# ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

**Χ. Α. Χριστοδούλου[1], Δ. Μπαρός[1], Δ. Βογλίτσης[1], Σ. Σαριδάκης[1], Ν. Π. Παπανικολάου[1] και Ι. Φ. Γκόνος[2]**

**[1] Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών, Δ.Π.Θ., Πολυτεχνειόπολη Κιμμερίων, Ξάνθη**
**[2]Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου**
**E-mail: Christ_fth@yahoo.gr**

## Περίληψη

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η σημαντική τεχνολογική πρόοδος στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική καθώς και περιβαλλοντικοί λόγοι έχουν οδηγήσει τα τελευταία χρόνια σε αύξηση των αυτόνομων φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η διασύνδεση με το δίκτυο διανομής καθίσταται δυσχερής. Η ποιότητα της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος αποτελεί ζήτημα αιχμής και σχετίζεται με τη συμμόρφωση συγκεκριμένων δεικτών με όρια που επιβάλλονται από τα ισχύοντα διεθνή Πρότυπα και τεχνοικονομικούς περιορισμούς. Οι δείκτες ποιότητας ισχύος εξαρτώνται από τις τιμές παραμέτρων του συστήματος, που καθορίζουν την ικανοποίηση των ως άνω απαιτήσεων. Στην παρούσα εργασία υπολογίζονται για διάφορες τιμές των παραμέτρων ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος δείκτες ποιότητας ισχύος, χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα και θεωρητικές εξισώσεις. Η ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ εργαστηριακών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνει την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου επιλογής των παραμέτρων του συστήματος για τη βελτίωση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος, που αναπτύχθηκε σε προηγούμενες εργασίες.

*Λέξεις-Κλειδιά: αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, ποιότητα ισχύος, ασυμμετρία, αρμονικές*

## Abstract

The liberalization of electrical energy markets, the technological progress in the conversion of solar energy to electricity and environmental goals have significantly increased the installation of residential photovoltaic (PV) systems, especially in regions where the interconnection with the distribution system is difficult. The quality of the generated electrical power is a critical issue and is related with the compliance of defined indices with limits, according to national Standards and techno-economical restrictions. The power quality indices depend on the values of parameters of the PV system, which determine the satisfaction of the above technical demands. The current work estimates the quality indices for various values of the parameters, following both laboratory and theoretical approach. The adequate convergence between experimental and theoretical results confirms the reliability and the effectiveness of the developed methodology for the design of three-phase autonomous PV residential systems with improved power quality, presented in previous works.

*Keywords: autonomous photovoltaic system, power quality, asymmetry, harmonic content*

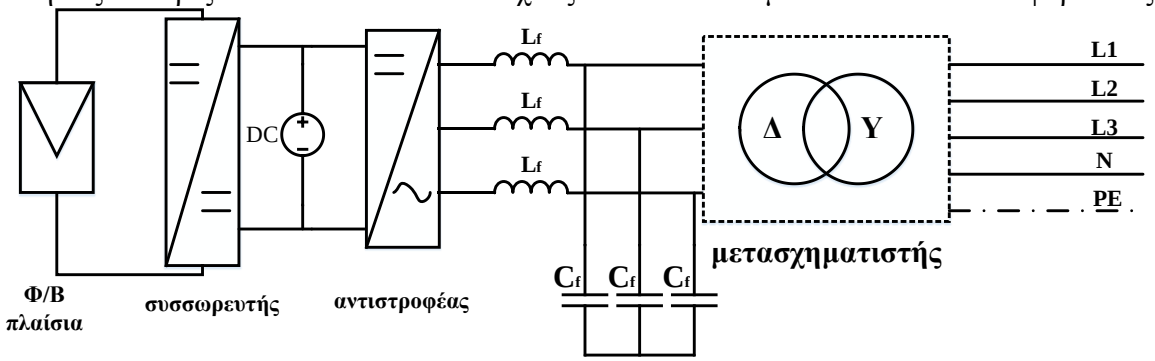
## 1. Εισαγωγή

Ο κατάλληλος σχεδιασμός των αυτόνομων φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων και η εναρμόνισή τους με εθνικά και διεθνή Πρότυπα εγγυώνται τη σωστή και αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος, μειώνοντας πιθανά σφάλματα και προβλήματα συμβατότητας. Αυτό απαιτεί τη ρύθμιση μιας σειράς δεικτών και παραμέτρων σχετικών με την ποιότητα ώστε να εξασφαλίζεται η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της εύρυθμης και απρόσκοπτης λειτουργίας, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να αποφεύγονται άσκοπες υπερδιαστασιολογήσεις του εξοπλισμού, που αυξάνουν το κόστος και οδηγούν σε μη πρακτικές και μη λειτουργικές τοπολογίες. Η συνεχής τάση των συσσωρευτών και της Φ/Β μονάδας είναι παράμετροι του συστήματος, οι οποίες συνήθως καθορίζονται από το επίπεδο ισχύος και τα διαθέσιμα Φ/Β πλαίσια και φορτιστές. Επιπλέον, ο λόγος του μετασχηματιστή και οι τιμές των στοιχείων του φίλτρου είναι παράμετροι που επηρεάζουν τους δείκτες ποιότητας ισχύος.

Προς την κατεύθυνση αυτή, αναπτύχθηκε σε προηγούμενες εργασίες (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013) μεθοδολογία, βασισμένη στην τεχνητή νοημοσύνη, για τον υπολογισμό των τιμών εκείνων των παραμέτρων του συστήματος, οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Στην παρούσα εργασία, τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας, συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα, ληφθέντα στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του Δ.Π.Θ.. Οι εργαστηριακές μετρήσεις, παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση με τα αποτελέσματα της θεωρητικής ανάλυσης, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου σχεδιασμού.

## 2. Ανάλυση του υπό εξέταση συστήματος

Το Σχήμα 1 παρουσιάζει το κύκλωμα του υπό εξέταση συστήματος. Ο τριφασικός αντιστροφέας, ελεγχόμενος με την SPWM τεχνική, τροφοδοτείται μέσω συσσωρευτών, οι οποίοι φορτίζονται από τη Φ/Β μονάδα μέσω μίας εν σειρά βαθμίδος φόρτισης (Fakha et al. 2011, Hajizaden et al. 2010, Geng et al. 2011, Wai et al. 2013, Singh and Sharna 2012, Hamzeh et al. 2013, Enslin and Snyman 1991, Vandroon et al. 2011). Επιπλέον, η συνεχής τάση των συσσωρευτών και της Φ/Β μονάδας είναι παράμετροι του συστήματος, οι οποίες συνήθως καθορίζονται από το επίπεδο ισχύος και τα διαθέσιμα Φ/Β πλαίσια και φορτιστές.




Σχήμα 1: Κυκλωματική αναπαράσταση του υπό εξέταση συστήματος

Αναφορικά με τον αντιστροφέα, χρησιμοποιήθηκε η πιο συνήθης τοπολογία για οικιακές-αστικές εφαρμογές, δηλαδή η τριφασική γέφυρα με τρανζίστορ ισχύος. Ο λόγος των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή επηρεάζει το επίπεδο της συνεχούς τάσης που θα επιλεχθεί, καθώς η τάση στην πλευρά του φορτίου εξαρτάται από αυτήν την τιμή. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στην παρακάτω ομάδα εξισώσεων, εξαγομένων από την αρχή

λειτουργίας του SPWM αντιστροφέα (Rashid 2001) και από το κύκλωμα του Σχήματος 1 (θεωρώντας ότι η ενεργός τιμή του χωρητικού ρεύματος του φίλτρου είναι αμελητέα).

$$V_{inv,N} = \sqrt{\frac{3}{2}} m_a \frac{V_{dc}}{2} \tag{1}$$

$$\dot{V}_{1N} = \dot{V}_{inv,N} - \Delta\dot{V}_{Lf} \tag{2}$$

$$V_{2N} = \frac{\sqrt{3}V_{1N}}{n} \tag{3}$$

όπου
$V_{1N}$, η ενδεικνύμενη πολική τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή
$V_{2N}$, η ενδεικνύμενη πολική τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή
$V_{inv,N}$, η ενδεικνύμενη πολική τάση του αντιστροφέα
$\Delta V_{Lf}$, η πτώση τάσης (ενδεικνύμενη τιμή) στην επαγωγική αντίσταση του φίλτρου
$n$, ο λόγος του μετασχηματιστή
$m_a$, ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους της SPWM παλμοδότησης
$V_{dc}$, η συνεχής τάση του αντιστροφέα.

Ο μετασχηματιστής ανύψωσης είναι συνδεμένος κατά Ygd (τρίγωνο το πρωτεύον, γειωμένος αστέρας το δευτερεύον, το οποίο είναι το τύλιγμα υψηλής τάσης), προκειμένου να αποφευχθεί στο πρωτεύον του μετασχηματιστή η κυκλοφορία συνιστωσών μηδενικής ακολουθίας και αρμονικών ρευμάτων 3$^{ης}$ τάξης (παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ασυμμετρίες τάσης στην πλευρά του αντιστροφέα), λόγω της ύπαρξης μονοφασικών και μη γραμμικών φορτίων, αντίστοιχα. Το τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, $I_{inv,sc}$, για τον αντιστροφέα του Σχήματος 1 δίνεται από την εξίσωση:

$$I_{inv,sc} = \frac{V_{inv,N}}{\sqrt{3}\omega_b L_f} \tag{5}$$

όπου
$\omega_b$, η γωνιακή συχνότητα του δικτύου.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα του αντιστροφέα, σε διαφορετική περίπτωση η διάταξη προστασίας δεν θα παρουσιάζει επαρκή επιλεκτικότητα. Οι σύγχρονοι αντιστροφείς για Φ/Β εφαρμογές μπορούν να αντέξουν έως και 280% του ονομαστικού ρεύματος για κάποια δευτερόλεπτα (ABB 2010, Lijie et al. 2010). Επομένως, έως αυτή τη στάθμη βραχυκύκλωσης είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένας αντιστροφέας τάσης με ονομαστική ισχύ ίση με το μέγιστο αναμενόμενο φορτίο της εγκατάστασης. Φυσικά, για υψηλότερες στάθμες βραχυκύκλωσης η ονομαστική ισχύς του αντιστροφέα τάσης πρέπει να αυξηθεί, αλλοιώνοντας έτσι τον συντελεστή χρήσης και αυξάνοντας το κόστος της εγκατάστασης.
Η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει ότι υπάρχουν πολλές παράμετροι, οι οποίες εάν επιλεγούν κατάλληλα, εξασφαλίζουν τη λειτουργία του συστήματος σύμφωνα με τους επιθυμητούς στόχους για την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και τους τεχνοοικονομικούς περιορισμούς για την ασφαλή και οικονομική λειτουργία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Οι αναφερθέντες στόχοι/περιορισμοί συνοψίζονται στα κάτωθι κριτήρια σχεδιασμού (δείκτες ποιότητας ισχύος):
***Ασυμμετρία λόγω μονοφασικών φορτίων (asym):*** χρησιμοποιείται ο ορισμός των (Pillay and Manyage 2001, Jouanne and Banerjee 2011). Ισχύει η εξίσωση:

$$\text{asym}(\%) = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100 \tag{6}$$

όπου
$V_2$, $V_1$, η αρνητική και η θετική ακολουθία των συνιστωσών της τάσης στην πλευρά του φορτίου (ενδεικνύμενη τιμή).
Η ασυμμετρία πρέπει να πληροί τα αναφερόμενα στα εθνικά και διεθνή πρότυπα όρια (NEMA 1993, IEEE Std.141 1993, IEEE Std.241 1990, IEEE Std.112 1991).

***Συνολική αρμονική παραμόρφωση λόγω μη γραμμικών φορτίων (THD):*** υπολογίζεται με ανάλυση συμμετρικών συνιστωσών. Πρέπει, επίσης, να τηρούνται τα προβλεπόμενα όρια, σύμφωνα με τα εθνικά και διεθνή πρότυπα, όπως το EN 50160.

***Λόγος ρεύματος βραχυκύκλωσης αντιστροφέα (Inverter Short Circuit Current Ratio - sci):***ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{sci} = \frac{I_{inv,sc}}{I_{inv,N}} \tag{7}$$

όπου
$I_{inv,N}$, το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα (ενδεικνύμενη τιμή)

Ο δείκτης *sci* ορίζει το ρεύμα βραχυκύκλωσης το οποίο μπορεί να αντέξει ο αντιστροφέας, καθώς και την αυτεπαγωγή του φίλτρου.

***Λόγος ονομαστικής ισχύος αντιστροφέα (Inverter Nominal Power Ratio-scs):*** ορίζεται ως ο λόγος της φαινόμενης ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα, $S_{inv,N}$, προς την φαινόμενη ονομαστική ισχύ του φορτίου, $S_{L,N}$:

$$\left.\begin{aligned} &\text{scs} = \frac{S_{inv,N}}{S_{L,N}} \\ &S_{inv,N} = \sqrt{3}\, V_{inv,N} I_{inv,N}\ ,\ S_{L,N} = \sqrt{3}\, V_{2N} I_{2N} = \frac{P_L}{pf} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

όπου
$I_{2N}$, το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (ενδεικνύμενη τιμή)
$P_L$, η ενεργός ισχύς του φορτίου
*pf*, ο συντελεστής ισχύος.

Ο δείκτης *scs* καθορίζει τη σχέση μεταξύ της ισχύος του αντιστροφέα και του φορτίου, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται οι στόχοι για την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

***Λόγος ονομαστικών ρευμάτων αντιστροφέα (Inverter Nominal Current Ratio-nomi):*** ορίζεται από την εξίσωση:

$$\text{nomi} = \frac{I_{inv,N}}{I_{1N}} \tag{9}$$

όπου
$I_{1N}$ το ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή (ενδεικνύμενη τιμή)

Σύμφωνα με το Σχήμα 1, ισχύει:

$$\dot{I}_{1N} = \dot{I}_{inv,N} + \dot{I}_{Cf} \quad (10)$$

όπου

$I_{Cf}$, το ρεύμα ανά φάση (ενδεικνύμενη τιμή) στον πυκνωτή του φίλτρου

Ο δείκτης *nomi* εκφράζει το μέγιστο επιτρεπτό χωρητικό ρεύμα στο κύκλωμα. Με τον τρόπο αυτό καθορίζει τις τιμές των $L_f$ και $C_f$

Οι παραπάνω δείκτες ποιότητας ισχύος, καθώς και ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους της SPWM παλμοδότησης εξαρτώνται από την αυτεπαγωγή $L_f$ και τη χωρητικότητα $C_f$ του φίλτρου, το λόγο του μετασχηματιστή $n$ και την συνεχή τάση $V_{dc}$ στον αντιστροφέα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε σε προηγούμενες εργασίες (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013) έχει σκοπό να υπολογίσει τις τιμές των παραμέτρων του συστήματος ($C_f$, $L_f$, $n$, $V_{dc}$), οι οποίες εξασφαλίζουν τη συμμόρφωση των ως άνω δεικτών με τα όρια του Πίνακα 1, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

Πίνακας 1: Όρια των δεικτών ποιότητας ισχύος

| Παράμετρος | Όριο | Παράμετρος | Όριο |
|---|---|---|---|
| *asym* | <5% | sci | <5 |
| *THD* | <3% | scs | <2 |
| $m_a$ | <0.5 ή <0.8 | *nomi* | <1.5 |

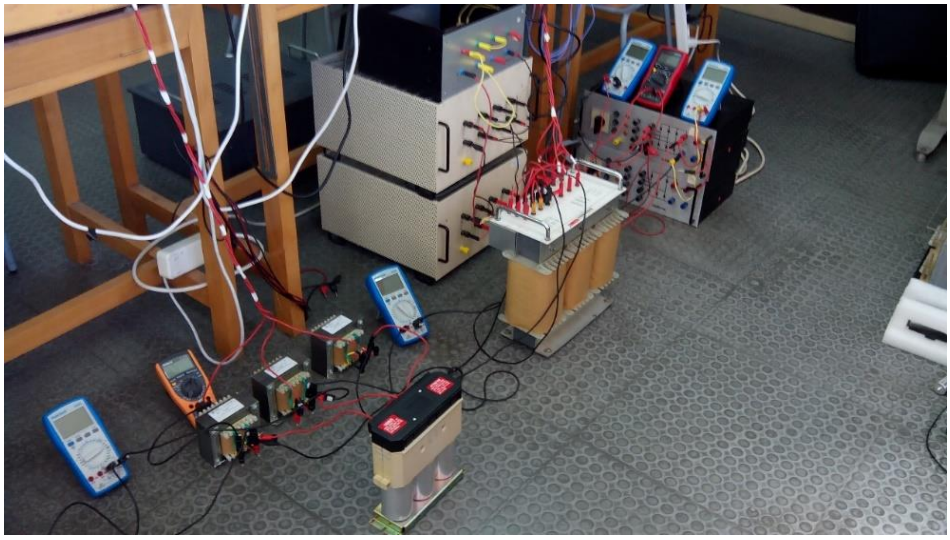
## 3. Εργαστηριακές μετρήσεις

### 3.1 Πειραματική διάταξη εξοπλισμός

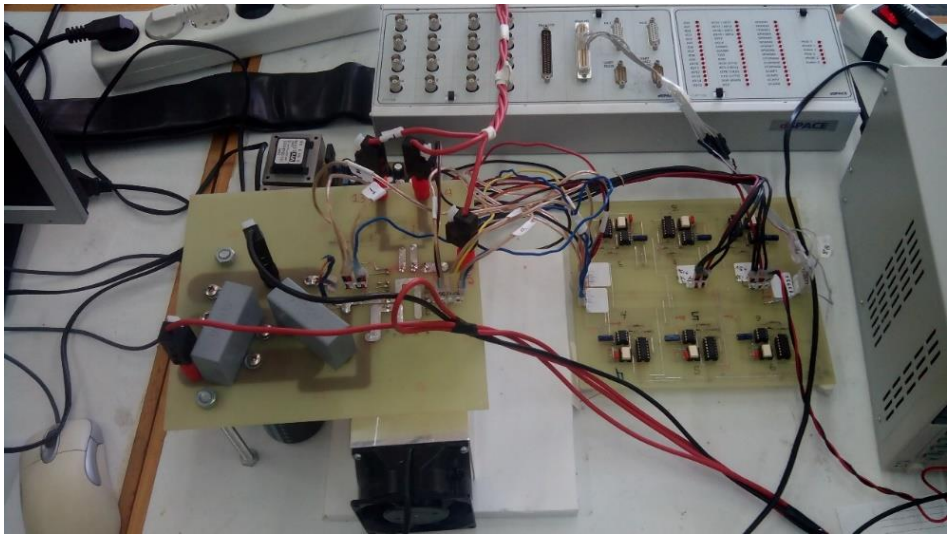
Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη θεωρητική ανάλυση, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε για το σχεδιασμό αυτόνομων Φ/Β εγκαταστάσεων. Η διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Δ.Π.Θ., στο πλαίσιο Μεταδιδακοτρικής Έρευνας (ΥΠΟΤΡΟΦΙΑ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ Ι.Κ.Υ. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ –ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SIEMENS). Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ο κάτωθι:

- Τροοφοδοτικό DELTA Electronica, 0-330V/ 0-11A
- Πηνία σιδήρου 3x36mH, 30A, CHOKE, MODEL 5070 50Hz
- Πηνία σιδήρου 3x5/10mH, 30A, CHOKE, MODEL 5070 50Hz
- Γέφυρα τριφασικής ανόρθωσης Intellectron, 510V/20A
- Μ/Σ SIEMENS 2GA1816-3A, 6kVA 50Hz 380 / 110, 220
- Πυκνωτές ARCOYRONICS ITALIA S.p.A., MKP 1.88/3, 3x66.6μF
- Πυκνωτές FRANCO LKI, 5-400-D50, 3x33.2μF
- Πυκνωτές FRANCO LKI, 2.5-400-D50, 3x16.6μF
- Πυκνωτές τύπου Film, EPCOS B32332-180, 3x15μF
- Αναλυτής Ενέργειας, LMG 450, ZES ZIMMER
- Ηλεκτρονικό Φορτίο, EA-EL 9750-25, 750V, 25A, 2400W, 800R
- Συστοιχίες Ωμικών Αντιστάσεων, 50Ω, 1kW
- Εργαστηριακός Αντιστροφέας Ισχύος, 0-800VDC, 3x0-400VAC, 3kVA
- Τροφοδοτικά TENMA, 0-60V, 0-6A
- Ψηφιακοί Παλμογράφοι SIGLENT SDS 1072CNL

Στα Σχήματα 2 και 3 παρουσιάζονται φωτογραφίες της διάταξης και του εξοπλισμού. Να σημειωθεί ότι σε όλες τις μετρήσεις, το συμμετρικό φορτίο αποτελείται από τριφασική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης και ωμικό φορτίο στην πλευρά συνεχούς. Το ωμικό φορτίο έχει δύο κομμάτια, συνδεδεμένα σε σειρά: ένα σταθερό φορτίο 480Ω (περίπου 540 W) και ένα μεταβλητό φορτίο 0 - 800Ω. Το μεταβλητό φορτίο είναι ηλεκτρονικό και μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ωμική αντίσταση είτε ως φορτίο σταθερής ισχύος. Από την ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου του ρεύματος δευτερεύοντος, προκύπτει ότι στο φορτίο των 480Ω ο αριθμός των μη γραμμικών φορτίων με αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος ίσο με το ανώτατο επιτρεπτό όριο, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 61000-3-2, είναι $X$=0.15 (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013).



Σχήμα 2: Πειραματική διάταξη



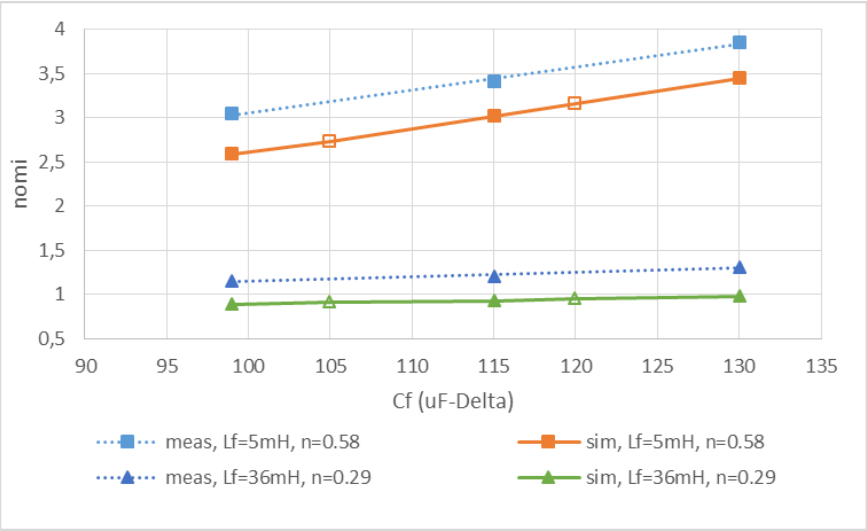
Σχήμα 3: Αντιστροφέας

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης και τιμών των παραμέτρων του κυκλώματος. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από την εφαρμογή των θεωρητικών

εξισώσεων, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η καταλληλόλητα της μεθοδολογίας σχεδιασμού Φ/Β συστήματος με βελτιωμένη ποιότητα ισχύος (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013). Στις καμπύλες των θεωρητικών αποτελεσμάτων υπάρχουν σημεία μη συμπαγή, για τα οποία δεν υπάρχει αντίστοιχη πειραματική τιμή. Παρουσιάζονται, ωστόσο, προκειμένου να καταδειχθεί πληρέστερα η τάση αλλαγής κάθε δείκτη στις μεταβολές των παραμέτρων.

### 3.2. Μετρήσεις υπό συμμετρικό φορτίο – υπολογισμός συντελεστή ισχύος αντιστροφέα

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη *nomi*, συναρτήσει των $C_f$, $L_f$ και $n$, όπως προκύπτουν από τις εργαστηριακές μετρήσεις και τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Η αύξηση της χωρητικότητας και του λόγου του μετασχηματιστή αυξάνει το *nomi*, ενώ η μεταβολή της αυτεπαγωγής του φίλτρου δεν έχει καμία επίδραση. Η διαφορά μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων οφείλεται κυρίως στις πραγματικές τιμές των στοιχείων, οι οποίες διαφέρουν από τις ονομαστικές και στο βαθμό απόδοσης του συστήματος, ο οποίος στην θεωρητική ανάλυση θεωρείται μοναδιαίος. Σημαντική είναι η σύμπτωση του τρόπου μεταβολής του *nomi* συναρτήσει των $C_f$, $L_f$ και $n$, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της θεωρητικής προσέγγισης και του σχεδιασμού του συστήματος στις προηγούμενες εργασίες (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013).

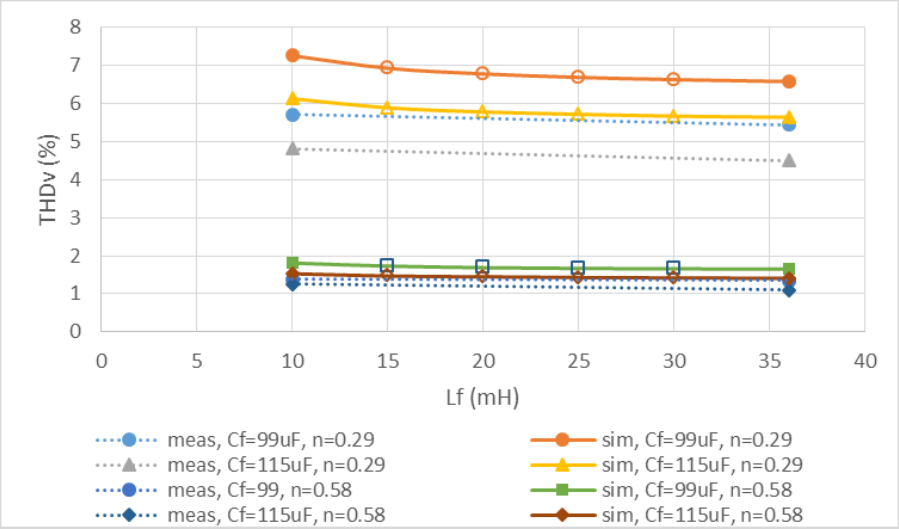



Σχήμα 4: Πειραματικός και θεωρητικός υπολογισμός του δείκτη *nomi* συναρτήσει των παραμέτρων του υπό εξέταση συστήματος

### 3.3. Ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου της τάσης και του ρεύματος του φορτίου για το μέγιστο συμμετρικό φορτίο

Για το μέγιστο συμμετρικό φορτίο και για διάφορες τιμές των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου της τάσης του φορτίου και

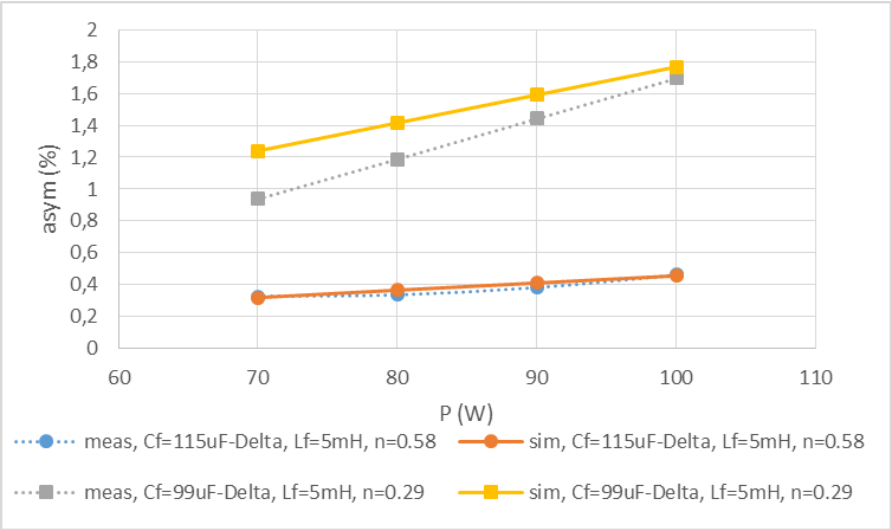
υπολογίζεται ο $THD_V$. Οι τιμές του $THD_V$ που υπολογίστηκαν με χρήση των εργαστηριακών μετρήσεων συγκρίνονται με τις εκτιμήσεις των θεωρητικών υπολογισμών για κάθε περίπτωση. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις και οι θεωρητικοί υπολογισμοί. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καταδεικνύουν ότι αύξηση των στοιχείων του φίλτρου και του λόγου μετασχηματιστή συνεπάγονται μείωση του $THD_V$. Όπως και στην περίπτωση του *nomi* οι τιμές των στοιχείων και ο βαθμός απόδοσης είναι οι κύριες αιτίες της διαφοράς μεταξύ εργαστηριακών αποτελεσμάτων και θεωρητικών υπολογισμών.




Σχήμα 5: Πειραματικός και θεωρητικός υπολογισμός του δείκτη $THD_V$ συναρτήσει των παραμέτρων του υπό εξέταση συστήματος

### 3.4. Ανάλυση της ασυμμετρίας

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της ασυμμετρίας γύρω από το μέγιστο συμμετρικό φορτίο (540W), για ασύμμετρο μονοφασικό φορτίο μεταβάλλεται από 70W έως 100W. Η ασσυμετρία μεταβάλλεται ευθέως με την αύξηση της χωρητικότητας του φίλτρου, ενώ μειώνεται με την αύξηση του λόγου του μετασχηματιστή. Εκτός από τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος και το βαθμό απόδοσης του συστήματος, οι διαφορές στην περίπτωση της ασυμμετρίας τάσης οφείλονται και στο γεγονός ότι η τάση του φορτίου παρουσιάζει ασυμμετρία ακόμη και υπό συμμετρική φόρτιση, λόγω των ασυμμετριών των πηνίων και των πυκνωτών.




Σχήμα 6: Πειραματικός και θεωρητικός υπολογισμός της ασσυμετρίας συναρτήσει των παραμέτρων του υπό εξέταση συστήματος

## 4. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα των δεικτών ποιότητας ισχύος ενός αυτόνομου Φ/Β συστήματος για διάφορες τιμές των παραμέτρων του. Οι εργαστηριακές μετρήσεις έχουν σκοπό την επαλήθευση των θεωρητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή κατάλληλης μεθόδου, που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε σε προηγούμενες εργασίες (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013), και την επιβεβαίωση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης μεθόδου. Η σύγκλιση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και θεωρητικών υπολογισμών κρίνεται ικανοποιητική, καταδεικνύοντας της ορθότητα της αναπτυχθείσας μεθοδολογίας (Christodoulou et al. 2014, Παπανικολάου κ.α. 2013). Σημαντική, επίσης, παράμετρος είναι η επιβεβαίωση της τάσης μεταβολής των μεγεθών των σχετιζομένων με τους δείκτες ποιότητας ισχύος συναρτήσει των παραμέτρων του συστήματος. Βασική αιτία για τις εμφανιζόμενες διαφοροποιήσεις μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων, είναι ο βαθμός απόδοσης, ο οποίος στη θεωρητική ανάλυση θεωρείται μοναδιαίος. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση της ασυμμετρίας τάσης οι διαφορές οφείλονται και στο γεγονός ότι η τάση του φορτίου παρουσιάζει ασυμμετρία ακόμη και υπό συμμετρική φόρτιση, λόγω των ασυμμετριών των πηνίων και των πυκνωτών. Επιπλέον, οι τιμές των αυτεπαγωγών, των χωρητικοτήτων και του λόγου μετασχηματισμού παρουσιάζουν απόκλιση σε σχέση με τις ονομαστικές τους τιμές, επηρεάζοντας ασφαλώς τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

## 5. Βιβλιογραφία

Christodoulou C.A., Papanikolaou N.P. and Gonos I.F., "*Power quality analysis for 3-phase standalone photovoltaic installations: a case study*", Proceedings of the 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution (MEDPOWER '14), November 2 – 5, Paper 161, 2014, Athens, Greece

Christodoulou C.A., Papanikolaou N.P. and Gonos I.F., "*Design of Three-Phase Autonomous PV Residential Systems with Improved Power Quality*", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, Issue 4, pp. 1027-1035, October 2014

Christodoulou C.A., Papanikolaou N.P. and Gonos I.F., "*Power quality assessment for autonomous residential PV systems*", Proceedings of the 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2014), pp. 650-654, Bucharest, May 25-28, 2014, Romania

Enslin J. and Snyman D., "*Combined low-cost, high-efficient inverter, peak power tracker and regulator for PV applications*", IEEE Trans. Power Electron, vol. 6, no. 1, pp. 73-82, Jan. 1991

EPRI Power Electronics Applications Center, "Input performance of ASDs during supply voltage unbalance", Power quality testing network PQTN Brief no. 28, 1996

Fakha H., Lu D. and Francois B., "*Power control design of a battery charger in a hybrid-active PV generator for load-following applications*", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 1, pp. 85-94, Jan. 2011

Geng H., Xu D., Wu B. and Huang W., "*Direct voltage control for a stand-alone wind-driven self-excited induction generator with improved power quality*", IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 8, pp. 2358-2368, Aug. 2011

Hajizadeh A., Golkar M. and Feliachi A., "Voltage control and active power management of hybrid fuel-cell/energy-storage power conversion system under unbalanced voltage sag", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 4, pp. 1195-1208, Dec. 2010.

Hamzeh M., Ghazanfari A., Mokhtari H. and Karimi H., "*Integrating hybrid power source into an islanded MV microgrid using CHB multilevel inverter under unbalanced and nonlinear load conditions*", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 28, no. 3, pp. 643-651, Sep. 2013

IEEE Recommended Practice for electric power distribution for industrial plants, ANSI/IEEE Std. 141-1993, (Red Book)

IEEE Recommended Practice for electric power systems in commercial buildings, ANSI/IEEE Std. 241-1990, (Gray Book)

IEEE Standard Test Procedure for polyphase induction motors and generators, IEEE Standard 112, 1991

Jouanne A. and Banerjee B., "*Assessment of voltage unbalance*", IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct. 2001

Kim S., Song H. and Nam K., "*Idling port isolation control of three-port bidirectional converter for EVs*", IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 5, pp. 2495-2506, May 2012

Lijie D., Yang L. and Yiqun M., "*Comparison of high capacity SVC and STATCOM in real power grid*", Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), vol.1, pp.993-997, 2010, Changsha, China

Motors and generators, NEMA Standards Publication no. MG 1-1993

PCS 6000 STATCOM to compensate long power line with heavy load, Reference case study, ABB Advanced Power Electronics, Feb. 2010

Pillay P. and Manyage M., "*Definitions of voltage unbalance*", IEEE Power Eng. Rev., pp. 50-51, May 2001

Rashid M. H., Power electronics handbook, Academic Press, 2001, ch. 14

Singh B. and Sharma S., "*Stand-alone single-phase power generation employing a three-phase isolated asynchronous generator*", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, no. 6, pp. 2414-2423, Nov./Dec. 2012

Vandoorn T., Meersman B., Degroote L., Renders B. and Vandevelde L., "*A control strategy for islanded microgrids with DC-Link voltage control*", IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, pp. 703-713, Jan. 2011

Voltage characteristics in public distribution systems, Standard EN 50160, Jul. 2004

Wai R., Lin C., Huang Y. and Chang Y., "*Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications*", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 4, pp. 1542-1555, Apr. 2013

Παπανικολάου Ν.Π., Χριστοδούλου Χ.Α. και Γκόνος Ι.Φ., "*Σχεδιασμός τριφασικού αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος υψηλής ποιότητας ισχύος*", Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Ενότητα Δ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Δ5, 12- 13 Δεκεμβρίου 2013, Αθήνα