Ακρίβεια στη Μέτρηση της Ηλεκτρικής Ισχύος και Ενέργειας υπό μη-Ημιτονοειδείς Συνθήκες

Χ. Δημουλιάς, Κ. Γκουραμάνης, Θ. Παπαδόπουλος, Ι. Παπαιωάννου, Π. Ντοκόπουλος

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών
Εργαστήρια Ηλεκτρικών Μηχανών και Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
Θεσσαλονίκη
Τηλ. 2310 995960
e-mail: chdimoul@auth.gr, kostisg@eng.auth.gr

Περίληψη-Οι μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών που πραγματοποιούνται σήμερα στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι στην πλειοψηφία τους, προσανατολισμένες στο να μετρούν ημιτονοειδή μεγέθη. Αυτή η εργασία ασχολείται με τα προβλήματα που προκαλούνται στη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας, όταν η τάση και το ρεύμα δεν είναι ημιτονοειδή. Ειδικότερα, γίνεται ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και εξετάζεται η ακρίβεια που παρουσιάζουν οι διάφοροι τύποι των μετρητικών οργάνων όταν χρησιμοποιούνται σε μη-ημιτονοειδείς συνθήκες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αύξηση των μη γραμμικών φορτίων που βρίσκονται στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει σαν αποτέλεσμα τη μόλυνση του δικτύου με ανώτερες αρμονικές καθιστώντας τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος μη ημιτονοειδείς. Μία από τις πλέον σημαντικές επιπτώσεις που έχει η ύπαρξη των αρμονικών στα ηλεκτρικά συστήματα είναι η επίδραση τους στην ακρίβεια των μετρητικών οργάνων. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται τα προβλήματα που προκαλούνται στη μέτρηση της ηλεκτρικής ισχύος, όταν η τάση και το ρεύμα δεν είναι ημιτονοειδή.

Από οικονομοτεχνική άποψη το θέμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς ουσιαστικά όλα τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζονται στην καταγραφή της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας που γίνεται από τους πελάτες. Μέσω της ορθής καταγραφής της κατανάλωσης γίνεται η αντίστοιχη χρέωσή της ως τελικό προϊόν. Αν δημιουργηθούν αμφιβολίες σχετικά με την αξιοπιστία της καταγραφής (άρα και χρέωσης) της ηλεκτρικής ενέργειας, τότε θα δημιουργηθούν σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου.

Προβλήματα αξιοπιστίας δημιουργούνται όταν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού δικτύου περιέχουν ανώτερες αρμονικές. Τα προβλήματα οφείλονται στο γεγονός, ότι ο τρόπος χρέωσης των καταναλωτών και τα μετρητικά όργανα που είναι εγκατεστημένα, είναι σχεδιασμένα για να μετρούν ημιτονοειδείς ποσότητες, με αποτέλεσμα όταν υπάρχουν αρμονικές να οδηγούνται σε σημαντικά σφάλματα. Τα σφάλματα που εισάγονται οφείλονται κυρίως σε δύο λόγους. Αφενός, υπάρχει έλλειψη αναγνωρισμένων – κοινά αποδεκτών ορισμών για τα μη ημιτονοειδή συστήματα που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση σε διάφορες περιπτώσεις διαφορετικών ορισμών που δίνουν προφανώς διαφορετικά αποτελέσματα. Αφετέρου εισάγονται σφάλματα από τα ίδια τα όργανα μέτρησης όταν μετρούν μη ημιτονοειδή μεγέθη.

Στην παρούσα εργασία αναλύονται εκτενώς οι δύο αυτές αιτίες εισαγωγής σφαλμάτων. Τα μετρητικά όργανα κατατάσσονται ανάλογα με την ηλεκτρική ποσότητα που μετρούν και εξετάζεται το σφάλμα που εισάγεται σε κάθε κατηγορία λόγω της ύπαρξης αρμονικών.

2. ΟΡΙΣΜΟΙ ΙΣΧΥΩΝ

2.1. Ημιτονοειδή Συστήματα

Σύμφωνα με το IEEE Std. 1459-2000 [2] για τη γενική περίπτωση μονοφασικού κυκλώματος όπου μία ημιτονοειδής τάση

$$u(t)=\sqrt{2}V\sin\omega t \qquad (1)$$

εφαρμόζεται στα άκρα ενός γραμμικού φορτίου, παράγεται ημιτονοειδές ρεύμα της μορφής:

$$i(t) = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς ενός μονοφασικού φορτίου δίνονται ως εξής:

$$P=VI\cos\theta \text{ και } Q=VI\sin\theta \quad (3)$$

Η Φαινόμενη ισχύς ορίζεται αντίστοιχα ως:

$$S=VI=\sqrt{(P^2+Q^2)} \quad (4)$$

Για τα τριφασικά φορτία οι ισχυείς P και Q είναι ίσες με το άθροισμα των τριών μονοφασικών ισχύων. Όμως για τη τριφασική Φαινόμενη Ισχύ υπάρχουν τρεις διαφορετικοί ορισμοί για τα ημιτονοειδή τριφασικά συστήματα [2] – [3], η αριθμητική (arithmetic S_A), η διανυσματική (vector S_V) και η effective apparent power S_e.

Προκύπτει, ότι για ημιτονοειδή κυκλώματα οι τρεις ορισμοί της φαινόμενης ισχύος για τις περιπτώσεις των μονοφασικών και των τριφασικών συμμετρικών κυκλωμάτων συμπίπτουν κι έτσι δε δημιουργείται κανένα πρόβλημα από τη χρήση οποιουδήποτε από αυτούς [2].

Αντίθετα, στα τριφασικά μη συμμετρικά κυκλώματα οι τρεις ορισμοί των ισχύων δε δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Αποδεικνύεται ότι κατά κανόνα μεταξύ των ορισμών της φαινόμενης ισχύος ισχύει η σχέση $S_V \le S_A \le S_e$. Αν και κατά κύριο λόγο οι ορισμοί της αριθμητικής και της διανυσματικής φαινόμενης ισχύος είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται λόγω των απλών εκφράσεών τους, για την περίπτωση των μη συμμετρικών τριφασικών κυκλωμάτων η πραγματική φαινόμενη ισχύς υπολογίζεται με τον ορισμό της S_e. Αυτή η διαπίστωση στηρίζεται στο γεγονός ότι μόνο η S_e ικανοποιεί το κριτήριο που λέει ότι οι απώλειες στο ζυγό του συστήματος πρέπει να είναι γραμμική συνάρτηση του τετραγώνου της φαινόμενης ισχύος του φορτίου που τροφοδοτεί.

2.2. Μη - Ημιτονοειδή Συστήματα

Αν και υπάρχει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον για τη δημιουργία ενός κοινά αποδεκτού θεωρητικού υπόβαθρου σχετικά με τις ισχύεις των μη γραμμικών συστημάτων, δεν υπάρχει ακόμη κοινά αποδεκτή θεωρία που να το περιγράφει.

Όλες οι εργασίες που έχουν εκδοθεί πάνω στο θέμα προσανατολίζονται στον ορισμό μίας αέργου ισχύος που ονομάζεται *distortion power D* η οποία δεν έχει κάποια φυσική σημασία και ο λόγος ορισμού της είναι η αιτιολόγηση της αέργου ισχύος που μεταφέρεται από τις αρμονικές τάσης και ρεύματος [1], [4], [5], [16].

Οι δύο κύριες θεωρίες που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα σύμφωνα με το [2], είναι οι εξής:

- ✓ Η πρόταση που στηρίζεται στην αρχική εργασία του *Budeanu* [6] προτείνει τον ορισμό συνολικής αέργου ισχύος Q_B ίσης με το άθροισμα των αέργων ισχύων σε όλες τις αρμονικές $Q_B^2 = (\sum_h V_h I_h \sin\theta_h)^2$ και μίας *Distortion Power D* που πρακτικά περιλαμβάνει τις άεργες ισχύεις που προκαλούνται μεταξύ όρων τάσης και ρεύματος διαφορετικών συχνοτήτων $D^2 = \sum_{\substack{n,n=1 \\ m\neq n}} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2V_m V_n I_m I_n \cos(\theta_m - \theta_n)$

  Αυτές οι δύο ισχύεις σε συνδυασμό με τη συνολική ενεργό ισχύ σε όλες τις συχνότητες δίνουν τη φαινόμενη ισχύ $S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2$.
- ✓ Η πρόταση που στηρίζεται στην εργασία του *Fryze* [7] και υποστηρίζει ότι η θεωρία του *Budeanu* δεν έχει φυσική υπόσταση καθώς δεν μπορούν να αθροισθούν αλγεβρικά άεργες ισχύεις διαφορετικών συχνοτήτων. Προτείνει λοιπόν μία διαφορετική θεωρία στην οποία χωρίζει το συνολικό μη ημιτονοειδές ρεύμα σε δύο συνιστώσες και ορίζει την ενεργό και την άεργο ισχύ ως εξής $P = i_a V$ και $Q_F = i_r V$, οπότε $S = V_{rms} I_{rms} = \sqrt{P^2 + Q_F^2}$.

Και οι δύο παραπάνω εκφράσεις αναφέρονται στο [2], σαν προτάσεις για τον υπολογισμό των ισχύων. Επίσης προτείνεται ο διαχωρισμός της ισχύος στη θεμελιώδη συχνότητα και στις αρμονικές της, θεωρώντας την ισχύ στη θεμελιώδη κύριο προϊόν και στις αρμονικές παραπροϊόν, ή αλλιώς *μόλυνση*.

Έτσι ορίζεται η φαινόμενη ισχύς ως $S = VI$ η οποία χωρίζεται ως εξής:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = S_1^2 + S_N^2 .$$

Όπου η S_1 είναι η φαινόμενη ισχύς που προκαλείται από την τάση και το ρεύμα στη θεμελιώδη συχνότητα και η S_N ορίζεται ως μη θεμελιώδης φαινόμενη ισχύς ίση με $S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2}$.

3. ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

3.1. Τεχνολογίες Μετρητικών Οργάνων

Το πλέον διαδεδομένο μετρητικό όργανο που χρησιμοποιείται κατά κανόνα στην Ελλάδα για τη χρέωση καταναλωτών, είναι το επαγωγικό ή αλλιώς ηλεκτρομαγνητικό. Η λειτουργία του στηρίζεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η ροή ρεύματος μέσα από ένα πηνίο και συγκεκριμένα στη ροπή που δημιουργείται μεταξύ δύο τέτοιων διασταυρούμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που βρίσκονται υπό γωνία. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δύο διασταυρούμενα πηνία σε συνδεσμολογίες που ποικίλουν ανάλογα με την ποσότητα που μετριέται.

Τα επαγωγικά όργανα χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος αγοράς και συντήρησης καθώς και από ικανοποιητική ακρίβεια στη μέτρηση ημιτονοειδών μεγεθών σε μία συγκεκριμένη συχνότητα. Όμως, η απόκρισή τους σε άλλες αρμονικές συχνότητες είναι ιδιαίτερα προβληματική, κάτι που τους δίνει ένα σοβαρό μειονέκτημα σχετικά με τη χρήση τους στα σημερινά δίκτυα.

Εκτός από τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα, σήμερα χρησιμοποιούνται και άλλα μετρητικά που εφαρμόζουν διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Όλα τα καινούργια όργανα είναι πλέον ηλεκτρονικά χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διατάξεις σε διάφορα σημεία τους. Τα πλέον ακριβή εφαρμόζουν δειγματοληψία επί των στιγμιαίων τιμών των υπό μέτρηση ποσοτήτων. Η ακρίβεια των οργάνων είναι προφανώς συνάρτηση της συχνότητας δειγματοληψίας.

3.2. Μέτρηση Ωφέλιμης Ενέργειας (Watt-Hour Meters)

3.2.1. Γενικά

Το συμπέρασμα από το σύνολο της αντίστοιχης βιβλιογραφίας [8, 9, 10, 11], είναι ότι η ακρίβεια των μετρητών ωφέλιμης ενέργειας ανεξαρτήτως της τεχνολογίας που εφαρμόζουν (επαγωγικοί, εξελιγμένοι επαγωγικοί, αναλογικοί, ψηφιακοί, solid-state) είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα. Αυτό δεν οφείλεται τόσο στην ακρίβεια των ίδιων των οργάνων, αλλά στο γεγονός ότι ακόμα και όταν το δίκτυο εμφανίζει υψηλή αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος, η παραμόρφωση της τάσης είναι κατά κανόνα χαμηλή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς στις συχνότητες εκτός της θεμελιώδους να είναι ιδιαίτερα μικρή κι έτσι τα σφάλματα που οφείλονται στην αδυναμία των οργάνων να μετρήσουν τις αρμονικές δε μειώνουν σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων [8].

Για να μελετηθεί η ακρίβεια των οργάνων εξετάστηκαν οι αναφορές που υπάρχουν στην αντίστοιχη βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών από τις δύο αναφορές [8] και [9] που εξετάστηκαν φαίνονται στον Πίνακα Ι:

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

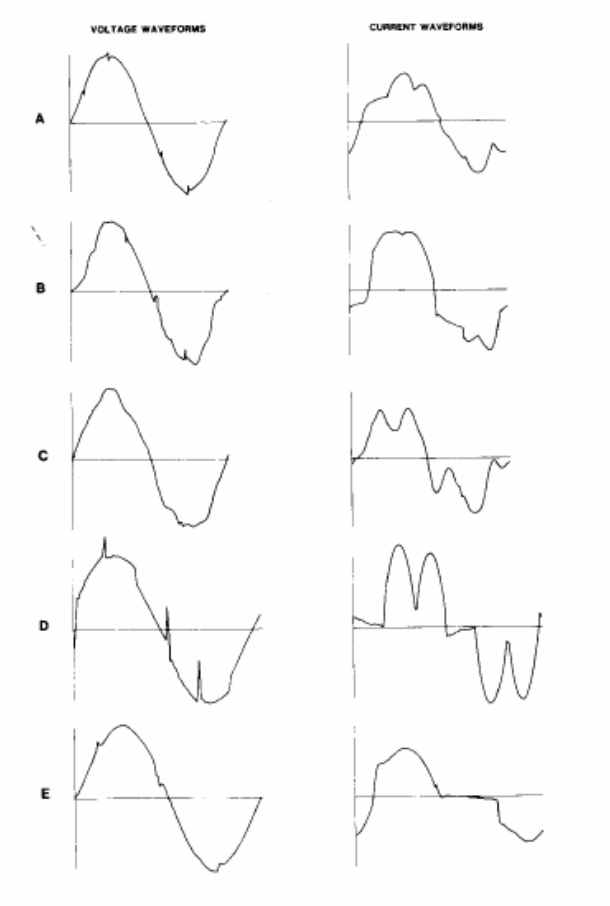
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%) ΤΩΝ WATT-HOUR METERS

Τύπος Οργάνου	*Μονοφασικά Φορτία*	*Τριφασικά Φορτία*	
		Συμμετρικά	*Μη Συμμετρικά*
Επαγωγικά	*+9.14*	*-1.50 έως +2.00*	*-5.57 και -8,75*
Solid-State	*+7.97*	*---*	*-3.00 και -9.54*
TDM Type	*---*	*-0.09 έως +0.40*	*-0.04 και -2.56*
Digital Sampling)	*+9.46*	*+0.03 έως +0.80*	*-0.18 και -3.24*

Τα όργανα κατηγοριοποιούνται στον Πίνακα Ι ανάλογα με την αρχή λειτουργίας που εφαρμόζουν για τη μέτρηση της ενέργειας. Έτσι εξετάζονται επαγωγικά όργανα καθώς και ηλεκτρονικά Solid-State, Time-Division Type και ψηφιακά που εφαρμόζουν δειγματοληψία (Digital sampling).

Η εξέταση των οργάνων για μέτρηση συμμετρικών τριφασικών φορτίων [8] όπως φαίνεται στον Πίνακα Ι δείχνει ότι τα σφάλματα είναι μικρά για το σύνολο σχεδόν των μετρητικών οργάνων. Τα μέγιστα σφάλματα παρατηρούνται στα επαγωγικά όργανα (από -1.5% έως +2%), αλλά δεν ξεπερνούν κατά πολύ τις ανοχές των οργάνων.

Τα όργανα εξετάστηκαν στις παρακάτω πέντε κυματομορφές τάσης και ρεύματος, καθώς και για περιπτώσεις φορτίων που τροφοδοτούνται από ένα *SCR* υπό γωνίες έναυσης $\alpha=30^0$, 60^0, 90^0.



Σχήμα. 1: Κυματομορφές Τάσης Ρεύματος [8]

Τα σφάλματα των ίδιων οργάνων όταν χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μη συμμετρικών τριφασικών φορτίων είναι σαφώς υψηλότερα.

Τα ασύμμετρα τριφασικά φορτία στα οποία εξετάστηκαν τα τριφασικά *Watt-hour meters* είναι:

1. Κτίριο γραφείων με φορτίο 980*kW* που τροφοδοτεί PCs, φωτοτυπικά, φωτισμό, κ.α.
2. Ένα αντλιοστάσιο με δύο αντλίες 150HP ελεγχόμενες από δύο 6-pulse ASD.

Τα σφάλματα των μετρητών κατά τη μέτρηση του κτιρίου γραφείων όπως φαίνονται στον Πίνακα Ι είναι μικρά για όλα τα ψηφιακά μετρητικά όργανα αλλά αρκετά υψηλά (-5.57%) για το επαγωγικό. Κατά τη μέτρηση του αντλιοστασίου εξαιτίας της υψηλής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος οι μετρήσεις παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά σφαλμάτων για όλα τα μετρητικά όργανα (από 2.56 έως και 9.54).

Για την εξέταση της ακρίβειας των μονοφασικών μετρητών ωφέλιμης ενέργειας στην [9] δίνονται τα αποτελέσματα από τη μέτρηση παροχής αντλίας θερμότητας, οδηγούμενης από ASD χωρίς κανένα φίλτρο.

Τα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα Ι, δείχνουν ότι κατά τις μετρήσεις διαπιστώθηκαν σημαντικά σφάλματα και για τα τρία όργανα (από 7.97% έως και 9.46%). Τα σφάλματα αυτά αποδίδονται στην υψηλή αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που έχει το συγκεκριμένο φορτίο.

3.3. Μέτρηση Αέργου Ενέργειας (Var-Hour Meters)

Ο τρόπος λειτουργίας των *Var-hour meters* (Μετρητών Αέργου Ενέργειας) δε διαφέρει από αυτόν των *Watt-hour meters,* καθώς είναι ουσιαστικά τα ίδια όργανα με τη διαφορά ότι για να μετρηθεί η άεργος ενέργεια το διάνυσμα της τάσης στρέφεται τεχνητά κατά 90^0 ώστε να γίνει συμφασικό με το διάνυσμα του άεργου ρεύματος. Αυτό γίνεται είτε μηχανικά στα επαγωγικά όργανα (στροφή του αντίστοιχου πηνίου), είτε τεχνητά στα ψηφιακά όργανα (τεχνητή χρονική καθυστέρηση της κυματομορφής της τάσης και ένα τέταρτο της περιόδου).

Λόγω της έλλειψης κοινά αποδεκτής θεωρίας για την άεργο ενέργεια σε συστήματα με αρμονική παραμόρφωση κατά τη μέτρηση της αέργου ενέργειας πρέπει να αναφέρεται ο ορισμός που εφαρμόζεται. Συνήθως η χρήση διαφορετικών ορισμών είναι η κυριότερη αιτία σφαλμάτων. Σαν αποτέλεσμα δεν υπάρχουν αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με την ακρίβεια των εν λόγω μετρητικών οργάνων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%) ΤΩΝ VAR-HOUR METERS

	Μέτρηση Var-Hours		*Μέτρηση PF*	
	Επαγωγικό	*Solid-State*	*Επαγωγικό*	*Solid-State*
Ημιτονοειδείς κυματομορφές	*2%*	*0,2%*		
PWM Inverter	*-25% έως -10%*		*25% έως 10%*	
TRIAC (α=60–90–120)	*-40%*		*10% έως 40%*	
Μη ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης	*-10% έως -3%*		*2.5% έως 1%*	

Στην [12] στην οποία εξετάζονται δύο μετρητές αέργου ενέργειας, σαν ορισμός αναφοράς υιοθετείται ο ορισμός του *Fryze* που δουλεύει στο πεδίο του χρόνου. Η εξέταση της ακρίβειας γίνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τρεις περιπτώσεις φορτίων με πρότυπες τιμές που μετρήθηκαν με τη χρήση παλμογράφου και Η/Υ.

Τα δύο όργανα που εξετάζονται είναι ένα επαγωγικό και ένα ηλεκτρονικό (solid state). Τα αποτελέσματα της εξέτασης των μετρητικών οργάνων δίνονται στον Πίνακα ΙΙ για τις διάφορες περιπτώσεις φορτίου.

Διαπιστώνεται ότι τα εν λόγω όργανα παρουσιάζουν ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά σφάλματος που φθάνουν μέχρι και -40% σε κάποιες περιπτώσεις. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο οργάνων φαίνεται ότι το επαγωγικό υστερεί σε ακρίβεια σε σχέση με το ηλεκτρονικό. Τα ιδιαίτερα υψηλά σφάλματα αποδίδονται στην εφαρμογή πολλαπλών ορισμών της αέργου ισχύος, στον τρόπο στροφής του διανύσματος της τάσης για τη μέτρηση της αέργου ισχύος και στην απόκριση των οργάνων κατά τη μέτρηση των ισχύων στις αρμονικές συχνότητες.

3.4. Μέτρηση Ενεργού Ισχύος (kW-Demand Meters)

Σύμφωνα με τη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων η ηλεκτρική ισχύς σε ένα τριφασικό φορτίο δίνεται:

$$P = \sqrt{3} V_{ll} I_l \cos\phi \qquad (5)$$

όπου η τάση είναι η πολική και το ρεύμα είναι το ρεύμα γραμμής.

Η σχέση υπολογισμού (5) ισχύει μόνο για τριφασικά συστήματα πλήρως συμμετρικά.

Σε αντίθετη περίπτωση για μη συμμετρικά φορτία ο υπολογισμός ανάλογα με το αν το σύστημα είναι συνδεδεμένο σε αστέρα ή σε τρίγωνο γίνεται σύμφωνα με τους τύπους:

$$\begin{aligned} P_{wye} &= V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3 \\ P_{Delta} &= V_{ab} I_1 + V_{bc} I_3 \end{aligned} \qquad (6)$$

Στην [13] γίνεται εξέταση 4 διαφορετικών τύπων μετρητών ενεργού ισχύος υπό ημιτονοειδείς κυματομορφές για επτά διαφορετικές περιπτώσεις φορτίων.

Τα μετρητικά όργανα που εξετάζονται είναι:

1. Ένα θερμικό όργανο που αποτελείται από δύο *bimetallic coils*
2. Τρία ψηφιακά όργανα που υπολογίζουν την ισχύ κάνοντας δειγματοληψία των κυματομορφών τάσης και ρεύματος.

Τα όργανα εξετάζονται κατά τη μέτρηση σε επτά διαφορετικά γραμμικά φορτία μεταβαλλόμενης ισχύος. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα ΙΙΙ.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ
ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (%) ΤΩΝ KW DEMAND METERS

Τύπος οργάνου	*Ποσοστό σφάλματος που υπολογίσθηκε κατά τη δοκιμή σε επτά διαφορετικά ημιτονοειδή φορτία*
Θερμικό με bimetallic coils	*-2.1% έως -9.3%*
3 Ψηφιακά όργανα με εφαρμογή δειγματοληψίας	*-6% έως +5.3%*

Διαπιστώνεται ότι σύμφωνα με την [13] ακόμη και για μεταβαλλόμενα ημιτονοειδή φορτία η μέτρηση ισχύος παρουσιάζει σοβαρές αποκλίσεις που φθάνουν μέχρι και -9.3%.

3.5. Μέτρηση Αέργου Ισχύος (kVar-Demand Meters)

Τα όργανα μέτρησης αέργου ισχύος όπως και τα αντίστοιχα της αέργου ενέργειας χαρακτηρίζονται από σημαντικά ποσοστά σφαλμάτων. Λόγω της έλλειψης κοινά αποδεκτής θεωρίας για την αέργο ισχύ οι βιβλιογραφικές αναφορές είναι επίσης περιορισμένες.

Στην [12], εξετάζονται τα εξής όργανα μέτρησης αέργου ισχύος:

1. Ένα ψηφιακό πολύμετρο που υπολογίζει τις ισχύεις κάνοντας δειγματοληψία επί των κυματομορφών. Ο υπολογισμός της αέργου ισχύος γίνεται μέσω τεχνητής καθυστέρησης των τιμών της τάσης κατά ένα τέταρτο της περιόδου.
2. Ένα ηλεκτρονικό *solid-state* όργανο.
3. Δύο επαγωγικά (*Induction Watt-hour Meters*) τα πηνία των οποίων έχουν προσαρμοσθεί έτσι, ώστε να μετράνε άεργο.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω οργάνων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ενός πρότυπου ψηφιακού οργάνου. Οι δοκιμές των οργάνων γίνονται αρχικά υπό ημιτονοειδείς κυματομορφές και στη συνέχεια υπό οκτώ μη ημιτονοειδείς.

Τα μέγιστα σφάλματα που παρατηρήθηκαν ανά όργανο μέτρησης είναι:

1. Ψηφιακό με εφαρμογή δειγματοληψίας -42%
2. Solid-State -41%
3. Δύο επαγωγικά όργανα -42 και -32% αντίστοιχα

Τα σημαντικά λάθη στις μετρήσεις της αέργου ισχύος αποδίδονται σε δύο λόγους. Εκτός από τα σφάλματα που οφείλονται στην ακρίβεια του οργάνου, σημαντικό σφάλμα εισάγεται λόγω της χρήσης διαφορετικών ορισμών αέργου ισχύος. Μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις τα σφάλματα είναι κατά κύριο λόγο σφάλματα λόγω ορισμών και λιγότερο λόγω της ίδιας της μέτρησης.

3.6. Μέτρηση Φαινόμενης Ισχύος (kVA-Demand Meters).

Η πλέον συνήθης πρακτική για τη χρέωση των καταναλωτών στο δίκτυο της Μέσης και Υψηλής Τάσης είναι η μέτρηση ενέργειας (ενεργού και αέργου). Σε ορισμένες χώρες (π.χ. στον Καναδά) η χρέωση των καταναλωτών στηρίζεται στη μέτρηση της ενέργειας και της φαινόμενης ισχύος [15]. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν αρκετές βιβλιογραφικές αναφορές που ασχολούνται με την ακρίβεια της μέτρησης των *VA Demand Meters*. Το σφάλμα που παρουσιάζουν οι μετρητές φαινόμενης ισχύος μπορεί να φθάσει μέχρι και 30% [8, 14]. Αυτό το σφάλμα οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους:

1. Τα όργανα σχεδιάζονται ώστε να μετρούν με ακρίβεια ημιτονοειδή μεγέθη στην πρώτη αρμονική, κι όχι μη ημιτονοειδείς ποσότητες.
2. Χρησιμοποιούνται διάφοροι ορισμοί φαινόμενης ισχύος που ταυτίζονται μόνο σε περιπτώσεις γραμμικών συμμετρικών φορτίων. Όταν τα φορτία είναι μη γραμμικά και μη συμμετρικά, η χρήση διαφορετικών ορισμών οδηγεί σε σφάλματα.

Οι ορισμοί της φαινόμενης ισχύος που εφαρμόζονται στα μετρητικά όργανα είναι οι εξής:

$S_1 = VI$, $S_2 = (1.11)^2 V_{avg} I_{avg}$ και

$S_3 = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (με $P = \sum V_h I_h \cos\phi$ και $Q = \sum V_h I_h \sin\phi$)

Ανάλογα με τον ορισμό της φαινόμενης ισχύος που χρησιμοποιείται από το κάθε όργανο, υπολογίζεται και ο αντίστοιχος συντελεστή ισχύος:

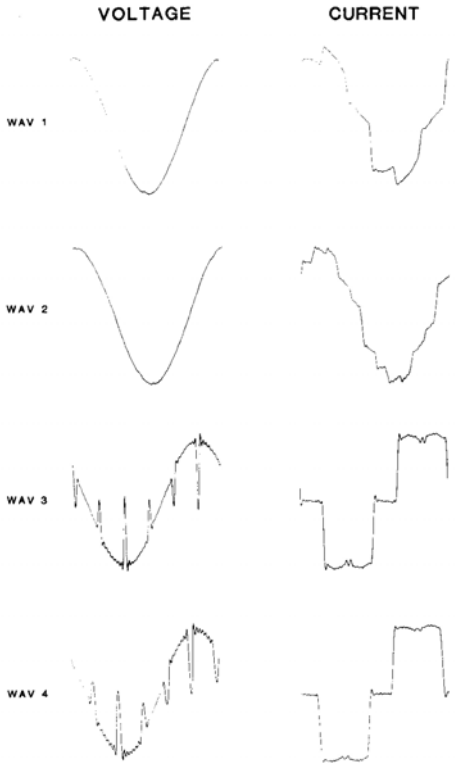
$PF_1 = P / S_1$, $PF_2 = P / S_2$ και $PF_3 = P / S_3$

Από τους παραπάνω ορισμούς η S_1 χρησιμοποιείται σαν ισχύς αναφοράς.

Τα μη-ημιτονοειδή φορτία που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις δίνονται στο Σχήμα 2:

Τα σφάλματα που παρατηρήθηκαν ανά τύπο μετρητικού και ανά τύπο φορτίου δίνονται στον Πίνακα IV.

Τα σφάλματα των μετρητών φαινόμενης ισχύος είναι αρκετά υψηλά, ενώ αυτά που έχουν κυρίως πρακτικό ενδιαφέρον είναι αυτά των μη ημιτονοειδών κυματομορφών. Οι δοκιμές με SCRs έχουν κυρίως ερευνητικό ενδιαφέρον, αφού ένας καταναλωτής είναι μάλλον απίθανο να εμφανίζει τέτοια χαρακτηριστικά φόρτισης στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο (Point of Common Coupling - PCC).



Σχήμα 2: Κυματομορφές Τάσης Ρεύματος διαφόρων ενδεικτικών μη-ημιτονοειδών φορτίων [8]

ΠΙΝΑΚΑΣ IV

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Φορτία	Τύπος οργάνου			
	1.Recti -thermal instrument	*2. Επαγωγικά με μικρο επεξεργαστή*	*3. Time-division type*	*4.Digital Sampling type*
Γραμμικά	*-0.49*	*0.46*	*-0.06*	*0.07*
Μη Γραμμικά	*-30.00*	*-14.00*	*-4.80*	*-15.00*
SCR $(a=30^0)$	*-6.50*	*-0.45*	*-0.11*	*-0.05*
SCR $(a=60^0)$	*-19.00*	*-4.80*	*-0.64*	*-1.30*
SCR $(a=90^0)$	*-35.00*	*-13.00*	*-0.97*	*-7.70*

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία καλύπτεται βιβλιογραφικά το θέμα της μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας και ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο, υπό συνθήκες αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και του ρεύματος.

Η ύπαρξη πλήρους και αιτιολογημένου θεωρητικού υπόβαθρου είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων. Γι' αυτό το λόγο αρχικά εξετάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τους ορισμούς των ηλεκτρικών ισχύων για όλες τις περιπτώσεις των ηλεκτρικών φορτίων. Από τη βιβλιογραφία, αποδεικνύεται ότι αυτό το υπόβαθρο για μη ημιτονοειδή συστήματα δεν υπάρχει και σε κάποιες περιπτώσεις οι έννοιες και οι ορισμοί δεν είναι ξεκάθαροι, αλλά είναι ακόμη αντικείμενο έρευνας.

Στη συνέχεια, εξετάστηκαν οι υπάρχουσες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με την ακρίβεια των ηλεκτρικών οργάνων μέτρησης φαινόμενης, ενεργού και αέργου ισχύος και ενέργειας. Εξετάστηκαν μετρητικά όργανα που εφαρμόζουν όλες τις τεχνολογίες που συναντώνται σήμερα.

Η ανάλυση σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των οργάνων έδειξε ότι τα επαγωγικά όργανα παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ τα σφάλματα που παρουσιάζουν τα ηλεκτρονικά όργανα εξαρτώνται κυρίως από τη συχνότητα δειγματοληψίας.

Εκτός από τον τρόπο λειτουργίας τους, τα όργανα ταξινομήθηκαν και ως προς την ηλεκτρική ποσότητα που μετράνε. Διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια είναι ικανοποιητική κατά τη μέτρηση ενεργού ισχύος και ωφέλιμης ενέργειας, κυρίως λόγω της μικρής ενέργειας στις αρμονικές συχνότητες. Αντίθετα, τα σφάλματα είναι σημαντικά κατά τη μέτρηση αέργου και φαινόμενης ενέργειας. Τα σφάλματα αυτά συσχετίστηκαν με το είδος του οργάνου και του φορτίου που μετρήθηκε. Από την ανάλυση των σφαλμάτων σε κάθε περίπτωση διαπιστώθηκε ότι τα σφάλματα κατά τη μέτρηση της αέργου ενέργειας και ισχύος οφείλονται στην ακρίβεια του οργάνου αλλά και σε έλλειψη κοινά αποδεκτών ορισμών.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] A.E.Emanuel, "Powers in Non-sinusoidal Situations: A Review of Definitions and Physical Meaning", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.3, July 1990

[2] IEEE Std 1459-2000 "Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", *Power Systems Instrumentation and Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society*

[3] A.E.Emanuel, "Apparent Power Definitions for Three-Phase Systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.14, No.3, July 1999

[4] P.S.Filipski, Y.Baghzouz, M.D.Cox, "Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.9, No.3, July 1994

[5] D. Yildirim, E.F. Fuchs, "Commentary on Various Formulations of Distortion Power D", *Power Engineering Letters, IEEE Power Engineering Review*, May 1999

[6] C. Budeanu, "Reactive and Fictitious Powers", *Publ. No.2 Rumanian National Inst*. Bucuresti 1927

[7] S.Fryze, "Active, Reactive and Apparent Powers in Networks with Nonsinusoidal Waveforms of Voltage and Current", *ETZ*, Vol.53, No.25 – 27, 1932 (in German)

[8] R.Arseneau, P.S.Filipski "Application of a Three Phase Nonsinusoidal Calibration System for Testing Energy and Demand Meters Under Simulated Filed Conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No.3, July 1988

[9] A.Domijan, G.Lamer, "Watthour Meter Accuracy Under Controlled Unbalanced Harmonic Voltage and Current Conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.1, January 1996

[10] L.S.Czarnencki, "Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.3, July 1996

[11] P.K.Ghosh, L.G.Durante, "Measurement Performance Testing for Nonsinusoidal Environments", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.14, No.4, November 1999

[12] M.D.Cox, T.B.Williams, "Induction VARHOUR and Solid-State VARHOUR Meters Performances on Nonlinear Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.5, No.4, November 1990

[13] R.Arseneau, "The Performance of Demand Meters Under Varying Load Conditions", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.8, No.4, October 1993

[14] R.Arseneau, G.T.Heydt, M.J.Kempker, "Application of IEEE Standard 519-1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.1, January 1997

[15] R.Arseneau, P.S.Filipski, "A VA-Meter-Error Analyzer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6, No.4, October 1991

[16] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definitions of Power, "Practical Definitions for Power Systems with Non-sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.1, January 1996