ΕΥΡΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Ν. Μ. Μανουσάκης[1], Κ. Π. Νικολόπουλος[2] και Γ. Ν. Κορρές[2]

[1]Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., Π. Ράλλη & Θηβών 250, 122 44 Αιγάλεω
[2]Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου
e-mail: gkorres@cs.ntua.gr

Περίληψη

Όλες οι λειτουργίες πραγματικού χρόνου σε ένα κέντρο ελέγχου ενέργειας (Energy Management System – EMS) προϋποθέτουν την εξασφάλιση της παρατηρησιμότητας του συστήματος μετρήσεων που λαμβάνονται από το σύστημα SCADA/RTU, δηλαδή την επάρκειά τους ώστε να επιλύεται η ροή φορτίου πραγματικού χρόνου ή αλλιώς εκτίμηση κατάστασης (state estimation). Η παρατηρησιμότητα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (power system) σχετίζεται άμεσα με τη διάταξη των μετρητικών οργάνων πραγματικού χρόνου. Οι συνεχείς μεταβολές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, που οφείλονται κυρίως σε αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου ή σε εσφαλμένες ενδείξεις μετρητικών συσκευών, αναγκάζουν τους χειριστές των κέντρων ελέγχου ενέργειας να ελέγχουν, μέσω κατάλληλου λογισμικού, την παρατηρησιμότητα του δικτύου προτού εφαρμόσουν την εκτίμηση κατάστασης, η οποία υπολογίζει το διάνυσμα τάσεων των ζυγών του δικτύου. Στην περίπτωση όπου οι διαθέσιμες μετρήσεις δεν είναι επαρκείς ώστε να υπολογιστεί το διάνυσμα κατάστασης του δικτύου, ακολουθείται μία διαδικασία τοποθέτησης πρόσθετων μετρήσεων, οι οποίες θα καταστήσουν και πάλι το σύστημα παρατηρήσιμο.

Η εμφάνιση του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (Global Positioning System – GPS) σε συνδυασμό με την έλευση προηγμένων τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών, οδήγησε στον εκσυγχρονισμό των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία, πλέον, είναι δυνατή η αυτόματη παρακολούθηση της ροής ενέργειας όπως και η απόκριση σε οποιαδήποτε μεταβολή της παροχής ή της ζήτησής της. Για την επίτευξη των στόχων αυτών, το διάνυσμα μετρήσεων της κλασσικής εκτίμησης κατάστασης διευρύνθηκε ώστε να περιλαμβάνει και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών (synchronized phasor measurements), οι οποίες παρέχονται από τις υψηλής ακρίβειας μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units − PMUs). Στην εργασία αυτή θα παρουσιαστεί μια τεχνική τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνόλου των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν PMUs. Ο όρος "βέλτιστο" υπονοεί ότι το σύνολο αυτό θα περιέχει τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό και τις θέσεις των PMUs, ώστε το δίκτυο να καθίσταται πλήρως παρατηρήσιμο. Το πρόβλημα αυτό είναι ευρύτερα γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών (optimal PMU placement problem − OPP). Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε έναν ευρετικό αλγόριθμο, με τον οποίο τα δεδομένα της τοπολογίας του δικτύου, καθώς και οι ζυγοί με τις διασυνδέσεις τους, καταχωρούνται σε κατάλληλες μήτρες σύμφωνα με τον αριθμό των διασυνδέσεων του κάθε ζυγού και το ενδεχόμενο να έχει ο ζυγός αυτός ήδη επιλεγεί για τοποθέτηση PMU.

Λέξεις-Κλειδιά: παρατηρησιμότητα δικτύου, φασιθέτης, βέλτιστη τοποθέτηση PMUs, μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMUs).

Abstract

The real-time functions in an energy management system (EMS) presume the measuring system observability which is based on measurements received from SCADA/RTU system, or, in other words, the measurements adequacy to solve the real-time power flow or else state estimation. The power system observability is directly related to the real-time measuring instruments configuration. The continuous changes in power systems is a result of power system topology changes or faulted indications of measuring devices, enforcing the energy control center operators to check the power system observability before implementing the state estimation procedure to determine the state vector. In case that the number of available measurements is not sufficient to render the power system observable, a procedure to restore the power system observability is adopted.

The advent of global positioning system (GPS) in conjunction with information and communication technology has led to the development of modern power systems, commonly known as smart grids, that automatically permit the monitoring of energy flow as well as the response to any change in energy supply or demand. To achieve these tasks, the vector of measurements in traditional state estimation has been enlarged to include synchronized phasor measurements acquired by the accurate phasor measurement units (PMUs). In this work, an optimal PMU placement methodology to find the optimal set of buses for PMU installation is presented. The term "optimal" means that this set includes the minimum number and locations of PMUs needed to render a completely observable power system. This problem is commonly known in literature as optimal PMU placement problem. The proposed method is based on a heuristic algorithm, by which the data related with the power system topology and the buses interconnections are stored in matrices, according to the number of interconnections of every bus and the possibility of this bus to be a PMU installation bus.

Keywords: network observability, phasor, optimal PMU placement, phasor measurement units (PMUs).

1. Εισαγωγή

Η μονάδα μέτρησης φασιθετών θεωρείται ως μια από τις σημαντικότερες μετρητικές συσκευές για τα μελλοντικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας του ιδιαίτερου χαρακτηριστικού της να παρέχει εξαιρετικής ακρίβειας συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος. Λαμβάνοντας υπόψη το υψηλό κόστος αυτών των συσκευών και τον διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό εγκατάστασής τους, η βέλτιστη τοποθέτησή τους έχει καταστεί ένας κρίσιμος στόχος για τους ερευνητές. Το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU είναι πολυσύνθετο και έχει προταθεί ένα μεγάλος αριθμός μαθηματικών και ευρετικών αλγορίθμων για την επίλυσή του (Manousakis et al. 2012).

Η πλειονότητα των μαθηματικών αλγορίθμων περιλαμβάνει ακέραιες μεταβλητές, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί μπορεί να είναι γραμμικοί, μη γραμμικοί ή τετραγωνικοί. Ενδεικτικά, έχουν προταθεί μέθοδοι που βασίζονται στον ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Xu et al. 2005, Chen and Abur 2006), στον ακέραιο ημιορισμένο προγραμματισμό (Alexopoulos et al. 2016, Korres et al. 2015, Manousakis and Korres 2016, Xygkis et al. 2016), στον διαδοχικό τετραγωνικό προγραμματισμό (Theodorakatos et al. 2014, Theodorakatos et al. 2015) και στα σταθμισμένα ελάχιστα τετράγωνα Manousakis and Korres 2013.

Αρκετές ευρετικές τεχνικές έχουν επίσης προταθεί στη βιβλιογραφία, όπως η αναζήτηση Tabu (Koutsoukis et al. 2013, Peng et al. 2006), η προσομοιωμένη ανόπτηση (Nuqui and Phadke 2005) και οι πρακτικοί αλγόριθμοι (Jiang et al. 2007).

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται ένας ευρετικός αλγόριθμος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU. Ο αλγόριθμος αυτός δοκιμάστηκε σε διάφορα δίκτυα αναφοράς του IEEE. Η εργασία οργανώνεται ως ακολούθως. Η Ενότητα 2 παρουσιάζει και περιγράφει τα δομικά στοιχεία μιας μονάδας PMU. Η Ενότητα 3 παρουσιάζει το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU. Ο προτεινόμενος ευρετικός αλγόριθμος παρουσιάζεται στην Ενότητα 4. Η Ενότητα 5 παρουσιάζει ένα επεξηγηματικό παράδειγμα χρησιμοποιώντας το δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE. Η ενότητα 6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορα δίκτυα του IEEE και η Ενότητα 7 ανακεφαλαιώνει την εργασία.

2. Μονάδα μέτρησης φασιθετών

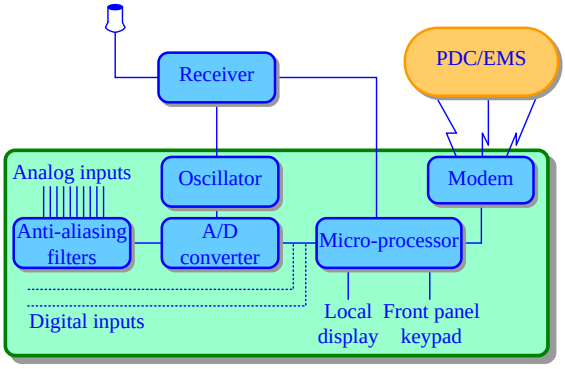
2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ενεργός ισχύς μιας γραμμής μεταφοράς είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαφορά των γωνιών των τερματικών ζυγών της γραμμής αυτής. Καθώς πολλές προσεγγίσεις σχεδιασμού και λειτουργίας ηλεκτρικών δικτύων είναι άμεσα συνυφασμένες με τη ροή της ενεργού ισχύος, η ακριβής μέτρηση των φασικών διαφορών μεταξύ ζυγών, αποτελεί πάντοτε πεδίο άμεσου ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς που μελετούν τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η σύγχρονη εποχή των συγχρονισμένων μετρήσεων ταυτίζεται με την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών και του πρώτου ψηφιακού ηλεκτρονόμου τη δεκαετία του ‘70. Η περίοδος αυτή, μπορεί να χαρακτηριστεί και ως μια περίοδος γενικότερης μετάβασης των συστημάτων προστασίας των ηλεκτρικών δικτύων από τις ηλεκτρομηχανικές μεθόδους στις ψηφιακές. Με τη βοήθεια των μικροεπεξεργαστών, οι ερευνητές προσπαθούσαν μέσω επαναληπτικών μεθόδων να εξακριβώσουν εάν σε μία τριφασική γραμμή μεταφοράς υπάρχει κάποιος από τους 10 τύπους σφάλματος, όπως μονοφασικά, διφασικά, ή τριφασικά βραχυκυκλώματα προς γη, βραχυκυκλώματα μεταξύ γραμμών και βραχυκυκλώματα σύνθετης αντίστασης προς γη. Η αναζήτηση αυτή είχε ως αποτέλεσμα την εξάλειψη της ανάγκης επίλυσης σύνθετων συστημάτων εξισώσεων και την ανάπτυξη μιας τεχνικής, που βασίζεται στη ανάλυση των συμμετρικών συνιστωσών όλων των τάσεων, των ρευμάτων και των στοιχείων ενός δικτύου. Με τη μέθοδο αυτή, κατέστη πλέον δυνατό να υπολογιστούν όλα τα πιθανά σφάλματα μέσω του κυκλώματος θετικής ακολουθίας. Οι τάσεις ζυγών θετικής ακολουθίας αποτελούν στην ουσία το διάνυσμα κατάστασης του κάθε δικτύου. Ο υπολογισμός της τάσης θετικής ακολουθίας έδωσε μεγάλη ώθηση στους ερευνητές και αναγνωρίστηκε η θεμελιώδης σημασία της στην ανάλυση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη δημοσίευση, που αποδείκνυε τη σημασία της τάσης θετικής ακολουθίας ενός κυκλώματος παρουσιάστηκε το 1983 και ουσιαστικά ήταν η απαρχή της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων.

Η πρώτη εφαρμογή, που αφορούσε την άμεση μέτρηση φασικών γωνιών, αναπτύχθηκε στην αρχή της δεκαετίας του ‘80. Η εφαρμογή αυτή, αποτελούσε ένα σύστημα, το οποίο χρησιμοποιούσε ραδιοφωνικά και δορυφορικά σήματα, στην προσπάθεια επίτευξης συγχρονισμού μετρήσεων σε διαφορετικές τοποθεσίες, με βάση κάποια χρονική αναφορά. Έτσι, μπόρεσε να καθοριστεί με επιτυχία η φασική διαφορά δύο ζυγών, με ακρίβεια μέτρησης της τάξεως των 40μs. Το σύστημα αυτό, λοιπόν, μπορούσε να μετρήσει τη γωνία ενός φασιθέτη τάσεως, ωστόσο ήταν αδύνατο να υπολογίσει το πλάτος του φασιθέτη και πολύ περισσότερο τις διάφορες αρμονικές που συνέθεταν τη συνολική κυματομορφή της

τάσης. Έτσι, η μέθοδος αυτή δε μπορούσε να εφαρμοστεί σε συστήματα συγχρονισμένων μετρήσεων και φυσικά δεν εφαρμόζεται ούτε στις μέρες μας.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας GPS, που εξελισσόταν παράλληλα εκείνη την περίοδο, κατέστησε σαφές, ότι το σύστημα αυτό παρείχε τον πιο αποδοτικό τρόπο συγχρονισμού μετρήσεων, ιδιαίτερα για μεγάλες αποστάσεις. Οι πρώτες εκδοχές των μονάδων μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units − PMUs), που εκμεταλλεύονταν τις ιδιότητες του GPS, υλοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο VirginiaTech στις αρχές της δεκαετίας του ‘80 και δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας υποσταθμών του Αμερικανικού ηλεκτρικού δικτύου. Το λειτουργικό διάγραμμα ενός PMU φαίνεται στο Σχήμα 1.

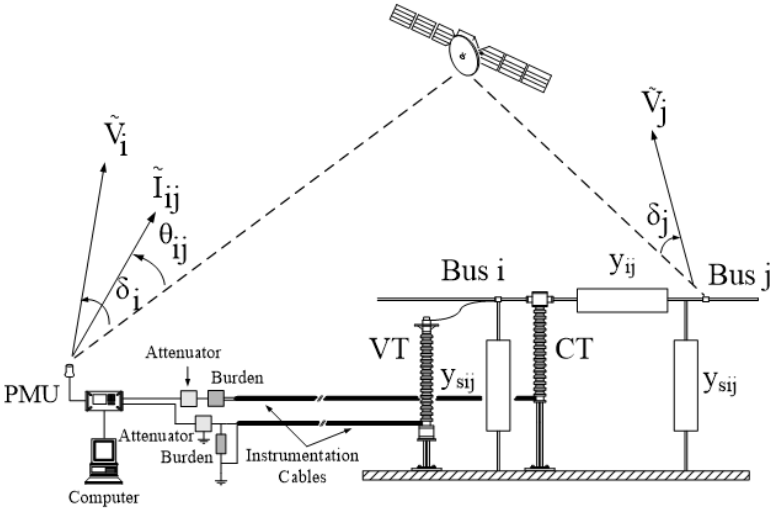


Σχήμα 1: Λειτουργικό διάγραμμα PMU

Η πρώτη εμπορική υλοποίηση PMU υλοποιήθηκε το 1991 σε συνεργασία του VirginiaTech με την εταιρεία Macrodyne. Την ίδια χρονιά, η IEEE καθόρισε τα πρότυπα των αρχείων δεδομένων που δημιουργούνται και αποστέλλονται από τα PMUs, η τελική τροποποίηση των οποίων πραγματοποιήθηκε το 2005. Σήμερα, οι περισσότερες μεγάλες εταιρείες του χώρου κατασκευάζουν PMUs ως εμπορικά προϊόντα, ενώ τα PMUs έχουν αρχίσει να διεισδύουν με σταθερό ρυθμό στα δίκτυα διανομής πολλών κρατών ανά τον κόσμο. Μπορεί, λοιπόν, να ειπωθεί, ότι η τεχνολογία των συγχρονισμένων μετρήσεων έχει πλέον τυποποιηθεί και ότι, τα επόμενα χρόνια, όλο και περισσότερα ηλεκτρικά δίκτυα ανά τον κόσμο θα μπορούν να εποπτεύονται γρήγορα και εξ ολοκλήρου μέσω των PMU.

2.2 Τεχνολογία μετρήσεων μονάδων PMU

Κάθε μονάδα PMU μπορεί να μετρήσει την τάση του ζυγού στον οποίο εγκαθίσταται και μέρος ή το σύνολο των ρευμάτων γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει μια τυπική εγκατάσταση μονάδας PMU στο ζυγό *i* μιας γραμμής *i*–*j* η οποία απεικονίζεται με το ισοδύναμο μοντέλο “π”. Οι μετρήσεις φασιθετών τάσεων και ρευμάτων υποβιβάζονται μέσω μετασχηματιστών μετρήσεως και στη συνέχεια ψηφιοποιούνται μέσω του εξοπλισμού συγχρονισμού με το GPS. Ανάμεσα στην αρχική τιμή των τάσεων και ρευμάτων και των τελικών ψηφιακών σημάτων που δημιουργούνται από τον A/D μετατροπέα, υπάρχει μια αλυσίδα συσκευών που παρεμβάλλονται, η οποία είναι γνωστή ως κανάλι μέτρησης (measuring channel), παρέχει απομόνωση από το δίκτυο υψηλής τάσης, υποβιβάζει τις τάσεις και τα ρεύματα σε επιτρεπτό επίπεδο μέτρησης και αποτελείται από μετασχηματιστές μέτρησης, καλώδια ελέγχου, εγκάρσιες αγωγιμότητες, φίλτρα και A/D μετατροπείς. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς είναι μετασχηματιστές τάσης ή ρεύματος (VTs ή CTs), χωρητικά συζευγμένοι μετασχηματιστές τάσης (CCVTs), ηλεκτρο-οπτικοί μετασχηματιστές τάσης (EOVTs) και μαγνητο-οπτικοί μετασχηματιστές ρεύματος (MOCTs).



Σχήμα 2: Φασιθέτες τάσης και ρεύματος στο ζυγό i της γραμμής i-j που παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο "π"

2.3 Μετρήσεις μονάδων PMU

Όπως προαναφέρθηκε, οι μετρήσεις των μονάδων PMUs αφορούν διανύσματα τάσεων και ρευμάτων τα οποία εκφράζονται σε πολική μορφή, ως ακολούθως:

$$\tilde{V}_i = V_i \angle \delta_i = V_i \cos\delta_i + j\ V_i \sin\delta_i \tag{1}$$

$$\tilde{V}_j = V_j \angle \delta_j = V_j \cos\delta_j + j\ V_j \sin\delta_j \tag{2}$$

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij} \tag{3}$$

όπου

$$I_{ij} = \sqrt{\begin{array}{l}\left\{V_i\left[\left(g_{ij}+g_{sij}\right)\cos\delta_i - \left(b_{ij}+b_{sij}\right)\sin\delta_i\right] - V_j\left[g_{ij}\cos\delta_j - b_{ij}\sin\delta_j\right]\right\}^2 + \\ + \left\{V_i\left[\left(b_{ij}+b_{sij}\right)\cos\delta_i + \left(g_{ij}+g_{sij}\right)\sin\delta_i\right] - V_j\left[b_{ij}\cos\delta_j + g_{ij}\sin\delta_j\right]\right\}^2\end{array}} \tag{4}$$

και

$$\theta_{ij} = arctg\left\{\frac{V_i\left[\left(b_{ij}+b_{sij}\right)\cos\delta_i + \left(g_{ij}+g_{sij}\right)\sin\delta_i\right] - V_j\left[b_{ij}\cos\delta_j + g_{ij}\sin\delta_j\right]}{V_i\left[\left(g_{ij}+g_{sij}\right)\cos\delta_i - \left(b_{ij}+b_{sij}\right)\sin\delta_i\right] - V_j\left[g_{ij}\cos\delta_j - b_{ij}\sin\delta_j\right]}\right\} \tag{5}$$

3. Το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU

Η τυπική διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU (optimal PMU placement – OPP) αφορά τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού PMUs, n_{PMU}, και το βέλτιστο σύνολο θέσεων, $S(n_{\text{PMU}})$, που αντιστοιχεί στα n_{PMU} PMUs, τα οποία διασφαλίζουν ότι το σύστημα γίνεται παρατηρήσιμο. Αυτό το μοντέλο μπορεί να γενικευτεί με σκοπό να συμπεριλάβει οποιονδήποτε άλλον πρόσθετο περιορισμό ή ενδεχόμενο ως ακολούθως:

$$\begin{array}{l}\min\limits_{n_{\text{PMU}}}\left\{G\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right)\right\} \\ \text{s.t.} \quad f\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) = 1\end{array} \tag{6}$$

όπου $G(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}}))$ είναι το σύνολο των μη παρατηρήσιμων ζυγών, και $f(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}}))$ είναι μια πολυκριτηριακή λογική συνάρτηση, οριζόμενη ως:

$$\begin{aligned} f(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}})) &= O_{bs}(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}})) \\ &+ O_{bs}(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}})) \bullet C_{on}(n_{\mathrm{PMU}}, S(n_{\mathrm{PMU}})) \end{aligned} \tag{10}$$

όπου $O_{bs}(.)$ είναι η λογική συνάρτηση υπολογισμού της παρατηρησιμότητας, $C_{on}(.)$ η λογική συνάρτηση υπολογισμού κάθε περιορισμού ή ενδεχομένου, ενώ τα σύμβολα + και • υποδηλώνουν τους λογικούς τελεστές OR και AND αντίστοιχα. Από άποψη υπολογιστικής πολυπλοκότητας, το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs κατατάσσεται στη κατηγορία *NP*-hard (non deterministic polynomial time-hard) και δεν έχει μοναδική λύση. Αναλόγως του σημείου εκκίνησης, η βελτιστοποίηση μπορεί να δώσει διαφορετικά σύνολα από βέλτιστες λύσεις, με τον ίδιο πάντοτε ελάχιστο αριθμό μονάδων PMU.

4. Προτεινόμενος ευρετικός αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε έναν απλό ευρετικό αλγόριθμο. Με σκοπό την υλοποίησή του, τα δεδομένα της τοπολογίας του δικτύου, οι ζυγοί και οι διασυνδέσεις τους, καταχωρούνται σε μήτρες, σύμφωνα με τον αριθμό των διασυνδέσεων του κάθε ζυγού και το ενδεχόμενο να έχει ο ζυγός αυτός επιλεγεί για τοποθέτηση PMU. Τόσο οι μήτρες που χρησιμοποιούνται όσο και η επεξήγησή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Τα βήματα υλοποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

Βήμα 1. Εντοπισμός των ζυγών του δικτύου που φέρουν μία διασύνδεση (μήτρα RB) και τοποθέτηση μονάδων PMU στους ζυγούς που διασυνδέονται με τους ζυγούς αυτούς.

Βήμα 2. Εντοπισμός των εν σειρά διασυνδεδεμένων ζυγών του δικτύου που φέρουν μόνο δύο διασυνδέσεις (μήτρα TB). Όταν ο αριθμός των ζυγών αυτών είναι άρτιος, τοποθετείται μία μονάδα PMU ανά δύο διασυνδεδεμένους ζυγούς της εν σειρά διάταξης. Όταν ο αριθμός είναι περιττός, τοποθετείται επίσης μία μονάδα PMU ανά δύο ζυγούς και ένα επιπλέον PMU στον προτελευταίο ζυγό της συστοιχίας.

Βήμα 3. Προσδιορισμός των ζυγών που εμφανίζονται περισσότερες της μίας φοράς στη μήτρα IC. Πρακτικά, επιλέγονται ζυγοί οι οποίοι, αρχικά, έφεραν περισσότερες των δύο διασυνδέσεων. Σε κάθε επανάληψη, ο ζυγός που επιλέγεται για τοποθέτηση μίας μονάδας PMU, είναι αυτός που εμφανίζεται περισσότερες φορές στην μήτρα IC.

Βήμα 4. Τοποθέτηση PMUs στους εναπομένοντες ζυγούς της μήτρας TB, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η παρατηρησιμότητα όσο το δυνατόν περισσότερων μη παρατηρήσιμων ζυγών που εμπεριέχονται στη μήτρα IC.

Βήμα 5. Έλεγχος ύπαρξης μη παρατηρήσιμων ζυγών. Σε μια τέτοια περίπτωση, η μονάδα PMU τοποθετείται στο ζυγό που φέρει τις περισσότερες διασυνδέσεις με μη παρατηρήσιμους ζυγούς και η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το δίκτυο καταστεί πλήρως παρατηρήσιμο.

Σημειώνεται ότι η ιεράρχηση των βημάτων 2 και 3 δεν είναι απόλυτη, αλλά εξαρτάται από την τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη βέλτιστη λύση. Εάν η αμοιβαία εναλλαγή των βημάτων 2 και 3 και η εξ αρχής εκτέλεση του αλγορίθμου δώσουν λύση με μικρότερο αριθμό PMUs, τότε η λύση αυτή λαμβάνεται ως βέλτιστη, διαφορετικά η διαδικασία τερματίζεται και βέλτιστη θεωρείται η προηγούμενη αποθηκευμένη λύση.

Πίνακας 1: Επεξήγηση μητρών πρακτικού αλγορίθμου τοποθέτησης PMU

Μήτρα	**Επεξήγηση**
RB *(**R**adial **B**uses)*	Περιλαμβάνει τους ζυγούς που φέρουν μία μόνο διασύνδεση. Ουσιαστικά τα στοιχεία της μήτρας αυτής είναι οι ακτινικοί ζυγοί του δικτύου.
TB *(**T**wo **B**uses)*	Περιλαμβάνει τους ζυγούς δικτύου που φέρουν αυστηρά δύο μόνο διασυνδέσεις.
IC *(**I**nter-**C**onnections)*	Περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του εκάστοτε εξεταζόμενου ζυγού.
OPL *(**O**ptimal **PMU L**ocations)*	Περιλαμβάνει τους ζυγούς στους οποίους έχουν τοποθετηθεί μονάδες PMU.
ITB *(**I**nitial **T**wo **B**uses)*	Περιλαμβάνει τους ζυγούς που φέρουν αυστηρά δύο μόνο διασυνδέσεις, πριν την τοποθέτηση κάποιας μονάδας PMU στο δίκτυο.
IIC *(**I**nitial **I**nter-**C**onnections)*	Περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του εκάστοτε εξεταζόμενου ζυγού, πριν την τοποθέτηση κάποιας μονάδας PMU στο δίκτυο.

5. Επεξηγηματικό παράδειγμα

Για να γίνει αντιληπτή η παραπάνω προτεινόμενη μέθοδος, παρουσιάζεται η εφαρμογή της στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 3. Στο δίκτυο αυτό, οι ακτινικοί ζυγοί του δικτύου είναι οι ζυγοί 11, 13 και 26, οι οποίοι συνδέονται με τους ζυγούς 9, 12 και 25.

RB	11	13	26
IIC	9	12	25

OPL	9	12	25

Οι ζυγοί του δικτύου με δύο διασυνδέσεις, καθώς και οι δύο αυτές διασυνδέσεις, σχηματίζουν τη μήτρα *ITB*:

ITB	1	3	5	7	8	14	16	17	18	19	20	21	23	29	30
IIC1	2	1	2	5	6	12	12	10	15	18	10	10	15	27	27
IIC2	3	4	7	6	28	15	17	16	19	20	19	22	24	30	29

Με *IIC1* και *IIC2* συμβολίζονται οι δύο διασυνδέσεις κάθε ζυγού. Για παράδειγμα ο ζυγός 1 διασυνδέεται με τους ζυγούς 2 και 3. Εφόσον η τοποθέτηση μίας μονάδας PMU σε ένα ζυγό, καθιστά τόσο το ζυγό αυτόν όσο και τους γειτονικούς του παρατηρήσιμους, οι στήλες της μήτρας που αντιστοιχούν σε ζυγούς όπου έχουν τοποθετηθεί PMU διαγράφονται. Συνεπώς η 7η και 8η στήλη, οι οποίες περιλαμβάνουν το ζυγό 12, στον οποίο έχει τοποθετηθεί PMU από το προηγούμενο βήμα, διαγράφονται. Έτσι δημιουργείται μία τροποποιημένη μήτρα *TB*, η οποία θα έχει την ακόλουθη μορφή:

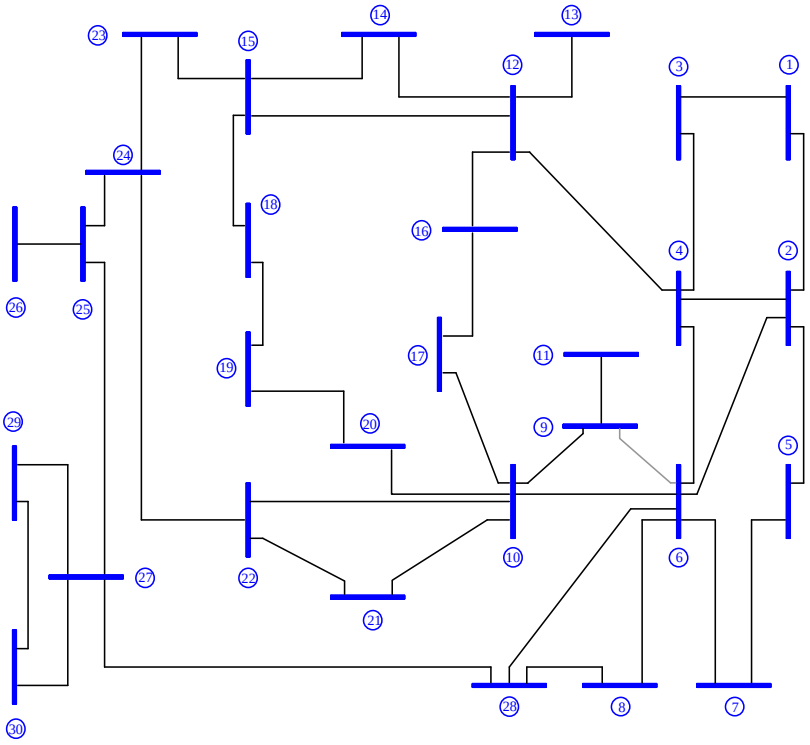
TB	1	3	5	7	8	17	18	19	20	21	23	29	30
IC1	2	1	2	5	6	10	15	18	10	10	15	27	27
IC2	3	4	7	6	28	16	19	20	19	22	24	30	29

Με βάση αυτή τη μήτρα, θα αναζητηθούν όσοι ζυγοί έχουν ακριβώς δύο διασυνδέσεις και συνδέονται εν σειρά μεταξύ τους. Υπάρχουν τρία ζεύγη {1, 3}, {5, 7}, {29, 30} και μία τριάδα {18, 19, 20} ζυγών που πληρούν αυτή την προϋπόθεση.

TB	1	3	5	7	8	17	18	19	20	21	23	29	30
IC1	2	1	2	5	6	10	15	18	10	10	15	27	27
IC2	3	4	7	6	28	16	19	20	19	22	24	30	29

Επειδή η τριάδα των ζυγών αντιστοιχεί σε περιττό αριθμό, τοποθετείται μία μονάδα PMU στο δεύτερο ζυγό της συστοιχίας, δηλαδή στο ζυγό 19, και μία ακόμη στον προτελευταίο ζυγό της εν σειρά συστοιχίας, ο οποίος είναι επίσης ο ζυγός 19. Συνεπώς στη συστοιχία των τριών ζυγών τοποθετείται μόνο μία μονάδα PMU στο ζυγό 19.

Σε σχέση με τις συστοιχίες άρτιου αριθμού ζυγών, η διαδικασία τοποθέτησης είναι περισσότερο ελαστική. Η λύση δεν επηρεάζεται από την επιλογή του ζυγού της κάθε δυάδας στον οποίο θα τοποθετηθεί PMU. Έτσι, στο παράδειγμά μας, μία μονάδα PMU μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο ζυγό 1 είτε στο ζυγό 3, χωρίς να αλλοιώνεται το αποτέλεσμα. Ομοίως, το αποτέλεσμα δεν αλλοιώνεται τοποθετώντας PMU στο ζυγό 5 ή στο ζυγό 7 και τέλος στο ζυγό 29 ή στο ζυγό 30. Εδώ γίνεται αντιληπτό γιατί το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs έχει πολλαπλές λύσεις και όχι μία και μοναδική.



Σχήμα 3: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου IEEE 30

Ολοκληρώνοντας το δεύτερο βήμα, θεωρούμε ότι οι ζυγοί που επιλέγονται για τοποθέτηση PMUs είναι οι 3, 5, 19 και 30. Η μήτρα *OPL* ενημερώνεται εκ νέου και γίνεται:

OPL	3	5	9	12	19	25	30

Διαγράφοντας και πάλι από τη μήτρα *ITB* εκείνες τις στήλες, οι οποίες περιέχουν ζυγούς στους οποίους έχουν τοποθετηθεί PMU, η μήτρα γίνεται:

TB	8	17	21	23
IC1	6	10	10	15
IC2	28	16	22	24

Στη συνέχεια, αναζητούνται οι ζυγοί που εμφανίζονται περισσότερες από μία φορές στις διασυνδέσεις της παραπάνω μήτρας.

TB	8	17	21	23
IC1	6	10	10	15
IC2	28	16	22	24

Είναι προφανές ότι ο ζυγός 10 εμφανίζεται δύο φορές στην παραπάνω μήτρα και άρα η επόμενη μονάδα PMU θα τοποθετηθεί στο ζυγό 10. Μετά την ενημέρωση, η μήτρα *OPL* γίνεται:

OPL	3	5	9	10	12	19	25	30

Διαγράφοντας τις στήλες που περιλαμβάνουν το ζυγό 10, η νέα μήτρα *TB* θα είναι:

TB	8	23
IC1	6	15
IC2	28	24

Με βάση την παραπάνω μήτρα, οι μόνοι ζυγοί που παραμένουν μη παρατηρήσιμοι, είναι οι 6, 8, 15, 23, 24 και 28. Τοποθετώντας μία μονάδα PMU σε οποιονδήποτε από τους ζυγούς που απαρτίζουν τη 2η και 3η στήλη της μήτρας, το δίκτυο καθίσταται αυτομάτως πλήρως παρατηρήσιμο. Επιλέγοντας αυθαίρετα τους ζυγούς 8 και 23, η ενημερωμένη μήτρα *OPL* γίνεται:

OPL	3	5	8	9	10	12	19	23	25	30

Συνεπώς η λύση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης περιλαμβάνει έναν ελάχιστο αριθμό 10 μονάδων PMU, στις θέσεις που αναγράφονται στην παραπάνω μήτρα. Σημειώνεται ότι τα βήματα 4 και 5 δεν χρειάστηκε να εκτελεστούν, διότι το υπό εξέταση δίκτυο κατέστη παρατηρήσιμο με την ολοκλήρωση του τρίτου βήματος. Αυτό συμβαίνει στα περισσότερα δίκτυα τα οποία έχουν ομοιόμορφα κατανεμημένους ζυγούς με μία έως δύο το πολύ διασυνδέσεις.

6. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δοκιμάστηκε στα δίκτυα 14, 30 και 57 ζυγών του IEEE. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τους αντίστοιχους χρόνους εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενου πρακτικού αλγορίθμου

Δίκτυο	**Αρ. PMUs**	**Προτεινόμενη μέθοδος**	**Xu B. et al. 2005**	**Χρόνος (s)**
IEEE–14	4	2, 7, 11, 13	2, 6, 7, 9	0,4800
IEEE–30	10	2, 3, 6, 9, 10, 12, 15, 20, 25, 27	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 25, 27	0,4508
IEEE–57	17	1, 4, 9, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 46, 49, 51, 54	1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 25, 27, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53	0,5079

Με σκοπό την επικύρωση των αποτελεσμάτων, τα τελευταία συγκρίθηκαν με τα ήδη υπάρχοντα στη διεθνή βιβλιογραφία, οπότε και αποδείχτηκε η αποτελεσματικότητά του.

7. Συμπεράσματα

Με τη ραγδαία αύξηση του ρυθμού τοποθέτηση PMUs στους υποσταθμούς, υπάρχει απαίτηση οι σχεδιαστές των δικτύων να προτείνουν τις βέλτιστες θέσεις στις οποίες θα πρέπει αυτές να εγκατασταθούν. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών. Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίλυσή του χρησιμοποιώντας έναν ευρετικό αλγόριθμο και τοπολογικούς κανόνες παρατηρησιμότητας. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διάφορα δίκτυα του IEEE. Προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, αυτά συγκρίθηκαν με άλλα ήδη γνωστά από τη βιβλιογραφία. Η σύγκριση έδειξε ότι οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές είτε αμεληθούν οι μηδενικές εγχύσεις είτε αυτές ληφθούν υπόψη. Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών βασίζεται στη γρήγορη επισκόπηση των εξεταζόμενων δικτύων παρέχοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

8. Βιβλιογραφία

Alexopoulos T.A., Manousakis N.M., and Korres G.N., "*Fault location observability using phasor measurements units via semidefinite programming*", IEEE Access, 4, p.p. 5187-5195, 2016.

Chen J. and Abur A., "*Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation*", IEEE Trans. Power Syst., 21, p.p. 1608-1615, 2006.

Jiang W., Vittal V. and Heydt G.T., "*A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements*", IEEE Trans. Power Syst., 22, p.p. 1–6, 2007.

Korres G.N., Manousakis N.M., Xygkis T.C. and Löfberg J., "*Optimal phasor measurement unit placement for numerical observability in the presence of conventional measurements using semidefinite programming*", IET Gen. Trans. & Distrib., 9, p.p. 2427-2436, 2015.

Koutsoukis N.C., Manousakis N.M., Georgilakis P.S. and Korres G.N., "*Numerical Observability Method for Optimal PMU Placement using Recursive Tabu Search Method*", IET Gen. Trans. & Distrib., 7, p.p. 347-356, 2013.

Manousakis N.M., Korres G.N. and Georgilakis P.S., "*Taxonomy of PMU placement methodologies*", IEEE Trans. Power Syst., 27, p.p. 1070-1077, 2012.

Manousakis N.M. and Korres G.N., "*A weighted least squares algorithm for optimal PMU placement*", IEEE Trans. Power Syst., 28, p.p. 3499-3500, 2013.

Manousakis N.M. and Korres G.N., "*Optimal PMU placement for numerical observability considering fixed channel capacity – A Semidefinite Programming Approach*", IEEE Trans. Power Syst., 31, p.p. 3328-3329, 2016.

Nuqui R.F. and Phadke A.G., "*Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability*", IEEE Trans. Power Del., 20, p.p. 2381-2388, 2005.

Peng J., Sun Y. and Wang H.F., "*Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm*", Int. J. Elect. Power Energy Syst., 28, p.p. 223-231, 2006.

Theodorakatos N.P., Manousakis N.M. and Korres G.N., "*A Sequential Quadratic Programming Method for Contingency-Constrained PMU Placement*", Inter. Trans. Elec. Energy Syst., 25, p.p. 3185-3211, 2015.

Theodorakatos N.P., Manousakis N.M. and Korres G.N., "*Optimal Placement of PMUs with Linear and Nonlinear Models*", Elec. Power Comp. and Syst., 43, p.p. 357-373, 2015.

Xu B., Yoon Y.J. and Abur A., "*Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation*", 2005, PSERC Publication 05-20.

Xygkis T.C., Korres G.N. and Manousakis N.M., "*Fisher Information based Meter "Placement in Distribution Grids via the D-optimal Experimental Design*", IEEE Trans. Smart Grid, DOI: 10.1109/TSG.2016.2592102, 2016.