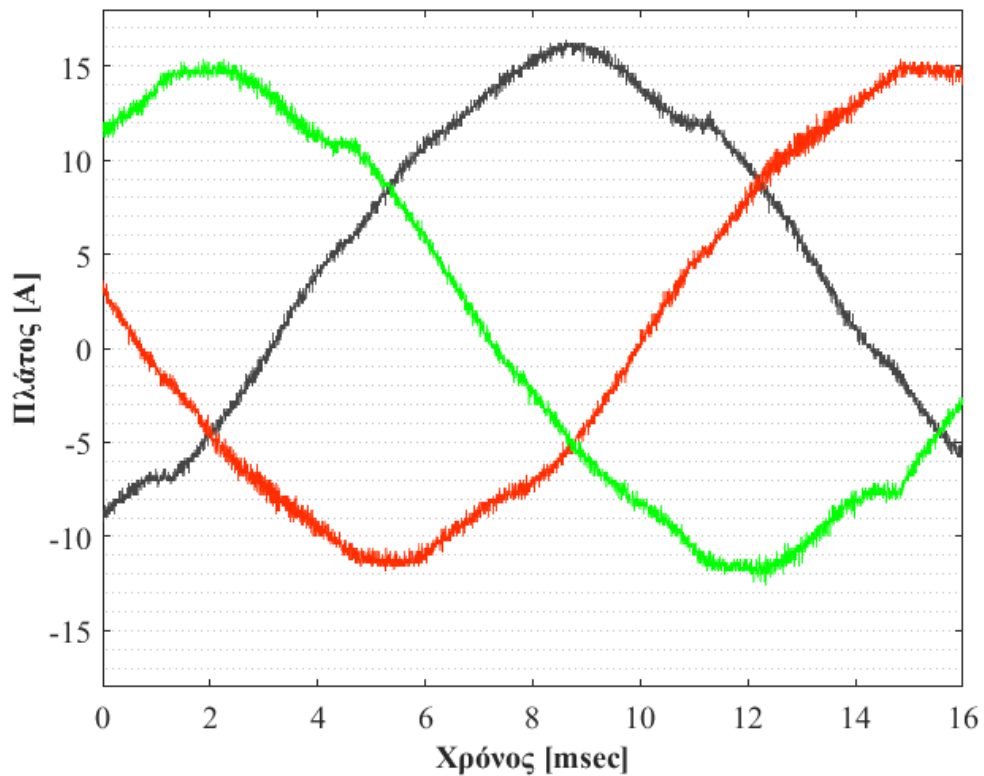


Εικόνα 5.46: Χρονική συνάρτηση 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

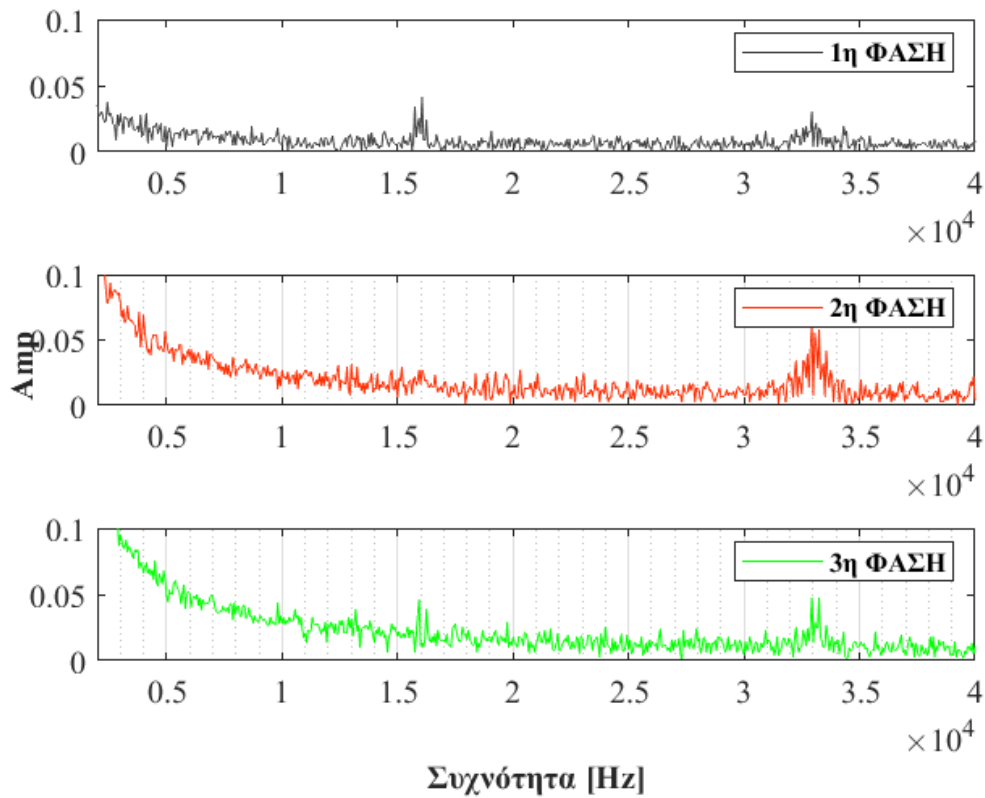


Εικόνα 5.47: FFT 3<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 13:15						
4	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6417	892.7	43.9	63.8	50	9.5
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	10.811477	0.041648	0.030316	3.285828		
2 <sup>η</sup> Φάση	12.042484	0.031435	0.060567	6.216538		
3 <sup>η</sup> Φάση	13.070948	0.046013	0.047671	6.828207		

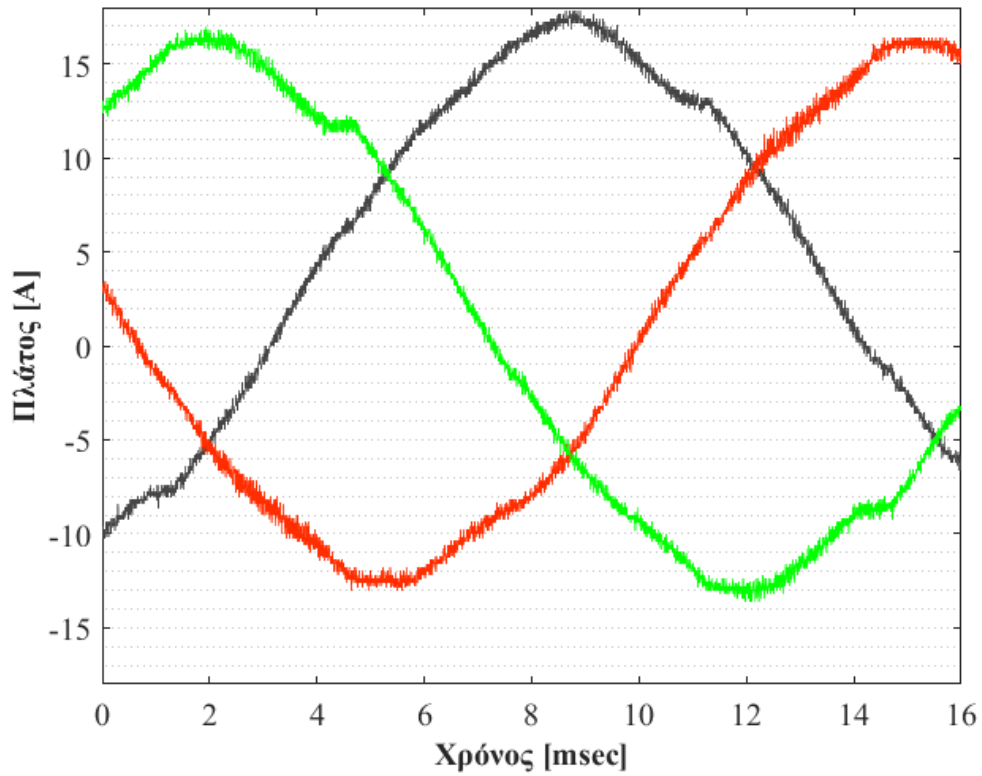


Εικόνα 5.48: Χρονική συνάρτηση 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

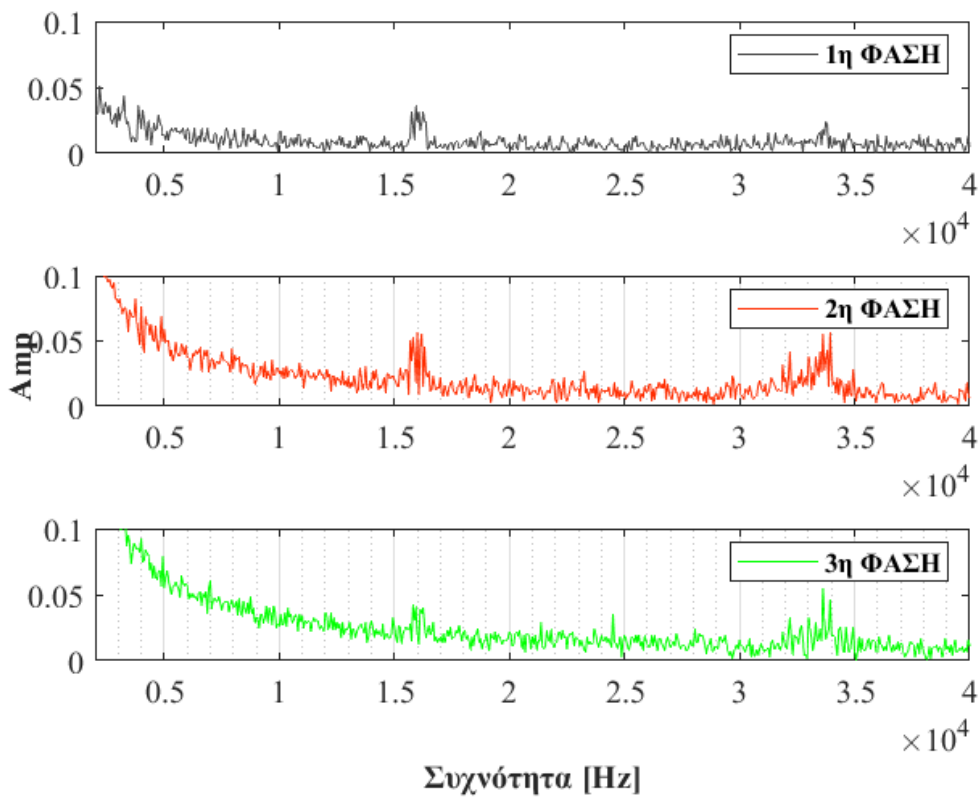


Εικόνα 5.49: FFT 4<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 13:30						
5	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρα</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6968	927	44.4	59.7	50	12.8
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	11.896430	0.035967	0.024083	3.195561		
2 <sup>η</sup> Φάση	13.275607	0.057088	0.056017	6.076325		
3 <sup>η</sup> Φάση	14.419589	0.041997	0.055075	6.772369		

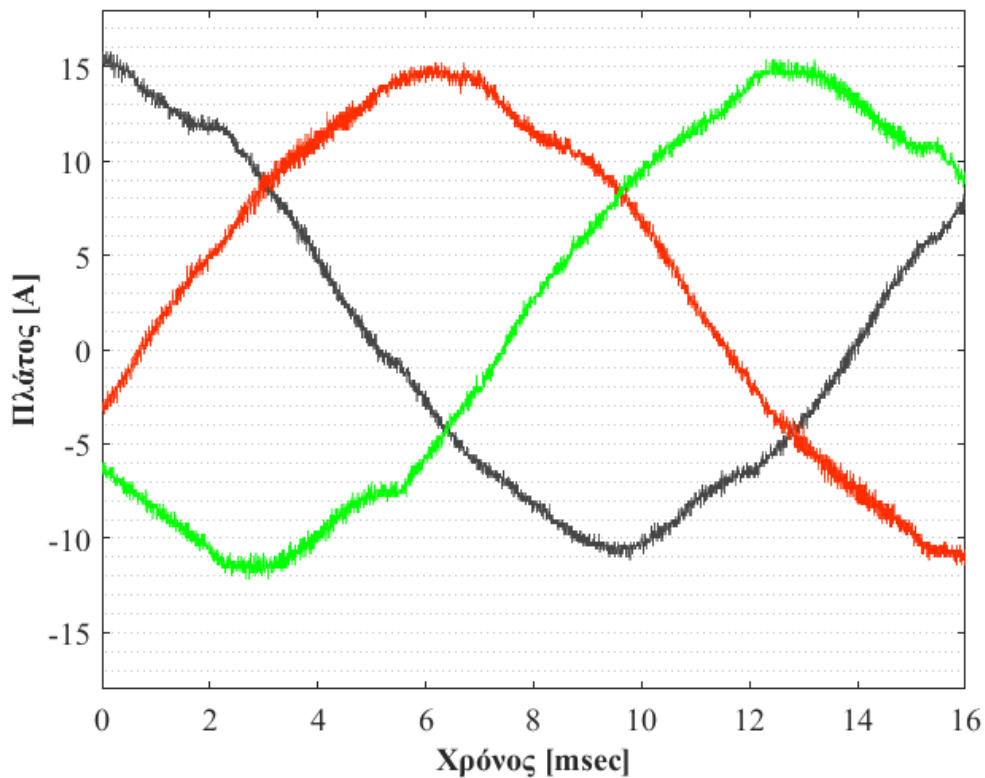


Εικόνα 5.50: Χρονική συνάρτηση 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

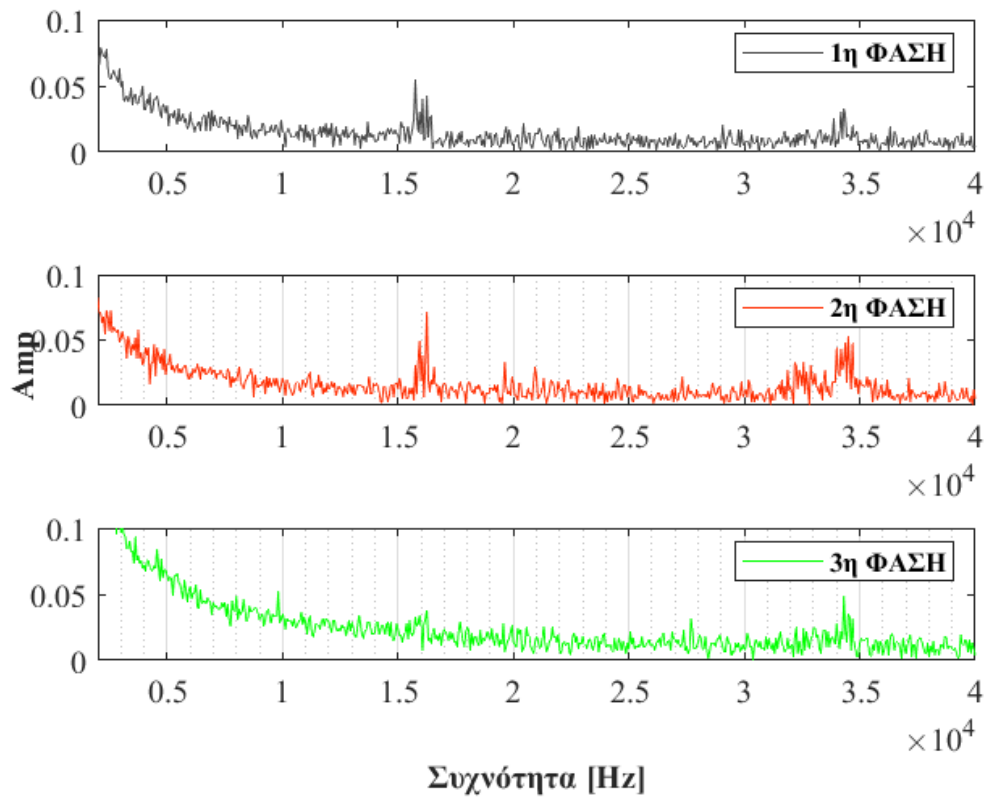


Εικόνα 5.51: FFT 5<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 13:45						
6	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5895	670	43.5	54.8	45.7	17.2
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	11.095954	0.054314	0.033107	4.849528		
2 <sup>η</sup> Φάση	11.193724	0.071619	0.052267	5.301540		
3 <sup>η</sup> Φάση	13.102462	0.037923	0.048057	7.157972		

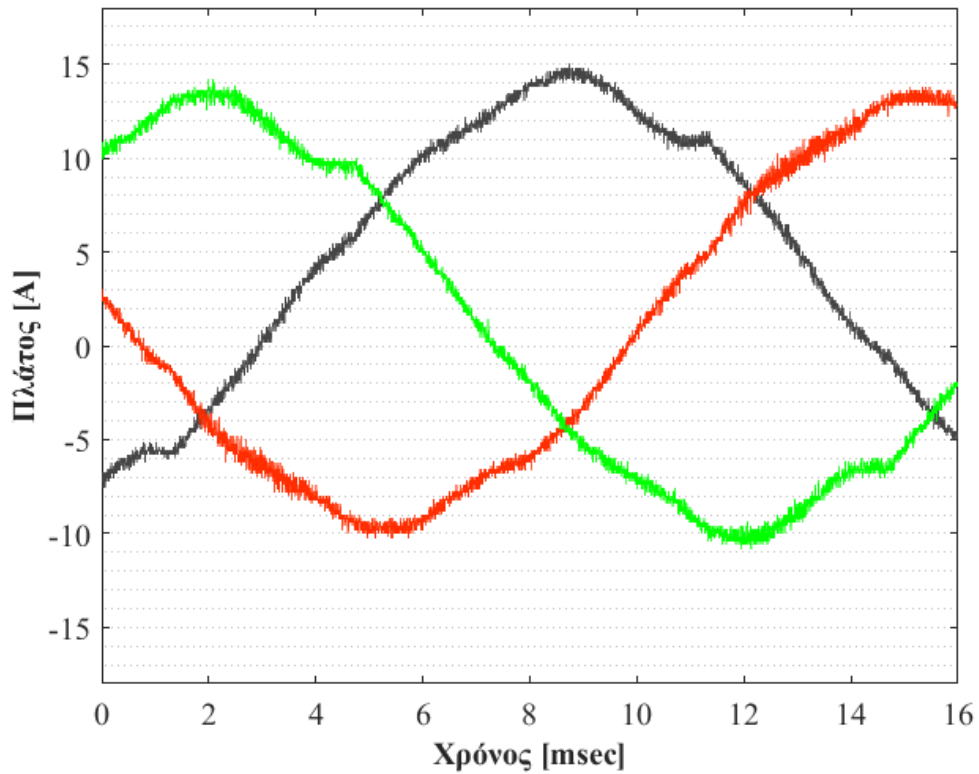


Εικόνα 5.52: Χρονική συνάρτηση 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

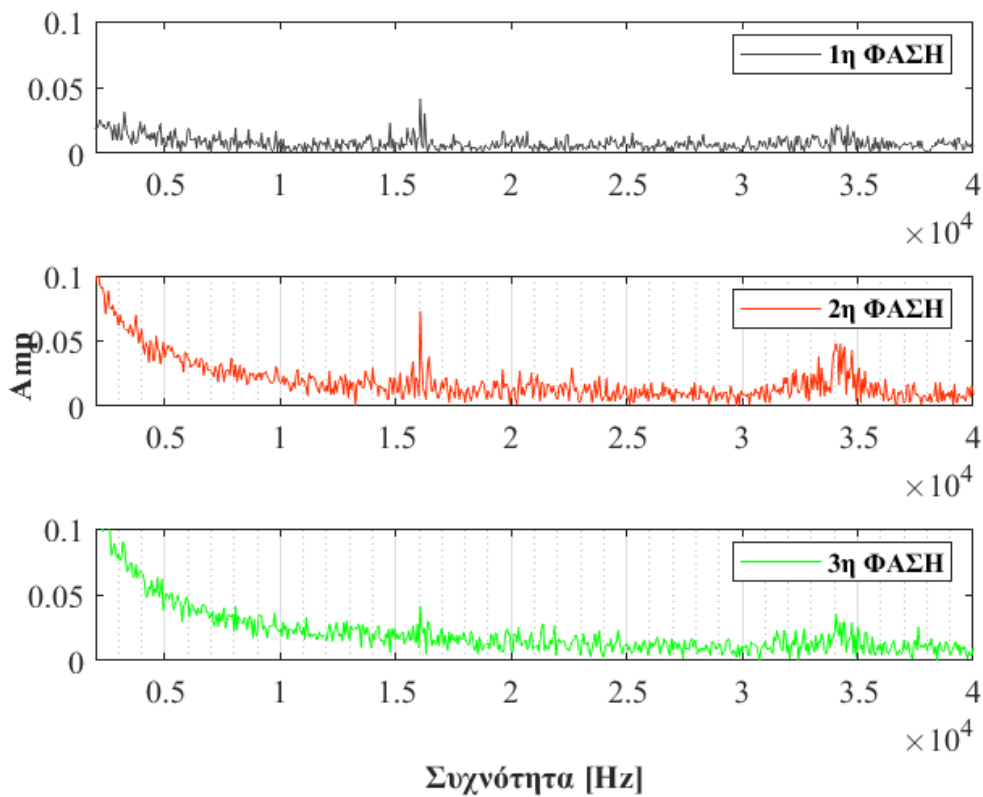


Εικόνα 5.53: FFT 6<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

04/09/22, 14:00						
7	P <sub>o</sub> (W)	P <sub>γρ</sub> (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>κ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	5571	650	44.1	59.7	50	9.5
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	9.465667	0.041550	0.021253	3.531682		
2 <sup>η</sup> Φάση	10.580435	0.072771	0.048547	6.605241		
3 <sup>η</sup> Φάση	11.439460	0.041759	0.035424	6.836869		



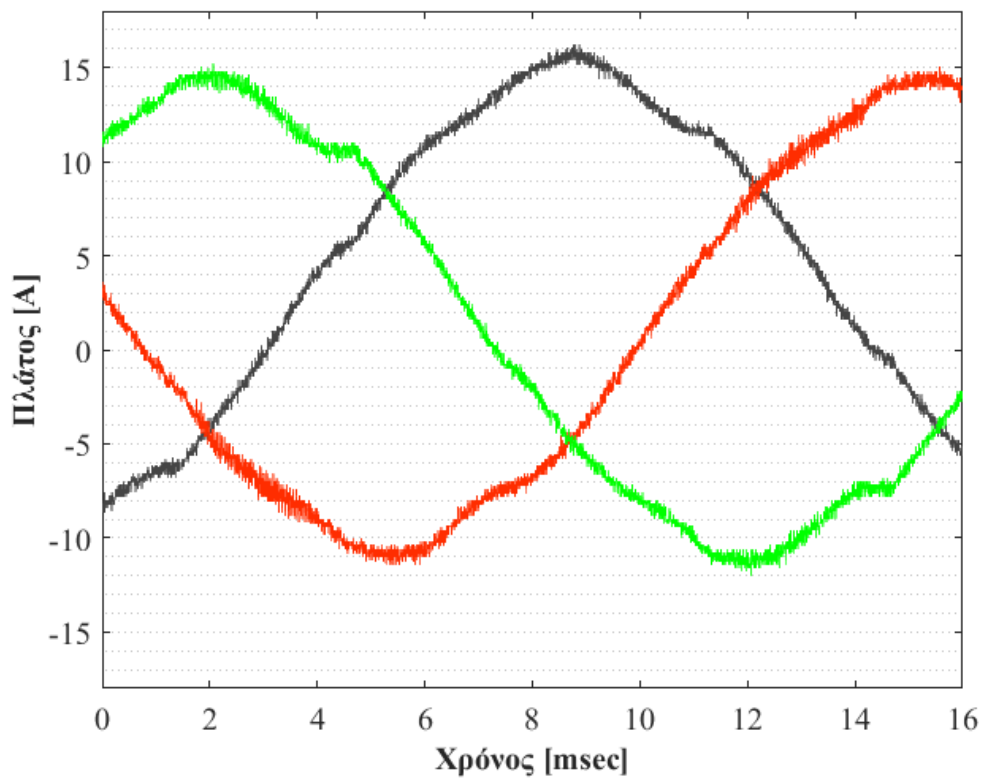
Εικόνα 5.54: Χρονική συνάρτηση 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



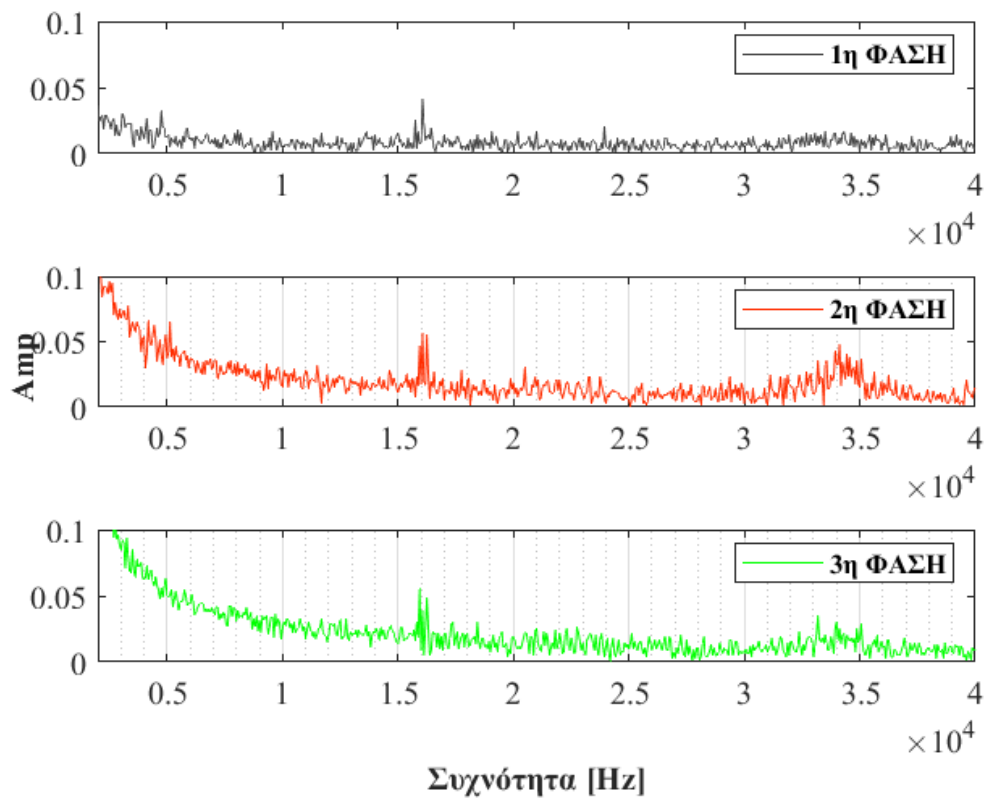
Εικόνα 5.55: FFT 7<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα



04/09/22, 14:15						
8	P <sub>o</sub> (W)	Pyra (W/m <sup>2</sup> )	Θ <sub>K</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΛ</sub> (°C)	Θ <sub>ΠΕΡ</sub> (°C)	Hum (%)
	6208	811.3	44	60.1	50	17
	I <sub>nmax</sub> (A)				THD %	
	50 Hz	16 kHz	32 kHz			
1 <sup>η</sup> Φάση	10.423281	0.041310	0.016863	3.331074		
2 <sup>η</sup> Φάση	11.600815	0.056186	0.047637	6.320738		
3 <sup>η</sup> Φάση	12.594976	0.055418	0.034645	6.723514		



Εικόνα 5.56: Χρονική συνάρτηση 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

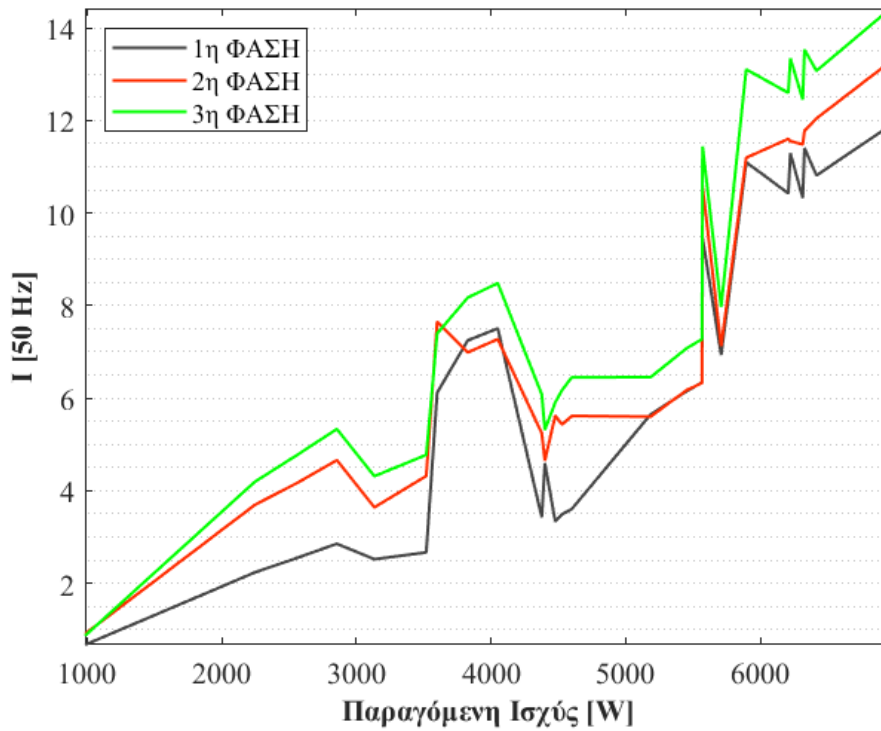


Εικόνα 5.57: FFT 8<sup>ης</sup> μέτρησης για συχνότητα δειγματοληψίας 250 kSa/sec και 4000 δείγματα

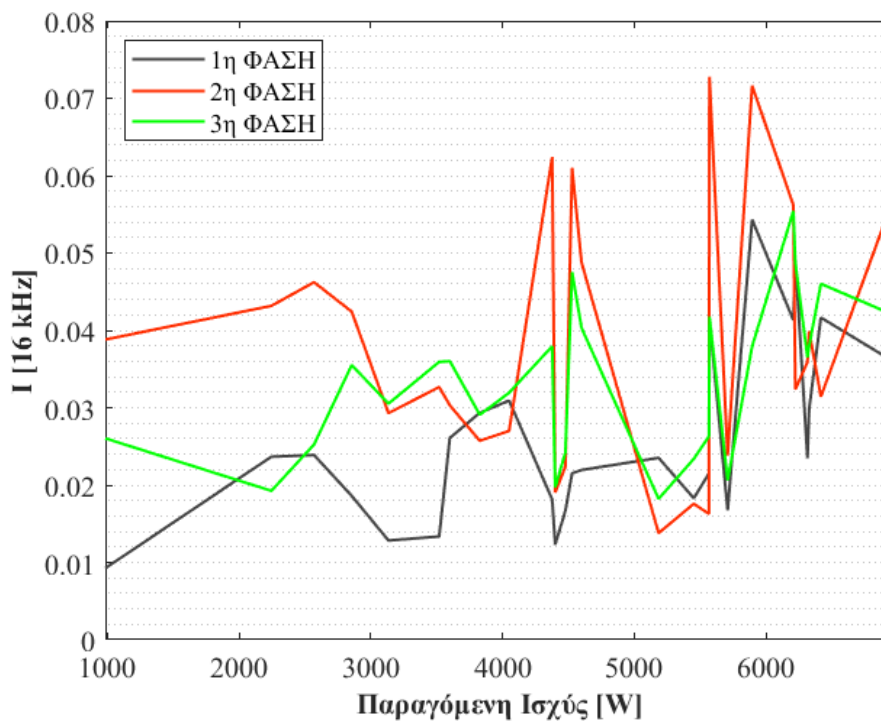
### 5.3.4 Υπεραρμονικές Συναρτήσεις Παραμέτρων

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων γίνεται απεικόνιση των βασικών μεγεθών σε συνάρτηση με την παραγόμενη ισχύ και την ηλιακή ακτινοβολία.

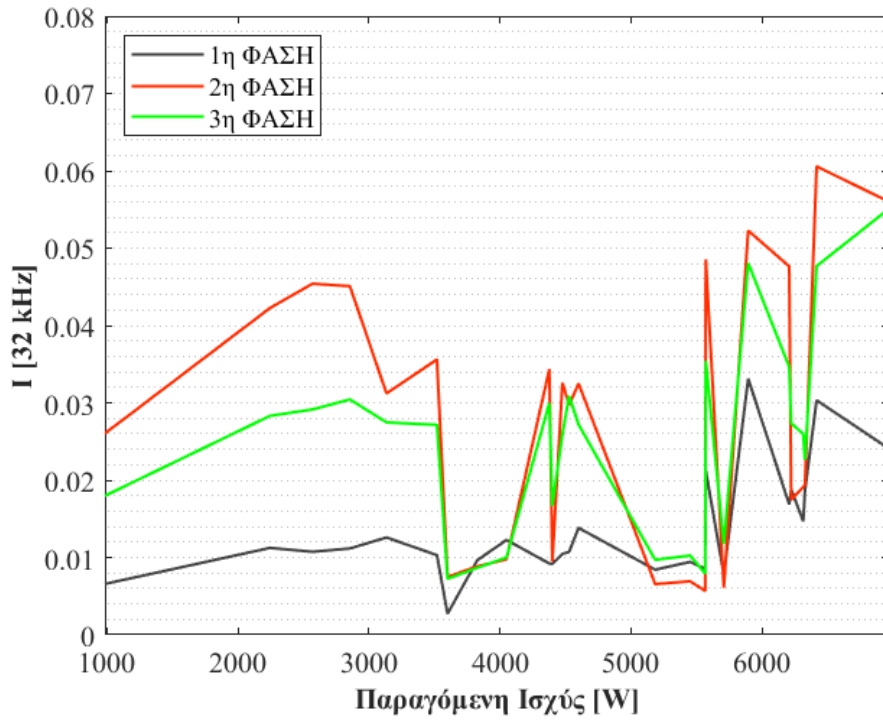
### 5.3.4.1 Παραγόμενη Ισχύς



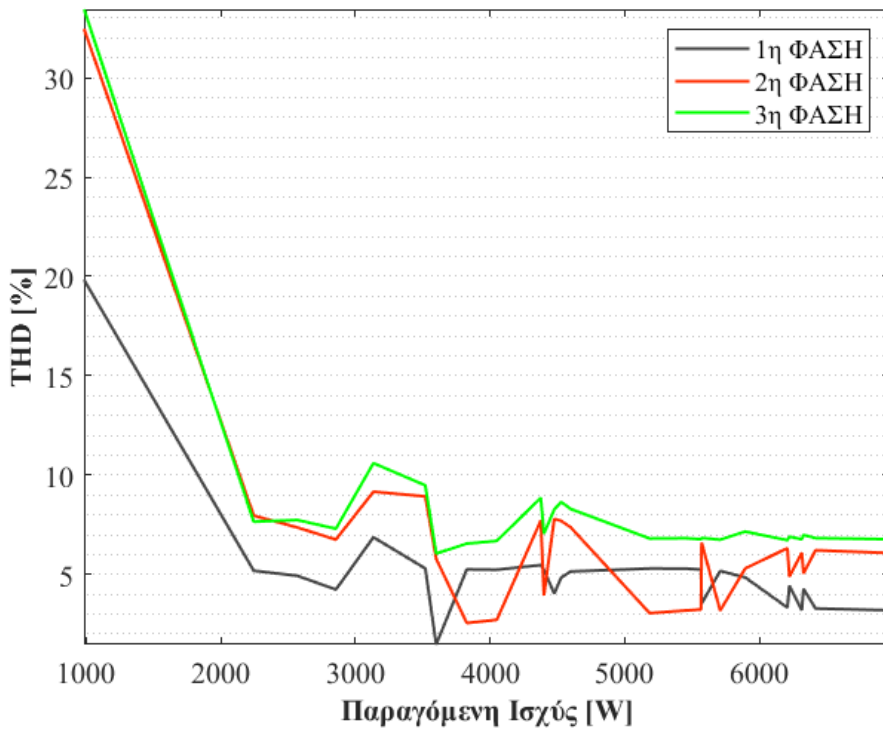
Εικόνα 5.58: Συναρτήσεις των θεμελιωδών συνιστωσών ρεύματος – παραγόμενης ισχύος



Εικόνα 5.59: Συναρτήσεις των μεγαλύτερων συνιστωσών ρεύματος κοντά στα 16 kHz – παραγόμενης ισχύος



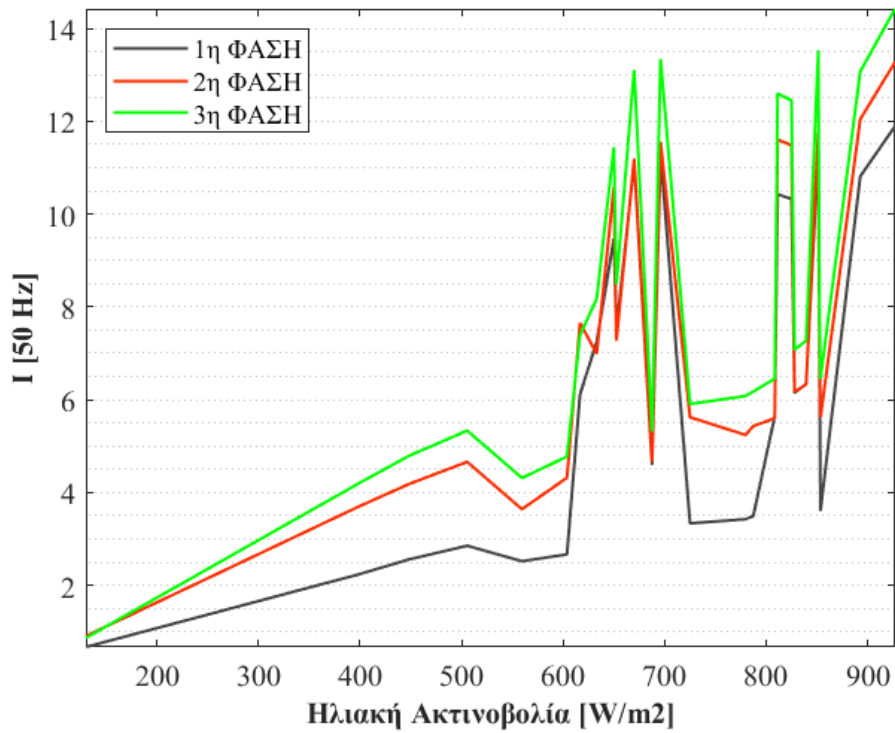
Εικόνα 5.60: Συναρτήσεις των μεγαλύτερων συνιστωσών ρεύματος κοντά στα 32 kHz – παραγόμενης ισχύος



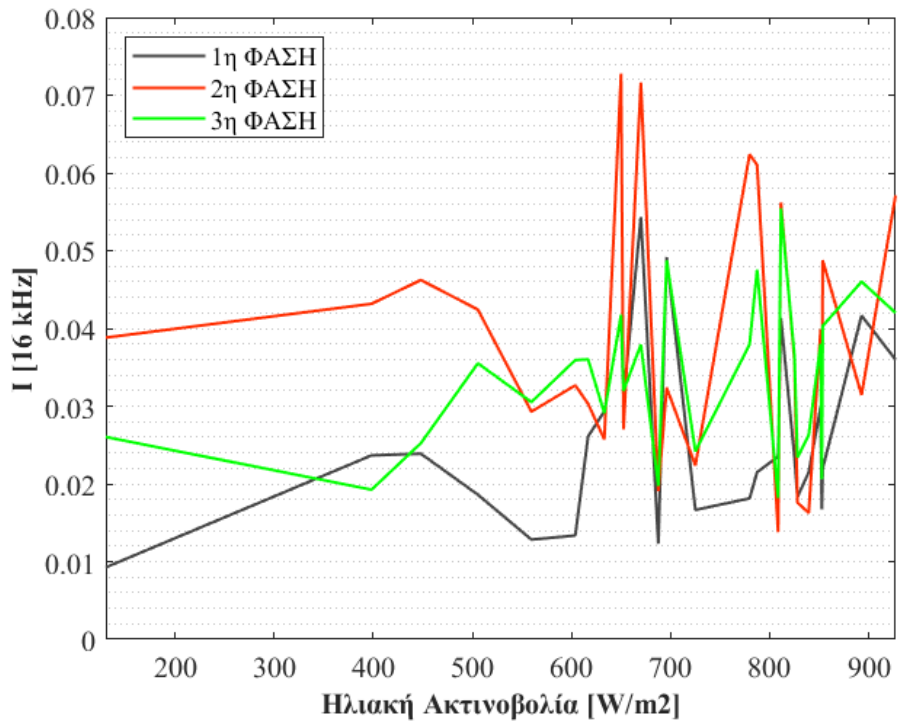
Εικόνα 5.61: Συναρτήσεις των δεικτών THD% κάθε φάσης – παραγόμενης ισχύος

5.3.4.2

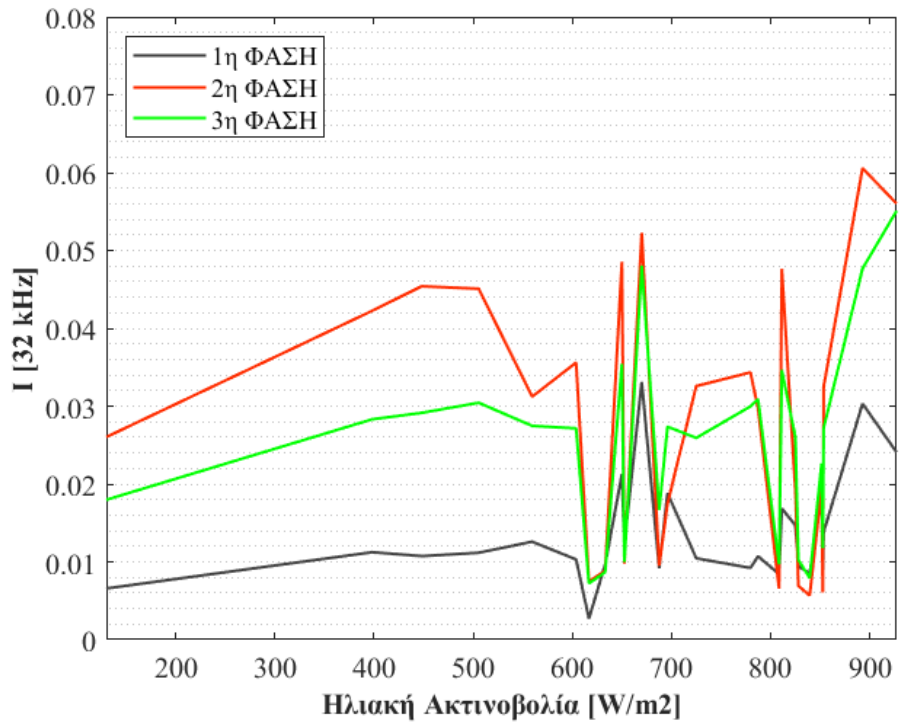
Ηλιακή Ακτινοβολία



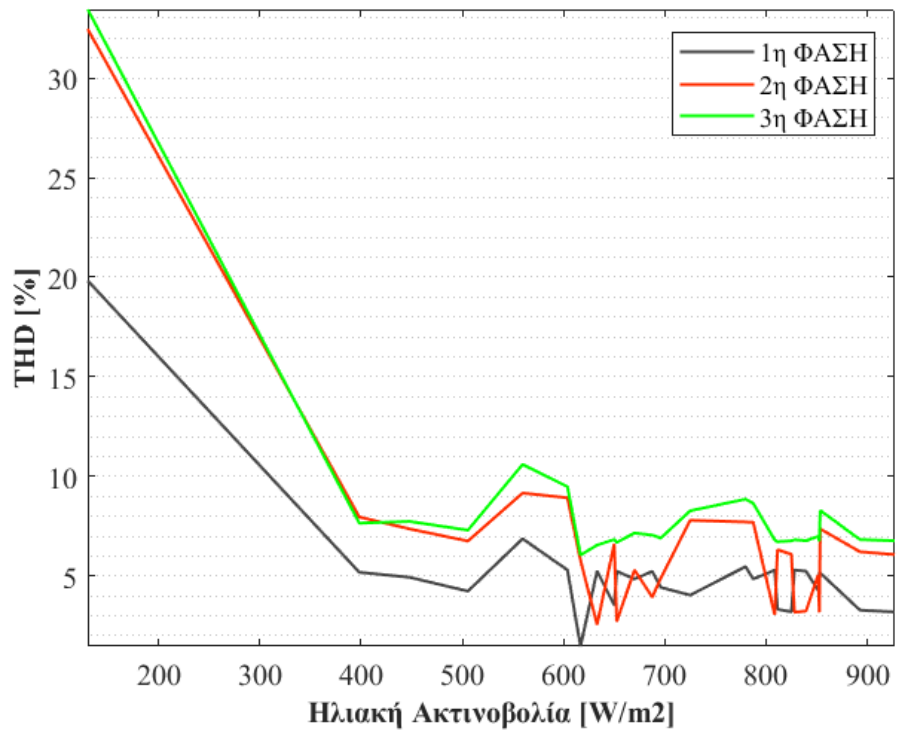
Εικόνα 5.62: Συναρτήσεις των θεμελιωδών συνιστωσών ρεύματος – ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 5.63: Συναρτήσεις των μεγαλύτερων συνιστωσών ρεύματος κοντά στα 16 kHz – ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 5.64: Συναρτήσεις των μεγαλύτερων συνιστωσών ρεύματος κοντά στα 32 kHz – ηλιακής ακτινοβολίας



Εικόνα 5.65: Συναρτήσεις των δεικτών THD% κάθε φάσης – ηλιακής ακτινοβολίας

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- I. Ο THD<sub>i%</sub> στο εύρος 0-2.5 kHz όπως μετρήθηκε και υπολογίστηκε υπερβαίνει το όριο του κατασκευαστή καθώς και το όριο του κανονισμού IEEE 519-2022.

	THD <sub>i%</sub>
Sunny tripower 10 kW	< 3.0
IEEE 519 2022	5.0
Μέτρηση	5.6

Το μέγεθος του αυξημένου δείκτη οφείλεται κυρίως στην 5<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> αρμονική οι οποίες φτάνουν σε μέγεθος το 4.6% και 2.6% της θεμελιώδους αρμονικής αντίστοιχα.

Για το παραπάνω αποτέλεσμα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραγωγή τη στιγμή της μέτρησης ήταν στο 50% της ονομαστικής του αντιστροφέα, ενώ δεν υπάρχουν πληροφορίες για την παραμόρφωση στην τάση.

- II. Στην φασματική ανάλυση των 2.5 kHz καταγράφεται το στοιχείο 0<sup>ης</sup> τάξης με τιμή ρεύματος 0.59 A, δηλαδή 5.4% του θεμελιώδους. Το ρεύμα αυτό αποτελεί την DC συνιστώσα που ρέει στον αγωγό.
- III. Οι κυριότερες υπεραρμονικές συνιστώσες που εντοπίζονται στο εύρος 2-125 kHz κυμαίνονται σε μέγεθος από 0.2 έως και 0.7% της θεμελιώδους συνιστώσας.
- IV. Σε όλες τις μετρήσεις παρατηρείται συγκέντρωση σημαντικών συνιστωσών πρωτίστως στην περιοχή των 16 kHz και έπειτα στην περιοχή των 32 kHz. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τη θεωρία με βάση την οποία αναμενόταν εμφάνιση υπεραρμονικών κοντά στη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα και στα πολλαπλάσια αυτής. Θυμίζεται ότι στους αντιστροφείς μικρής ισχύος η συχνότητα αυτή κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 15 και 20 kHz. Επομένως ο αντιστροφέας μπορεί να χαρακτηριστεί στοιχείο παραγωγής υπεραρμονικών.
- V. Ως προς την επιρροή των υπεραρμονικών από τις περιβαλλοντικές συνθήκες παρατηρούνται:
- Η παραγόμενη ισχύς προκύπτει ευθέως ανάλογη της ηλιακής ακτινοβολίας όπως ήταν αναμενόμενο. Με την αύξηση της παραγόμενης ισχύος ο δείκτης THD<sub>i%</sub> φαίνεται να μένει σταθερός. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι ότι παράλληλα με το βασικό ρεύμα αυξάνονται εξίσου και οι υπεραρμονικές συνιστώσες.
  - Σε μέτρηση που έγινε με έντονη συννεφιά και επομένως πολύ χαμηλή ακτινοβολία φαίνεται ότι το βασικό ρεύμα (50 Hz) μειώνεται κατακόρυφα, ενώ οι συνιστώσες στα 16 και 32 kHz μειώνονται ελάχιστα. Αυτός είναι ο λόγος που ενώ ο THD<sub>i%</sub> στο σύνολο των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 0 και 10%, στην συγκεκριμένη περίπτωση υπερβαίνει στις 2 φάσεις το 30%.
  - Με την αύξηση της θερμοκρασίας των κυψελών φαίνεται ότι οι συνιστώσες του ρεύματος στα 50 Hz παραμένουν σταθερές, ενώ μετά τους 40 °C ξεκινάει μια απότομη αύξηση. Στις συνιστώσες των 16 και 32 kHz η επιρροή της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη με την αύξηση αυτή να ξεκινάει νωρίτερα από

τους 35 °C. Στις μετρήσεις που η θερμοκρασία κυψελών ήταν αυξημένη, παρατηρούνται αυξημένες υπεραρμονικές συνιστώσες ρεύματος και αυξημένος THD<sub>i%</sub>.

- Με την αύξηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και κυψελών αναμένεται μείωση της τάσης και ελάχιστη αύξηση του ρεύματος. Στα αποτελέσματα φαίνεται πως με την αύξηση της θερμοκρασίας, η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος μειώνεται σε ποσοστό της τάξης του 50% ενώ η ισχύς (W) παραμένει σχεδόν σταθερή. Ταυτόχρονα παρατηρείται σημαντική αύξηση του THD<sub>i%</sub> στο διάστημα > 2 kHz καθώς και στις συνιστώσες ρεύματος που βρίσκονται κοντά στα 16 και 32 kHz. Επομένως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει προκαλέσει αύξηση της ισχύος (ενώ αναμενόταν μείωση) εξαιτίας της σημαντικής αύξησης των υπεραρμονικών.

#### VI. Ως γενικές παρατηρήσεις σημειώνονται:

- Μεταξύ των φάσεων καταγράφονται ανισορροπίες τόσο στο βασικό ρεύμα όσο και στις αρμονικές. Στην πλειοψηφία των μετρήσεων η 1<sup>η</sup> φάση εμφανίζει μειωμένο ρεύμα σε σχέση με το ρεύμα της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> φάσης.
- Ο δείκτης THD<sub>i%</sub> που χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την συμμόρφωση με τους κανονισμούς περιλαμβάνει συνιστώσες έως και 50<sup>ης</sup> τάξης, εν προκειμένω 2.5 kHz. Επομένως, οι συνιστώσες καθώς και ο THD<sub>i%</sub> που υπολογίστηκαν στις παραπάνω μετρήσεις στο διάστημα > 2.5 kHz δεν λαμβάνονται υπόψιν από τα τρέχοντα πρότυπα.
- Οι τιμές θερμοκρασίας περιβάλλοντος που κατέγραψε το θερμόμετρο *UNI-T UT303B IR* σε πολλές μετρήσεις είναι υψηλές σε τέτοιο βαθμό (44,5 °C, 50 °C) που δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες. Η λειτουργία του πιθανόν να επηρεάστηκε από την πολύωρη έκθεση σε υψηλή ακτινοβολία.



## Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση

Η τοπολογία διασύνδεσης της εγκατάστασης στην οποία έγιναν οι μετρήσεις είναι αυτή της εικόνας 3.14, περιλαμβάνει δηλαδή έναν κεντρικό αντιστροφέα στον οποίο οδηγείται συγκεντρωτικά το παραγόμενο ρεύμα όλων των πλαισίων. Όπως έχει αναφερθεί, όταν υπάρχουν πολυάριθμες συσκευές σε κοντινή απόσταση, η σύνθετη αντίσταση της εγκατάστασης αλλάζει με αποτέλεσμα η εμφάνιση και το μέγεθος των υπεαρμονικών να διαφέρουν. Επομένως υπάρχει ενδιαφέρον για τη μέτρηση υπεαρμονικών ρεύματος σε αντίστοιχες συνθήκες παραγωγής όταν υπάρχουν πολλαπλοί αντιστροφείς που λειτουργούν σε παράλληλους κλάδους.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Hwei P. Hsu, *Theory and Problems of Signals and Systems*. The MacGraw-Hill companies, 1995.
- [2] Roger C. Dugan, Mark F. Mc Granaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*. The MacGraw-Hill companies, 2002.
- [3] Κωνσταντίνος Α. Μπαλάρας, Αθανάσιος Α. Αργυρίου, Φώτης Ε. Καραγιάννης, *Συμβατικές και Ήπιες Μορφές Ενέργειας*. ΤΕΚΔΟΤΙΚΗ, 2006.
- [4] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab, *Σήματα και Συστήματα*. FOUNTAS BOOKS, 2012.
- [5] Στέφανος Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. ΣΥΜΕΩΝ, 2017.
- [6] Sarah Rönnberg, Math Bollen, *Propagation of Supraharmonics in the Low Voltage Grid*. Energiforsk, 2017.
- [7] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [8] Μωυσής Δαμιανίδης, Γεώργιος Κατσαρός, Ματθαίος Τόλης, Φώτιος Στεργιόπουλος, *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων*. ΤΕΕ/Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας. Θεσσαλονίκη, 2011.
- [9] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519, 2022.
- [10] G. Chicco, A. Russo and F. Spertino, "Supraharmonics: Concepts and experimental results on photovoltaic systems," 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), Lagow, Poland, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISNCC.2015.7174705.
- [11] S. K. Rönnberg, A. G. Castro, A. Moreno-Munoz, M. H. J. Bollen and J. Garrido, "Solar PV inverter supraharmonics reduction with random PWM," 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, Spain, 2017, pp. 644-649, doi: 10.1109/CPE.2017.7915248.
- [12] C. Waniek, T. Wohlfahrt, J. M. A. Myrzik, J. Meyer, M. Klatt and P. Schegner, "Supraharmonics: Root causes and interactions between multiple devices and the low voltage grid," 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Turin, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGTEurope.2017.8260267.
- [13] S. K. Rönnberg, A. Gil-De-Castro and R. Medina-Gracia, "Supraharmonics in European and North American Low-Voltage Networks," 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Palermo, Italy, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493930.
- [14] Ángela Espín-Delgado et al., "Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment," 2021 Electric Power Systems Research, Volume 195, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107179>.

- [15] Alexander Novitskiy, Steffen Schlegel, Dirk Westermann, "Estimation of Power Losses Caused by Supraharmonics," 2020 E3S Web Conf. 209 07008, doi: 10.1051/e3sconf/202020907008
- [16] J. Sreedevi, N. Ashwin and M. N. Raju, "A study on grid connected PV system," 2016 National Power Systems Conference (NPSC), Bhubaneswar, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/NPSC.2016.7858870.
- [17] M. Díez-Mediavilla et al., "Performance of grid-tied PV facilities based on real data in Spain: Central inverter versus string system," 2014 Energy Conversion and Management, vol. 86, pp. 1128-1133, Oct. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.087>.
- [18] A. Rahman, M. M. Rahman and M. R. Islam, "Performance Analysis of Three Phase Inverters with Different Types of PWM Techniques," 2017 2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi, Bangladesh, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/CEEE.2017.8412864.
- [19] E. H. E. Aboadla et al., "A comparative study between SPWM and SHE-PWM modulation techniques for DC-AC inverters," 2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS), Bangkok, Thailand, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICETSS.2017.8324191.
- [20] Mike Rycroft, "Supraharmonics in transmission and distribution networks," eePublishers, Sep. 2017, Διαθέσιμο: <https://www.ee.co.za/article/supraharmonics-transmission-distribution-networks.html> [Accessed: Jan. 17, 2021]
- [21] Richard P. Bingham, "A Higher Order: The Facts About Supraharmonics," Electrical Contractor, Jul. 2019. Διαθέσιμο: <https://www.ecmag.com/section/integrated-systems/higher-order-facts-about-supraharmonics> [Accessed: Feb. 17, 2021]
- [22] Sarah K. Rönnberg, Math H.J. Bollen, Hortensia Amaris, et al., "On waveform distortion in the frequency range of 2kHz–150kHz—Review and research challenges," 2017, Electric Power Systems Research, Volume 150, Pages 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.032>
- [23] A. Larsson, "On high-frequency distortion in low-voltage power systems", PhD dissertation, Luleå, 2011
- [24] D. Agudelo-Martínez, M. Limas, A. Pavas and J. Bacca, "Supraharmonic bands detection for low voltage devices," 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016, pp. 1003-1009, doi: 10.1109/ICHQP.2016.7783327.
- [25] V. Khokhlov, J. Meyer, A. Greverer, T. Busatto and S. Rönnberg, "Comparison of Measurement Methods for the Frequency Range 2–150 kHz (Supraharmonics) Based on the Present Standards Framework," in IEEE Access, vol. 8, pp. 77618-77630, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2987996.
- [26] Z. Siyuan et al., "A Novel Supraharmonics Measurement Method Based on Flexible Atom Filtering," 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), 2019, pp. 113-117, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886318.

- [27] S. Zhuang, W. Zhao, Q. Wang, Z. Wang, L. Chen, and S. Huang, "A High-Resolution Algorithm for Supraharmonic Analysis Based on Multiple Measurement Vectors and Bayesian Compressive Sensing," *Energies*, vol. 12, no. 13, p. 2559, Jul. 2019.
- [28] D. Amaripadath et al., "Measurement of Supraharmonic Emissions (2 - 150 kHz) in Real Grid Scenarios," 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/CPEM.2018.8501185.
- [29] Barkas, Dimitrios & Psomopoulos, Constantinos & Kaminaris, S.D. & Ioannidis, G.C.. (2020). "Supraharmonics Monitoring System Based on an FPGA Device", 2020, doi: 10.1049/icp.2021.1235.
- [30] Anthoula Menti, Thomas Zacharias, John Miliadis-Argitis, "Harmonic distortion assessment for a single-phase grid-connected photovoltaic system," *Renewable Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 360-368, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.001>.
- [31] Mohamed Hariri, Muhammad Hafeez and Mat Desa, Mohd Khairunaz and Masri, Syafrudin and Mohd Zainuri, Muhammad Ammirul Atiqi, "Grid-Connected PV Generation System-Components and Challenges: A Review", *Energies*, vol. 13, 2020.
- [32] D. Jain and U. K. Kalla, "Design and analysis of LCL filter for interconnection with grid connected PV system," 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077457.
- [33] Nejib Hamrouni, Sami Younsi, Moncef Jraidi, "A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy of a LV Grid Connected PV System, *Energy Procedia*", vol 162, pp 325-338, 2019, doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.034.
- [34] Moreno-Muñoz, Antonio, Aurora Gil-De-Castro, Sarah K. Rönnberg, Math H. J. Bollen and Enrique Romero-Cadval. "Ongoing work in CIGRE working groups on supraharmonics from power-electronic converters.", 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, June 2015.
- [35] [https:// solar.schneider-electric.com](https://solar.schneider-electric.com)
- [36] <https://megger.com>
- [37] <https://edn.com>
- [38] [https:// mb-drive-services.com](https://mb-drive-services.com)
- [39] <http://www.cired.net>
- [40] <http://www.sma.de>
- [41] <https://www.schaffner.com>
- [42] <https://hiokiusa.com>
- [43] <https://www.deltaohm.com>
- [44] <https://www.siglent.eu>
- [45] <https://ecopress.gr>

## Παράρτημα Α

Στο Παράρτημα Α περιλαμβάνονται πληροφορίες και τεχνικά φυλλάδια για τον αντιστροφέα και τα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

- Sunny Tripower 10kW

Ο αντιστροφέας της εικόνας Α.1 είναι τριφασικός, ισχύος 10 kW και υποστηρίζει:

- Μέγιστη χρήση ενέργειας χάρη στη φόρτιση βάσει προβλέψεων.
- Έξυπνος έλεγχος φορτίου.
- Μέγιστη απόδοση συστήματος μέσω της τεχνολογίας Smart module.
- Εύκολη διασύνδεση μέσω ενσωματωμένου WLAN και Speedwire.
- Οπτικοποίηση κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα Α.1 : Τριφασικός αντιστροφέας SMA Tripower<sup>[40]</sup>

Ο πίνακας Α.1 περιλαμβάνει τις τεχνικές προδιαγραφές όπως δίνονται από τον κατασκευαστή.

**Πίνακας Α 1:** Τεχνικές προδιαγραφές Sunny Tripower 10.0 <sup>[40]</sup>

### Sunny Tripower 10.0

STP10.0-3AV-40	
Maximum PV array power	15000 W <sub>p</sub>
Maximum input voltage	1000 V
MPP voltage range	320 V to 800 V

### AC Output

STP10.0-3AV-40	
Rated power at 230 V, 50 Hz	10000 W
Maximum apparent AC power at $\cos \varphi = 1$	10000 VA
Rated grid voltage	230 V

STP10.0-3AV-40	
Nominal AC voltage	3/N/PE, 220 V / 380 V, 230 V / 400 V, 240 V / 415 V
AC voltage range*	180 V to 280 V
Nominal AC current at 220 V	3 x 14.5 A
Nominal AC current at 230 V	3 x 14.5 A
Nominal AC current at 240 V	3 x 13.9 A
Maximum output current	3 x 14.5 A
Total harmonic distortion of the output current with total harmonic distortion of the AC voltage <2%, and AC power >50% of the rated power	< 3 %
Rated power frequency	50 Hz
AC power frequency*	50 Hz / 60 Hz

## Efficiency

	STP10.0-3AV-40
Maximum efficiency, $\eta_{\max}$	98.2 %
European weighted efficiency, $\eta_{\text{EU}}$	97.6 %

## 13.2 General Data

Width x height x depth	460 mm x 497 mm x 176 mm
Weight	20.5 kg
Length x width x height of the packaging	800 mm x 600 mm x 250 mm
Transport weight	26.5 kg
Climatic category in accordance with IEC 60721-3-4	4K4H
Environmental category	Outdoors
Pollution degree outside the enclosure	3
Pollution degree inside the enclosure	2
Operating temperature range	-25 °C to +60 °C
Maximum permissible value for relative humidity, non-condensing	100 %
Maximum operating altitude above mean sea level (MSL)	3000 m
Typical noise emission	25 dB(A)
Power loss in night mode	5 W
Maximum data volume per inverter with Speedwire/Webconnect	550 MB/month
Additional data volume when using the Sunny Portal live interface	660 kB/hour
Topology	Transformerless
Cooling method	Convection
Degree of protection for electronics in accordance with IEC 60529	IP65

- Siglent Digital SDS2304X

Οι μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια του παλμογράφου SDS2304X (εικόνα Α.2). Είναι 4<sup>ov</sup> καναλιών και υποστηρίζει μεταξύ άλλων εύρος ζώνης 300 MHz και μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 2 GSa/sec. Συνδέεται με μετασχηματιστή ρεύματος (CT) από όπου γίνεται η μέτρηση του ρεύματος των τριών φάσεων του αντιστροφέα. Το φασματικό γράφημα μπορεί να εξαχθεί και απευθείας χάρη στη δυνατότητα του παλμογράφου να υποστηρίζει μαθηματικές λειτουργίες όπως τον αλγόριθμο του γρήγορου Μ/Σ Fourier (FFT).



Εικόνα Α.2 : Παλμογράφος Siglent Digital SDS2304X [44]

Πίνακας Α.2: Τεχνικές προδιαγραφές μοντέλου SDS2304X [44]

Model	SDS2302XSDS2304X
Bandwidth	300 MHz
Sampling Rate (Max.)	2 GSa/s
Channels	2 + EXT 4 + EXT
Memory Depth (Max.)	140 Mpts (Single-Channel), 70 Mpts (Dual-Channel)
Waveform Capture Rate (Max.)	140,000 wfm/s (normal mode), 500,000 wfm/s (sequence mode)
Trigger Type	Edge, Slope, Pulse width, Window, Runt, Interval, Dropout, Pattern, Video
Serial Trigger	IIC, SPI, UART/RS232, CAN, LIN
Decoder Type (Optional)	IIC, SPI, UART/RS232, CAN, LIN
16 Digital Channels (MSO Option)	Maximum waveform capture rate up to 500 MSa/s, Record length up to 140 Mpts/CH
Waveform Generator (Optional)	Single channel, Max. frequency up to 25MHz, 125MSa/s sampling rate, 16Kpts wave length
I/O	USB Host, USB Device, LAN, Pass/Fail, Trigger Out, GPIB (Optional)
Probe (Std)	SP2030A 300MHz 1 pcs for each channel
Display	8 inch TFT LCD (800x480)

- ELDITEST CP6220

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση του ρεύματος είναι το Elditest Current Probe 6220. Έχει δυνατότητα μέτρησης συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, εύρος ζώνης 300 kHz και μέγιστη τιμή ρεύματος 100 A.





Εικόνα Α.3: Current Probe Elditest 6220

Πίνακας Α.3: Τεχνικές προδιαγραφές Elditest CP6220

MODEL	CP6220
Measurement Ranges	100 mV/A – 10 mV/A
Current (DC + peak AC)	10 A – 100 A
Bandwidth	DC – 300 kHz
Rise and Fall Time	1.2 $\mu$ s (typ.)
Max. Working Voltage	600 VAC RMS CAT II / 300 VAC RMS CAT III
Max. Floating Voltage	600 VAC RMS CAT II / 300 VAC RMS CAT III
Battery Type	9 V Alkaline (NEDA 1604A, IEC 6LR61)
Operating Temp.	0 to 50°C (32 to 122°F)
Storage Temp.	-20 to 80°C (-4 to 176°F)
Max. Operating Humidity	0 to 95% (0 to 40°C; 32 to 104°F) 0 to 45% (40 to 50°C; 104 to 122°F)
Max. Cable Diameter	11 mm (0.43")
Dimensions	262 mm x 79 mm x 36 mm (10.3 x 3.15 x 1.4")
Weight	260 g w/o battery

- DeltaOHM LP471PYRA.03

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) είναι το LP471PYRA.03, συνδυαστικά με αγωγό και ψηφιακό όργανο HD2102.2. Στην εικόνα Α.4 φαίνεται το πυρανόμετρο και ο αγωγός σύνδεσης.



Εικόνα Α.4 : Πυρανόμετρο LP471PYRA.03 <sup>[43]</sup>

Το παραπάνω μοντέλο είναι δεύτερης κλάσης, δεν απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία, συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα που έχει θέσει ο παγκόσμιος μετεωρολογικός οργανισμός (WMO), το πρότυπο ISO 9060 καθώς επίσης και με τον οργανισμό PMOD/WRC που εδρεύει στο Davos της Σουηδίας. Στον πίνακα Α.4 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά από το αντίστοιχο φυλλάδιο του κατασκευαστή.

**Πίνακας Α.4:** Τεχνικές προδιαγραφές LP471PYRA.03 <sup>[43]</sup>

Technical Specifications	LPPYRA03
WMO/ISO Classification	Second Class
ISO 9060:2018*	Spectrally flat *
Typical sensitivity	5 to 15 $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$
Impedance	33 $\Omega \div 45 \Omega$
Measuring range	0 $\div 2000 \text{ W}/\text{m}^2$
Viewing field	2 $\pi$ sr
Spectral range (50%)	300 nm $\div$ 2800 nm
Operating and storage temperature range	-40 °C $\div$ 80 °C
Weight	0.45 kg
ISO 9060 Specifications	
Response time 95%	< 30 s
Zer	a) Response to thermal radiation (200Wm <sup>-2</sup> )
	25 W/m <sup>2</sup>

b) Response to temperature change 5K/h	< ± 6 W/m <sup>2</sup>
Non stability over 1 year	< ± 2.5 %
Non-linearity	< ± 2 %
Cosine response	< ±22 W/m <sup>2</sup>
Spectral selectivity	< ±7 %
Temperature response (-10°C to +40°C)	< 8 %
Tilt response	< ± 4 %
Humidity Range	0 to 100%
Mean Time Between Failures	> 10 years
Accuracy of bubble level	< 0.2°
Ingress Protection (IP) rating	67
Version with shadow ring	✓ (only for passive version)
Warranty	3
ISO 17025 Certification	on request

\*Under approval

- DeltaOHM HD2102.2

Είναι φορητό ψηφιακό όργανο για μετρήσεις ακτινοβολίας και φωτεινότητας, συμβατό με το πυρανόμετρο LP471PYRA.03. Έχει οθόνη LCD, δυνατότητα καταγραφής και αποθήκευσης έως και 38.000 δειγμάτων, σύνδεση και μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με υπολογιστή μέσω USB και βαθμό προστασίας IP 66. Ο πίνακας Α.5 περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου.



Εικόνα Α.5 : Ψηφιακό όργανο HD2102.2 <sup>[43]</sup>

Πίνακας Α.5: Τεχνικές προδιαγραφές HD2102.2 <sup>[43]</sup>

INSTRUMENT TECHNICAL CHARACTERISTICS	
Measured quantities	lux - fcd - lux/s - fcd/s - W/m <sup>2</sup> - μW/cm <sup>2</sup> J/m <sup>2</sup> - μJ/cm <sup>2</sup> - μmol/(m <sup>2</sup> s) - μmol/m <sup>2</sup> - cd/m <sup>2</sup> - μW/lumen
Measured values storage - model HD2102.2	
Type (for single probes)	2000 pages containing 19 samples each
Type (for combined probes)	2000 pages containing 7 samples each
Quantity (for single probes)	total of 38000 samples
Quantity (for combined probes)	total of 14000 samples
Selectable storage interval	1, 5, 10, 15, 30 s 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 min 1 hour
Serial interface RS232C	
Type	RS232C electrically isolated
Baud rate	can be set from 1200 to 38400

	baud
Data bit	8
Parity	None
Stop bit	1
Flow Control	Xon/Xoff
Serial cable length	Max 15m
Print interval	immediate or selectable between: 1, 5, 10, 15, 30 s 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30 min 1 hour
USB interface - model HD2102.2	
Type	1.1 - 2.0 electrically isolated
<b>Connections</b>	
Input module for the probes	8-pole male DIN45326 connector
RS232 serial interface	8-pole MiniDin connector
USB serial interface	B-type MiniUSB connector
Mains adapter	2-pole connector (positive at centre)
<b>Operating conditions</b>	
Working temperature	-5...50 °C
Storage temperature	-25...65 °C
Working relative humidity	0...90% RH without condensation
Protection degree	IP66
<b>Instrument</b>	
Dimensions (Length x Width x Height)	185 x 90 x 40 mm
Weight	470 g (complete with batteries)
Material	ABS, rubber
Display	2x4½ digits plus symbols Visible area: 52x42 mm

- UNI-T UT303B IR

Η θερμοκρασία των πλαισίων και των κυψελών μετρήθηκε ανέπαφα με τη βοήθεια του παρακάτω θερμομέτρου υπερύθρων (εικόνα Α.6). Υποστηρίζει:

- Εύρος θερμοκρασίας -32 έως 850 °C
- Χρόνο απόκρισης 250 msec
- Ακρίβεια  $\pm 1.8\%$



Εικόνα Α.6: Θερμόμετρο υπερύθρων UNI-T UT303B IR

## Παράρτημα Β

Στο Παράρτημα Β περιλαμβάνονται οι κώδικες MatLab που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία και την γραφική απεικόνιση των μετρήσεων.

### db1.m

```
clear;
close all;

%-----
% Εισαγωγή δεδομένων από .xlsx
e = 0.1; % Ευαισθησία των probes [V/A]
y1 = readmatrix('db1.xlsx','Sheet','db1','Range','B2:B4001')/e;
y2 = readmatrix('db1.xlsx','Sheet','db1','Range','C2:C4001')/e;
y3 = readmatrix('db1.xlsx','Sheet','db1','Range','D2:D4001')/e;

%-----
Fs = 250000; % Συχνότητα Δειγματοληψίας [Samples/sec]
Ts = 1/Fs; % Περίοδος Δειγματοληψίας [sec]
L = length(y1); % Μήκος Σήματος, [y1 = y2 = y3]
t = 0:Ts:(L-1)*Ts; % Ορισμός εύρους στο πεδίο του χρόνου

%-----
% FFT για την 1η φάση
Y1 = fft(y1); % Υπολογισμός FFT του y1
P2_1 = abs(Y1/L); % Απόλυτη τιμή του FFT 2 ζωνών
P1_1 = P2_1(1:L/2+1); % Υπολογισμός FFT μονής ζώνης
P1_1(2:end-1) = 2*P1_1(2:end-1);

% FFT για την 2η φάση
Y2 = fft(y2); % Υπολογισμός FFT του y2
P2_2 = abs(Y2/L); % Απόλυτη τιμή του FFT 2 ζωνών
P1_2 = P2_2(1:L/2+1); % Υπολογισμός FFT μονής ζώνης
P1_2(2:end-1) = 2*P1_2(2:end-1);

% FFT για την 3η φάση
Y3 = fft(y3); % Υπολογισμός FFT του y3
P2_3 = abs(Y3/L); % Απόλυτη τιμή του FFT 2 ζωνών
P1_3 = P2_3(1:L/2+1); % Υπολογισμός FFT μονής ζώνης
P1_3(2:end-1) = 2*P1_3(2:end-1);

F = Fs*(0:(L/2))/L; % Ορισμός εύρους στο πεδίο των συχνοτήτων
% fmax = Fs/2
fst = f(length(f))/(length(f)-1); % Βήμα συχνότητας στην ανάλυση Fourier

%-----
% Εξαγωγή γραφημάτων

% Στο πεδίο του χρόνου
fig1 = figure(1); clf;

a1 = plot(t*1000,y1,"color","#454545");
hold on
a2 = plot(t*1000,y2,"color","#FF2D00");
hold on
```

```

a3 = plot(t*1000,y3,"color","g");
axis tight;
set(a1,"LineWidth",0.5);
set(a2,"LineWidth",0.5);
set(a3,"LineWidth",0.5);
set(gca,"fontsize",12,"FontName","Times New Roman","YMinorGrid","on");
xlabel("Χρόνος [msec]","FontWeight","bold","FontSize",12,"FontName","Times
New Roman");
ylabel("Πλάτος [A]","FontWeight","bold","FontSize",12,"FontName","Times New
Roman");

% M/Σ Fourier (FFT)
fig2 = figure(2); clf;

subplot(3,1,1);
plot(f,mag2db(P1_1),LineWidth=0.8,Color="#454545")
set(gca,"fontsize",12,"FontName","Times New
Roman","XGrid","on","XMinorGrid","on");
xlim([1800, 40000]);
ylim([-50, -20]);
legend("1η ΦΑΣΗ","FontWeight","bold","fontSize",10,"FontName","Times New
Roman");

subplot(3,1,2);
plot(f,mag2db(P1_2),LineWidth=0.8,Color="#FF2D00")
set(gca,"fontsize",12,"FontName","Times New
Roman","XGrid","on","XMinorGrid","on");
xlim([1800, 40000]);
ylim([-50, -20]);
legend("2η ΦΑΣΗ","FontWeight","bold","fontSize",10,"FontName","Times New
Roman");

subplot(3,1,3);
plot(f,mag2db(P1_3),LineWidth=0.8,Color="g")
set(gca,"fontsize",12,"FontName","Times New
Roman","XGrid","on","XMinorGrid","on");
xlim([1800, 40000]);
ylim([-50, -20]);
legend("3η ΦΑΣΗ","FontWeight","bold","fontSize",10,"FontName","Times New
Roman");

com1 = axes(fig2,'visible','off'); % Ορισμός κοινών αξόνων x,y
com1.XLabel.Visible='on';
com1.YLabel.Visible='on';
xlabel(com1,"Συχνότητα [Hz]","FontWeight","bold","FontSize",12,"FontName",
"Times New Roman");
ylabel(com1,"dBA","FontWeight","bold","FontSize",12,"FontName","Times New
Roman");

%-----
% Εύρεση θεμελιώδους συνιστώσας ρεύματος
fprintf("ifund1 = %f A \n", max(P1_1));
fprintf("ifund2 = %f A \n", max(P1_2));
fprintf("ifund3 = %f A \n\n", max(P1_3));

```



% Εύρεση μέγιστης συνιστώσας στην περιοχή 12 kHz ~ 18 kHz  
(αναμενόμενη στα 16.5 kHz)

```
lim10 = 12000/fst;           % από 12000 Hz
lim20 = 18000/fst;         % έως 18000 Hz
tem_P10 = P1_1(lim10:lim20); % Πίνακας με τα στοιχεία από 12 έως 18 kHz
tem_P20 = P1_2(lim10:lim20);
tem_P30 = P1_3(lim10:lim20);
[A10, B10] = max(tem_P10);  % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 1ης φάσης
B10 = B10 +lim10;
[A20, B20] = max(tem_P20); % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 2ης φάσης
B20 = B20 +lim10;
[A30, B30] = max(tem_P30); % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 3ης φάσης
B30 = B30 +lim10;
fprintf("Μέγιστη συνιστώσα στα 16kHz\n");
fprintf("Φάση 1: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n",A10, B10*fst);
fprintf("Φάση 2: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n",A20, B20*fst);
fprintf("Φάση 3: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n\n",A30, B30*fst);
```

% Εύρεση μέγιστης συνιστώσας στην περιοχή 30 kHz ~ 36 kHz  
(αναμενόμενη στα 32 kHz)

```
lim11 = 30000/fst;         % από 30000 Hz
lim21 = 36000/fst;         % έως 36000 Hz
tem_P12 = P1_1(lim11:lim21); % Πίνακας με τα στοιχεία από 30 έως 36 kHz
tem_P22 = P1_2(lim11:lim21);
tem_P32 = P1_3(lim11:lim21);
[A11, B11] = max(tem_P12); % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 1ης φάσης
B11 = B11 +lim11;
[A21, B21] = max(tem_P22); % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 2ης φάσης
B21 = B21 +lim11;
[A31, B31] = max(tem_P32); % Μέγιστη συνιστώσα ρεύματος 3ης φάσης
B31 = B31 +lim11;
fprintf("Μέγιστη συνιστώσα στα 32kHz\n");
fprintf("Φάση 1: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n",A11, B11*fst);
fprintf("Φάση 2: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n",A21, B21*fst);
fprintf("Φάση 3: SupraCur: %f -- SupraHar [Hz] : %f \n\n",A31, B31*fst);
```

%-----

% Υπολογισμός δείκτη THDi %

```
ifund1_rms = max(P1_1)/sqrt(2); % RMS τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας
ifund2_rms = max(P1_2)/sqrt(2);
ifund3_rms = max(P1_3)/sqrt(2);
lim12 = 2000/fst;           % από 2000 kHz
lim22 = 125000/fst;         % έως 125000 kHz
tem_P13 = P1_1(lim12:lim22); % Πίνακας με τα στοιχεία από 2 έως 125 kHz
tem_P23 = P1_2(lim12:lim22);
tem_P33 = P1_3(lim12:lim22);
ih1_rms_sq = (tem_P13/sqrt(2)).^2; % Πίνακας τετραγώνων
ih2_rms_sq = (tem_P23/sqrt(2)).^2;
ih3_rms_sq = (tem_P33/sqrt(2)).^2;
as1 = sqrt(sum(ih1_rms_sq)); % Ρίζα αθροίσματος τετραγώνων
as2 = sqrt(sum(ih2_rms_sq));
as3 = sqrt(sum(ih3_rms_sq));
THD_1 = (as1)/ifund1_rms;    % THDi
THD_2 = (as2)/ifund2_rms;
THD_3 = (as3)/ifund3_rms;
```

```
fprintf("THDi1 percent: %f \n", THD_1*100);
fprintf("THDi2 percent: %f \n", THD_2*100);
fprintf("THDi3 percent: %f \n", THD_3*100);
```

### s1.m

```
clear;
close all;
```

```
%-----
```

```
% Υπεραρμονικές συναρτήσεις της παραγόμενης ισχύος &
% των περιβαλλοντικών συνθηκών
```

```
% Παραγόμενη ισχύς           : power
% Ηλιακή ακτινοβολία         : pyra
% Θερμοκρασία κυψελών        : tk
% Θερμοκρασία πλαισίου       : tfr
% Θερμοκρασία περιβάλλοντος : tenv
% Υγρασία                     : hum
```

```
%-----
```

```
% Εισαγωγή δεδομένων από .xlsx
```

```
tab = readtable("s1.xlsx", "Sheet", "s1", "Range", "B1:S27");
```

```
x = tab.power;
y1 = tab.f1_16;
y2 = tab.f2_16;
y3 = tab.f3_16;
```

```
[xx,ii] = sort(x);
```

```
%-----
```

```
% Εξαγωγή γραφημάτων
```

```
fig1 = figure(1); clf;
```

```
a1 = plot(xx,y1(ii), "color", "#454545");
```

```
hold on
```

```
a2 = plot(xx,y2(ii), "color", "#FF2D00");
```

```
hold on
```

```
a3 = plot(xx,y3(ii), "color", "g");
```

```
axis tight;
```

```
legend("1η ΦΑΣΗ", "2η ΦΑΣΗ", "3η ΦΑΣΗ", Location="northwest");
```

```
set(a1, "LineWidth", 1.2);
```

```
set(a2, "LineWidth", 1.2);
```

```
set(a3, "LineWidth", 1.2);
```

```
set(gca, "fontSize", 12, "FontName", "Times New Roman", "YMinorGrid", "on");
```

```
xlabel("Παραγόμενη ισχύς [W]", "FontWeight", "bold", "FontSize", 12,
"FontName", "Times New Roman");
```

```
ylabel("I [16 kHz]", "FontWeight", "bold", "FontSize", 12, "FontName", "Times New
Roman");
```

## har.m

```
clear;
close all;

%-----
% Εισαγωγή δεδομένων από .xlsx
e = 1; % Ευαισθησία των probes [V/A]
y = readmatrix('22.xlsx','Sheet','22','Range','A26:A5025')/e;

%-----
Fs = 250000; % Συχνότητα Δειγματοληψίας [Samples/sec]
Ts = 1/Fs; % Περίοδος Δειγματοληψίας [sec]
L = length(y); % Μήκος Σήματος
t = 0:Ts:(L-1)*Ts; % Ορισμός εύρους στο πεδίο του χρόνου

%-----
Power = 5412; % 3φασική ισχύς (W) τη στιγμή της μέτρησης
Current = Power/(400*sqrt(3)); % Ενεργός τιμή του ρεύματος θεωρητικά
I_peak = Current*sqrt(2); % Τιμή κορυφής του ρεύματος θεωρητικά
I_max = max(y); % Πραγματική τιμή κορυφής του σήματος
k = I_peak/I_max;
y1 = k*y; % Το σήμα μετά τη διόρθωση του λόγου "k"

%-----
% FFT
Y = fft(y1); % Υπολογισμός FFT του y1
P2 = abs(Y/L); % Απόλυτη τιμή του FFT 2 ζωνών
P1 = P2(1:L/2+1); % Υπολογισμός FFT μονής ζώνης
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
fst = f(length(f))/(length(f)-1); % Βήμα συχνότητας στην ανάλυση Fourier

%-----
% Εξαγωγή γραφημάτων

% Στο πεδίο του χρόνου
figure(1)
plot(t*1000,y1,LineWidth=0.5);
xlabel('Χρόνος [msec]','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman')
ylabel('Πλάτος [A]','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman')
set(gca, 'YMinorGrid', 'on');

% Μ/Σ Fourier (FFT)
figure(2)
plot(f,mag2db(P1),LineWidth=2,Marker="o")
xlabel('Συχνότητα f [Hz]','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman')
ylabel('Πλάτος [dBA]','FontWeight','bold','FontSize',12,'FontName','Times New Roman')
xlim([0, 2500])
grid on
grid minor
```

```

%-----
% Υπολογισμός δείκτη THDi %

ifund_rms = max(P1)/sqrt(2);      % RMS τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας
lim1 = 150/fst;                  % από 50 Hz
lim2 = 2500/fst;                 % έως 2.5 kHz
tem_P1 = P1(lim1:lim2);          % Πίνακας με τα στοιχεία από 0 έως 2.5 kHz
ih_rms_sq = (tem_P1/sqrt(2)).^2; % Πίνακας τετραγώνων
as = sqrt(sum(ih_rms_sq));        % Ρίζα αθροίσματος τετραγώνων
THD = (as)/ifund_rms;            % THDi

%-----
% Αρμονικές 0 ~ 2.5 kHz

fprintf("max 3<11 :%f \n", (max(P1(4:11))/max(P1))*100);
fprintf("max 13<17 :%f \n", (max(P1(12:17))/max(P1))*100);
fprintf("max 19<23 :%f \n", (max(P1(18:23))/max(P1))*100);
fprintf("max 25<35 :%f \n", (max(P1(24:35))/max(P1))*100);
fprintf("max 35<50 :%f \n", (max(P1(36:51))/max(P1))*100);

```