

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΗΣ (PMU) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ EMRP ENG04 «Metrology for Smart Grids»

Μυρτώ Χολιαστού
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας
e-mail: holiastou@eim.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι συσκευές μέτρησης του ανύσματος φάσης (Phase measurement units, PMUs) έχουν αναδειχτεί σε πολύτιμο εργαλείο για την καταγραφή του ανύσματος τάσης του ηλεκτρικού δικτύου και την πρόβλεψη ασταθειών ή την εξάλειψη διακοπών της παροχής ρεύματος (μπλακάουτ).

Ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό έργο με τίτλο “ENG04 Metrology for Smart Electrical Grids”^[1], το οποίο εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος “EMRP” (European Metrology Research Program) από 18 ευρωπαϊκά μετρολογικά ινστιτούτα και 4 Πανεπιστήμια/ ερευνητικά κέντρα ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο 2013. Ως μέλος του προγράμματος αυτού, το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας πραγματοποίησε μετρήσεις των διανυσμάτων τάσης και έντασης στο ελληνικό δίκτυο μεταφοράς, χρησιμοποιώντας πρότυπα όργανα που έχουν ιχνηλασιμότητα στο Εθνικό και Παγκόσμιο πρότυπο αναφοράς. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στους υποσταθμούς υπερυψηλής τάσης Ωραιοκάστρου (Θεσσαλονίκη) και Αγ. Στεφάνου (Αττική) με διακριβωμένες συσκευές μέτρησης φάσης (PMUs) και συγκρίθηκαν με τις αδιάλειπτες μετρήσεις ομοίων συσκευών (PMUs), οι οποίες βρίσκονται συνδεδεμένες μόνιμα στους υποσταθμούς από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς (ΑΔΜΗΕ) της Ελλάδας.

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι είναι δυνατό να ελεγχθεί η κατάσταση διακρίβωσης των συσκευών PMU χωρίς να χρειάζεται να απομακρυνθούν από την εγκατάσταση, αλλά και αναδεικνύουν τη σημασία της συνεργασίας μεταξύ της επιστημονικής κοινότητας και των εταιριών παραγωγής, διαχείρισης και μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος της χώρας.

Λέξεις-Κλειδιά: Διακρίβωση, Υποσταθμός, Συσκευή μέτρησης ανύσματος τάσης (PMU), Συγχρονισμένος παγκόσμιος χρόνος (UTC)

ABSTRACT

The Phase Measurement Units (PMUs) have turned into an important tool in the measurements of the voltage phasor of the electrical grid and the prediction of instabilities or the exclusion of electrical blackouts.

A European research project titled “ENG04 Metrology for Smart Electrical Grids”^[1], that was implemented in the frame of the European Metrology Research Program EMRP by 18 European Metrology Institutes and 4 Universities/Research Centers, was completed in August 2013. As a partner of this project, the Hellenic Institute of Metrology performed phasor measurements of voltage and current in the Greek transport grid, using as reference, instruments traceable to the National and International standards. The measurements were performed at the high voltage substations of Oreokastro (Thessaloniki) and Ag. Stefanos (Attiki) using calibrated Phase Measurement Units and were compared with the continuous measurements of similar units (PMUs), that are permanently installed in the

substations by the Independent Power Transmission Operator (IPTO or ADMIE) of Greece.

The results prove that it is possible to verify the calibration state of the PMU units without the need to disconnect them from the installation, but also reveal the importance of the cooperation between the scientific community and the companies of production, distribution and operation of electricity in the country.

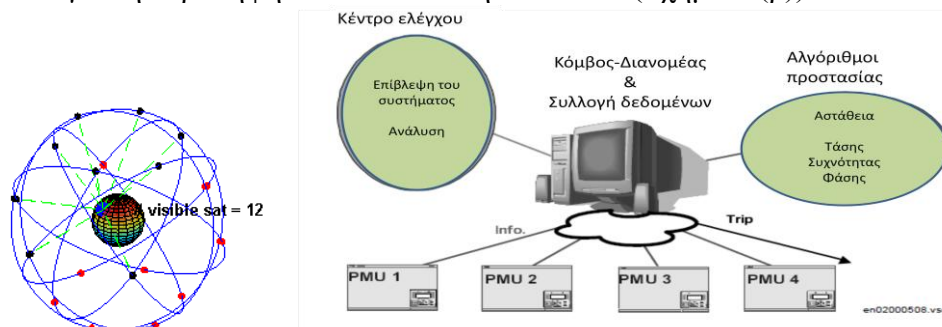
Key-WORDS: Calibration, Substation, Phase measurement unit (PMU), Universal Time coordinated (UTC)

1. Εισαγωγή

Οι Μετρητές Φάσης (Phase measurement units, PMU)^{[2],[3]} είναι όργανα που συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής, μεσαίας ή υψηλής τάσης και πραγματοποιούν μέτρηση της τάσης, της έντασης και της συχνότητας των γραμμών. Ταυτόχρονα μετρούν τη γωνία φάσης του καθενός από τις τρεις συνιστώσες τάσης και έντασης αποδίδοντάς τες ως ανύσματα με χαρακτηριστικό μέτρο και διεύθυνση. Αναφορά για τη μέτρηση της φάσης αποτελεί το παγκόσμιο σήμα χρόνου UTC (Universal Time Coordinated), διαθέσιμο σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση (Σχήμα 1 (α)) μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης GPS (Global Positioning System).

Κάθε Μετρητής Φάσης PMU διαθέτει κεραία GPS με την οποία λαμβάνει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου στον οποίο είναι εγκατεστημένο και τον παγκόσμιο χρόνο UTC, με τη μορφή ενός παλμού κάθε δευτερόλεπτο (1pps -pulse per second). Ο Μετρητής φάσης PMU δημιουργεί ένα σήμα αναφοράς μοναδιαίου πλάτους και φάσης συγχρονισμένης με το παλμικό σήμα 1pps του GPS. Ακολούθως μετρά τις γωνίες φάσης όλων των ανυσμάτων ως προς την αναφορά αυτή, επομένως οι μετρήσεις του πρότυπου Μετρητή Φάσης PMU, σε όποιον τόπο και αν είναι εγκατεστημένο έχουν την ίδια, παγκόσμια αναφορά.

Καταλαβαίνουμε ότι η εγκατάσταση Μετρητών Φάσης PMU σε πολλά σημεία του δικτύου παροχής ενέργειας, συμβάλλει στον υπολογισμό της κατάστασης του δικτύου («state estimation») και παρέχει πληροφορίες απαραίτητες για τη σταθερότητα του δικτύου και για την πρόληψη ταλαντώσεων ή διακοπών (Σχήμα 1 (β)).



Σχήμα 1: (α) Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης GPS (β) Σύστημα Μετρητών Φάσης PMU

Η αρχική ανάπτυξη μάλιστα, των Μετρητών φάσης PMU και η χρήση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε με αφορμή την καθολική διακοπή ηλεκτροδότησης («blackout») που συνέβη στις 14 Αυγούστου 2003 στις ΗΠΑ^[4].

2. Αρχή Λειτουργίας των Μετρητών Φάσης PMUs

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) δίνει μια ακρίβεια στο χρόνο $\pm 0.5 \mu\text{s}$. Ο μετρητής φάσης PMU παράγει ένα σήμα αναφοράς συγχρονισμένο με το σήμα του GPS.

Στη συνέχεια μετρά τα ανύσματα της τάσης και έντασης του δικτύου και καταγράφει τα πλάτη και τις γωνίες φάσης σε σχέση με την αναφορά αυτή. Επίσης καταγράφεται η συχνότητα και ο ρυθμός μεταβολής της.

Οι διάφοροι τύποι Μετρητών φάσης PMUs από διαφορετικό κατασκευαστή χρησιμοποιούν κοινά πρωτόκολλα για την εξαγωγή δεδομένων, τα IEEE Std 1344 -1995^[5] και IEEE C37 118-2011^[6].

3. Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή είναι Μετρητές φάσης εμπορικού τύπου και πρότυπο αναφοράς ενέργειας τριών φάσεων. Τα στοιχεία των οργάνων συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

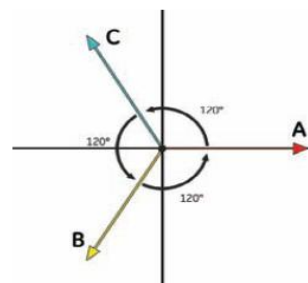
Πίνακας 1: Όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία

Περιγραφή οργάνου	Κατασκευαστής	Τύπος
Εγκατεστημένο PMU	ABB	RES 521
Πρότυπο PMU	ARBITER	1133A
Τριφασικό Πρότυπο αναφοράς	ZERA	TPZ303

Όπως θα φανεί στις μετρήσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια, ενώ η βασική αρχή μέτρησης των δύο τύπων Μετρητών φάσης είναι η ίδια, η απεικόνιση των μετρήσεών τους είναι διαφορετική.

Ο Μετρητής ARBITER 1133A παρέχει στο χρήστη τρεις τιμές πλάτους RMS και τρεις γωνίες φάσης (Σχήμα 2 (α)) που αντιστοιχούν στις τρεις συνιστώσες A, B, C του δικτύου (Σχήμα 2 (β)):

TIME	PHASOR
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-A + Voltage Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-A + Voltage Phase Angle
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-A + Current Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-A + Current Phase Angle
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-C + Voltage Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-C + Voltage Phase Angle
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-C + Current Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-C + Current Phase Angle
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-B + Voltage Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Volt CH-B + Voltage Phase Angle
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-B + Current Magnitude
27/03/2013 13:08:26.000	1133 Pmu-1 Phasor Cur CH-B + Current Phase Angle

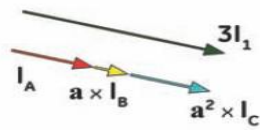


Σχήμα 2: (α) Περιγραφή των δεδομένων καταγραφής του Μετρητή φάσης Arbiter (β) Συνιστώσες A, B, C του δικτύου

Ο Μετρητής Φάσης ABB RES 521 παρέχει στο χρήστη ένα διάνυσμα, τη λεγόμενη «θετική ακολουθία» («Positive sequence») των τριών συνιστωσών A, B, C του δικτύου, το οποίο ορίζεται με τις σχέσεις του Fortescue^[7] ως εξής:

$$V = 1/3(V_A + \hat{a} \times V_B + \hat{a}^2 \times V_C) \quad I = 1/3(I_A + \hat{a} \times I_B + \hat{a}^2 \times I_C)$$

Ο τελεστής \hat{a} στρέφει ένα άνυσμα κατά γωνία 120° αντίθετα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού και ο τελεστής \hat{a}^2 το στρέφει κατά γωνία 240° (Σχήμα 3 (α)). Έτσι, ο Μετρητής Φάσης ABB παρέχει για τις τρεις φάσεις ένα άνυσμα με μία τιμή πλάτους και μία τιμή φάσης κάθε χρονική στιγμή (Σχήμα 3 (β)):



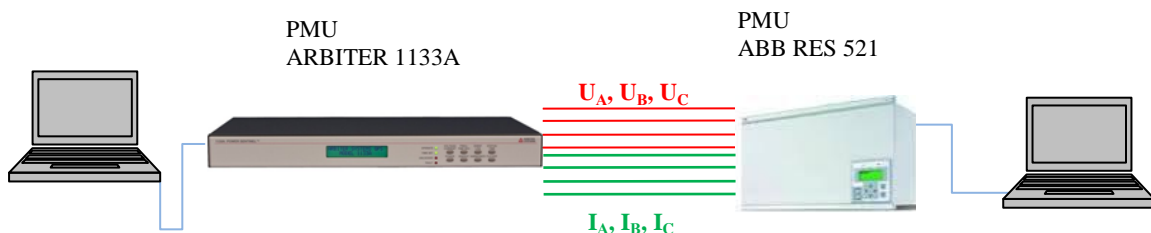
Date-Time	Phasor U (deg)	Phasor U (V)
2/8/2013 10:32:13.000	-73.14949228	235966.2648
2/8/2013 10:32:13.004	-73.12906975	235991.7572
2/8/2013 10:32:13.009	-73.11731097	235983.4888
2/8/2013 10:32:13.014	-73.10199739	236002.6407
2/8/2013 10:32:13.019	-73.09689342	236009.0284
2/8/2013 10:32:13.024	-73.07492754	236013.5769
2/8/2013 10:32:13.029	-73.05806509	236011.7563
2/8/2013 10:32:13.034	-73.03610022	236016.3661
2/8/2013 10:32:13.039	-73.02589671	236029.1917

Σχήμα 3: (α) Ανυσμα θετικής ακολουθίας ρεύματος (β) Μετρήσεις πλάτους και φάσης της τάσης
 Μετρητές Φάσης PMU έχουν εγκατασταθεί από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ Α.Ε., www.admie.gr) ΔΕΗ στα Κέντρα υπέρ-υψηλής τάσης (ΚΥΤ) Ωραιοκάστρου (Θεσσαλονίκη) και Αγ. Στεφάνου (Αθήνα). Οι μετρητές αυτοί είναι του τύπου ABB RES521, είναι συνδεδεμένοι σε γραμμές του δικτύου μεταφοράς και παίρνουν αδιάλειπτα μετρήσεις του πλάτους και της φάσης των γραμμών. Τα μετρητικά τους δεδομένα αποστέλλονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στο ευρωπαϊκό κέντρο ελέγχου ENTSOE (European Network of Transmission System Operators for Electricity) μέσω αποκλειστικής γραμμής Ethernet.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η πραγματοποίηση της επί τόπου σύγκρισης των εγκατεστημένων Μετρητών Φάσης με πρότυπους Μετρητές Φάσης οι οποίοι έχουν ιχνηλασιμότητα στο διεθνές πρότυπο του BIPM (www.bipm.org) και στο Εθνικό πρότυπο του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας ΕΙΜ (www.eim.gr).

4. Μετρητική διάταξη- Συνδέσεις

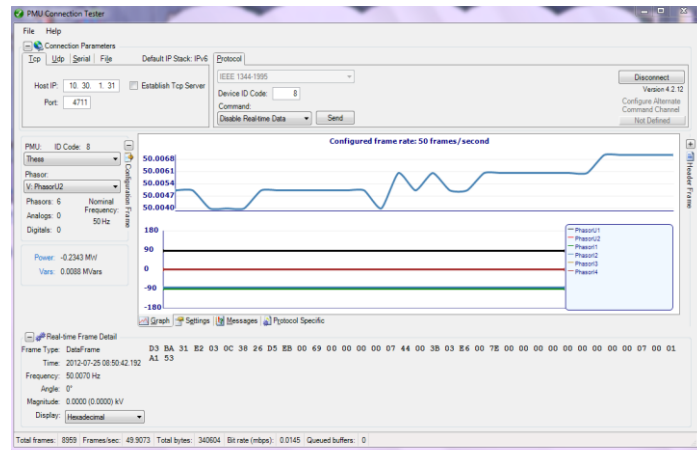
Οι δύο Μετρητές φάσης που συγκρίνονται συνδέονται στην ίδια γραμμή μεταφοράς, με τις εισόδους τάσης τους παράλληλα και τις εισόδους ρεύματός τους σε σειρά (Σχήμα 4). Στη συνέχεια οι δύο Μετρητές φάσης συνδέονται με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω γραμμής Ethernet για την καταγραφή των δεδομένων. Για την πραγματοποίηση των συνδέσεων του ρεύματος απαιτήθηκε διακοπή της ηλεκτροδότησης της συγκεκριμένης γραμμής, οπότε αυτή πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια προγραμματισμένης συντήρησης του δικτύου.



Σχήμα 4: Μετρητική διάταξη στους υποσταθμούς (ΚΥΤ)

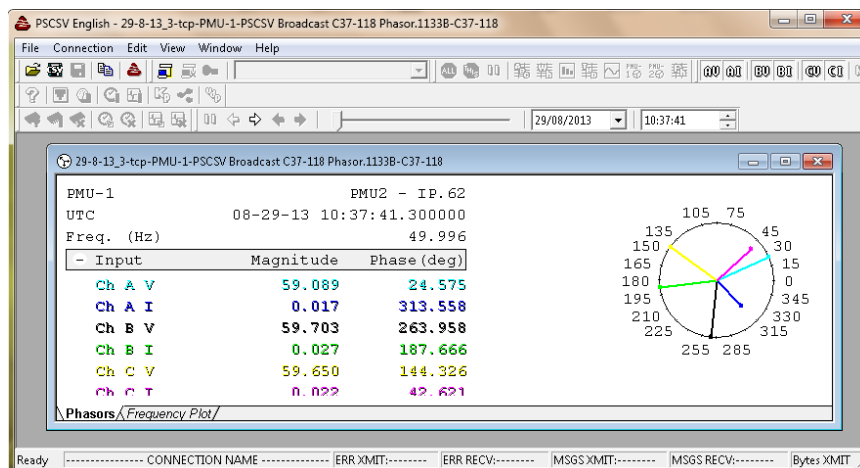
5. Προγράμματα καταγραφής

Για την εξαγωγή των δεδομένων του εγκατεστημένου Μετρητή φάσης ABB χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα «PMU Connection Tester». Το πρόγραμμα καταγράφει τα δεδομένα τα οποία ο Μετρητή Φάσης PMU εξάγει σε δεκαεξαδική μορφή κατά τα πρωτόκολλα IEEE1344, IEEE C37 και τα παρουσιάζει σε μορφή κατανοητή για το χρήστη (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Βασική απεικόνιση του προγράμματος “PMU Connection Tester”

Για την εξαγωγή των δεδομένων του πρότυπου Μετρητή φάσης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα «Power Sentinel CSV» του κατασκευαστή του οργάνου (Σχήμα 6).



Σχήμα 6: Διανυσματική απεικόνιση του προγράμματος “Power Sentinel”

6. Υποσταθμοί και χρονική περίοδος μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο υποσταθμούς της ΔΕΗ σύμφωνα με το χρονοδιάγραμμα και τις γραμμές μεταφοράς που δίνονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2: Χρονοδιάγραμμα και γραμμές μεταφοράς

Τόπος	Χρόνος	Υποσταθμός	UUT	Γραμμές Μεταφοράς	ΠΡΟΤΥΠΟ	Γραμμές Μεταφοράς
Θεσ/κη	Σεπτ. 2012	ΚΥΤ	ABB	1xV (A,B,C)	ARBITER	1xV (A,B,C)
		Ωραιοκάστρου	RES 521	2xI (A,B,C)	1133	
Αθήνα	Μάρτιος 2013	ΚΥΤ Αγ.	ABB	2xV(A,B,C)	ARBITER	1xV (A,B,C)
		Στεφάνου	RES 521		1133	
Θεσ/κη	Αύγ. 2013	ΚΥΤ	ABB	1xV (A,B,C)	ARBITER	1xV (A,B,C)
		Ωραιοκάστρου	RES 521	2xI (A,B,C)	1133	1xI (A,B,C)

Ακολουθώς παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

7. Μετρήσεις

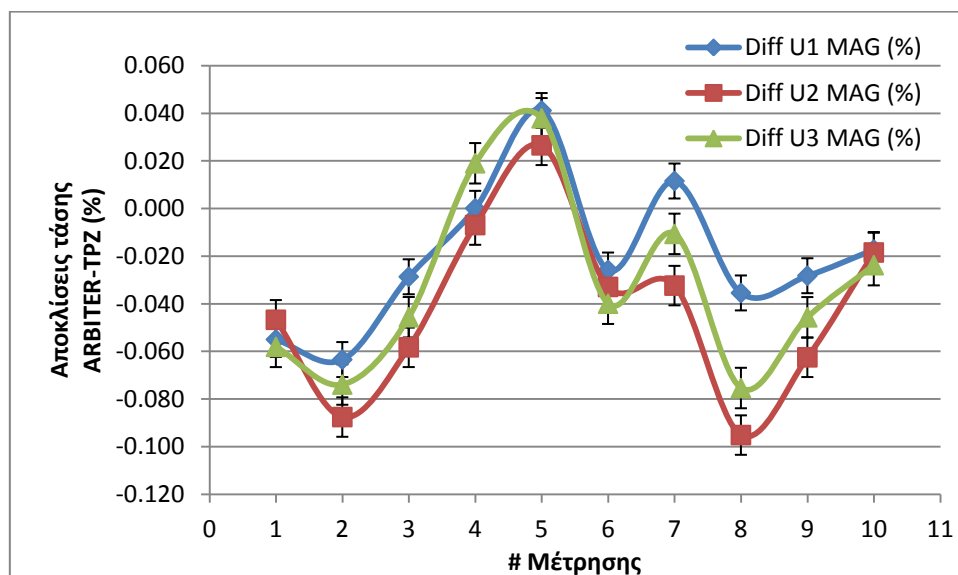
7.1. Μετρήσεις τάσης του Μετρητή φάσης Arbiter και αβεβαιότητα

Η λειτουργία μέτρησης τάσης του Μετρητή φάσης Arbiter σε εξωτερικές συνθήκες πεδίου επιβεβαιώθηκε επί τόπου με το πρότυπο αναφοράς τριών φάσεων του EIM. Το πρότυπο αυτό, τύπου Zera TPZ 303, έχει αβεβαιότητα 50 ppm και οι μετρήσεις έδειξαν μικρές αποκλίσεις του Μετρητή Arbiter PMU στις τρεις φάσεις του (Πίνακας 3).

Πίνακας 3: Μετρήσεις τάσης του Μετρητή φάσης Arbiter με το πρότυπο αναφοράς TPZ 303

ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΤΑΣΗΣ ARBITER PMU				
Diff U1 MAG (%)	Diff U2 MAG (%)	Diff U3 MAG (%)	Diff Phase 1-2 ($^{\circ}$)	Diff Phase 1-3 ($^{\circ}$)
-0.055	-0.047	-0.058	0.00	0.01
-0.063	-0.088	-0.074	0.01	0.01
-0.029	-0.058	-0.046	0.01	0.01
0.000	-0.007	0.019	0.01	0.01
0.041	0.027	0.038	0.00	0.00
-0.026	-0.033	-0.040	-0.01	0.00
0.012	-0.032	-0.011	0.00	0.01
-0.035	-0.095	-0.075	0.01	0.00
-0.028	-0.063	-0.046	0.01	0.00
Εκτεταμένη Αβεβαιότητα $U-V$ ($k=2$) (V)		Εκτεταμένη Αβεβαιότητα $U-\phi$ ($k=2$) ($^{\circ}$)		
0.007	0.008	0.008	0.013	0.012

Οι διαφορές, οι οποίες είναι εντός των προδιαγραφών του οργάνου σχεδιάζονται στο ακόλουθο σχήμα, με γραμμές σφάλματος την εκτεταμένη αβεβαιότητα της μέτρησης.

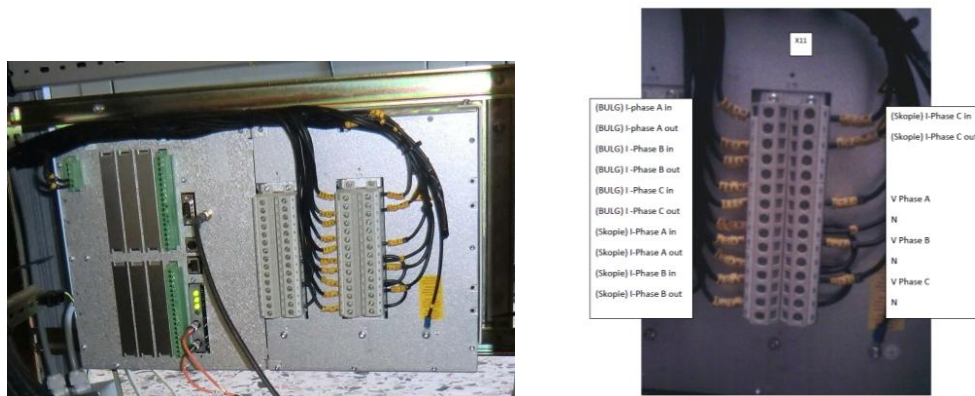


Σχήμα 7: Σφάλμα μέτρησης τάσης του Μετρητή Φάσης Arbiter PMU και αβεβαιότητα

7.2. Μετρήσεις στο κέντρο υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ) Ωραιοκάστρου (Θεσσαλονίκη)

Στον υποσταθμό αυτό πραγματοποιούνται οι διασυνδέσεις Ελλάδας-Βουλγαρίας και Ελλάδας-FYROM. Το δίκτυο μεταφοράς της Ελλάδας λειτουργεί από το 2004 σύγχρονα και παράλληλα με το σύγχρονο διασυνδεδεμένο ευρωπαϊκό σύστημα ENTSOE (European Network of Transmission System Operators for Electricity¹). Η παράλληλη λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών γραμμών μεταφοράς (Γ.Μ.) 400 kV και 150 kV με τα Συστήματα Αλβανίας, Βουλγαρίας και FYROM. Με το Σύστημα της FYROM η Ελλάδα συνδέεται μέσω: μίας γραμμής 400 kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Dubrono (FYROM). Με το Βουλγαρικό Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω μίας Γραμμής μεταφοράς 400 kV μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad (Βουλγαρία).

Ο εγκατεστημένος Μετρητής φάσης ABB PMU συνδέεται στις γραμμές μεταφοράς μέσω μετασχηματιστών τάσης (400 kV/100 V) και έντασης (1600 A/1 A). Η αναφορά φάσης και χρόνου (UTC) λαμβάνεται από το Μετρητή φάσης μέσω κεραίας GPS που βρίσκεται στον εξωτερικό χώρο. Οι συνδέσεις των τριών φάσεων A, B, C των γραμμών φαίνονται στα σχήματα 6 (α) και (β) (πίσω όψη του οργάνου):



Σχήμα 6: (α) Συνδέσεις στην πίσω όψη του οργάνου ABB (β) Λεπτομέρεια των γραμμών σύνδεσης

Ο Μετρητής φάσης ARBITER PMU που χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπος έχει διακριβωθεί από το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας της Σουηδίας SP Technical Research Institute of Sweden με βάση τα πρότυπα του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (BIPM).

7.3. Σύγκριση των Μετρητών φάσης ABB και ARBITER

Η σύγκριση των δύο Μετρητών φάσης ABB και Arbiter πραγματοποιήθηκε με ταυτόχρονη λήψη δεδομένων με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας, για χρονικά διαστήματα της τάξης ωρών. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα μετρήσεων από το Μετρητή φάσης ABB:

Πίνακας 4: Μετρήσεις από το Μετρητή φάσης ABB

Date-Time	Frequency (Hz)	Phasor U1 (V)	Phasor U1 (deg)
27/3/2013 13:08:26.000	49.958	236000.4149	-17.36707201
27/3/2013 13:08:26.004	49.958	236022.2911	-17.66745227
27/3/2013 13:08:26.009	49.959	236022.9744	-17.9643402
27/3/2013 13:08:26.014	49.958	236022.9038	-18.27302053
27/3/2013 13:08:26.019	49.957	236064.5169	-18.59010273
27/3/2013 13:08:26.024	49.958	236064.1027	-18.88861034
27/3/2013 13:08:26.029	49.959	236062.8756	-19.18207407

27/3/2013 13:08:26.034	49.959	236082.4965	-19.48558818
27/3/2013 13:08:26.039	49.958	236095.5067	-19.79586608
27/3/2013 13:08:26.044	49.959	236113.4236	-20.08924681
...
27/3/2013 13:09:42.004	49.981	235767.0475	-128.9133241
27/3/2013 13:09:42.009	49.981	235801.1159	-129.0508683
27/3/2013 13:09:42.014	49.98	235785.4552	-129.1984935
27/3/2013 13:09:42.019	49.98	235759.147	-129.3761975
27/3/2013 13:09:42.024	49.977	235813.9163	-129.551973
27/3/2013 13:09:42.029	49.978	235831.6428	-129.7078306
27/3/2013 13:09:42.034	49.979	235772.3501	-129.8657342
27/3/2013 13:09:42.039	49.977	235782.8353	-130.0516825
27/3/2013 13:09:42.004	49.981	235767.0475	-128.9133241
27/3/2013 13:09:42.009	49.981	235801.1159	-129.0508683

Από το μεγάλο σύνολο τιμών που καταγράφονται, επιλέγονται χρονικά στιγμιότυπα απόστασης ενός δευτερολέπτου, στα οποία υπολογίζονται οι διαφορές των δύο μετρητών φάσης. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται ένα επιλεγμένο τμήμα τιμών για το Μετρητή ABB.

Πίνακας 5: Επιλεγμένο τμήμα τιμών του Μετρητή ABB

ABB PMU			
UTC Time	Freq. (Hz)	Phasor U1 (V)	Phasor U1 (deg)
10:46:03.000	50.019	238026.7	-79.0324
10:46:04.000	50.021	238066.1	-71.7557
10:46:05.000	50.021	238029.0	-64.0168
10:46:06.000	50.020	237994.7	-56.4889
10:46:07.000	50.023	238036.6	-48.5026
10:46:08.000	50.021	237966.6	-40.3637
10:46:09.000	50.020	237960.8	-32.9094
10:46:10.000	50.019	237955.9	-25.6919
10:46:11.000	50.018	237950.1	-18.7445

Στο λογισμικό του οργάνου του Μετρητή φάσης ABB έχει συμπεριληφθεί ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας ο λόγος των μετασηματιστών τάσης, ο οποίος είναι 400 kV/100 V=4000. Έτσι όταν καταγράφεται τάση 238026.7 V, η πραγματική τάση στην είσοδο του οργάνου είναι: 238026.7 V/4000 =58.95 V.

Οι μετρήσεις του Μετρητή φάσης ARBITER για τα τρία ανύσματα A, B, C της τάσης, για τις ίδιες χρονικές στιγμές δίνονται στον Πίνακα 6:

Πίνακας 6: Επιλεγμένο τμήμα τιμών του Μετρητή ARBITER

ARBITER PMU							
UTC Time	Freq. (Hz)	Ch A (V)	Phase A (deg)	Ch B (V)	Phase B (deg)	Ch C (V)	Phase C (deg)
10:46:03.000	50.020	59.12	281.268	59.71	160.570	59.74	40.970
10:46:04.000	50.021	59.13	288.547	59.72	167.861	59.75	48.247
10:46:05.000	50.021	59.13	296.266	59.7	175.589	59.73	55.973

10:46:06.000	50.021	59.12	303.793	59.69	183.128	59.73	63.502
10:46:07.000	50.024	59.14	311.774	59.7	191.114	59.73	71.484
10:46:08.000	50.021	59.13	319.916	59.69	199.248	59.69	79.631
10:46:09.000	50.021	59.12	327.363	59.7	206.706	59.71	87.075
10:46:10.000	50.020	59.11	334.587	59.69	213.939	59.69	94.294
10:46:11.000	50.019	59.13	341.534	59.7	220.891	59.68	101.242

Εφόσον οι δύο Μετρητές φάσης είναι συνδεδεμένοι στην ίδια γραμμή, οι διαφορές των παραπάνω μετρήσεων αντικατοπτρίζουν τις διαφορές στην ακρίβεια των δύο οργάνων και στην υπολογιστική πλατφόρμα που χρησιμοποιεί ο κάθε κατασκευαστής. Στον Πίνακα 7 υπολογίζονται οι διαφορές στο πλάτος και στη φάση του ανύσματος της τάσης και οι διαφορές στη συχνότητα για κάθε χρονική στιγμή. Στον υπολογισμό λήφθηκαν υπόψη οι σχέσεις του Fortescue που αναφέρθηκαν πιο πάνω για τη «θετική ακολουθία» του Μετρητή φάσης ABB.

Πίνακας 7: Διαφορές μεταξύ των Μετρητών φάσης ABB και ARBITER

COMPARISON ABB-Arbiter				
UTC Time	Diff Angle (°)	Diff Voltage (%)	Diff Freq (Hz)	
10:46:03.000	0.032	-0.025	-0.001	
10:46:04.000	0.026	-0.027	0.000	
10:46:05.000	0.041	-0.023	0.000	
10:46:06.000	0.037	-0.025	-0.001	
10:46:07.000	0.040	-0.027	-0.001	
10:46:08.000	0.038	-0.020	0.000	
10:46:09.000	0.043	-0.035	-0.001	
10:46:10.000	0.035	-0.013	-0.001	
10:46:11.000	0.033	-0.024	-0.001	

Η ακρίβεια του Μετρητή φάσης ABB που δίνεται από τον κατασκευαστή είναι 0.1% στο πλάτος, ± 0.005 Hz στη συχνότητα και 0.1° στη φάση. Επομένως, συνάγεται ότι ο Μετρητής βρίσκεται εντός των ορίων των προδιαγραφών του.

7.4. Σύγκριση με ENTSOE

Στην εργασία αυτή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δεδομένων του προτύπου Μετρητή φάσης Arbiter με τα δεδομένα που συλλέγονται από την υπηρεσία ENTSOE^[8] σε μόνιμη βάση, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω. Τα δεδομένα που παραχωρήθηκαν από την κεντρική βάση δεδομένων ENTSOE έδειξαν πλήρη συμφωνία (Πίνακας 8) με τα αποτελέσματα πιο πάνω.

Πίνακας 8: Σύγκριση ENTSOE - ARBITER

ENTSOE-ARBITER							
Date	Local Time	msec	abs (V)	angle (deg)	Ag Stefanos.f	Diff volt (%)	Diff PH (deg)
3/27/2013	12:00:08	0	406200.7	168.5269	49.964	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:08	100	406276.6	167.2005	49.964	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:08	200	406238.6	165.8192	49.963	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:08	300	406206.5	164.4351	49.961	0.03	-0.03

3/27/2013	12:00:08	400	406204.1	163.037	49.962	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:08	500	406154.6	161.6262	49.961	0.02	-0.03
3/27/2013	12:00:08	600	406120.7	160.227	49.962	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:08	700	406058.8	158.8079	49.961	0.04	-0.03
3/27/2013	12:00:08	800	406120.3	157.4458	49.963	0.02	-0.03
3/27/2013	12:00:08	900	406059.5	156.0511	49.962	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:09	0	406074.6	154.6934	49.963	0.03	-0.03
3/27/2013	12:00:09	100	406079.8	153.3077	49.962	0.04	-0.02

8. Συμπεράσματα

Οι Μετρητές φάσης που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο Εθνικό σύστημα μεταφοράς του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ελεγχθούν επί τόπου, χωρίς να χρειάζεται να αποσυνδεθούν από την εγκατάσταση.

Η επί τόπου σύγκριση των Μετρητών φάσης που προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές έδειξε ότι τα όργανα ενδέχεται να διαθέτουν διαφορετική μέθοδο απεικόνισης των δεδομένων. Η ακριβής αντιστοίχιση των δεδομένων καταγραφής των μετρητών είναι απαραίτητη προκειμένου να πραγματοποιηθεί αξιόπιστη σύγκριση μεταξύ τους.

Με αναφορά πρότυπες συσκευές, οι οποίες έχουν ιχνηλασιμότητα στα πρότυπα αναφοράς του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας (ΕΙΜ) και του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (BIPM), αναδείχτηκε ότι οι μετρητές φάσης έχουν αποκλίσεις της τάξης των 0.03% στο πλάτος, 0.04° στη φάση και 1 mHz στη συχνότητα, αποκλίσεις που είναι πλήρως συμβατές με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

9. Βιβλιογραφία

- [1] ENG04 SmartGrids “Metrology for Smart Electrical Grids”, EMRP 2009 Joint Research Project Protocol <http://www.smartgrid-metrology.eu/>
- [2] P. Bonanomi, “Phase angle measurement with synchronized clocks”, *IEEE Transactions on power apparatus and Systems*, vol. PAS 100, no 12, pp 5036-5043, Dec 1981
- [3] Z. Huang, B. Kaszenny, V. Madani, K. Martin, S. Meliopoulos, D. Novosel, J. Stenbakken “Performance Evaluation of Phasor Measurement Systems”, IEEE Power Engineering Society General Meeting 2008, Pittsburgh, PA
- [4] U.S.-Canada Power System Outage Task Force, “Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United State and Canada: Causes and Recommendations”, <https://reports.energy.gov/>, April 2004.
- [5] IEEE 1344 “Standard for Synchrophasors for Power Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*”, Volume 13, Issue: 1, 1995.
- [6] IEEE Std C37.111 “Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems”, 1999.
- [7] C.L. Fortescue “Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, American Institute of Electrical Engineers, Transactions Vol xxxvii, issue 2, July 1918
- [8] ENTSOE “European Network of Transmission System Operators for Electricity”, <http://www.entsoe.eu>

Η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία είναι μέρος του Προγράμματος European Metrology Research Program (EMRP), το οποίο συγχρηματοδοτείται από τις χώρες του EURAMET που συμμετέχουν στο EMRP και στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Ευχαριστούμε τον ΑΔΜΗΕ και το ΔΕΔΗΕ για τη συμβολή τους στην πραγματοποίηση της εργασίας αυτής με την παραχώρηση της άδειας μετρήσεων στους δύο υποσταθμούς, την πραγματοποίηση αναγκαίων διακοπών ηλεκτροδότησης, την παροχή παράλληλων συνδέσεων και το πιο σημαντικό: τη συνεργασία και την υποστήριξή τους.