



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΕ ΕΞΥΠΝΑ
ΔΙΚΤΥΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Φοιτητής: ΜΙΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ
ΑΜ: 43695

Επιβλέπων Καθηγητής

Νικόλαος Μανουσάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024



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

Diploma Thesis

OPTIMAL PLACEMENT OF PMUs AND PDCs IN SMART GRIDS

Student: MILOS CHRISTOS
Registration Number: 43695

Supervisor

Nikolaos Manousakis
Associate Professor

ATHENS-EGALEO, JULY 2024

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

Νικόλαος Μανουσάκης Αν. Καθηγητής ΠΑΔΑ	Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος Καθηγητής ΠΑΔΑ	Κωνσταντίνος Καλκάνης Επ. Καθηγητής ΠΑΔΑ
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Ονοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),
Ιούλιος, 2024**

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΜΙΛΟ ΧΡΗΣΤΟΣ Του ΜΑΡΚΟΥ, με αριθμό μητρώου 43695 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο/Η Δηλών/ούσα
(ΜΙΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ)

(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)



Σελίδα ευχαριστιών

Το παρόν έγγραφο αποτελεί το τελικό ποιον της διπλωματικής εργασίας του Χρήστου Μίλου.

Με την ολοκλήρωση της , θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους τους ανθρώπους που συμμετείχαν στην προσπάθεια μου όλα αυτά τα χρόνια στην σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Ηλεκτρονικών του ΠΑΔΑ

Κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου , καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Ηλεκτρονικών, κ. Νικόλαο Μανουσάκη. Αφενός για το γεγονός ότι μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση του εν λόγω θέματος , αφετέρου διότι υπήρξε σπουδαίος καθηγητής. Του οφείλουμε πολλά στην διάρκεια αυτών των χρονών και εγώ και όλοι οι συνάδελφοι.

Μετέπειτα δεν θα πρέπει να ξεχάσω την συμπαράσταση που έλαβα από την οικογένεια μου από το ξεκίνημα των σπουδών μου μέχρι και την ολοκλήρωση αυτή της διπλωματικής εργασίας. Καθώς αποτελούσαν στήριγμα σε όλη την πορεία μου καθώς και κίνητρο.

Χρήστος Μ. Μίλος

Περίληψη

Η παρούσα εργασία στοχεύει στη διερεύνηση, ανάλυση και σύγκριση μαθηματικών μοντέλων και αλγορίθμων για τη βέλτιστη τοποθέτηση των Μονάδων Μετρήσεων Φάσης (PMU) και των Συγκεντρωτών Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών (PDC) σε Συστήματα Ευρείας Παρακολούθησης (WAMS). Κύριοι στόχοι της εργασίας είναι η ανάδειξη των σύγχρονων μεθόδων και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τομέα, η κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους. Παράλληλα, η εργασία εξετάζει τις μελλοντικές κατευθύνσεις για έρευνα και ανάπτυξη και παρέχει πρακτικά συμπεράσματα για τη βελτίωση της λειτουργίας και της ασφάλειας των ενεργειακών συστημάτων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατανόηση των υφιστάμενων προσεγγίσεων και αλγορίθμων. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι στο περιβάλλον του Matlab, οι οποίοι αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν. Ο πρώτος αλγόριθμος παρουσιάζει απλότητα στη χρήση και εφαρμογή, αλλά απαιτεί τη χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, λόγω του μεγάλου χώρου λύσεων. Ο δεύτερος αλγόριθμος, από την άλλη πλευρά, παρέχει έναν εξαντλητικό έλεγχο του χώρου λύσεων, προσφέροντας σιγουριά στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, αν και παρουσιάζει αυξημένο χρόνο εκτέλεσης.

Από την ανάλυση και τη σύγκριση των δύο αλγορίθμων, προέκυψε ότι και οι δύο προσεγγίσεις έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προτεραιότητες του εκάστοτε περιβάλλοντος. Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ιδανικός για περιπτώσεις που απαιτούν γρήγορες λύσεις με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης, ενώ ο δεύτερος είναι προτιμότερος για περιπτώσεις που απαιτούν απόλυτη ακρίβεια και δεν υπάρχει περιορισμός στον χρόνο εκτέλεσης.

Η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC σε WAMS είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της λειτουργίας και της ασφάλειας των ενεργειακών συστημάτων. Επιπλέον, ενισχύεται η κατανόηση και η σημασία αυτού του τομέα, προωθώντας την έρευνα και την ανάπτυξη νέων μεθόδων και αλγορίθμων. Οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας των ενεργειακών συστημάτων, ενώ παράλληλα ανοίγουν νέους δρόμους για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη.

Συνοψίζοντας, η εργασία επισημαίνει ότι οι δύο αναπτυγμένοι αλγόριθμοι προσφέρουν σημαντικές εναλλακτικές λύσεις για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC σε WAMS. Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις και προτεραιότητες του κάθε συστήματος, καθιστώντας τη μελέτη αυτή πολύτιμη για τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και των συστημάτων παρακολούθησης.

Λέξεις – κλειδιά

Βελτιστοποίηση, WAMS, Βέλτιστη τοποθέτηση PDU και PDC, Έξυπνα δίκτυα

Abstract

This thesis aims to investigate, analyze and compare mathematical models and algorithms for the optimal placement of Phase Measurement Units (PMU) and PDCs in Wide Area Monitoring Systems (WAMS). The main objectives of the thesis are to highlight the modern methods and algorithms used in this field, to understand their advantages and limitations and to evaluate their effectiveness. At the same time, the thesis examines future directions for research and development and provides practical conclusions for improving the operation and security of energy systems.

The methodology followed included an extensive literature review to understand existing approaches and algorithms. Afterwards, two different algorithms were developed in the Matlab environment, which were evaluated and compared. The first algorithm is simple to use and implement, but requires the use of artificial intelligence methods such as genetic algorithms due to the large solution space. The second algorithm, on the other hand, provides an exhaustive check of the solution space, offering confidence in finding the optimal solution, although it exhibits increased execution time.

From the analysis and comparison of the two algorithms, it emerged that both approaches have their own advantages and can be used depending on the requirements and priorities of each environment. The first algorithm is ideal for cases that require fast solutions using artificial intelligence, while the second is preferable for cases that require absolute accuracy and no execution time limitation.

The thesis concludes that the optimal placement of PMUs and PDCs in WAMS is critical for improving the operation and security of energy systems. In addition, it enhances the understanding and importance of this field, promoting research and development of new methods and algorithms. The observations and conclusions of the work can be used to improve the performance and safety of energy systems, while opening new avenues for future research and development.

In summary, the thesis points out that the two developed algorithms offer significant alternatives for optimal placement of PMUs and PDCs in WAMS. The choice of the appropriate approach depends on the particular requirements and priorities of each system, making this study valuable for the field of electricity and monitoring systems.

Keywords

Optimization, WAMS, Optimal placement of PDU and PDCs, Smart grids

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	11
Κατάλογος Εικόνων	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	13
Σκοπός και στόχοι	14
Μεθοδολογία.....	14
Καινοτομία	14
Δομή	14
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Έξυπνα Δίκτυα και Συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης ευρείας περιοχής.....	16
1.1 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)	16
1.2 Συστήματα Παρακολούθησης Ευρείας Περιοχής (WAMS).....	22
1.2.1 Συστήματα παρακολούθησης ευρείας περιοχής: Ενοσιολογική επισκόπηση.....	23
1.2.2 Αρχιτεκτονικές WAMS	24
1.2.3 Τεχνολογίες μέτρησης και ανίχνευσης.....	26
1.2.4 Σχεδιασμός αρχιτεκτονικής WAMS	29
1.2.5 Κατανεμημένα και ημι-κατανεμημένα πλαίσια παρακολούθησης	30
1.2.6 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων.....	33
1.2.7 Δίκτυα φασιθετών	34
1.2.8 Προκλήσεις των μελλοντικών ευφυών συστημάτων παρακολούθησης και ανάλυσης.....	39
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Τεχνολογία συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών	44
2.1 Βασικοί ορισμοί του φασιθέτη, της συχνότητας και του ROCOF	45
2.2 Μόνιμη κατάσταση και δυναμικές συνθήκες σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος.....	47
2.3 Η σημασία του μοντέλου: Κλασσικός φασιθέτης και δυναμικός φασιθέτης	49
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Βέλτιστη τοποθέτηση PMU και PDC, Βιβλιογραφική ανασκόπηση	52
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Μεθοδολογία.....	56
4.1 Ερευνητική μέθοδος	56
4.2 Παρουσίαση εξεταζόμενων πρότυπων δικτύων.....	56
4.2.1 IEEE-14	56
4.2.2 IEEE-57	57
4.2.3 IEEE-118	58
4.3 Εξεταζόμενο μοντέλο 1: Το Μοντέλο υπολογισμού των Bronsle & Jungare [85].....	59
4.3.1 Δημιουργία αλγορίθμου υπολογισμού βέλτιστης τοποθέτησης PMUs και PDCs βάσει του μοντέλου των Bronsle & Jungare.....	61
4.3.2 Δομή και λειτουργία πρώτου γενετικού αλγορίθμου	63
4.3.3 Δομή και λειτουργία δευτέρου γενετικού αλγορίθμου	65
4.4 Εξεταζόμενο μοντέλο 2: Το Μοντέλο υπολογισμού των Haghghatfar et al. [86]	65
4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	67
4.5.1 Μοντέλο υπολογισμού των Bronsle & Jungare.....	67
4.5.2 Μοντέλο υπολογισμού των Haghghatfar et al.	76
4.6 Σύγκριση εξεταζόμενων αλγορίθμων	78
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	81
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	82

Παράρτημα Α: Αλγόριθμοί εύρεσης βέλτιστης λύσης για το μοντέλο της εργασίας των Bronsle & Jungare [85]	89
Βασικός κώδικας (γενετικός αλγόριθμος 1).....	89
Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού (γενετικός αλγόριθμος 1)	91
Συνάρτηση υπολογισμού τιμής αντικειμενικής συνάρτησης (γενετικός αλγόριθμος 1)	91
Συνάρτηση αναπαραγωγής (γενετικός αλγόριθμος 1).....	91
Συνάρτηση Crossover (γενετικός αλγόριθμος 1).....	92
Συνάρτηση μετάλλαξης (γενετικός αλγόριθμος 1).....	93
Συνάρτηση κλήσης γενετικού αλγορίθμου 2	93
Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού (γενετικός αλγόριθμος 2)	94
Συνάρτηση υπολογισμού τιμής αντικειμενικής συνάρτησης (γενετικός αλγόριθμος 2)	95
Συνάρτηση αναπαραγωγής (γενετικός αλγόριθμος 2).....	95
Συνάρτηση Crossover (γενετικός αλγόριθμος 2).....	96
Συνάρτηση μετάλλαξης (γενετικός αλγόριθμος 2).....	97
Παράρτημα Β Αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστης λύσης βάσει του μοντέλου των Haghghatfar et al. [86]	98

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Παράμετροι γενετικού 1	63
Πίνακας 2 Παράμετροι γενετικού 2	65
Πίνακας 3 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-14	68
Πίνακας 4 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-57	71
Πίνακας 5 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-118	75
Πίνακας 6 Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου των Haghghatfar et al.	76

.....

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Ολοκληρωμένη υποδομή και αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου που αποτελείται από παραγωγή, μεταφορά, διανομή και κατανάλωση [1].	19
Εικόνα 2 Γενική διαμόρφωση WAMS [73]	24
Εικόνα 3 Μια γενικευμένη αρχιτεκτονική παρακολούθησης. Οι καθαρά αποκεντρωμένες ή συγκεντρωτικές δομές θεωρούνται ως μια ιδιαίτερη περίπτωση αυτού του μοντέλου. [73]	31
Εικόνα 4 Σχηματική ανάλυση δεδομένων που δείχνει διάφορα στάδια στην ανάλυση πολυμεταβλητών δεδομένων. (α) εξαρτήσεις εντός του μπλοκ, (β) εξαρτήσεις εντός του μπλοκ, (γ) ολοκλήρωση δεδομένων ή συγχώνευση δεδομένων και (δ) μείωση διαστάσεων [73]	33
Εικόνα 5 Βασική αναπαράσταση γράφου που αποτελείται από κορυφές και ακμές. Σε αυτήν την απεικόνιση, οι κύκλοι σε ανοιχτό μπλε χρώμα αντιπροσωπεύουν τις πηγές δεδομένων του συστήματος ενώ τα βέλη υποδηλώνουν γραμμές μετάδοσης. Οι κορυφές μπορεί να έχουν θέσεις στο χρόνο και το χώρο, ενώ οι ακμές μπορεί να έχουν βάρη, κατευθύνσεις και σημάδια ως κύρια χαρακτηριστικά [72]	34
Εικόνα 6 Ένα απλό παράδειγμα που απεικονίζει την αναπαράσταση των ακμών ως πιθανολογικά βάρη ($m = 7$). Τα βάρη ακμών p_{ij} υποδηλώνουν την πιθανότητα μετάβασης από την κορυφή i στην κορυφή j σε ένα βήμα [73]	37
Εικόνα 7 Ένα απλό παράδειγμα σήματος στις κορυφές ενός γράφου. Το στιγμιαίο ύψος αντιπροσωπεύει την τιμή του σήματος [73]	39
Εικόνα 8 Δύο συνημιτονοειδή με διαφορετική γωνία φάσης στο $t=0$ [85]	46
Εικόνα 9 Σήμα διαμορφωμένο πλάτος: (Α) αναπαράσταση πεδίου χρόνου και (Β) αναπαράσταση πεδίου συχνοτήτων [85]	49
Εικόνα 10 Ποιοτική συμπεριφορά του δυναμικού μοντέλου φάσορα στο πεδίο συχνοτήτων [85]	50
Εικόνα 11 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-14	57

Εικόνα 12 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-57	58
Εικόνα 13 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-118.....	59
Εικόνα 14 Γενική δομή του αλγορίθμου επίλυσης.....	63
Εικόνα 15 Γραφική αποτύπωση λύσης 1 για το δίκτυο IEEE-14.....	68
Εικόνα 16 Γραφική αποτύπωση λύσης 2 για το δίκτυο IEEE-14.....	69
Εικόνα 17 Γραφική αποτύπωση λύσης 3 για το δίκτυο IEEE-14.....	69
Εικόνα 18 Γραφική αποτύπωση λύσης 4 για το δίκτυο IEEE-14.....	70
Εικόνα 19 Γραφική αποτύπωση λύσης 5 για το δίκτυο IEEE-14.....	70
Εικόνα 20 Γραφική αποτύπωση λύσης 1 για το δίκτυο IEEE-57.....	72
Εικόνα 21 Γραφική αποτύπωση λύσης 2 για το δίκτυο IEEE-57.....	72
Εικόνα 22 Γραφική αποτύπωση λύσης 3 για το δίκτυο IEEE-57.....	73
Εικόνα 23 Γραφική αποτύπωση λύσης 4 για το δίκτυο IEEE-57.....	73
Εικόνα 24 Γραφική αποτύπωση λύσης 5 για το δίκτυο IEEE-57.....	74
Εικόνα 25 Γραφική αποτύπωση λύσης για το δίκτυο IEEE-14.....	77
Εικόνα 26 Γραφική αποτύπωση λύσης για το δίκτυο IEEE-57.....	77

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMU) και των συγκεντρωτών συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών (PDC) σε συστήματα παρακολούθησης ευρείας περιοχής (WAMS) αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την αποτελεσματική λειτουργία και την ασφάλεια του ηλεκτρικού δικτύου. Τα WAMS συμβάλλουν στη βελτίωση της επίβλεψης, της διάγνωσης και του ελέγχου του δικτύου, ενώ η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC επιτρέπει την αξιοποίηση των δεδομένων μετρήσεων με τον πλέον αποδοτικό και αποτελεσματικό τρόπο. Η κρίσιμη σημασία της βέλτιστης τοποθέτησης των PMU και PDC έγκειται στην ανάγκη/απαίτηση για την παροχή μιας πλήρους και αξιόπιστης εικόνας της κατάστασης του δικτύου, η οποία είναι απαραίτητη για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν στη λειτουργία και στην ασφάλεια του ηλεκτρικού συστήματος.

Η τοποθέτηση των PMU σε στρατηγικά σημεία του δικτύου επιτρέπει την παρακολούθηση των φορτίων, την ανίχνευση ασυνήθιστων συμπεριφορών και την εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Αντίστοιχα, η βέλτιστη τοποθέτηση των PDC επιτρέπει την αποτελεσματική συγκέντρωση, αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τις PMU. Οι PDC λειτουργούν ως κεντρικά σημεία συγκέντρωσης των δεδομένων των μετρήσεων των PMU και επιτρέπουν την αποτελεσματική διανομή των δεδομένων σε εφαρμογές εποπτείας, ανάλυσης και ελέγχου του δικτύου.

Μια σημαντική πτυχή της βέλτιστης τοποθέτησης των PMU και PDC είναι η βελτιστοποίηση του κόστους και της αποδοτικότητας. Η επιλογή στρατηγικών σημείων εγκατάστασης για τις PMU με βάση τα κριτήρια της παρακολούθησης της κατάστασης, της ανίχνευσης ασυνήθιστων συμπεριφορών και της ελαχιστοποίησης του κόστους εγκατάστασης αποτελεί σημαντική πρόκληση. Επίσης, η τοποθέτηση των PDC πρέπει να γίνει με τρόπο που να εξασφαλίζει την αποτελεσματική συγκέντρωση και επεξεργασία των δεδομένων με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Επιπλέον, η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC συμβάλλει στην ενίσχυση της αντοχής και της ασφάλειας του ηλεκτρικού δικτύου απέναντι σε διάφορες απειλές και διαταραχές. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και ανίχνευσης των ανωμαλιών και των εκτάκτων καταστάσεων, η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC επιτρέπει την άμεση αντίδραση και τη λήψη αποφάσεων για την πρόληψη ή την αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων στο δίκτυο.

Τέλος, η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC σε WAMS συμβάλλει στην προώθηση της έρευνας και της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών και μεθόδων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των ηλεκτρικών δικτύων, και κατά συνέπεια αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης, με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του ηλεκτρικού δικτύου σε παγκόσμιο επίπεδο.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία επικεντρώνεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση και σύγκριση αλγορίθμων για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC σε συστήματα WAMS. Η ανασκόπηση περιλαμβάνει μια εκτενή ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας, παρουσιάζοντας την σχετική θεωρία, καθώς και διάφορους αλγορίθμους και μεθόδους που έχουν προταθεί για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU και PDC. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε σημαντικές έρευνες και εφαρμογές στον τομέα, ενώ παρέχεται μια σφαιρική εικόνα των πλεονεκτημάτων, των περιορισμών και των πιθανών κατευθύνσεων για μελλοντικές έρευνες. Περαιτέρω, επιλέγονται δύο αλγόριθμοι από τους προτεινόμενους στην βιβλιογραφία και εξετάζονται σε σχέση με τα αποτελέσματά τους στην επίλυση του προβλήματος για μια σειρά από πρότυπα δίκτυα.

Σκοπός και στόχοι

Ο σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση, η ανάλυση και η σύγκριση των μαθηματικών μοντέλων και των αλγορίθμων επίλυσης, σε σχέση με το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης των PMU και PDC σε WAMS. Οι στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν την ανάδειξη των σύγχρονων μεθόδων και αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στον τομέα, την κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους καθώς και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους. Επιπλέον, η εργασία αποσκοπεί στην παρουσίαση των πιθανών κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα, καθώς και στην παροχή πρακτικών συμπερασμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της λειτουργίας και της ασφάλειας των ενεργειακών συστημάτων. Τέλος, η εργασία έχει ως στόχο την προώθηση της κατανόησης και της ανάδειξης της σημασίας της βέλτιστης τοποθέτησης PMU και PDC σε WAMS, καθώς και την ενίσχυση της έρευνας και της ανάπτυξης σε αυτόν τον σημαντικό τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας.

Μεθοδολογία

Για τις ανάγκες της εργασίας και την εκπλήρωση των στόχων και των σκοπών της διενεργήθει μια εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση τόσο σε σχέση με το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και σε σχέση με τις προτεινόμενες μεθόδους βέλτιστης τοποθέτησης PMU και PDC σε WAMS. Δύο εκ των προτεινόμενων μεθόδων επιλέχθηκαν και αναπτύχθηκαν αντίστοιχοι αλγόριθμοι στο περιβάλλον του Matlab με στόχο την διερεύνηση της λειτουργίας τους και την σύγκριση αυτής και των αποτελεσμάτων που αποδίδουν.

Καινοτομία

Η καινοτομία της εργασίας αναδεικνύεται μέσω της προσέγγισης που ακολουθείται στην επιλογή και ανάπτυξη των αλγορίθμων για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU και PDC σε WAMS. Η εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση που διενεργήθηκε καλύπτει τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και τις προτεινόμενες μεθόδους, επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση των υφιστάμενων προσεγγίσεων στον τομέα. Επιπλέον, η ανάπτυξη δύο διαφορετικών αλγορίθμων στο περιβάλλον του Matlab αποτελεί το πυρήνα της καινοτομίας, καθώς η σύγκριση αυτών των αλγορίθμων επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσής τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την καταλληλότερη προσέγγιση για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η εργασία παρουσιάζει μια σφαιρική περιγραφή των διαθέσιμων μεθόδων και την απόδοσή τους, ενθαρρύνοντας την εξέλιξη και την καινοτομία στον τομέα της βέλτιστης τοποθέτησης PMU και PDC σε WAMS.

Δομή

Η δομή της εργασίας έχει ως κάτωθι:

Το πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζει εν είδη εισαγωγής το θεωρητικό πλαίσιο που αφορά σε Έξυπνα Δίκτυα και WAMS. Παρουσιάζονται οι ορισμοί και τα χαρακτηριστικά των WAMS, η λειτουργία τους και οι παραμέτρων και προδιαγραφές σύνδεσής τους. Επιπλέον παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά σε γράφους, καθώς αποτελούν βασικό στοιχείο για την μοντελοποίηση και ανάλυση δικτύων.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στα ειδικά χαρακτηριστικά των PMU, PDC που διέπουν την λειτουργία τους και επηρεάζουν το δίκτυο στο οποίο τοποθετούνται.

Το τρίτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζει μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των μεθοδολογιών για την τοποθέτηση PMU/ PDC που προτείνονται στην συναφή βιβλιογραφία.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στο ερευνητικό σκέλος της εργασίας, τους αλγορίθμους που επιλέχθηκαν για υλοποίηση, τους σχετικούς αλγορίθμους εκτενώς και εν τέλει τα αποτελέσματα της χρήσης των αλγορίθμων. Το κεφάλαιο κλείνει με την συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων.

Η εργασία κλείνει με την παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων.

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Έξυπνα Δίκτυα και Συστήματα παρακολούθησης και ανάλυσης ευρείας περιοχής

1.1 Έξυπνα Δίκτυα (Smart Grids)

Οι καινοτομίες στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα διαφορετικά πρότυπα ζήτησης ενέργειας και οι πολιτικές εξοικονόμησης ενέργειας έχουν καταστήσει ξεπερασμένη την έννοια του συμβατικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Μια νέα ιδέα ενός ευφυούς δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από εύελικτη λειτουργικότητα και αξιόπιστες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) έχει αντικαταστήσει το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και ονομάζεται έξυπνο δίκτυο. Τα συμβατικά δίκτυα ισχύος περιέχουν όλα τα εξαρτήματα στο σταθμό παραγωγής ενέργειας για να εξασφαλίσουν τη μετάδοση, τη διανομή και την κατανάλωση ενέργειας. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι χύδην μονάδες, όπως ατμοηλεκτρικοί σταθμοί με βάση τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής αερίου, τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, τους πυρηνικούς σταθμούς και τους σταθμούς συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής χύδην μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν αιολικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα (ΦΒ) [1].

Ο όρος συμβατικό δίκτυο, αναφέρεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γραμμές μεταφοράς, γραμμές διανομής υποσταθμών και το φορτίο των καταναλωτών. Επί του παρόντος, οι συσκευές συνδέονται σε μια παροχή ώστε να λειτουργήσουν. Κάτι που αξίζει να αναφερθεί εδώ για το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι περιέχει μονοκατευθυντικά δίκτυα στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια ρέει από την εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον υποσταθμό και στον τελικό χρήστη. Το υπάρχον συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας λειτούργησε πρώτη φορά στη δεκαετία του 1890 και με την πάροδο του χρόνου έγιναν αποδεκτές και υιοθετήθηκαν σειρά βελτιώσεων στην παροχή της ενέργειας από την παραγωγή στον τελικό χρήστη [1].

Η εγκατάσταση του συμβατικού δικτύου περιλαμβάνει παλιά τεχνολογία που απαιτεί συνεχή συντήρηση για να διασφαλιστεί η αδιάλειπτη ροή ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στον καταναλωτή. Με τις εξελίξεις στον εξοπλισμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και την εισαγωγή της κατανεμημένης παραγωγής, της έξυπνης μέτρησης, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και της ιδέας του έξυπνου δικτύου, οι προκλήσεις στην υιοθέτηση του έξυπνου δικτύου έχουν αυξηθεί. Εν γένει οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται και οδήγησαν στην ανάδυση της ιδέας του έξυπνου δικτύου είναι οι ακόλουθες [1]:

- Οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, ειδικά οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής με βάση ορυκτά καύσιμα, κατασκευάστηκαν κοντά σε τοποθεσίες χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κοινότητα των απομακρυσμένων περιοχών που δημιουργούν την έννοια των ενεργειακών συστημάτων εκτός δικτύου. Οι ενεργειακές ανάγκες του αυξανόμενου πληθυσμού και των νεόδμητων τοποθεσιών δεν συνδέονται με το συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και βρίσκονται εκτός του κύριου προοδευτικού ρεύματος της χώρας τους.
- Τα συμβατικά δίκτυα αδυνατούν να ενσωματώσουν τις ενεργειακές απαιτήσεις κατά τις ώρες αιχμής, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα μη κάλυψης του φορτίου.

- Στα συμβατικά δίκτυα, εάν οι καταναλωτές παράγουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως οι ανεμογεννήτριες, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα ή οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής βιοαερίου, δεν είναι σε θέση να πουλήσουν την πλεονάζουσα ενέργειά τους στο δίκτυο.
- Η ροή ισχύος και η επικοινωνία στο συμβατικό δίκτυο είναι μονής κατεύθυνσης, δηλαδή, από την παραγωγή ενέργειας στον καταναλωτή. Αυτό το σύστημα είναι ανίκανο να εκτιμήσει την κατάσταση της έλλειψης ενέργειας από την πλευρά της παραγωγής και την απαίτηση ενέργειας από την πλευρά του καταναλωτή.
- Το ηλεκτρικό δίκτυο κινδυνεύει να καταρρεύσει εξαιτίας της ανισορροπίας του φορτίου. Όταν η ζήτηση φορτίου υπερβαίνει την παραγωγή ενέργειας, το σύστημα καταρρέει και μπορεί να προκύψει πλήρης διακοπή λειτουργίας.
- Οι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας στο συμβατικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαρχαιωμένοι, παρέχοντας πληροφορίες μόνο ως προς τη συνολική ενέργεια που καταναλώνεται. Δεν καταγράφουν τον ακριβή χρόνο της ενέργειας που καταναλώθηκε, κάτι που θα έδειχνε αν καταναλώθηκε σε ώρες αιχμής ή εκτός αιχμής.

Ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί να οριστεί ως ένα δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς και παράδοσης ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο δημιουργεί ένα δίκτυο επικοινωνίας μεταξύ του προμηθευτή ρεύματος και του καταναλωτή ρεύματος με τη βοήθεια έξυπνων αισθητήρων, έξυπνων μετρητών, ηλεκτρικών οχημάτων και βοηθητικών υπηρεσιών παραγωγής ενέργειας. Το έξυπνο δίκτυο εισάγει ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας που βοηθά στην εξισορρόπηση της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας για την αποτελεσματική παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλότερο κόστος. Ο νόμος για την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια (EISA 2007) έχει υποδείξει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά ενός έξυπνου δικτύου [1]:

- Η αποτελεσματικότητα, η ασφάλεια και η αξιοπιστία του έξυπνου δικτύου βελτιώνονται με την πρόοδο της τεχνολογίας ελέγχου και της τεχνολογίας επικοινωνίας.
- Οι πόροι και η λειτουργία του έξυπνου δικτύου είναι βελτιστοποιημένα και ή
- Ενσωματώνονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η κατανεμημένη παραγωγή.
- Η διαχείριση από την πλευρά της ζήτησης έχει αναπτυχθεί στο έξυπνο δίκτυο.
- Ο καταναλωτής μπορεί να ελέγξει το πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας και μπορεί να επικοινωνήσει με το δίκτυο σε πραγματικό χρόνο.
- Αναπτύσσονται συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και παρέχονται βοηθητικές υπηρεσίες μέσω υβριδικών και plug-in υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων.
- Έξυπνες συσκευές, έξυπνοι μετρητές και έξυπνοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται από τον καταναλωτή μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα

Η διαφορά μεταξύ του συμβατικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και του έξυπνου δικτύου είναι η αρχιτεκτονική τους. Η αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου αποτελείται από διαφορετικά επίπεδα όπως το επίπεδο εφαρμογής, το επίπεδο επικοινωνίας και το επίπεδο του συστήματος ισχύος. Η υποδομή του έξυπνου δικτύου φαίνεται στην εικόνα 1 [1].

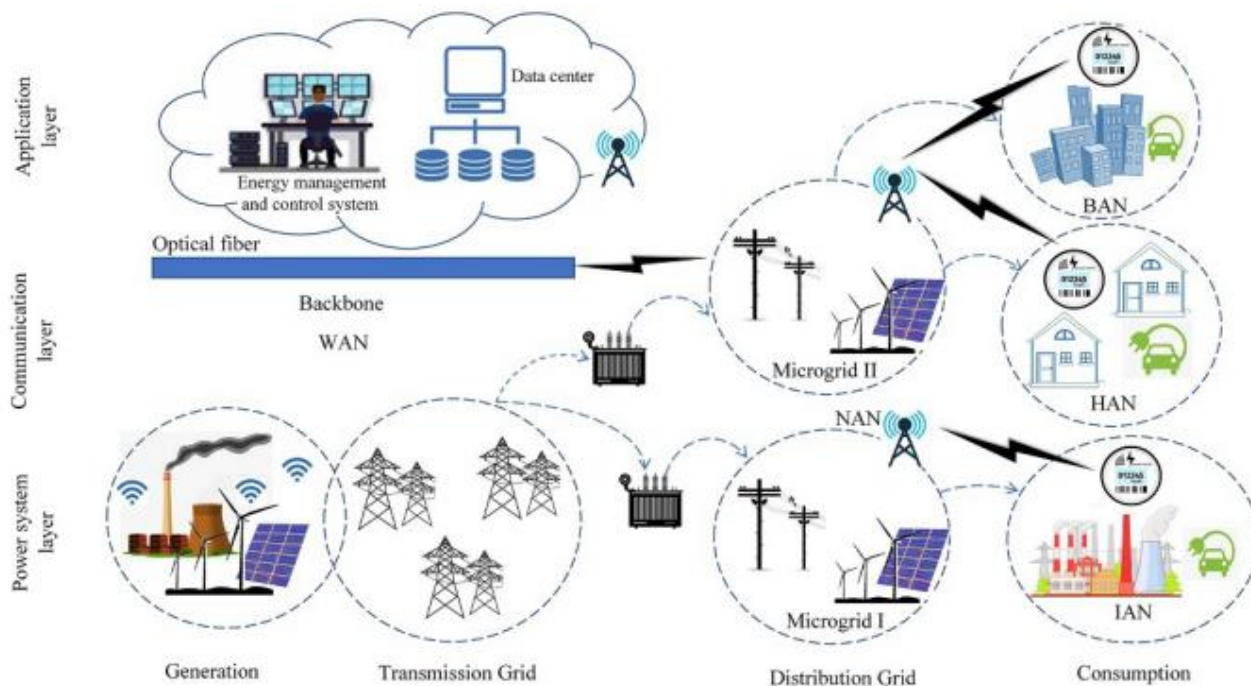
Το επίπεδο εφαρμογής επιτρέπει εφαρμογές πελατών, εφαρμογές έξυπνων μετρητών και εφαρμογές ηλεκτρικού δικτύου. Σε εφαρμογές πελατών, επιτρέπει την οικιακή αυτοματοποίηση, την τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο και τη διαχείριση της ζήτησης. Σε εφαρμογές έξυπνων μετρητών, επιτρέπει την αυτόματη ανάγνωση του μετρητή και την επικοινωνία μεταξύ του καταναλωτή και της εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας σχετικά με τη χρέωση και τη ζήτηση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.

Η αρχιτεκτονική του επιπέδου επικοινωνίας είναι η κύρια διαφορά μεταξύ του συμβατικού και του έξυπνου δικτύου. Όλη η επικοινωνία μεταξύ του καταναλωτή, του έξυπνου μετρητή και του

ηλεκτρικού δικτύου γίνεται μέσω του επιπέδου επικοινωνίας. Τα σήματα από όλους τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στο έξυπνο δίκτυο και, ως απόκριση, τα σήματα από τον ελεγκτή για ανάληψη δράσης μεταδίδονται στο επίπεδο επικοινωνίας. Ένα δίκτυο επικοινωνίας με βάση τη γεωγραφία χωρίζεται στις ακόλουθες κατηγορίες [1]:

- Δίκτυο οικιακής περιοχής (HAN): γνωστό και ως δίκτυο περιοχής πελατών, αυτό ενεργοποιεί έξυπνες οικιακές συσκευές και συσκευές και τις συνδέει στον έξυπνο μετρητή. Η εμβέλεια του HAN είναι μικρή και η αξιοπιστία επικοινωνίας με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων είναι υψηλή. Το κόστος υλοποίησης και η κατανάλωση ενέργειας του HAN είναι χαμηλότερα από τους άλλους τύπους δικτύων περιοχής.
- Δίκτυο περιοχής κτιρίου (BAN): αυτό είναι ένα τοπικό δίκτυο (LAN) παρόμοιο με το HAN και καλύπτει ένα ολόκληρο κτίριο. Εάν ένας όροφος ενός κτιρίου θεωρείται LAN, τότε ο συνδυασμός των LAN όλων των ορόφων θεωρείται BAN.
- Δίκτυο περιοχής βιομηχανίας (IAN): πρόκειται για ένα πιο σύνθετο δίκτυο που καλύπτει ένα ολόκληρο εργοστάσιο ή μια βιομηχανία.
- Δίκτυο περιοχής γειτονιάς (NAN): αυτό είναι υπεύθυνο για τη σύνδεση ενός HAN, BAN και IAN σε ένα WAN. Ένα NAN επιτρέπει στους χρήστες να συνδέονται γρήγορα στο Διαδίκτυο με πολύ χαμηλό κόστος. Δεδομένου ότι το εύρος του NAN είναι υψηλό, ο ρυθμός δεδομένων του είναι επίσης υψηλός. Στο έξυπνο δίκτυο, ένα NAN συνδέει χιλιάδες έξυπνους μετρητές στη βάση δεδομένων.
- Δίκτυο ευρείας περιοχής (WAN): αυτό είναι ένα δίκτυο μεγάλης περιοχής που επιτρέπει την επικοινωνία σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Στο έξυπνο δίκτυο, ένα WAN χρησιμοποιείται από ένα NAN για την αποστολή και λήψη δεδομένων από χιλιάδες μικροδίκτυα, έξυπνους μετρητές και άλλα στοιχεία του έξυπνου δικτύου. Δεδομένου ότι ένας μεγάλος όγκος πληροφοριών μεταφέρεται από ένα WAN, απαιτείται υψηλός ρυθμός δεδομένων για την επικοινωνία και η οπτική ίνα χρησιμοποιείται συνήθως για επικοινωνία WAN.

Το επίπεδο του συστήματος ισχύος λειτουργεί όπως το συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο και χειρίζεται την παραγωγή, τη μετάδοση και τη διανομή της ισχύος στο έξυπνο δίκτυο [1].



Εικόνα 1 Ολοκληρωμένη υποδομή και αρχιτεκτονική του έξυπνου δικτύου που αποτελείται από παραγωγή, μεταφορά, διανομή και κατανάλωση [1].

Τα κύρια πλεονεκτήματα του έξυπνου δικτύου είναι τα κάτωθι [1]:

- **Εξοικονόμηση ενέργειας.** Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, ο άνεμος, το βιοαέριο, η βιομάζα, οι κυψέλες καυσίμου και η γεωθερμία είναι συνεχείς πηγές ενέργειας, αλλά είναι διακοπτόμενες. Αυτή η διακοπή μπορεί να ξεπεραστεί με την ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Με τις εξελίξεις στις τεχνολογίες αξιοποίησης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι συμβατικές πηγές ενέργειας αντικαθίστανται. Επιπλέον, η χρήση τεχνικών πρόβλεψης ενέργειας, έξυπνων συστημάτων μέτρησης και διαχείρισης ενέργειας έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο εξοικονόμηση ενέργειας. Οι πελάτες μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια επαναπρογραμματίζοντας τη χρήση ενέργειας από ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής.
- **Αξιοπιστία.** Η χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας και έξυπνων μετρητών καθιστά το έξυπνο δίκτυο πιο αξιόπιστο. Οι τεχνολογίες επικοινωνίας κρατούν τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, τους φορείς εκμετάλλευσης ενέργειας και τους καταναλωτές ενέργειας σε επαφή και ενημερώνουν συνεχώς την κατάσταση του δικτύου. Οι έξυπνοι μετρητές επιτρέπουν στους καταναλωτές να γνωρίζουν τις ώρες αιχμής και τη σχετική τιμολογιακή πολιτική. Η κατανεμημένη παραγωγή είναι ένα άλλο βασικό στοιχείο που διασφαλίζει την αξιοπιστία του έξυπνου δικτύου. Σε περιόδους που η πηγή ενέργειας δεν είναι διαθέσιμη, μια άλλη πηγή ενέργειας συνεχίζει να τροφοδοτεί το φορτίο.
- **Πρόσδος στα ηλεκτρικά οχήματα.** Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ένα άλλο μέρος του έξυπνου δικτύου και λειτουργούν ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Οι έξυπνοι σταθμοί φόρτισης χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, τα οχήματα επαναφορτίζονται με τη διαδικασία αναγεννητικής πέδησης. Εάν το SOC της μπαταρίας του οχήματος είναι 100%, αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο σε ώρες αιχμής σε ανταγωνιστική υψηλή τιμή και σε ώρες εκτός αιχμής

η μπαταρία μπορεί να επαναφορτιστεί από το δίκτυο με χαμηλότερες τιμές. Ως εκ τούτου, το έξυπνο δίκτυο δημιουργεί ευκαιρίες για την καινοτόμο έρευνα στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων.

- **Μείωση του αποτυπώματος άνθρακα.** Οι βασικές ιδέες πίσω από το έξυπνο δίκτυο είναι η μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα και η προώθηση των ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Κάθε προσπάθεια στο έξυπνο δίκτυο επικεντρώνεται στη μείωση των εκπομπών από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- **Ανταγωνιστική τιμή ενέργειας.** Στα έξυπνα δίκτυα, η ροή ενέργειας και η επικοινωνία είναι αμφίδρομη. Οι καταναλωτές μπορούν να περιορίσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής και εκτός αιχμής. Μπορούν είτε να πουλήσουν την ενέργειά τους στο δίκτυο είτε να την αγοράσουν από το δίκτυο σε σχετικά χαμηλή τιμή. Εάν ένας καταναλωτής αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια από το μικροδίκτυο που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής, θα χρεωθεί λιγότερο, ενώ εάν αγοράσει συμβατικό ηλεκτρισμό με βάση το καύσιμο κατά τις ώρες αιχμής, θα χρεωθεί περισσότερο.
- **Έξυπνες συσκευές και έξυπνα σπίτια/έξυπνα κτίρια.** Η ευφυΐα του έξυπνου δικτύου έγκειται στην ευφυΐα των έξυπνων μετρητών, των έξυπνων συσκευών, των έξυπνων οικιακών συσκευών, των έξυπνων κτιρίων και των έξυπνων πόλεων. Οι έξυπνες συσκευές και οι έξυπνες οικιακές συσκευές μπορούν να έχουν πρόσβαση και να λειτουργούν από οπουδήποτε με τη βοήθεια του Διαδικτύου. Τα έξυπνα σπίτια, τα έξυπνα κτίρια και οι έξυπνες πόλεις βοηθούν στην προώθηση ενός έξυπνου δικτύου

Ωστόσο, η εφαρμογή των έξυπνων δικτύων συναντά μια σειρά από σημαντικές προκλήσεις. Οι κύριες εξ αυτών είναι οι ακόλουθες [1]:

1. Προκλήσεις Επικοινωνίας

- a. **Έλλειψη προτύπων:** Διαφορετικά στοιχεία στο έξυπνο δίκτυο επικοινωνούν μεταξύ τους σε ένα πλαίσιο που απαιτεί πρότυπα. Για να αντιμετωπιστεί η πρόοδος στις τεχνολογίες επικοινωνίας, απαιτούνται προηγμένα πρότυπα επικοινωνίας. Ορισμένα πρότυπα επικοινωνίας έχουν διαμορφωθεί από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO), τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) και το Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων (ANSI). Μερικά από αυτά τα πρότυπα καλύπτουν την επικοινωνία μέσω ηλεκτρικών γραμμών (IEEE 1901), τη διαλειτουργικότητα έξυπνου δικτύου (IEEE 2030), το πρωτόκολλο κατανεμημένου δικτύου επικοινωνίας συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (IEEE 1815–2012), τη μεταφορά δεδομένων συγχρονισμένης φάσης (IEEE C37.118.2–2011), προηγμένη υποδομή μέτρησης και ασφάλεια στον κυβερνοχώρο (IEC 62351).
- b. **Παρεμβολές:** Η παρεμβολή είναι η πρόκληση ασύρματης επικοινωνίας στην οποία το σήμα παρεμβολής από άλλες συσκευές μπορεί να παραμορφώσει τις αρχικές πληροφορίες. Το σήμα παρεμβολής έχει τα δικά του χαρακτηριστικά συχνότητας. Οι τεχνικές εναλλαγής καναλιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποφυγή παρεμβολών από άλλες συσκευές ή το ίδιο το δίκτυο.
- c. **Ρυθμός μεταφοράς:** Καθώς χιλιάδες συσκευές είναι συνδεδεμένες στο έξυπνο δίκτυο, η διασφάλιση υψηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων χωρίς συμβιβασμούς στην ποιότητα της υπηρεσίας (QoS) αποτελεί πρόκληση.

2. Προκλήσεις ασφαλείας

Λόγω της παρουσίας διαφόρων αισθητήρων, επικοινωνιών και Διαδικτύου, ένα έξυπνο δίκτυο είναι πάντα ευάλωτο σε απειλές ασφαλείας. Τα μικροδίκτυα, οι έξυπνοι αισθητήρες, η καταναλωμένη παραγωγή, τα ηλεκτρικά οχήματα και το δίκτυο είναι διασυνδεδεμένα, γεγονός που αυξάνει την ευπάθεια του έξυπνου δικτύου. Οι χάκερ ενδέχεται να έχουν πρόσβαση παράνομα σε συστήματα διαχείρισης λογισμικού και βάσεων δεδομένων, και ενδέχεται να κλέψουν και να αλλάξουν τα δεδομένα των καταναλωτών καθώς και της υπηρεσίας ηλεκτρισμού. Εάν ένας χάκερ αποσυνδέσει την επικοινωνία μεταξύ του καταναλωτή ενέργειας και του παραγωγού ενέργειας, ο έξυπνος μετρητής ενδέχεται να παραβιαστεί για να αλλάξει τις πληροφορίες χρέωσης και τις πιστώσεις χρημάτων. Τα ακόλουθα σημεία είναι περιπτώσεις όπου θα μπορούσε να απειληθεί η ασφάλεια του έξυπνου δικτύου.

- a. **Επίθεση άρνησης υπηρεσίας (DoS):** Οι επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας (DoS) αναφέρονται στην αποτροπή υπηρεσιών προς τους καταναλωτές, οι οποίες μπορούν να ληφθούν από πολλαπλές επιθέσεις σε ένα σύστημα, προκαλώντας το να κατακλύζεται. Έτσι, ο εισβολέας σταματά τις υπηρεσίες στον πελάτη και στέλνει ψευδή μηνύματα στον έλεγχο. Τα μηνύματα ελέγχου ως απόκριση ενδέχεται να αντιμετωπίσουν καθυστέρηση και το πλήρες σύστημα μπορεί να αντιμετωπίσει την αστοχία του συστήματος. Οι προηγμένες επιθέσεις DoS τροποποιούνται ώστε να είναι πολύ δύσκολο να εντοπιστούν, επειδή τείνουν να προέρχονται από αξιόπιστη πηγή και μπορεί να φαίνονται νόμιμες.
- b. **Απόρρητο:** Οι έξυπνοι μετρητές στο έξυπνο δίκτυο αποκτούν διάφορες πληροφορίες σχετικά με τους πελάτες, όπως τον αριθμό της ταυτότητας, την τοποθεσία, τον τρόπο πληρωμής, τα στοιχεία πιστωτικής κάρτας και τις προτιμήσεις φορτίου. Οι εισβολείς μπορεί να παραβιάσουν τον έξυπνο μετρητή ενός χρήστη και να κοιτάξουν το μοτίβο χρήσης ενέργειας για να μαντέψουν πότε οι κάτοικοι είναι στο σπίτι και πότε φεύγουν από το σπίτι. Οι διαφημιστές ενδέχεται να κλέψουν τους αριθμούς επικοινωνίας των πελατών και να τους στείλουν διαφημιστικά μηνύματα. Επομένως, το απόρρητο των πληροφοριών των πελατών πρέπει να διασφαλίζεται.
- c. **Επίθεση Insider:** Οι Insider είναι οντότητες που είναι εξουσιοδοτημένες στο έξυπνο δίκτυο να εκτελούν μια λειτουργία και να διαθέτουν πληροφορίες νόμιμα. Περιλαμβάνουν παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, καταναλωτές ενέργειας, τρίτα μέρη που παρέχουν οποιαδήποτε υπηρεσία, χειριστές και εργαζόμενους. Εάν ένας χρήστης κλέβει πληροφορίες και πραγματοποιήσει παράνομη δραστηριότητα στο έξυπνο δίκτυο, αυτό ονομάζεται επίθεση εμπιστευτικών πληροφοριών. Αυτές οι επιθέσεις αποτελούν σοβαρές απειλές για το έξυπνο δίκτυο, καθώς υπάρχει νομική εξουσία για τη χρήση των κωδικών πρόσβασης και το τείχος προστασίας δεν μπορεί εύκολα να εντοπίσει δόλιες δραστηριότητες. Τέτοιες δραστηριότητες μπορούν να εντοπιστούν ελέγχοντας για ακανόνιστες συμπεριφορές στο σύστημα.
- d. **Έγχυση δεδομένων:** Οι χειριστές συστημάτων μπορούν να στείλουν ψευδείς πληροφορίες στις κεντρικές οντότητες ελέγχου για να τις παραπλανήσουν σχετικά με τις πληροφορίες που σχετίζονται με την πλευρά της παραγωγής ενέργειας ή το τέλος του χρήστη ενέργειας. Ο χειριστής μπορεί να στείλει ψευδή δεδομένα σχετικά με έναν συγκεκριμένο πελάτη για να αλλάξει τις ώρες χρήσης ενέργειας. Ο πελάτης μπορεί να αλλάξει τις ώρες αιχμής του σε ώρες εκτός αιχμής και θα χρεωθεί λιγότερο τις ώρες αιχμής

3. Προκλήσεις μεγάλων δεδομένων

- a. **Εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο:** Τα έξυπνα δίκτυα προορίζονται να ερευνούν το πρότυπο κατανάλωσης ενέργειας χιλιάδων πελατών και να λαμβάνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τους έξυπνους μετρητές. Το έξυπνο δίκτυο πρέπει να μπορεί να χειρίζεται τα δεδομένα από χιλιάδες συνδεδεμένες συσκευές σε πραγματικό χρόνο για να διασφαλίσει την ακριβή λειτουργία του δικτύου. Οι εφαρμογές που βασίζονται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) μπορούν να προσαρμοστούν για να χειριστούν το πρόβλημα, αναλύοντας τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων για μια έξυπνη συσκευή και εκχωρώντας μια αποκλειστική ζώνη για αυτήν τη συσκευή για συγκεκριμένο χρόνο.
- b. **Οπτικοποίηση και συμπίεση δεδομένων:** Δεδομένα από χιλιάδες αισθητήρες, έξυπνους μετρητές και έξυπνες συσκευές αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση αρχείων. Η συμπίεση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι μια αναγκαιότητα για τη διατήρηση της λειτουργίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν με οπτικό τρόπο για να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω έρευνα, όπως πρόβλεψη ενέργειας, απόκριση ζήτησης και πρόβλεψη φορτίου.
- c. **Ετερογενή δεδομένα:** Η ετερογένεια των δεδομένων αναφέρεται στους διαφορετικούς τύπους δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Το έξυπνο δίκτυο λαμβάνει δεδομένα από έξυπνους αισθητήρες, έξυπνους μετρητές, έξυπνες οικιακές συσκευές και συσκευές, σταθμούς, ενεργοποιητές, λογισμικό και κινητές εφαρμογές. Αυτές οι συσκευές λαμβάνουν και στέλνουν μηνύματα ελέγχου ταυτότητας, μηνύματα λάθους, μηνύματα που υποδεικνύουν ώρες αιχμής, μηνύματα κατά την ένδειξη ωρών εκτός αιχμής, κ.λπ. Αυτό ονομάζεται ετερογένεια των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, το πλέγμα πρέπει να αντιμετωπίσει και να επεξεργαστεί δομημένα, ημιδομημένα και μη δομημένα δεδομένα.

4. Προκλήσεις υπολογιστικού νέφους

Το υπολογιστικό νέφος ορίζεται ως το μοντέλο για τη δυνατότητα πρόσβασης στο δίκτυο κατ' απαίτηση σε μια κοινόχρηστη δεξαμενή διαμορφώσιμων υπολογιστικών πόρων (διακομιστές, δίκτυα, υπηρεσίες, αποθήκευση και εφαρμογές) που μπορούν εύκολα να απελευθερωθούν με την ελάχιστη αλληλεπίδραση των Παρόχω υπηρεσιών Διαδικτύου και ελάχιστες προσπάθειες διαχείρισης. Ο βασικός σκοπός του cloud computing είναι η διανομή πόρων σε πολλούς υπολογιστές. Η εφαρμογή του cloud computing στο έξυπνο δίκτυο θεωρείται πρόκληση, καθώς οι χρήστες του έξυπνου δικτύου έχουν ανησυχίες σχετικά με την αυθεντικότητα του υπολογιστικού νέφους. Ως εκ τούτου, οι ακόλουθες προκλήσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του υπολογιστικού νέφους για συστήματα έξυπνων δικτύων.

- έλλειψη συνεπών πολιτικών.
- αναποτελεσματική πολιτική ασφάλειας cloud.
- τοποθεσία των δεδομένων.
- ανάμειξη δεδομένων. και
- διεθνής νομοθεσία

1.2 Συστήματα Παρακολούθησης Ευρείας Περιοχής (WAMS)

Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης ευρείας περιοχής (WAMS¹) που βασίζονται στην τεχνολογία φασιθετών (synchrophasor) παρέχει άνευ προηγουμένου οπτικές σε σχέση με τη δυναμική συμπεριφορά συστημάτων ισχύος με αυξημένη ανάλυση και ακρίβεια [2-5]. Εκτός από την αύξηση του όγκου των δεδομένων, η ποικιλία των συσκευών μέτρησης έχει επίσης αυξηθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η πρόοδος στην ανάπτυξη και εγκατάσταση φθηνών συσκευών καταγραφής χαμηλής τάσης είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολλών αισθητήρων που μεταδίδουν δεδομένα σε εξειδικευμένους συγκεντρωτές δεδομένων. Καθώς το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των δικτύων ενέργειας συνεχίζουν να αυξάνονται, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, η προστασία και η πρόβλεψη των δυναμικών διαδικασιών γίνονται όλο και πιο σημαντικές [6,7]. Αυτή η αύξηση του όγκου και της ποικιλίας των δεδομένων απαιτεί προόδους στη μεθοδολογία για την κατανόηση, την αυτόματη επεξεργασία και τη σύνοψη των δεδομένων, όσο και για την βέλτιστη τοποθέτηση των μερών του συστήματος με βάση την καλύτερη αποδοτικότητα αυτού.

Οι γρήγορες, υψηλής ποιότητας μετρήσεις φασιθετών της τάσης και του ρεύματος χρησιμοποιώντας σήματα από έναν παγκόσμιο δορυφόρο εντοπισμού θέσης μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την ορατότητα ευρείας περιοχής και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος [8-10].

Οι προηγμένες εφαρμογές στην παρακολούθηση ευρείας περιοχής περιλαμβάνουν την εφαρμογή συστημάτων επίγνωσης της κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων ειδοποιήσεων διαταραχής, ανίχνευσης τοποθεσίας συμβάντων και ταλαντώσεων, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και άλλων προηγμένων χαρακτηριστικών [10-12]. Στον πυρήνα αυτών των συστημάτων βρίσκονται οι έξυπνες τεχνικές ανίχνευσης και επεξεργασίας σήματος και επικοινωνίας για τη βέλτιστη χρήση δεδομένων ευρείας περιοχής.

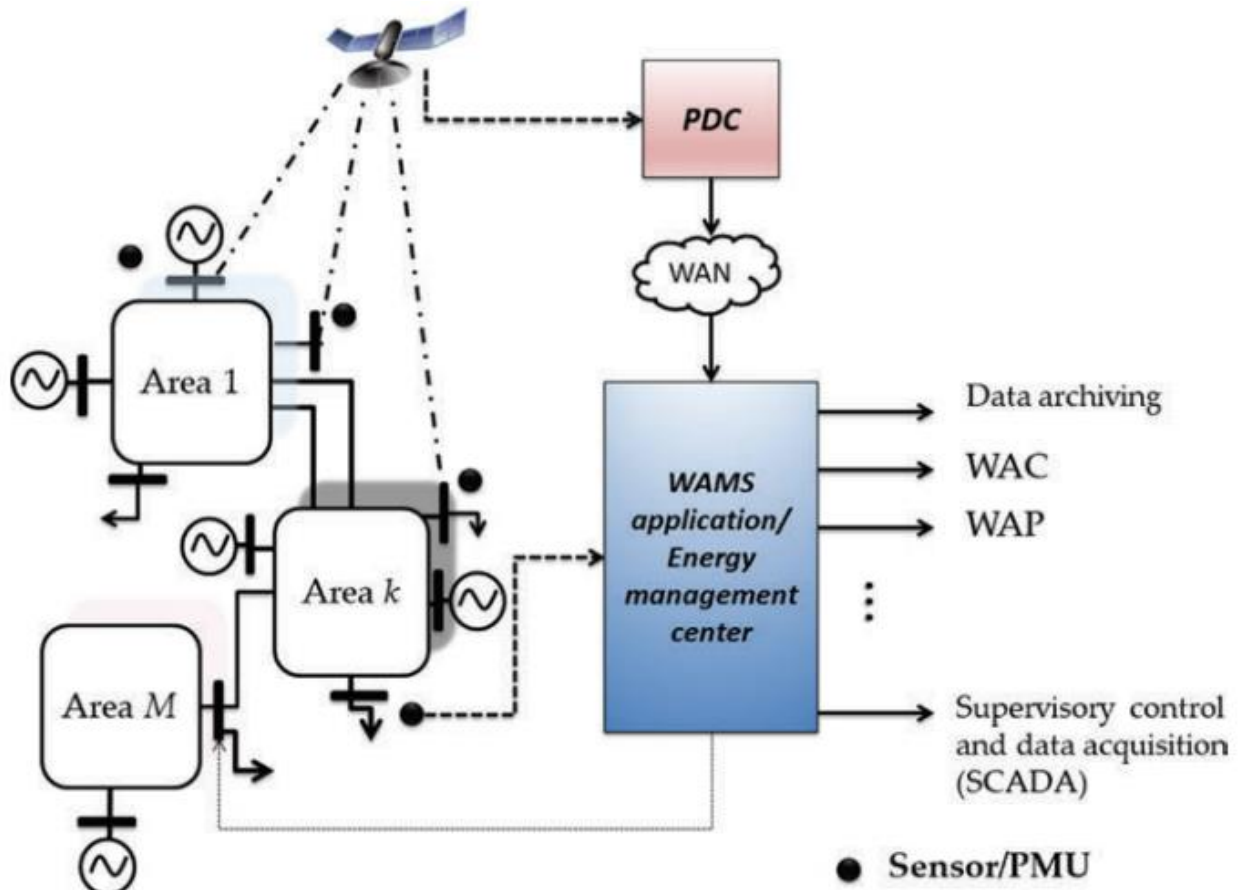
1.2.1 Συστήματα παρακολούθησης ευρείας περιοχής: Εννοιολογική επισκόπηση

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μορφές WAMS για την παρακολούθηση της ταλαντωτικής συμπεριφοράς των συστημάτων ισχύος. Στον πυρήνα του, ένα σύστημα παρακολούθησης ευρείας περιοχής (WAMS) είναι ένα έξυπνο, σύστημα συνεχούς αναγνώρισης της κατάστασης του συστήματος ισχύος.

Τα κρίσιμα στοιχεία ενός WAMS φαίνονται στην εικόνα 1. Εννοιολογικά, ένα WAMS αποτελείται από διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως καταγραφείς διαταραχών συχνότητας, φασιθετών που αναφέρονται επίσης ως μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMUs²), ψηφιακών ηλεκτρονόμων, προηγμένων ζεύξεων επικοινωνίας και τεχνικών επεξεργασίας σήματος. Η σύγχρονη τεχνολογία συγχρονισμένης μέτρησης παρέχει δεδομένα φασιθέτη συνήθως με ρυθμούς μεταξύ 30 και 100 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της συμπεριφοράς των ταλαντώσεων του συστήματος ισχύος.

¹ wide-area measurement systems

² phasor measurement units



Εικόνα 2 Γενική διαμόρφωση WAMS [73]

Παράλληλα με αυτές τις εξελίξεις, νέες μονάδες μέτρησης κυματομορφής με δυνατότητα καταγραφής δεδομένων με ταχύτητα 200 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο επιτρέπουν την παρακολούθηση ταχύτερων ταλαντώσεων στην υπό σύγχρονη περιοχή [13]. Η εμφάνιση τεχνολογιών υψηλού ρυθμού και ακριβέστερης ανίχνευσης ανοίγει τη δυνατότητα μελέτης ενός πιο ολοκληρωμένου φάσματος δυναμικών φαινομένων και οδηγεί σε πιο αξιόπιστη παρακολούθηση και χαρακτηρισμό πολύπλοκων ταλαντώσεων [14].

1.2.2 Αρχιτεκτονικές WAMS

Οι τρέχουσες αρχιτεκτονικές WAMS έχουν εξελιχθεί από προηγμένα συστήματα προστασίας και ελέγχου παρακολούθησης σε πιο έξυπνες αρχιτεκτονικές συγχώνευσης και ελέγχου δεδομένων. Η αρχιτεκτονική WAMS και τα σχετικά συστήματα επικοινωνίας εξαρτώνται από την εφαρμογή και συχνά εξαρτώνται από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά όπως η τοπολογία δικτύου, τα χαρακτηριστικά επικοινωνίας και η υποδομή του συστήματος.

Στη βιβλιογραφία, οι αρχιτεκτονικές παρακολούθησης ευρείας περιοχής έχουν σχεδιαστεί ιστορικά με συγκεντρωτικά πλαίσια, όπου οι πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος συλλέγονται και επεξεργάζονται κεντρικά. Η δομή WAMS είναι ιεραρχική και μπορεί να χωριστεί σε δύο πρωτεύοντα επίπεδα: περιφερειακό και παγκόσμιο. Οι ανιχνευόμενες πληροφορίες συλλέγονται αυτόματα, συγχρονίζονται και αρχειοθετούνται τοπικά σε περιφερειακό επίπεδο από ένα κέντρο παρακολούθησης και ελέγχου γνωστό ως Συγκεντρωτής Συγχρονισμένων Μετρήσεων

Φασιθετών (Phasor Data Concentrator - PDC) [12, 15, 16]. Επιπλέον, οι PDC μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν άλλες λειτουργίες, όπως ανίχνευση και αρχειοθέτηση συμβάντων συστήματος, προ επεξεργασία δεδομένων για διάφορες εφαρμογές και βαθμονόμηση δεδομένων. Αυτό το στάδιο προ επεξεργασίας μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλές εργασίες, όπως καθαρισμό δεδομένων, μείωση διαστάσεων και αφαίρεση ακραίων στοιχείων.

Τα δεδομένα αισθητήρων αποστέλλονται στη συνέχεια μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας σε έναν καθολικό ή υπέρ-PDC για την παρακολούθηση της δυναμικής σε πραγματικό χρόνο, έλεγχο και προστασία ευρείας περιοχής για σκοπούς εκτίμησης συμπερασμάτων, ελέγχου και προστασίας. Πληροφορίες σχετικά με σφάλματα και άλλα ανώμαλα συμβάντα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν στη διάγνωση και την απόκριση σε ανωμαλίες στην εφαρμογή παρακολούθησης της υγείας του συνόλου του συστήματος.

Τα δεδομένα εισόδου στο WAMS μπορεί να είναι ατελή, συσχετισμένα, δυναμικά ασυνεπή και σε διαφορετικές μορφές, όπως στην περίπτωση πολυκαναλικών δεδομένων από τις PMU. Η παρακολούθηση παρέχει κρίσιμα δεδομένα προς επεξεργασία και χρήση για λειτουργίες ελέγχου και προστασίας ώστε να σταματήσει η υποβάθμιση του συστήματος ισχύος. Η επιτυχής εφαρμογή τεχνικών παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο που βασίζονται στην τεχνολογία φασιθετών απαιτεί την ενσωμάτωση πολλών επιπέδων ενεργοποίησης και ρυθμίσεων που ανιχνεύουν πιθανή επιδείνωση των συνθηκών του συστήματος σε σχέση με τη κανονική συμπεριφορά του συστήματος ισχύος [16]. Το πλαίσιο και οι αρχιτεκτονικές για την παρακολούθηση της υγείας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας θα συνεχίσουν να εξελίσσονται για πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, με προόδους στην τεχνολογία φασιθετών, νέους και πιο προηγμένους αλγόριθμους και καλύτερη τεχνολογία επικοινωνίας.

Στην συναφή βιβλιογραφία περιγράφεται ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών για αυτές τις τεχνολογίες. Οι πρόσφατες εφαρμογές περιλαμβάνουν [8, 18–21]:

- επίγνωση της κατάστασης σε μια ευρεία περιοχή
- εκτίμηση κατάστασης
- αξιολόγηση περιθωρίων ασφαλείας
- δυνατότητα συνολικής μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο
- παρακολούθηση ταλαντώσεων μεταξύ των περιοχών
- αναγνώριση δυναμικής παραμέτρου
- επικύρωση μοντέλου
- αξιολόγηση ακεραιότητας συστήματος μετά από διαταραχή
- παρακολούθηση αξιοπιστίας ευρείας περιοχής
- παρακολούθηση τάσης και γωνίας φάσης
- παρακολούθηση ελέγχου συχνότητας
- πόροι δικτύου και επάρκεια και αξιοπιστία
- αρχειοθέτηση δεδομένων βάσει συμβάντων
- ενοποίηση DER³

³ distributed energy resources - κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι

Η ανίχνευση και ο χαρακτηρισμός των χρονικών ταλαντώσεων στα δεδομένα μέτρησης περιπλέκεται πάρα πολύ από διάφορους παράγοντες. Στην πράξη, ο θόρυβος του περιβάλλοντος και της μέτρησης, καθώς και άλλα ζητήματα που μπορεί να προκαλέσουν αλλοίωση να μολύνουν τα δεδομένα μέτρησης και να οδηγήσουν σε ψευδείς συναγερούς και λανθασμένες επιχειρησιακές αποφάσεις. Επιπλέον, τα σφάλματα επικοινωνίας μπορεί να προκαλέσουν καταστροφή δεδομένων και να επηρεάσουν την ερμηνεία της ανάλυσης δεδομένων [22]. Οι μέθοδοι σχεδιασμού πρέπει να ενσωματώνουν στρατηγικές ανοχής σε σφάλματα και τεχνικές συγχώνευσης δεδομένων για την ενίσχυση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας και τη βελτίωση της απόδοσης των WAMS.

Ιεραρχικά, ένας μόνο φασιθέτης παρατηρεί δεδομένα ροής μιας διάστασης και όλοι οι αισθητήρες μαζί σχηματίζουν ένα δίκτυο συγχρονισμού ευρείας περιοχής με μια συγκεκριμένη τοπολογική δομή [23]. Οι αρχιτεκτονικές WAMS μπορούν να κυμαίνονται από πλήρως συγκεντρωτικές εγκαταστάσεις έως κατανεμημένες ή ιεραρχικά κατανεμημένες αρχιτεκτονικές. Οι σύγχρονες αρχιτεκτονικές WAMS απαιτούν πρόσθετες δυνατότητες παρακολούθησης και επεξεργασίας που δεν είναι διαθέσιμες σε συμβατικές κεντρικές αρχιτεκτονικές [16].

1.2.3 Τεχνολογίες μέτρησης και ανίχνευσης

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων τύπων αισθητήρων που παρέχουν στα WAMS ή στα δίκτυα συγχρονισμού μοναδικές ικανότητες παρακολούθησης ή εκτίμησης της κατάστασης πολύπλοκων συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Σύμφωνα με το επίπεδο εφαρμογής τους, οι τεχνολογίες μέτρησης και ανίχνευσης μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως σε δύο κύριες κατηγορίες: επίπεδα διανομής και μετάδοσης.

Σε επίπεδο διανομής, η έξυπνη παρακολούθηση επιτρέπει την αποτελεσματική ανάλυση των προφίλ τάσης και τη μείωση των απωλειών ισχύος. Σε επίπεδο μετάδοσης, συσκευές που βασίζονται σε συγχρονισμό, όπως καταγραφείς δυναμικής συχνότητας, PMU και άλλες έξυπνες συσκευές παρακολούθησης επιτρέπουν μια ανάλυση σε όλο το σύστημα των συνολικών του χαρακτηριστικών, που σχετίζονται κυρίως με αργές ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και δυναμική παγκόσμιας συχνότητας.

Μια τυπική PMU συλλέγει, αλλά δεν περιορίζεται σε, πολυκαναλικά δεδομένα όπως τάση, συχνότητα, γωνία φάσης και ενεργό και άεργο ισχύ σε πολλές θέσεις του συστήματος, που συχνά προκύπτουν από πολύπλοκα φαινόμενα ή αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών του συστήματος [23-25]. Με την ενσωμάτωση άλλων παραμέτρων, όπως ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας, είναι δυνατό να ενισχυθεί η παρακολούθηση και να αξιολογηθεί η επίδραση της υποστήριξης συχνότητας στη σταθερότητα του συστήματος.

1.2.3.1 Μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU)

Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών είναι ζωτικής σημασίας στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας προηγμένες δυνατότητες παρακολούθησης, ελέγχου και προστασίας. Στον πυρήνα τους, οι PMU παρέχουν μετρήσεις των ηλεκτρικών κυμάτων σε πραγματικό χρόνο, σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τόσο το μέγεθος όσο και τη γωνία φάσης της τάσης και του ρεύματος, συγχρονισμένα, χρησιμοποιώντας μια υψηλής ακρίβειας πηγή χρόνου, συνήθως GPS. Αυτός ο συγχρονισμός επιτρέπει την ακριβή σύγκριση των δεδομένων φάσης από διαφορετικές τοποθεσίες στο δίκτυο, καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος [26].

Η κύρια λειτουργία των PMU περιλαμβάνει τον υπολογισμό του μεγέθους και της γωνίας φάσης των ηλεκτρικών μεγεθών, τον ακριβή συγχρονισμό αυτών των μετρήσεων σε όλο το δίκτυο και τη μετάδοση των δεδομένων σε μια κεντρική τοποθεσία για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτή η μετάδοση διευκολύνεται μέσω μιας διεπαφής επικοινωνίας, η οποία διασφαλίζει ότι τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης του δικτύου [27].

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των PMU είναι η ικανότητά τους να συγχρονίζουν μετρήσεις σε διαφορετικές τοποθεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτός ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται μέσω μιας κοινής χρονικής αναφοράς που παρέχεται από τους δορυφόρους του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (GPS). Ο δέκτης GPS στη PMU παρέχει χρονικές σημάνσεις με ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια (συνήθως στο εύρος των μικροδευτερολέπτων). Αυτός ο ακριβής χρονισμός επιτρέπει τη χρονική ευθυγράμμιση των μετρήσεων φάσης από διάφορες PMU, επιτρέποντας τη συνεκτική ανάλυση της κατάστασης του συστήματος ισχύος [26].

Μόλις προκύψουν τα ψηφιακά σήματα, η PMU τα επεξεργάζεται για να υπολογίσει τις τιμές των φασιθετών. Αυτό περιλαμβάνει πολλά βήματα [26]:

- Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) εφαρμόζεται στα δεδομένα δειγματοληψίας για τη μετατροπή των σημάτων του πεδίου του χρόνου σε φασιθέτες στο πεδίο συχνότητας. Η βασική συνιστώσα συχνότητας (συνήθως 50 ή 60 Hz) εξάγεται για να προσδιοριστεί ο φασιθέτης.
- Εφαρμόζονται ψηφιακά φίλτρα για την αφαίρεση του θορύβου και των ανεπιθύμητων στοιχείων συχνότητας από το σήμα, βελτιώνοντας την ακρίβεια των μετρήσεων των φασιθετών.
- Από την αναπαράσταση του πεδίου συχνότητας, η PMU υπολογίζει το μέγεθος και τη γωνία φάσης των φασιθετών τάσης και ρεύματος.

Η PMU μεταδίδει έπειτα τα υπολογισμένα δεδομένα των φασιθετών σε μια κεντρική τοποθεσία ή σε έναν συγκεντρωτή συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών (PDC) χρησιμοποιώντας μια διεπαφή επικοινωνίας. Αυτή η μετάδοση περιλαμβάνει [26]:

- Τη διασφάλιση ότι τα δεδομένα μεταδίδονται με ελάχιστη καθυστέρηση για να είναι δυνατή η παρακολούθηση και ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο.
- Τη διασφάλιση εύρους ζώνης: Απαιτείται επαρκές εύρος ζώνης για τη διαχείριση του υψηλού ρυθμού δεδομένων που παράγεται από τις PMU, συνήθως δειγματοληψία στα 30-60 δείγματα ανά δευτερόλεπτο.

Τα δεδομένα που αποστέλλονται στον PDC στη συνέχεια συγκεντρώνονται και χρησιμοποιούνται για διάφορες εφαρμογές όπως εκτίμηση κατάστασης, ανάλυση σταθερότητας και ανίχνευση σφαλμάτων [26].

Οι PMU έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε συστήματα ισχύος. Ενισχύουν την παρακολούθηση και την οπτικοποίηση πλέγματος παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, τα οποία βοηθούν στον έγκαιρο εντοπισμό και διάγνωση προβλημάτων. Στην εκτίμηση κατάστασης, οι PMU βελτιώνουν την ακρίβεια του προσδιορισμού της κατάστασης του συστήματος παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις που μπορούν να ενσωματωθούν με τους παραδοσιακούς εκτιμητές κατάστασης. Είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση δυναμικής ευστάθειας, βοηθώντας στην αξιολόγηση της απόκρισης του συστήματος σε διάφορες διαταραχές. Επιπλέον, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό και την ανάλυση διαταραχών, προσφέροντας έγκαιρη ανίχνευση σφαλμάτων και επιτρέποντας ταχύτερες διορθωτικές ενέργειες. Στα συστήματα παρακολούθησης ευρείας περιοχής (WAMS), οι ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Μίλος Χρήστος

PMU ενισχύουν την ικανότητα παρακολούθησης και ελέγχου μεγάλων διασυνδεδεμένων δικτύων, βελτιώνοντας τη συνολική διαχείριση του δικτύου [26].

Τα οφέλη των PMU είναι πολλαπλά. Βελτιώνουν σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος ισχύος επιτρέποντας την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών και πιθανών αστοχιών. Αυτό οδηγεί σε ενισχυμένη ασφάλεια, καθώς οι χειριστές μπορούν να ανταποκριθούν πιο γρήγορα σε απειλές και άλλα ζητήματα στο δίκτυο. Οι PMU συμβάλλουν επίσης στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του ηλεκτρικού δικτύου διευκολύνοντας την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και την εξισορρόπηση του φορτίου. Επιπλέον, οι αποτελεσματικές δυνατότητες ανίχνευσης σφαλμάτων των PMU συμβάλλουν στη μείωση του λειτουργικού κόστους [26].

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που σχετίζονται με τις PMU. Η εγκατάσταση και η συντήρησή τους μπορεί να είναι δαπανηρή, θέτοντας εμπόδιο στην ευρεία υιοθέτηση. Η διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγονται από τις PMU απαιτεί ισχυρές λύσεις διαχείρισης και αποθήκευσης δεδομένων. Η διασφάλιση της διαλειτουργικότητας με τα υπάρχοντα συστήματα και πρότυπα είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση, όπως και η προστασία της υποδομής των PMU από απειλές στον κυβερνοχώρο [26].

1.2.3.2 Συγκεντρωτές συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών (PDC)

Ο Συγκεντρωτής Συγχρονισμένων Δεδομένων Φασιθετών (PDC) είναι ένα κρίσιμο στοιχείο στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, που χρησιμεύει ως μια κεντρική μονάδα που συγκεντρώνει και επεξεργάζεται δεδομένα από πολλαπλές PMU. Η κύρια λειτουργία ενός PDC είναι να συλλέγει συγχρονισμένα δεδομένα φασιθετών από διάφορες PMU που βρίσκονται καταναμημένες σε όλο το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι αυτά τα δεδομένα ευθυγραμμίζονται με συνοχή για ολοκληρωμένη ανάλυση και έλεγχο [26].

Η λειτουργία ενός PDC ξεκινά με τη λήψη ροών δεδομένων φάσης από διάφορες PMU. Κάθε PMU μεταδίδει δεδομένα που περιλαμβάνουν φασιθέτες τάσης και ρεύματος, μαζί με ακριβείς χρονικές σημάνσεις που παρέχονται από τον συγχρονισμό GPS. Ο PDC έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται τον μεγάλο όγκο δεδομένων που παράγονται από τις PMU, οι οποίες συνήθως κάνουν δειγματοληψία με ρυθμούς 30-60 φορές ανά δευτερόλεπτο. Για τη διαχείριση αυτής της εισροής, ο PDC χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές χειρισμού και αποθήκευσης δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι όλα τα εισερχόμενα δεδομένα είναι ακριβή και χρονικά συγχρονισμένα [26].

Η βασική λειτουργικότητα του PDC περιλαμβάνει τη συγκέντρωση και τον συγχρονισμό των δεδομένων φάσης. Αξιοποιώντας τις χρονοσημάνσεις των δεδομένων από τις PMU, ο PDC δημιουργεί ένα συνεκτικό και ενοποιημένο σύνολο δεδομένων που αντικατοπτρίζει την κατάσταση σε πραγματικό χρόνο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο συγχρονισμός είναι ζωτικής σημασίας για διάφορες αναλυτικές διαδικασίες, καθώς επιτρέπει την ακριβή σύγκριση και την ενσωμάτωση δεδομένων από διαφορετικά μέρη του δικτύου. Ο PDC χρησιμοποιεί εξελιγμένους αλγόριθμους για τη συγχώνευση των ροών δεδομένων, διορθώνοντας τυχόν αποκλίσεις στις χρονικές σημάνσεις και διασφαλίζοντας ένα συνεπές χρονικό πλαίσιο [26].

Μετά τον συγχρονισμό των δεδομένων, ο PDC τα επεξεργάζεται για να εξάγει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του συστήματος ισχύος. Αυτή η επεξεργασία περιλαμβάνει φιλτράρισμα θορύβου, ανίχνευση ανωμαλιών και υπολογισμό πρόσθετων μετρήσεων και μεγεθών που παρέχουν πληροφορίες για την απόδοση του πλέγματος. Ο PDC είναι εξοπλισμένος με

υπολογιστικές δυνατότητες για την εκτέλεση ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, εντοπίζοντας μοτίβα και τάσεις που υποδεικνύουν πιθανά ζητήματα όπως ανισορροπίες ισχύος, αστάθεια ή σφάλματα [26].

Περαιτέρω, ο PDC παρέχει αυτά τα δεδομένα σε κέντρα ελέγχου όπου οπτικοποιούνται και αναλύονται για να υποστηρίξουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Αυτή η οπτικοποίηση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στους χειριστές να ανταποκρίνονται άμεσα σε διαταραχές, βελτιστοποιώντας την απόδοση και την ασφάλεια του ηλεκτρικού δικτύου [26].

Εκτός από τις λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο, ο PDC διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάλυση ιστορικών δεδομένων. Με την αποθήκευση των συγχρονισμένων δεδομένων φασιθετών, ο PDC επιτρέπει την ανάλυση μετά από συμβάντα, η οποία είναι απαραίτητη για την κατανόηση των αιτιών παρελθουσών διαταραχών και τη βελτίωση της μελλοντικής απόδοσης του συστήματος. Αυτή η ικανότητα υποστηρίζει τις προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητας του δικτύου και την προσαρμογή στις εξελισσόμενες ενεργειακές απαιτήσεις.

Η επικοινωνιακή πτυχή του PDC είναι επίσης κρίσιμη. Διασφαλίζει ότι τα επεξεργασμένα δεδομένα μεταδίδονται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα σε διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς, συμπεριλαμβανομένων των διαχειριστών δικτύου, των εταιρειών κοινής ωφελείας και των ρυθμιστικών φορέων. Το PDC χρησιμοποιεί ισχυρά πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας και της εμπιστευτικότητας των δεδομένων, προστατεύοντάς τα από απειλές στον κυβερνοχώρο και διασφαλίζοντας αξιόπιστη μετάδοση [26].

1.2.4 Σχεδιασμός αρχιτεκτονικής WAMS

Οι αρχιτεκτονικές WAMS επόμενης γενιάς εκμεταλλεύονται τις εγκαταστάσεις του Διαδικτύου για τη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ των κέντρων ελέγχου. Η κατανόηση και η αξιολόγηση των υποδομών επικοινωνίας είναι επομένως ουσιαστική για το σχεδιασμό αρχιτεκτονικών WAMS.

Τα κρίσιμα αναδυόμενα ζητήματα περιλαμβάνουν την τοποθέτηση PMU και PDC και την ελαχιστοποίηση της δομής της επικοινωνίας [27, 28]. Ένα δεύτερο σχετικό πρόβλημα ενδιαφέροντος είναι ο σχεδιασμός κλιμακούμενων αρχιτεκτονικών WAMS που μπορούν να φιλοξενήσουν κατανομημένη ή ενσωματωμένη παραγωγή σε κλίμακα χρησιμότητας.

Δύο κύριοι στόχοι σχεδιασμού είναι [27]:

1. Η τοποθέτηση των PMU σε επιλεγμένους ζυγούς για τη μεγιστοποίηση της παρατηρησιμότητας των τρόπων λειτουργίας του συστήματος κατά την παρακολούθηση της σταθερότητας ταλάντωσης είναι το κύριο πρόβλημα ανησυχίας.
2. Ο συντονισμός των τεχνικών τοποθέτησης PMU με το σχεδιασμό της επικοινωνιακής υποδομής μιας ευρείας περιοχής.

Ως αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών, υπάρχει επιτακτική ανάγκη ανάπτυξης τεχνικών βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων που μπορούν από κοινού να καθορίσουν τις βέλτιστες θέσεις αισθητήρων και των PDC. Άλλα σχετικά αλλά ξεχωριστά ζητήματα είναι η δυναμική ανακατασκευή διεργασιών με χρήση περιορισμένων μετρήσεων και συμπίεστικής ανίχνευσης.

Αρκετές πρόσφατες μελέτες έχουν αντιμετωπίσει το πρόβλημα της ανακατασκευής δυναμικής κατάστασης και της τοποθέτησης αισθητήρων. Στη μελέτη του Georges [26], μια προσέγγιση που βασίζεται στο Gramian του γραμμικού συστήματος χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη τοποθέτηση αισθητήρων και σχεδιασμού PDC. Οι Castillo και Messina [28] και Manohar et al. [29] εισήγαγαν

μεθόδους που βασίζονται σε τεχνικές που βασίζονται σε δεδομένα για δυναμική ανακατασκευή και συμπεριστακή αντίχνευση. Αντίστοιχα μια σειρά μελετών εξέτασαν διαφορετικές συνθέσεις για την τοποθέτηση ελεγκτών συστήματος που εστιάζουν στην ανακατασκευή της παρατηρούμενης δυναμικής του συστήματος [30-32].

1.2.5 Κατανεμημένα και ημι-κατανεμημένα πλαίσια παρακολούθησης

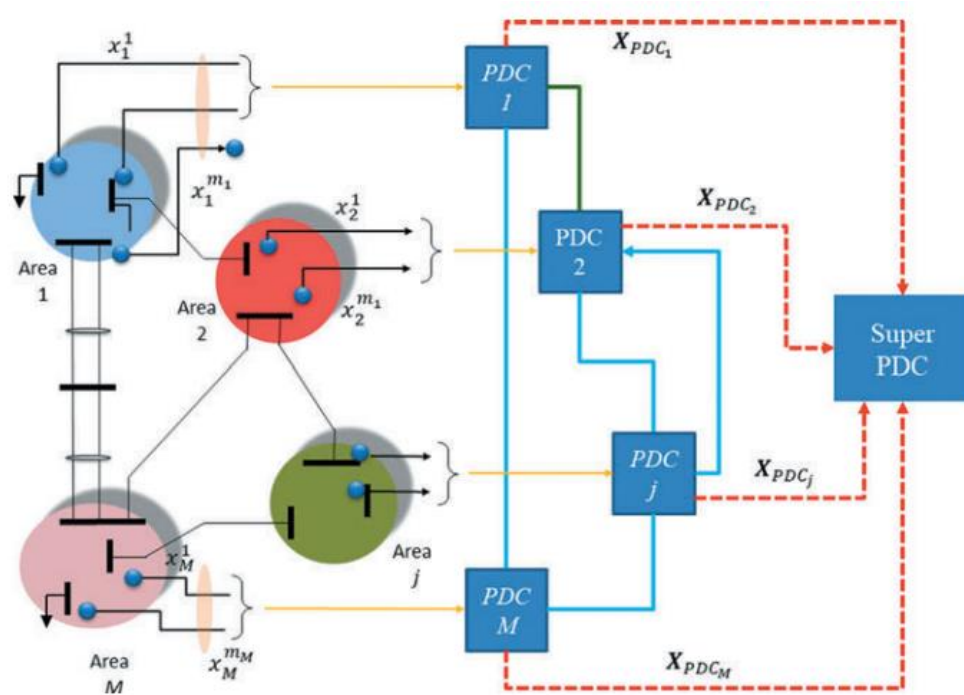
Οι πρόσφατες εξελίξεις στις επικοινωνίες και την κατανεμημένη αντίχνευση επέτρεψαν την ανάπτυξη ιεραρχικών, αποκεντρωμένων και συστημάτων παρακολούθησης. Το ενδιαφέρον για τις κατανεμημένες αρχιτεκτονικές παρακολούθησης έχει αυξηθεί λόγω, εν μέρει, του αυξανόμενου μεγέθους και της κλίμακας των σύγχρονων δικτύων ενέργειας, της ενσωμάτωσης νέων κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DER) και της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των σύγχρονων συστημάτων ισχύος [33-35]. Αυτή η τάση συνοδεύτηκε από σημαντικές προόδους στις αρχιτεκτονικές παρακολούθησης με χρήση υπολογιστικού νέφους και στις στρατηγικές που βασίζονται στο Διαδίκτυο [36]. Κρίσιμης σημασίας για την ανάπτυξη κατανεμημένων πλαισίων παρακολούθησης είναι η ενοποίηση ή η συγχώνευση πολυμεταβλητών δεδομένων από διαφορετικούς αισθητήρες.

Αρκετοί τύποι αρχιτεκτονικών παρακολούθησης έχουν εξεταστεί στην τρέχουσα πρακτική χρησιμότητας. Αυτές περιλαμβάνουν (1) συγκεντρωτικές αρχιτεκτονικές, (2) κατανεμημένες αρχιτεκτονικές παρακολούθησης και (3) ιεραρχικά κατανεμημένες αρχιτεκτονικές παρακολούθησης.

Για μικρού και μεσαίου μεγέθους αρχιτεκτονικές WAMS, είναι δυνατή η αποτελεσματική μετάδοση όλων των μετρήσεων PMU σε ένα υπέρ-PDC, όπου τα δεδομένα συγχωνεύονται για τη λήψη αποφάσεων. Ωστόσο, η κεντρική συλλογή δεδομένων και η συγχώνευση πολυδιάστατων δεδομένων από κάθε φασιθέτη μπορεί να δημιουργήσει μεγάλη κίνηση σε στενά κανάλια επικοινωνίας, πολυπλοκότητα μοντελοποίησης και πλεονασμό δεδομένων που εισάγονται με την ενσωμάτωση μετρήσεων από κατανεμημένους αισθητήρες. Άλλα σημαντικά ζητήματα είναι η έλλειψη επεκτασιμότητας, η εντατική επεξεργασία δεδομένων και τα ζητήματα αξιοπιστίας.

Η αποκεντρωμένη παρακολούθηση των συστημάτων ισχύος αποτελεί αντικείμενο ενεργούς έρευνας τα τελευταία χρόνια. Στα [34-37], περιγράφονται οι προσπάθειες σχεδιασμού αποκεντρωμένων δομών ελέγχου που βασίζονται σε φυσικές και υπολογιστικές τεχνικές. Μεταξύ αυτών των προσεγγίσεων, οι τεχνικές υπολογισμού πλέγματος βρίσκουν αυξανόμενο ενδιαφέρον. Άλλες πρόσφατες εργασίες περιλαμβάνουν την ανάλυση δομών παρακολούθησης κατανεμημένης τάσης [38].

Η εικόνα 2 παρουσιάζει ένα σχηματικό σχήμα μιας γενικής ιεραρχικής και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής WAMS. Το μοντέλο αποτελείται από δύο κύριους ιεραρχικούς βρόχους: έναν εσωτερικό κατανεμημένο βρόχο στον οποίο οι τοπικοί PDC επικοινωνούν μεταξύ τους και έναν εξωτερικό βρόχο στον οποίο οι PDC μεταδίδουν δεδομένα σε ένα ολικό ή υπέρ-PDC. Με την κατάργηση μεμονωμένων βρόχων ελέγχου, μπορούν να ληφθούν καθαρά αποκεντρωμένες ή πλήρως κεντρικές αρχιτεκτονικές.



Εικόνα 3 Μια γενικευμένη αρχιτεκτονική παρακολούθησης. Οι καθαρά αποκεντρωμένες ή συγκεντρωτικές δομές θεωρούνται ως μια ιδιαίτερη περίπτωση αυτού του μοντέλου. [73]

Αρχικά, θα πρέπει να αναγνωριστεί ότι τα δεδομένα των WAMS καταλήγουν σε πίνακες πολλαπλών δρόμων που περιλαμβάνουν πολλαπλούς τύπους δεδομένων που μπορούν να αναπαρασταθούν αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας πίνακες διπλής κατεύθυνσης (πίνακες) ή πολυδρομικούς πίνακες (τανυστές). Οι πίνακες διπλής κατεύθυνσης συνδέονται συνήθως με χωροχρονικές σειρές. Αντίθετα, οι πίνακες τριών κατευθύνσεων επιτρέπουν τη μοντελοποίηση πιο γενικών, μετρούμενων χαρακτηριστικών, όπως αυτά που αφορούν το χώρο, τον χρόνο και τον τύπο δεδομένων ή άλλα χαρακτηριστικά.

Προκειμένου να επεξηγηθεί αυτή η έννοια, θεωρείται μια ιεραρχική και κατανεμημένη αρχιτεκτονική παρακολούθησης που αποτελείται από M διασυνδεδεμένες περιοχές. Το σύνολο $X_j = X_{PDC_j}$, με $j = 1, \dots, M$ απεικονίζει το σύνολο των μετρήσεων που σχετίζονται με την περιοχή j όπου οι τοπικές μετρήσεις γενικά συσχετίζονται με άλλες περιοχές.

Το πρώτο πρόβλημα ενδιαφέροντος είναι η από κοινού ανάλυση των τοπικών μετρήσεων δεδομένων χρησιμοποιώντας αλγόριθμους πολλαπλών μπλοκ ή κατανεμημένων αλγορίθμων. Μια κοινή προσέγγιση ως προς αυτό είναι η σύνδεση των μετρήσεων επιφάνειας δίπλα-δίπλα και η ανάλυση του προκύπτοντος μοντέλου χρησιμοποιώντας μια τεχνική συνολικής ανάλυσης. Ωστόσο, τέτοια μοντέλα μπορεί να αγνοούν μια πιθανή σημαντική χωροχρονική συσχέτιση ή εξαρτήσεις και να οδηγούν σε δυσεπίλυτους αλγόριθμους ανάλυσης.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι η συγχώνευση δυνητικά ανόμοιων πληροφοριών από κάθε περιφερειακό κέντρο. Τέτοιες πληροφορίες που συγχωνεύονται με την ανάλυση των διασταυρούμενων συσχετισμών μεταξύ των περιφερειακών PDC μπορούν να επιτρέψουν στους ερευνητές να προσδιορίσουν σχετικά δεδομένα συστήματος για την επιλογή χαρακτηριστικών παρακολούθησης ευρείας περιοχής ή να αξιολογήσουν δομές επικοινωνίας ευρείας περιοχής. Μπορεί επίσης να βοηθήσει στον προσδιορισμό του πιο κατάλληλου συνδυασμού τύπων δεδομένων για το σχεδιασμό ελεγκτών συστημάτων δύο επιπέδων ή πολλαπλών επιπέδων.

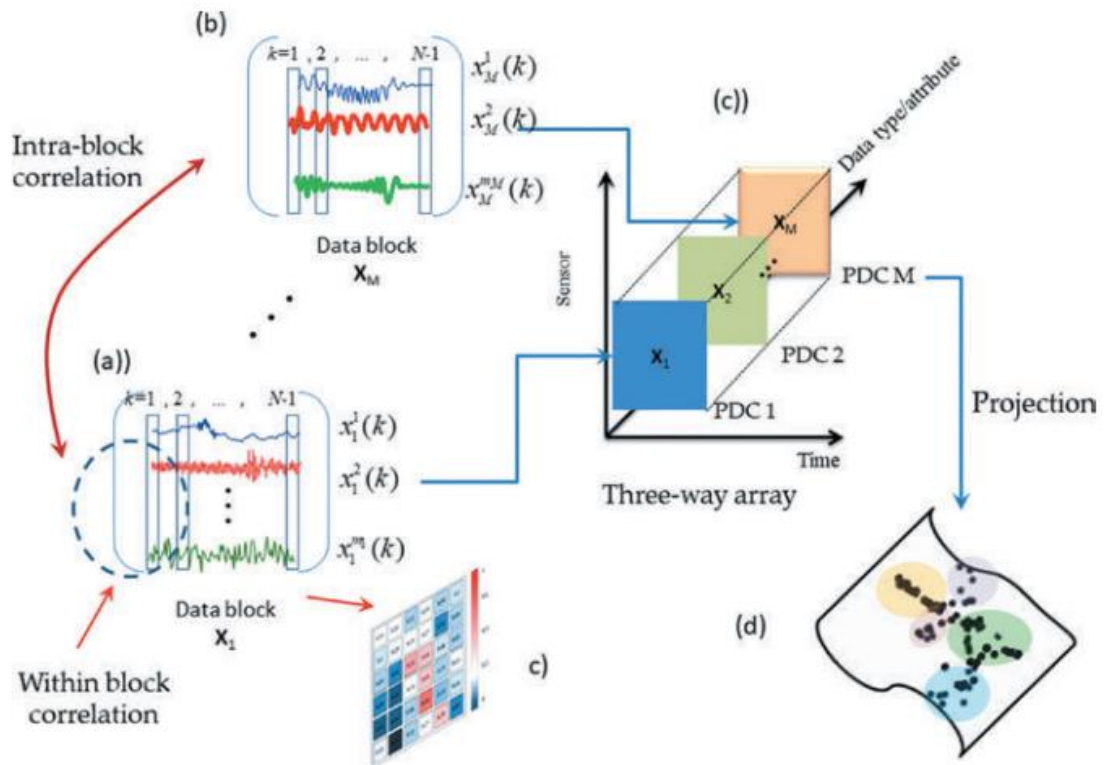
Επιπλέον, οι τεχνικές χωροχρονικής εξόρυξης μπορούν να εξάγουν σχέσεις ή μοτίβα από μετρήσεις μεγάλης κλίμακας. Αυτή η ανάγκη υποκινείται από διάφορους παράγοντες. Πρώτον, τα δεδομένα WAMS είναι τεράστια, πολύπλοκα και μπορεί να περιλαμβάνουν πολυτροπικά ή πολλαπλών τύπων δεδομένα. Για παράδειγμα, τα πολυκαναλικά δεδομένα μπορεί να αποτελούνται από διαφορετικούς τύπους δεδομένων ή χαρακτηριστικά και να παρουσιάζουν τάσεις, θόρυβο ή ράμπες πιο παρατηρήσιμες σε ορισμένες παραμέτρους από άλλες. Δεύτερον, η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος μπορεί να είναι απαγορευτική καθώς μεμονωμένες χρονοσειρές μπορούν να συσχετιστούν στο χώρο και στο χρόνο και οι πίνακες μέτρησης μπορεί να είναι κακώς ρυθμισμένοι, όπως στην περίπτωση των περιττών μετρήσεων. Ο τεράστιος όγκος των συλλεγόμενων δεδομένων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε προβλήματα αποθήκευσης και ανάλυσης. Αυτό προκαλεί την ανάγκη εφαρμογής τεχνικών μείωσης διαστάσεων.

Τέλος, απαιτούνται εργαλεία χωροχρονικής απεικόνισης για την παρατήρηση της εξελισσόμενης δυναμικής του συστήματος μετά από σημαντικές διαταραχές ή για την αποκάλυψη δυναμικών πτυχών της εξελισσόμενης δυναμικής που ενδιαφέρουν τους αναλυτές και τους χειριστές.

Με την αυξανόμενη προσοχή να εστιάζει πλέον σε αποτελεσματικές δομές επικοινωνίας, η χρήση τεχνικών ανάλυσης πολλαπλών μπλοκ για βελτιωμένη παρακολούθηση της ευστάθειας σε ευρεία περιοχή αποκτά σταθερά ώθηση. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την παρακολούθηση τοπικών και παγκόσμιων διαδικασιών και μπορούν ενδεχομένως να βελτιώσουν την δυνατότητα ερμηνείας των δυναμικών διαδικασιών.

Δύο κρίσιμες παρατηρήσεις εδώ σχετίζονται με την κατανομή των αισθητήρων και των PDC. Οι τεχνικές ανάλυσης και επεξεργασίας μοντέλων είναι χρήσιμες σε εφαρμογές πραγματικού κόσμου μόνο όταν παρέχεται μια ουσιαστική διαίρεση των δεδομένων μέτρησης στην εικόνα 2 σε μπλοκ. Επιπλέον, μόλις εντοπιστούν τα μπλοκ δεδομένων, απαιτείται μια βέλτιστη κατανομή αισθητήρων για να καταγραφεί η σχετική μεταβλητότητα χώρου (και χρόνου) των παρατηρούμενων ταλαντώσεων.

Μια απεικόνιση αυτών των θεμάτων φαίνεται στην εικόνα 3. Τα ανοιχτά προβλήματα για έρευνα περιλαμβάνουν: (α) αξιολόγηση συσχετίσεων ή εξαρτήσεων εντός του μπλοκ που αποκαλύπτουν δυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακολουθιών μέτρησης σε κάθε σύνολο δεδομένων, (β) προσδιορισμό χωροχρονικών εξαρτήσεων εντός του μπλοκ, (γ) σύντηξη ή ενοποίηση τοπικών δεδομένων και (δ) προσδιορισμός αναπαραστάσεων δεδομένων χαμηλής διάστασης. Σημειώνεται η ερμηνεία μεμονωμένων δεδομένων ως προς έναν πίνακα μέτρησης τριών κατευθύνσεων (ένας υπερκύβος δεδομένων).



Εικόνα 4 Σχηματική ανάλυση δεδομένων που δείχνει διάφορα στάδια στην ανάλυση πολυμεταβλητών δεδομένων. (α) εξαρτήσεις εντός του μπλοκ, (β) εξαρτήσεις εντός του μπλοκ, (γ) ολοκλήρωση δεδομένων ή συγχώνευση δεδομένων και (δ) μείωση διαστάσεων [73]

1.2.6 Συλλογή και διαχείριση δεδομένων

Σημαντικές εξελίξεις στα WAMS προήλθαν από τεχνικές για τη προηγμένη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων ακολουθούμενη από εργαλεία διάγνωσης και πρόγνωσης. Όπως αναφέρθηκε εν συντομία παραπάνω, τα δεδομένα που συλλέγονται σε διάφορες τοποθεσίες του συστήματος και χρόνους δειγματοληψίας μπορούν να αναπαρασταθούν με χωροχρονικές σειρές. Κατά συνέπεια, απαιτούνται αποτελεσματικά και αξιόπιστα μέσα απόκτησης, διαχείρισης, ενοποίησης και ερμηνείας δεδομένων απόδοσης για χρήσιμες πληροφορίες.

Πολλές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Ο όρος αισθητήρας μπορεί να ερμηνευτεί ευρέως εδώ ως πηγή ακριβών και συγχρονισμένων δεδομένων. Οι περισσότεροι σύγχρονοι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν ταυτόχρονα διάφορες παραμέτρους, οι οποίες μπορεί να παρέχουν μια συμπληρωματική άποψη της συμπεριφοράς του συστήματος. Παραδείγματα περιλαμβάνουν ρελέ προστασίας, καταγραφείς σφαλμάτων διαταραχών και καταγραφείς διαταραχών συχνότητας σε δίκτυα παρακολούθησης συχνότητας που βασίζονται στο Διαδίκτυο [40–43].

Οι αισθητήρες, ωστόσο, μπορεί να παρέχουν ελλιπή (δυναμική) παρατηρησιμότητα του συστήματος, καθώς τα κριτήρια τοποθέτησης PMU συχνά εξαρτώνται από την εφαρμογή ή βασίζονται σε στατικά κριτήρια. Ενώ οι μετρήσεις SCADA συχνά συμπληρώνουν τη μέτρηση φάσης, αυτό καθιστά τα δεδομένα ετερογενή και εγείρει προβλήματα συγχρονισμού και ευθυγράμμισης.

Τα χωροχρονικά δεδομένα είναι πλούσιες δυναμικές πηγές πληροφοριών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για χωροχρονική απεικόνιση, ομαδοποίηση και εξόρυξη χωροχρονικών δεδομένων. Με την εξάπλωση των δικτύων συγχρονισμού και την ενσωμάτωση υψηλών επιπέδων

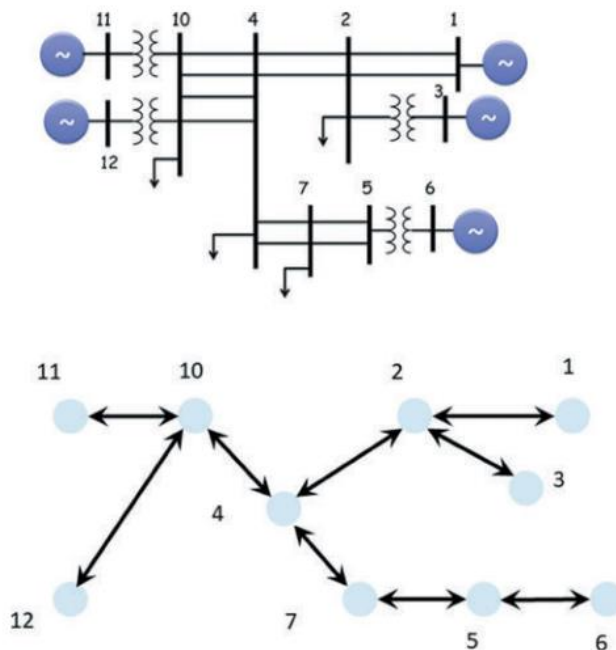
κατανεμημένης παραγωγής, αυτά τα ζητήματα προσελκύουν αυξανόμενη προσοχή στην ακαδημαϊκή κοινότητα και στην κοινότητα των επαγγελματιών.

1.2.7 Δίκτυα φασιθετών

1.2.7.1 Γράφοι δικτύων

Τα δίκτυα φασιθετών έχουν μια ενδιαφέρουσα ερμηνεία ως προς τους κατευθυνόμενους ή μη γράφους. Σε αυτή την περίπτωση, κάθε κορυφή αντιστοιχεί σε μια θέση μέτρησης και οι απαιτήσεις επικοινωνίας μπορούν να συσχετιστούν με τη συγκεκριμένη τοπολογία του δικτύου. Οι γράφοι δικτύων μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την επεξεργασία σήματος και να οδηγήσουν σε μειωμένες αναπαραστάσεις σειράς ενός συνόλου συλλεγόμενων δεδομένων [44].

Η εικόνα 4 απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση ενός απλού συστήματος ισχύος και του σχετικού γράφου και του αντίστοιχου πίνακα συνδεσιμότητας. Στην απλούστερη μορφή του, ένας γράφος $G = (V, E)$ μπορεί να κατασκευαστεί ώστε οι κόμβοι ή κορυφές να αντιστοιχούν σε ζυγούς συστήματος και οι ακμές σε γραμμές μετάδοσης [45]. Ωστόσο, χρειάζονται πιο γενικές αναπαραστάσεις που λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.



Εικόνα 5 Βασική αναπαράσταση γράφου που αποτελείται από κορυφές και ακμές. Σε αυτήν την απεικόνιση, οι κύκλοι σε ανοιχτό μπλε χρώμα αντιπροσωπεύουν τις πηγές δεδομένων του συστήματος ενώ τα βέλη υποδηλώνουν γραμμές μετάδοσης. Οι κορυφές μπορεί να έχουν θέσεις στο χρόνο και το χώρο, ενώ οι ακμές μπορεί να έχουν βάρη, κατευθύνσεις και σημάδια ως κύρια χαρακτηριστικά [72]

Τυπικά, ο γράφος μπορεί να οριστεί ως προς τις κορυφές και τις ακμές ως [46, 47]

$$G = (V, E) \quad (1)$$

Όπου το διάνυσμα $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$ υποδηλώνει τους κόμβους ή τις κορυφές (σημεία μέτρησης), και οι ακμές $E \subseteq V$ είναι οι ακμές του γραφήματος.

Ένας γράφος θεωρείται συνδεδεμένος εάν, για όλα τα ζεύγη κορυφών, υπάρχει μια διαδρομή μεταξύ αυτών των κορυφών στο γράφημα. Σε αυτόν τον ορισμό, μια ακμή $(i, j) \in E$ εάν τα v_i και v_j συνδέονται. Όπως σημειώθηκε από τους Benson και Daggett [46], οι ακμές αντιπροσωπεύουν

σχέσεις μεταξύ ζευγών κόμβων, δηλ. $E \subseteq V \times V$. Υπό αυτή την έννοια, ένα κρίσιμο πρόβλημα ενδιαφέροντος είναι ο προσδιορισμός σημείων ή ζωνών παρακολούθησης χρησιμοποιώντας την έννοια των συνδεδεμένων κυρίαρχων συνόλων [47]. Αυτό ισοδυναμεί με την απομόνωση των πιο ζωτικών σχέσεων σε ένα γράφο.

Δεδομένης μιας αναπαράστασης γράφου της μορφής που παρουσιάζει η εξίσωση (1), ο σταθμισμένος πίνακας γειτνίασης $W \in \mathbb{R}^{m \times m}$ είναι ένας συμμετρικός, χωρικός πίνακας βαρών με στοιχεία

$$W = [w_{i,j}] = \begin{cases} w_{ij}, & \text{αν } (v_i, v_j) \in R \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2)$$

Εννοιολογικά, τα βάρη w_{ij} αντιπροσωπεύουν τη συγγένεια ή την απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j και σημαίνουν την απουσία ή την παρουσία μιας άμεσης ακμής μεταξύ των κόμβων. Ιδιαίτερες περιπτώσεις είναι ο πίνακας γειτνίασης $A \in \mathbb{R}^{m \times m}$ [48] ή οι φυσικές αποστάσεις. Όπως συζητήθηκε, ένα ανοιχτό πρόβλημα ενδιαφέροντος είναι η ομαδοποίηση στενά συνδεδεμένων μεταβλητών σε υποομάδες μεταβλητών για αποσύνθεση της διεργασίας, καταναμημένη παρακολούθηση, τοποθέτηση αισθητήρα ή οπτικοποίηση.

Ωστόσο, οι αμιγώς χωρικές μέθοδοι παρουσιάζουν αρκετούς σαφείς περιορισμούς. Αν και είναι αποτελεσματικές για την κατανόηση των αναγκών επικοινωνίας ή της τοπολογικής δομής, το μειονέκτημα αυτών των μεθόδων είναι ότι είναι εγγενώς στατικές και συγκεντρωτικές, γεγονός που εμποδίζει την εφαρμογή τους σε συμβατικά σχέδια WAMS.

Όλο και περισσότερο, οι ιδιότητες των δικτύων φασιθετών μελετώνται χρησιμοποιώντας πιο γενικές αναπαραστάσεις γράφων, που συχνά συνοδεύονται από την εφαρμογή φασματικής ανάλυσης ή άλλων παρόμοιων τεχνικών [49]. Σε αυτή την προοπτική, απαιτείται μια χωροχρονική αναπαράσταση στην οποία οι ακμές έχουν βάρη που σχετίζονται με δεδομένα χρονοσειρών, που συχνά αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα μετάβασης από τη μια κορυφή στην άλλη. Όταν συνδυάζονται με τεχνικές φασματικής ανάλυσης, αυτές οι προσεγγίσεις μπορούν να γενικευτούν για να λάβουν υπόψη τη χωροχρονική αναπαράσταση της δυναμικής του συστήματος.

Ένας απλός τρόπος για να οριστούν τα σημαντικά βάρη μεταξύ κορυφών είναι να προσδιοριστεί η ισχύ της αλληλεπίδρασης χρησιμοποιώντας Ευκλείδειες αποστάσεις. Όσον αφορά στη εικόνα 2, έστω ότι το $X = [x_{kj}(t)]$ υποδηλώνει έναν χωροχρονικό πίνακα δεδομένων που καταγράφεται από ένα μεμονωμένο γεγονός στο σύστημα όπου το $x_{ij}(t)$ αντιπροσωπεύει τα δεδομένα που καταγράφονται την k -στη χρονική στιγμή από τη j -στη χωρική (σημείο μέτρησης) θέση ($k = 1, \dots, N$) [50,51].

Τυπικά, δεδομένου ενός σύνολο ακολουθιών δεδομένων $\Omega = \{x_i\}_{i=1}^m$, όπου το $x_i \in \mathbb{R}^N = [x_i(0) \ x_i(1) \ \dots \ x_i(N-2) \ x_i(N-1)]$ είναι ένα διάνυσμα μετρήσεων στο ζυγό i (μια δυναμική τροχιά), το βάρος μιας ακμής που συνδέει τις κορυφές i και j είναι ένας πυρήνας Gaussian κατωφλίου της μορφής,

$$W = [w_{i,j}] = \begin{cases} e^{-\frac{|dist_{ij}|^2}{2\sigma^2}}, & \text{αν } i \neq j \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (3)$$

για ένα δεδομένο σ , όπου το $dist(i,j) = d_{ij}$ αντιπροσωπεύει τη φυσική απόσταση ή τη συγγένεια ανά ζεύγη μεταξύ των κορυφών i και j ή την απόσταση Mahalanobis ή Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των δυναμικών τροχιών x_i και x_j .

Δύο παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν σχετικά με αυτό το μοντέλο:

1. Η εξίσωση (3) περιγράφει ένα πλήρως συνδεδεμένο γράφο

2. Σε μια ρύθμιση μεγάλης κλίμακας, λαμβάνεται ένα περικομμένο γράφημα όταν $\text{dist}_{ij} < \sigma$, όπου το σ είναι ένα συντονίσιμο όριο

1.2.7.2 Φασματική ανάλυση γράφων

Μέχρι εδώ, είχε υποθεθεί ότι οι γράφοι αποτελούν μια στατική, ντετερμινιστική αναπαράσταση. Αυτή η ενότητα εισάγει το πρόβλημα της φασματικής ομαδοποίησης και την εφαρμογή της στη ομαδοποίηση και την οπτικοποίηση.

Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν τις ιδιοτιμές και τα ιδιοδιανύσματα μιας κανονικοποιημένης μήτρας απόστασης ή ομοιότητας για να ομαδοποιήσουν πληροφορίες δεδομένων σε (συσχετισμένες) ομάδες με βάση φυσικές αποστάσεις ή ομοιότητες μεταξύ δυναμικών τροχιών. Μια τέτοια αναπαράσταση οδηγεί φυσικά σε ένα πλαίσιο μοντελοποίησης μέσω του οποίου είναι δυνατός ο ορισμός μιας ζώνης παρακολούθησης ή ο διαχωρισμός του WAMS σε πολλά σχετικά μπλοκ δεδομένων.

Μεταξύ των διαφορετικών τεχνικών ανάλυσης που βασίζονται σε γράφους, η φασματική ανάλυση γράφων έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης δεδομένων τροχιάς, της ομαδοποίησης και του χαρακτηρισμού φυσικών αποστάσεων. Σε αντίθεση με τις αμιγώς στατικές αναπαραστάσεις, κάθε κορυφή i μπορεί να συσχετιστεί με μια ακολουθία μέτρησης ή κατάσταση $x_i(t)$, η οποία εξελίσσεται στο χρόνο. Το βάρος ή οι αντοχές της κατευθυνόμενης ακμής από την κορυφή i στην κορυφή j μπορούν να οριστούν με βάση μια πιθανολογική συνάρτηση και θεωρούνται θετικές.

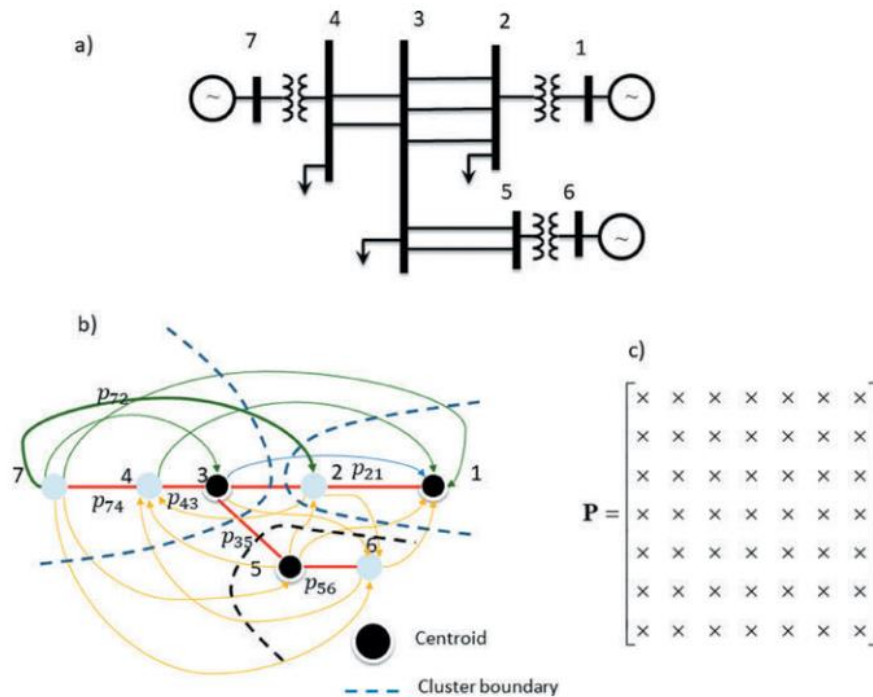
Σε αυτή την προοπτική, ο γράφος και οι ιδιότητές του μπορούν να οριστούν ως ένας τυχαίος περίπατος όπου μια πιθανότητα p_{ij} δίνει την πιθανότητα μια κορυφή i να περπατήσει στην κορυφή j .

Υπάρχουν τέσσερα κύρια βήματα για την κατασκευή ενός γράφου ή ενός δικτύου [52, 53]:

1. Κατασκευάζεται ένας σταθμισμένος γράφος G με βάση μια συνάρτηση βάρους κατά ζεύγη που μετρά τη συγγένεια μεταξύ των δειγμάτων.
2. Ορίζεται μια διαδικασία Markov στο γράφο G μέσω της κατασκευής ενός πίνακα μετάβασης που προέρχεται από το G
3. Λαμβάνει χώρα μια μη γραμμική χαρτογράφηση των δειγμάτων σε έναν νέο ενσωματωμένο χώρο με βάση μια παραμετροποίηση του γράφου, η οποία σχηματίζει μια εγγενή αναπαράσταση του σήματος
4. Λαμβάνει χώρα η εξαγωγή φασματικών ιδιοτήτων και συναφών συστάδων. Εάν είναι απαραίτητο, προσεγγίζεται η φυσική συμπεριφορά (ανακατασκευή δεδομένων) χρησιμοποιώντας τη σχετική δυναμική στον μειωμένο υποχώρο

Σημειώνεται ότι η δυναμική του δικτύου ορίζεται από ένα σταθμισμένο γράφο που μπορεί να ορίσει μια διεργασία διάχυσης σε αυτήν την περίπτωση. Ο γράφος δικτύου G θεωρείται ότι είναι ισχυρά συνδεδεμένος, δηλαδή υπάρχει μια κατευθυνόμενη διαδρομή μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κορυφών.

Μια απεικόνιση αυτών των ιδεών δίνεται στην εικ. 5.



Εικόνα 6 Ένα απλό παράδειγμα που απεικονίζει την αναπαράσταση των ακμών ως πιθανολογικά βάρη ($m = 7$). Τα βάρη ακμών p_{ij} υποδηλώνουν την πιθανότητα μετάβασης από την κορυφή i στην κορυφή j σε ένα βήμα [73]

Στη συνέχεια, τίθεται το ερώτημα του υπολογισμού σημαντικών πιθανοτικών μέτρων απόστασης. Μια σύντομη εξήγηση του μοντέλου στην εικόνα 5 είναι χρήσιμη ως προς αυτό. Με το γράφο στην εικόνα 5 μπορεί να συσχετιστεί ένας (συμμετρικός) πίνακας μετάβασης ή στοχαστικής πιθανότητας P που ορίζεται ως

$$W \in \mathfrak{R}^{m \times m} = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Μια (πεπερασμένη) διαδικασία Markov μπορεί τώρα να υποθεθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι, για σταθερό i ,

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad (5)$$

για κάθε $i = 1, \dots, m$, και οι πιθανότητες μετάβασης στην εξίσωση (4) ικανοποιούν $p_{ij} \geq 0, \forall ij$ απαιτώντας έτσι ότι

$$\hat{p}_{ij} = p_{ij} / \sum_{j=1}^m p_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, m$$

Σύμφωνα με τις φασματικές ιδιότητες των στοχαστικών πινάκων, η πρώτη ιδιοτιμή του πίνακα μετάβασης είναι $\lambda_1 = 1$, και επομένως $P \Psi = \Lambda \Psi$, όπου Ψ είναι το συσχετισμένο (τετριμμένο) ιδιοδιάνυσμα. Τα υπόλοιπα ιδιοδιανύσματα μπορούν να υπολογιστούν από

$$(P - \lambda_j I) \Psi_j = 0, j = 2, \dots, m \quad (6)$$

και βρίσκονται μέσα στον μοναδιαίο κύκλο. Αυτό είναι ένα τρέχον θέμα που ενδιαφέρει τη μελέτη των τεχνικών ομαδοποίησης και οπτικοποίησης.

Μόλις καθοριστεί μια βάση χαμηλής διάστασης, οι τροχιές στιγμιότυπου μπορούν να προσεγγιστούν με έναν γραμμικό συνδυασμό των μη τετριμμένων συντεταγμένων στην εξίσωση (6) προβάλλοντας τα αρχικά δεδομένα X στην εικόνα 2 σε έναν υποχώρο χαμηλής διάστασης έτσι ώστε

$$X = \sum_{j=1}^r a_j(t) \Psi_j^T \quad (7)$$

Όπου τα $a_j(t) = A_j \cos(\omega_j t + \theta_j)$ είναι συντελεστές που εξαρτώνται από το χρόνο που πρέπει να προσδιοριστούν και r είναι ο αριθμός των σχετικών συντεταγμένων.

Χρησιμοποιώντας αυτό το αποτέλεσμα, μπορεί να ληφθεί μια αναπαράσταση συστήματος χαμηλών διαστάσεων. Έχουν εφαρμοστεί φασματικές μέθοδοι για τη ομαδοποίηση και την οπτικοποίηση δεδομένων, την εκτίμηση μοντέλων και την αξιολόγηση διαφόρων πτυχών της απόδοσης του συστήματος. Διάφορα προβλήματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον όπως:

1. Φιλτράρισμα και αποθορυβοποίηση
2. Συμπύεση σήματος
3. Δυναμική ανακατασκευή διαδικασίας
4. Ομαδοποίηση και οπτικοποίηση
5. Τοποθέτηση αισθητήρα

1.2.7.3 *Συνδεδεμένα κυρίαρχα σύνολα*

Στη μελέτη των Randles και Taleb-Bendiab [47], προτείνεται μια προσέγγιση για τον προσδιορισμό της επαρκούς παρακολούθησης σε ένα υπολογιστικό σύστημα μεγάλης κλίμακας. Η παρακολούθηση εκχωρείται σε ένα υποσύνολο του συστήματος, όπου μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν πλήρης εμβέλεια του συστήματος από ελάχιστα σημεία παρακολούθησης.

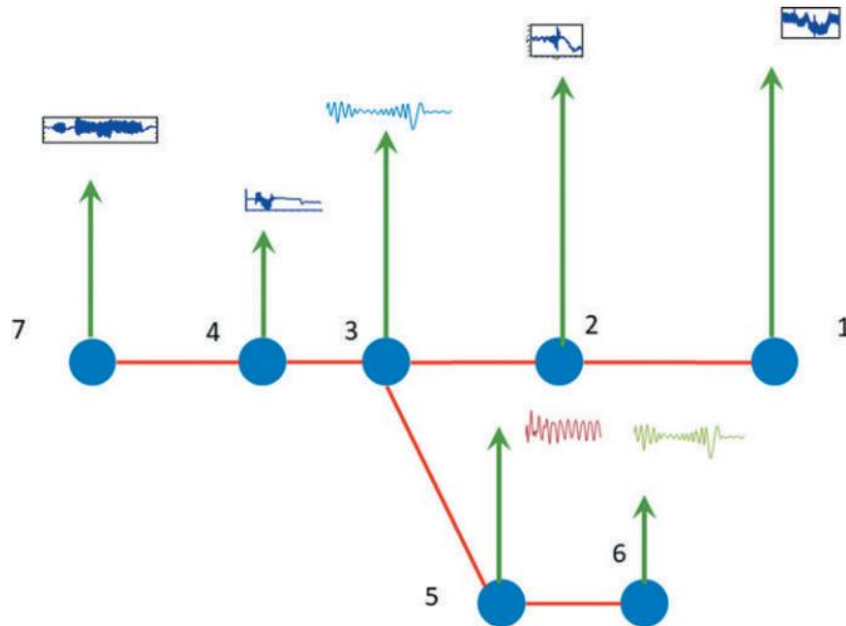
Για την επίτευξη αυτού του στόχου, τα σημεία παρακολούθησης επιλέγονται προβάλλοντας τις υπολογιστικά ενεργές θέσεις, στο σύστημα, ως κόμβους σε ένα γράφο δικτύου.

Ακολουθώντας τους Randles και Taleb-Bendiab [47] για ένα γράφο $G = (V, E)$, ένα υποσύνολο κόμβων $V^+ \subseteq V$ ονομάζεται κυρίαρχο σύνολο στο V εάν κάθε μέλος του V είναι είτε στο V^+ είτε συνδέεται με ένα μέλος του V^+ . Στη συνέχεια, είναι δυνατό να οριστεί μια περιοχή ενδιαφέροντος (ζώνη παρακολούθησης) για κάθε μέλος του V^+ που θα καλύπτει ολόκληρο το δίκτυο.

Ωστόσο, ο ορισμός των κυρίαρχων περιοχών ενδιαφέροντος είναι ένα μη τετριμμένο έργο, ειδικά στην περίπτωση εξαιρετικά πολύπλοκων και διασυνδεδεμένων δικτύων ισχύος όπου ο αριθμός των κορυφών και των ακμών μπορεί να είναι τεράστιος. Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι αυτές οι τεχνικές είναι ουσιαστικά στατικές

1.2.7.4 *Γεωμετρικές προσεγγίσεις για την επεξεργασία σήματος*

Πρόσφατα, αναπτύχθηκαν επεκτάσεις στις κύριες αναπαραστάσεις γράφου που λαμβάνουν υπόψη τις χρονοσειρές δεδομένων σε κάθε κορυφή ή κόμβο. Σε αυτές τις προσεγγίσεις, κάθε κατάσταση μπορεί να συσχετιστεί με μια δυναμική τροχιά, δηλαδή τη χρονική εξέλιξη ή τη ροή δεδομένων ενός PMU ή φασιθέτη [44]. Η εικ. 6 είναι μια σχηματική απεικόνιση αυτής της έννοιας.



Εικόνα 7 Ένα απλό παράδειγμα σήματος στις κορυφές ενός γράφου. Το στιγμιαίο ύψος αντιπροσωπεύει την τιμή του σήματος [73]

Εδώ, ένα σήμα που ορίζεται στις κορυφές αντιπροσωπεύεται από μια συνάρτηση $f(t) \in \mathbb{R}^N$, όπου N είναι ο αριθμός των σημείων δεδομένων. Συγκεκριμένες περιπτώσεις είναι ημιτονοειδής συναρτήσεις που σχετίζονται με μια δεδομένη τροπική συμπεριφορά ενδιαφέροντος ή τις προσεγγίσεις της.

Σε σχετική εργασία, έχουν αναπτυχθεί γεωμετρικές προσεγγίσεις για την ανάλυση δεδομένων που επεκτείνουν τη συμβατική αναπαράσταση χωρικών γραφημάτων στη χωροχρονική, στοχαστική ρύθμιση. Κάθε ζυγός i έχει μια βαθμωτή κατάσταση $x_i(t)$ σε αυτές τις προσεγγίσεις, η οποία εξελίσσεται σε συνεχή χρόνο [54], δηλαδή ως ακίνητη στοχαστική είσοδος.

Σε αντίθεση με τη θεωρία φασματικών γράφων, στην προσέγγιση επεξεργασίας γεωμετρικού σήματος, ο στόχος είναι να οριστούν τα φάσματα συχνότητας και οι βάσεις επέκτασης για το μετασχηματισμό γραφήματος Fourier [44].

Συνδυάζοντας ιδέες από τη θεωρία φασματικών γράφων με τεχνικές θέσης αποσύνθεσης Fourier ή παρόμοιες τεχνικές, είναι δυνατό να αποτυπωθούν δυναμικές πτυχές στην αναπαράσταση γράφου. Η επεξεργασία σήματος σε αυτές τις αναπαραστάσεις έχει τη δυνατότητα να επιτρέψει το φιλτράρισμα στον τομέα κορυφής, την αποθορυβοποίηση και τη συμπίεση, μεταξύ άλλων πιθανών εφαρμογών

1.2.8 Προκλήσεις των μελλοντικών ευφυών συστημάτων παρακολούθησης και ανάλυσης

Οι προηγμένες τεχνολογίες μέτρησης και ανάλυσης συστημάτων ισχύος διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη έξυπνων δικτύων [19, 20, 55-59]. Ωστόσο, πολλά ζητήματα καθιστούν την ανάπτυξη του WAMS περίπλοκη και προκλητική. Μερικά από αυτά τα θέματα συζητούνται εν συντομία παρακάτω.

Επιλεκτικότητα αισθητήρα και έξυπνη σύντηξη δεδομένων: Οι σύγχρονες PMU παράγουν δεδομένα με τη μορφή πολυδιάστατων συστοιχιών διαφορετικών τύπων ή τροπολογιών. Η σύντηξη ή η ενοποίηση δεδομένων από πολλαπλές, συμπληρωματικές μεθόδους έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την κατανόηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος. Επιπλέον, η επιλογή του ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Μίλος Χρήστος

συνδυασμού τύπων δεδομένων που μπορεί να ενδιαφέρει για εφαρμογές ανάλυσης και ελέγχου είναι ένα ανοιχτό πρόβλημα που μόλις και μετά βίας έχει συζητηθεί στη βιβλιογραφία των συστημάτων ισχύος. Γενικά, οι τεχνικές σύντηξης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τεχνικές ολοκλήρωσης και σύντηξης δεδομένων [60-62].

Η διαχείριση δεδομένων, από την άλλη πλευρά, είναι ζωτικής σημασίας για μελλοντική έρευνα. Η επιτυχής παρακολούθηση του συστήματος ισχύος απαιτεί τον αποτελεσματικό και αξιόπιστο χειρισμό τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων παρατήρησης. Είναι διαισθητικά σαφές ότι όλες οι πληροφορίες που συλλέγονται πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών για την παρακολούθηση και τη διάγνωση της απόδοσης λειτουργίας. Ωστόσο, τα δεδομένα μέτρησης δεν είναι ανεξάρτητα, επομένως απαιτούν μείωση διαστάσεων. Επιπλέον, οι μέθοδοι πολλαπλών μεταβλητών επιτρέπουν την παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρονται οι μεταβλητές μεταξύ τους και μειώνουν τα επίπεδα θορύβου μέσω του μέσου όρου. Γενικά, τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες είναι ατελή και μπορεί να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που κάνουν την ανάλυση των κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος πολύπλοκη, δηλαδή συσχέτιση. Τα δεδομένα που συλλέγονται από μεταβατικές διεργασίες, ειδικότερα, είναι θορυβώδη και ελλιπή, ετερογενή, δυναμικά ασυνεπή και μπορεί να παρουσιάζουν ανόμοια χρονικά διαστήματα και χωροχρονική εξάρτηση. Διαισθητικά, η ενσωμάτωση πολλαπλών συνόλων δεδομένων που αποκτώνται από διαφορετικούς αισθητήρες για ένα παροδικό φαινόμενο ενδιαφέροντος μπορεί να αποφέρει περισσότερες ενημερωτικές γνώσεις και συχνά συμπληρωματικές πληροφορίες από οποιοδήποτε μεμονωμένο σύνολο δεδομένων.

Επιπλέον, μια πλήρης (και αξιόπιστη) άποψη της δυναμικής του συστήματος δεν μπορεί να επιτευχθεί με βάση δεδομένα από έναν μόνο αισθητήρα. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για τα ακόλουθα:

Παραμετροποίηση δεδομένων: Τα μετρούμενα δεδομένα του συστήματος ισχύος συνήθως μολύνονται με διάφορους τύπους θορύβου και τεχνουργήματα, ειδικά κατά τα στάδια απόκτησης και επεξεργασίας. Οι ακραίες τιμές και ο θόρυβος μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένη ομαδοποίηση και να επηρεάσουν την απόδοση πρόβλεψης, καθώς οι προγνωστικοί παράγοντες προσπαθούν να προβλέψουν τα ακραία σημεία και τον θόρυβο και επηρεάζουν την ποιότητα των τεχνικών εξαγωγής και ταξινόμησης χαρακτηριστικών. Τυπικοί στόχοι είναι η μείωση ή η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των τεχνουργημάτων διατηρώντας παράλληλα τις πιο σχετικές πληροφορίες στα σήματα. Αυτά τα ζητήματα απαιτούν την ανάπτυξη εξειδικευμένων εργαλείων για τη συστηματική απόσβεση, φιλτράρισμα και μείωση των δεδομένων που συλλέγονται σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες.

Ανεπάρκεια δεδομένων: Οι μετρήσεις κατανέμονται αραιά σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή και ενδέχεται να παρέχουν μόνο μερική παρατηρησιμότητα του συστήματος. Χρειάζονται λοιπόν έξυπνες διαδικασίες παρεμβολής για την εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μη δειγματοληπτικές τοποθεσίες στο διάστημα καθώς και για τον εντοπισμό περιττών μετρήσεων. Επιπλέον, οι χωρικές μετρήσεις συσχετίζονται χωρικά (μη ανεξάρτητες από το διάστημα) και απαιτούνται τεχνικές για την εξαγωγή της πραγματικής διάστασης του χώρου μέτρησης. Η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων σε προβλήματα παρακολούθησης συστημάτων έχει προχωρήσει σημαντικά με την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης, προστασίας και ελέγχου ευρείας περιοχής. Ωστόσο, η ενσωμάτωση μεγάλων επιπέδων παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά το σχεδιασμό του μελλοντικού Έξυπνου Δικτύου.

Ολοκληρωμένες επικοινωνίες σε όλο το δίκτυο: Οι αναδυόμενες τεχνολογικές εξελίξεις υπόσχονται να βελτιώσουν την αξιολόγηση απειλών και της υγείας του συστήματος [21, 22]. Για παράδειγμα, αναπτύσσονται νέες τεχνικές ανίχνευσης που σαρώνουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε διαφορετικούς ρυθμούς και αναλύσεις. Η ενσωμάτωση δυναμικά ασυνεπών δεδομένων, ωστόσο, είναι μια πρόκληση.

Καθώς προστίθενται περισσότεροι αισθητήρες στο ηλεκτρικό δίκτυο, προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας κατευθυντήριων γραμμών για την τοποθέτηση και διαχείριση των αισθητήρων του συστήματος με συντονισμένο τρόπο. Μια τέτοια ενοποίηση πληροφοριών που βασίζονται σε διαδικασίες με τεράστιο όγκο δεδομένων απαιτεί περαιτέρω μελέτη. Ένα πρόσθετο ζήτημα είναι η ανακατασκευή της δυναμικής του συστήματος, ειδικά η συμπεριφορά των τρόπων μεταφοράς χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό αισθητήρων.

Επομένως, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη τεχνικών παρακολούθησης της ασφάλειας του Διαδικτύου των πραγμάτων (IOT) στην εποχή των «μεγάλων δεδομένων». Περαιτέρω, ο προσδιορισμός των αναγκών ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι ένα ανοιχτό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Επιπλέον, απαιτείται εξαιρετικά αξιόπιστη και ανθεκτική υποδομή επικοινωνίας.

Προηγμένη ανίχνευση και μέτρηση: Η προηγμένη παρακολούθηση συστήματος είναι ένα κρίσιμο στοιχείο του μελλοντικού Smart Grid. Απαιτείται έρευνα σχετικά με την ευφυή ανάλυση δεδομένων, τη μηχανική μάθηση, τις τεχνικές προτύπων και τους εξελικτικούς υπολογισμούς για τη συνετή χρήση των δεδομένων [16–20]. Τα συστήματα παρακολούθησης επόμενης γενιάς πρέπει να ενσωματώνουν και να επεξεργάζονται αποτελεσματικά δεδομένα από διάφορες τεχνολογίες παρακολούθησης, ενώ ανταποκρίνονται γρήγορα και προσαρμοστικά σε αλλαγές στη συμπεριφορά του συστήματος παροδικής.

Τοποθέτηση αισθητήρα και δυναμική ανακατασκευή διεργασιών: Το WAMS βασίζεται σε ένα σωστά σχεδιασμένο και καλά κατανοημένο δίκτυο συγχρονισμού για τη δημιουργία πολύτιμων δεδομένων. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες τοποθετούνται συχνά με βάση διάφορες εκτιμήσεις, τα υπάρχοντα δίκτυα συγχρονισμού μπορεί να υπεραντιπροσωπεύουν ορισμένες περιοχές και να υποεκπροσωπούν κάποιες άλλες. Επιπλέον, όπως συζητήθηκε προηγουμένως, η διασπορά τοποθεσίας μπορεί να μην καταγράφει τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των δυναμικών διεργασιών που ενδιαφέρουν. Δύο κεντρικά προβλήματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την τοποθέτηση αισθητήρων συστήματος: (α) δυναμική διαδικασία ή ανακατασκευή κατάστασης από περιορισμένο αριθμό αισθητήρων και συχνά περιορισμένα δεδομένα [28, 63, 64] και (β) χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Μαζί αυτά τα ζητήματα υπογραμμίζουν την ανάγκη για γρήγορες και ισχυρές μεθόδους για την προσαρμογή των εξής:

Ανάλυση ελλιπών δεδομένων: Τα δεδομένα που λείπουν μπορεί να προκύψουν σε διάφορες ρυθμίσεις λόγω απώλειας πληροφοριών, καταστροφής δεδομένων, εσφαλμένων μετρήσεων, ελλιπών ή ανεπαρκών πληροφοριών ή σφαλμάτων στα δεδομένα διαδικασία συλλογής. Απαιτούνται μέθοδοι για την εκτίμηση των πληροφοριών συστήματος από ελλιπή σύνολα δεδομένων [62, 65, 66]. Η συμπλήρωση των τιμών που λείπουν με τις εκτιμώμενες τιμές είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Τα ελλιπή δεδομένα μπορεί να οδηγήσουν σε αναξιόπιστες ή μεροληπτικές τροπικές εκτιμήσεις και να περιπλέξουν την εφαρμογή χωροχρονικών μοντέλων σε δεδομένα σε όλο το σύστημα.

Μέχρι στιγμής, έχουν αναφερθεί λίγες εξαντλητικές αναλύσεις για τη μελέτη της φύσης των στοιχείων που λείπουν. Η μοντελοποίηση ετερογενών δεδομένων, ωστόσο, υπόσχεται να παρέχει καλύτερη κατανόηση του προβλήματος, καθώς κάθε τύπος δεδομένων έχει τα πλεονεκτήματά του καθώς και τους περιορισμούς του.

Μείωση διαστάσεων: Τα σύνολα δεδομένων του συστήματος ισχύος είναι υψηλών διαστάσεων και πολυμεταβλητών. Η μείωση των διαστάσεων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της κατανόησης της φυσικής συμπεριφοράς του συστήματος και της οπτικοποίησης [67]. Επίσης, λόγω της υψηλής διάστασης των δεδομένων, η μείωση διαστάσεων είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αποφυγή του πλεονασμού δεδομένων, την καταστολή του θορύβου και την αποκάλυψη σημαντικής δομής σε χώρο χαμηλών διαστάσεων. Επιπλέον, μια άλλη πολλά υποσχόμενη οδός για έρευνα είναι η χρήση μοντέλων μειωμένης τάξης για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου.

Ετερογένεια δεδομένων: Η ετερογένεια δεδομένων αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση για την παρακολούθηση του συστήματος ισχύος. Η αυξανόμενη ποικιλομορφία των δεδομένων καθιστά απαραίτητη την κοινή ανάλυση ετερογενών μετρήσεων. Τυπικά, τα δεδομένα που αποκτώνται από πολυμεταβλητές PMU αναλύονται χωριστά, με αποτέλεσμα έναν ελλιπή δυναμικό χαρακτηρισμό. Η συγχώνευση πληροφοριών από συμπληρωματικές μεθόδους ή τύπους όχι μόνο έχει τη δυνατότητα να παρέχει πρόσθετη εικόνα για τη δυναμική του συστήματος, αλλά παρουσιάζει επίσης πολλαπλές προκλήσεις.

Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών, ειδικότερα, συλλέγουν πολλαπλές ετερογενείς μετρήσεις (π.χ., μέγεθος και φάση τάσης διαύλου, συχνότητα διαύλου, ενεργή και άεργη ισχύς). Η ανακάλυψη συσχετίσεων μεταξύ διαφόρων τύπων δεδομένων είναι ένα θέμα που δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Τα τελευταία χρόνια, αναπαραστάσεις βασισμένες σε τανυστές έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση πολυτροπικών ή πολλαπλών τύπων πτυχών των δεδομένων [39, 68-70]. Ωστόσο, αυτά τα μοντέλα είναι υπολογιστικά απαιτητικά παρά τις δυνατότητές τους και χρειάζονται επίσης εργαλεία για την εξέταση των συσχετίσεων μεταξύ των τύπων δεδομένων.

Εξόρυξη δεδομένων τροχιάς: Τα τελευταία χρόνια, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τη χρήση τεχνικών εξόρυξης δεδομένων για την εξαγωγή συναρπαστικών μοτίβων από δεδομένα χρονοσειρών (εξόρυξη προτύπων τροχιάς) που δημιουργούνται από αισθητήρες που παρακολουθούν χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα [71]. Στο μέλλον, ευφυείς αισθητήρες με ενσωματωμένους μικροεπεξεργαστές, κάποια επεξεργασία σήματος και υπολογισμοί θα μπορούσαν να εκτελούνται τοπικά και ταυτόχρονα, επιτρέποντας καλύτερη ορατότητα των μεταβατικών ταλαντώσεων που μεταβάλλονται στο χρόνο.

Κατανεμημένη παρακολούθηση και έλεγχος: Μια σημαντική παγκόσμια τάση στην εξέλιξη των σύγχρονων συστημάτων ισχύος είναι η ενσωμάτωση περισσότερων DER. Η πολυκατευθυντική ροή ισχύος που σχετίζεται με τη διακοπόμενη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές απαιτεί τη λειτουργία να βασίζεται σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Το WAMS είναι μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις για τον χειρισμό αυτών των απαιτήσεων. Η πιο πρόσφατη εμφάνιση των ιδεών Smart Grid είναι μια άλλη θεμελιώδης πτυχή για περαιτέρω συζητήσεις και ανάπτυξη της τεχνολογίας φασιθετών, που σχετίζεται με την πραγματική δυνατότητα διαδικτυακών εφαρμογών παρακολούθησης. Η αξιοσημείωτη χρήση ευέλικτων συστημάτων μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος και τεχνολογίας συστημάτων υψηλής τάσης DC σε σύγχρονα συστήματα ισχύος είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας που χρειάζεται περαιτέρω παρακολούθηση και έλεγχο βάσει πληροφοριών ευρείας περιοχής.

Ανίχνευση και ταξινόμηση ανωμαλιών: Η έγκαιρη αναγνώριση της φθοράς του συστήματος είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή αστάθειας του συστήματος [72]. Σε πολλές αναδυόμενες εφαρμογές, οι τεχνικές μείωσης διαστάσεων και αναγνώρισης προτύπων συνδυάζονται για την παρακολούθηση της υγείας του συστήματος ισχύος.

Απαιτήσεις εύρους ζώνης: Άλλα ανοιχτά προβλήματα περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- απώλεια επικοινωνίας PMU
- Ροές PMU με διαφορετικούς ρυθμούς αναφοράς και διαφορετική καθυστέρηση
- σύντηξη πολυτροπικών, πολλαπλών δεδομένων
- κατανομημένη μοντελοποίηση και έλεγχος

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Τεχνολογία συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών

Παραδοσιακά, οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση συστημάτων ισχύος έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν βαθμωτές πληροφορίες. Ενώ για μετρήσεις ισχύος αυτό είναι προφανές, για τάσεις και ρεύματα, σε συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος συνήθως σημαίνει αναφορά της τιμής RMS για τα μετρούμενα μεγέθη.

Η κύρια εξέλιξη στον τομέα αυτό ήταν η μετάβαση από τις αναλογικές και ηλεκτρομηχανολογικές συσκευές στην ψηφιακή υλοποίηση. Αυτή η ψηφιακή εφαρμογή επέτρεψε την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων επιλογών μέτρησης που είναι επίσης χρήσιμες για σκοπούς ποιότητας ισχύος (π.χ. ολική αρμονική παραμόρφωση). Από την άλλη πλευρά, η φάση παίζει κρίσιμο ρόλο στη λειτουργία των συστημάτων ισχύος. Οι πληροφορίες φάσης εξάγονται συνήθως μόνο στο επίπεδο του θαλάμου ελέγχου μέσω της διαδικασίας εκτίμησης κατάστασης (state estimation - SE). Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιεί μια μεγάλη ποσότητα μετρήσεων για να εξαγάγει μια συνεκτική εικόνα της λειτουργίας του δικτύου. Η εικόνα αντιπροσωπεύεται σε πολλές περιπτώσεις από το προφίλ τάσης ως προς το πλάτος και τη φάση. Μια τέτοια προσέγγιση έχει τρεις κύριους περιορισμούς:

- Οι πληροφορίες είναι πάντα το αποτέλεσμα μιας αριθμητικής διαδικασίας και ποτέ δεν μετριέται άμεσα.
- Οι πληροφορίες για την φάση είναι διαθέσιμες μόνο σε κεντρικό επίπεδο και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τοπική επεξεργασία.
- Ο ρυθμός ανανέωσης του συστήματος SE είναι μάλλον αργός και ακόμη και τότε, οι πληροφορίες είναι διαθέσιμες μόνο με ελάχιστες λεπτομέρειες.

Με τον αυξανόμενο ρόλο της δυναμικής του συστήματος και την ανάγκη να λειτουργούν τα δίκτυα πιο κοντά στο όριο τους, κατέστη προοδευτικά σαφές ότι ήταν κρίσιμο να βελτιωθεί το γνωστικό πλεονέκτημα της ποσότητας φάσης ως κριτική αξιολόγηση της ευστάθειας ολόκληρου του συστήματος.

Ανάλογα με τις εφαρμογές, όαυτό σημαίνει:

- χρήση των πληροφοριών για περισσότερες τοπικές διαδικασίες.
- ταχύτερη και ακριβέστερη διαδικασία σε επίπεδο συστήματος.

Αυτή η συνειδητοποίηση είναι η βασική αιτία της ανάπτυξης των PMU. Τα PMU είναι συσκευές μέτρησης ικανές να εξάγουν όχι μόνο το πλάτος αλλά και τη φάση μιας ημιτονοειδούς ποσότητας. Η φάση εκτιμάται αναφερόμενη σε συγκεκριμένη μέτρηση του χρόνου, η οποία συνήθως επιλέγεται να βασίζεται στο Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης, το οποίο παρέχει έναν διαθέσιμο και αξιόπιστο ορισμό του χρόνου παντού.

Οι PMU είναι συσκευές μέτρησης που έχουν σχεδιαστεί για τη μέτρηση της φάσης, της συχνότητας και του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας (ROCOF⁴) ηλεκτρικών σημάτων, όπως οι τάσεις και τα ρεύματα σε δίκτυα ισχύος, χρησιμοποιώντας μια πηγή χρονικού συγχρονισμού για να επισημαίνουν κάθε μέτρηση με την αντίστοιχη στιγμή. Ο συγχρονισμένος χαρακτήρας των μετρήσεων PMU απαιτεί την εισαγωγή, κάτω από μια νέα προοπτική, κλασικών εννοιών όπως του φάσορα.

Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια υπενθυμίζονται οι βασικές έννοιες σχετικά με τον φασιθέτη και τις σχετικές παραμέτρους, υπογραμμίζοντας τις διαφορές με μια παραδοσιακή προοπτική. Οι ορισμοί και η σημείωση που χρησιμοποιούνται εισάγονται επίσης για να δημιουργηθεί ένα συνθετικό κοινό υπόβαθρο για τη συζήτηση των αλγορίθμων PMU και την τυποποίηση της απόδοσης της PMU.

⁴ rate of change of frequency

Οι προτεινόμενοι ορισμοί είναι κατάλληλοι για την αντιμετώπιση τόσο της σταθερής κατάστασης όσο και των δυναμικών συνθηκών που μπορούν να αντικατοπτρίζονται στα σήματα του δικτύου, λόγω γεγονότων ή φαινομένων διαφορετικής προέλευσης. Ειδικότερα, εισάγεται η ιδέα του δυναμικού φασιθέτη, η οποία είναι θεμελιώδης για τη λειτουργία της PMU και εξηγούνται συνοπτικά οι ιδιαιτερότητές του. Ο στόχος είναι να υποδειχθεί πώς μια τέτοια ιδέα ταιριάζει απόλυτα με το μοντέλο των σημάτων δυναμικής ζώνης διέλευσης που είναι κατάλληλα για να αντιπροσωπεύουν την τυπική δυναμική που αναμένεται να ακολουθήσει ένα PMU

2.1 Βασικοί ορισμού του φασιθέτη, της συχνότητας και του ROCOF

Ο ορισμός του φασιθέτη (phasor) χρονολογείται από το 1893 και από την έρευνα του Charles Proteus Steinmetz [73]. Ο στόχος ήταν να εισαχθεί ένας τρόπος για να περιγραφεί συνθετικά ένα ημιτονοειδές σήμα σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω ενός μιγαδικού αριθμού, που δημιουργείται από την ενεργό τιμή (rms) και τη γωνία φάσης του. Ένα σύστημα ισχύος πρέπει να λειτουργεί σε ημιτονοειδή σταθερή κατάσταση, που χαρακτηρίζεται από ονομαστική συχνότητα είτε 50 είτε 60 Hz και επομένως η έννοια της φάσης εφαρμόζεται άμεσα. Η χρήση του φασιθέτη οφείλεται στο γεγονός ότι ένα γραμμικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί και να αναλυθεί για κάθε συχνότητα ανεξάρτητα.

Ο κλασικός μαθηματικός ορισμός του φασιθέτη βασίζεται σε ένα γενικό σήμα AC $x(t)$, δηλαδή σε ένα συνημιτονοειδές σήμα με σταθερή συχνότητα και μέγεθος:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

όπου X_m είναι το πλάτος του σήματος, $\omega=2\pi f$ είναι η γωνιακή συχνότητα του συστήματος και φ_0 είναι η αρχική φάση του σήματος, η οποία εξαρτάται από τον ορισμό της χρονικής κλίμακας.

Η αντίστοιχη αναπαράσταση φασιθέτη είναι τότε:

$$\bar{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_0} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\varphi_0 + i\sin\varphi_0) = X_r + iX_i \quad (9)$$

όπου τα X_r και X_i είναι πραγματικές και φανταστικές ορθογώνιες συνιστώσες της μιγαδικής αναπαράστασης φάσορα, ενώ το μέτρο της είναι η ενεργός τιμή του ημιτονοειδούς σήματος. Η σχέση με το αρχικό σήμα είναι

$$x(t) = \Re[\sqrt{2}\bar{X}e^{i2\pi f t}] \quad (10)$$

Δηλαδή, το σήμα είναι το πραγματικό τμήμα της φάσης που περιστρέφεται στη γωνιακή συχνότητα σήματος.

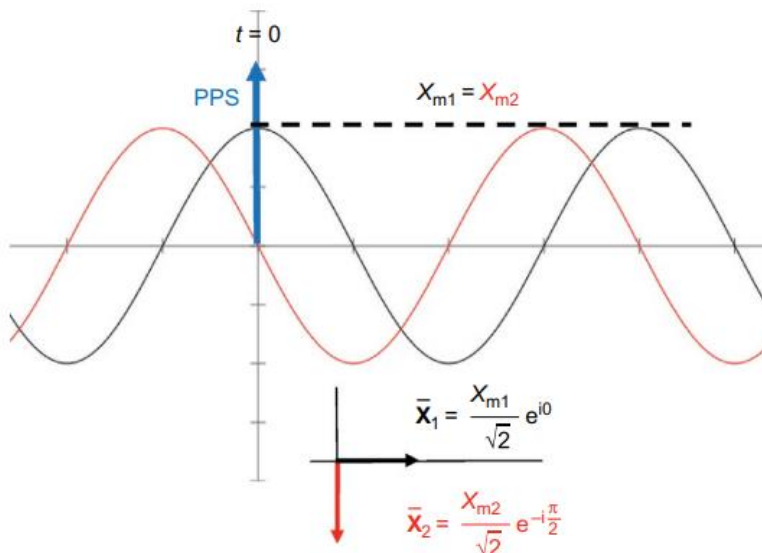
Όπως προαναφέρθηκε, η γωνία φάσης του φασιθέτη συνδέεται αυστηρά με την αρχική χρονική στιγμή που χρησιμοποιείται ως αναφορά ($t = 0$ στην εξίσωση 8). Για το λόγο αυτό, η γωνία φάσης είναι εγγενώς μια σχετική έννοια που πρέπει να αναφέρεται σωστά στον αρχικό χρόνο που χρειάζεται μια μέτρηση της φάσης.

Ο φασιθέτης είναι ακριβώς αφιερωμένος στη σύνδεση της έννοιας αυτής με τη μέτρησή του με σαφή τρόπο. Στην πραγματικότητα, η εκτίμηση του φασιθέτη βασίζεται στην ίδια ιδέα, με τη βασική διαφορά ότι η γωνία φάσης, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον Συντονισμένο Παγκόσμιο Χρόνο (UTC⁵) ως χρονική αναφορά. Μια τέτοια επιλογή επιτρέπει την ύπαρξη μιας μοναδικής αναφοράς

⁵ Coordinated Universal Time

για όλα τα ημιτονοειδή σήματα που θα μετρηθούν σε μια ευρεία ή παγκόσμια περιοχή, επειδή ο χρόνος διάδοσης βασίζεται σε δορυφορικά συστήματα. Δύο φασιθέτες, που υφίστανται σε διαφορετικά σημεία ενός δικτύου, μπορούν εύκολα να συγκριθούν επειδή σχετίζονται με κοινές στιγμές.

Η έκφραση του $x(t)$ στο φασιθέτη έχει επομένως την ίδια αναπαράσταση της εξίσωσης 9, αλλά, σε αυτήν την περίπτωση, η φάση ϕ_0 ορίζεται ότι είναι 0 μοίρες όταν το μέγιστο του $x(t)$ εμφανίζεται στη χρονική στιγμή UTC T_r που επιλέχθηκε για τη μέτρηση. Με άλλα λόγια, ο φασιθέτης που μετρά σε μια γενική στιγμή αναφοράς UTC T_r απεικονίζει το πλάτος rms και τη γωνία φάσης του ημιτονοειδούς σήματος στο T_r . Με μια χαλαρή σημείωση είναι δυνατός ο ορισμός του φασιθέτη ως $\bar{X}(T_r)$. Μια απλή αλλά λεπτή έννοια που είναι σημαντική όταν εξετάζονται οι φασιθέτες είναι ότι αυτοί δεν είναι πλέον μοναδικοί μιγαδικοί αριθμοί που περιγράφουν άπειρα σήματα σε σχέση με ένα υποθετικό $t=0$, αλλά είναι «μετρήσεις» που σχετίζονται άμεσα με τη στιγμή στην οποία αναφέρονται. Ως παράδειγμα, η εικόνα δείχνει δύο συνημιτονοειδή με το ίδιο πλάτος και διαφορετικές γωνίες φάσης στο χρόνο αναφοράς $T_r=0$.



Εικόνα 8 Δύο συνημιτονοειδή με διαφορετική γωνία φάσης στο $t=0$ [85]

Σε αυτό το παράδειγμα, η μέτρηση του φασιθέτη εκτελείται στο συμβάν παλμού ανά δευτερόλεπτο (το PPS⁶, που αντιστοιχεί στην εμφάνιση του δεύτερου) σε χρόνο UTC.

Η έννοια του φασιθέτη εισήχθη τη δεκαετία του 1980 και τυποποιήθηκε για πρώτη φορά στο πρότυπο IEEE 1344 [75]. Το πρότυπο αναπτύχθηκε περαιτέρω: μια πρώτη ενημέρωση οδήγησε στο πρότυπο IEEE C37.118 το 2005 [76], ενώ μια δεύτερη διαδικασία αναθεώρησης παρήγαγε το 2011 τις δύο τρέχουσες εκδόσεις IEEE C37.118.1 [77], ακολουθούμενη το 2014 από την τροποποίησή του IEEE C37.118.1a [78] και IEEE C37.118.2 [79]. Ειδικότερα, το [77] ασχολείται με τις απαιτήσεις μέτρησης φασιθετών, συμπεριλαμβανομένης της δυναμικής απόδοσης, ενώ το [79] είναι αφιερωμένο στις απαιτήσεις μεταφοράς δεδομένων φασιθετών.

Ο ορισμός του φασιθέτη χρησιμοποιεί ακριβώς τη εξίσωση 8, που σημαίνει ότι η γωνία φάσης αναφέρεται στη φάση ενός συνημιτονοειδούς σήματος τη στιγμή αναφοράς. Κάθε μέτρηση επισημαίνεται χρονικά με τη στιγμή αναφοράς που συνήθως σχετίζεται με το κέντρο του παραθύρου των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό. Για να καταστούν διαλειτουργικές

⁶ pulse per second

διαφορετικές PMU, οι χρονικές στιγμές μέτρησης, οι οποίες είναι προφανώς διακριτές χρονικά, δεν είναι γενικά χρονικά σημεία αλλά εμπίπτουν στην εμφάνιση του δεύτερου και στα κλάσματά του, ανάλογα με τον ρυθμό μέτρησης. Τα διαστήματα αναφοράς μετρήσεων (χρονικές αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων) επιλέγονται στο πρότυπο ως πολλαπλάσια του κύκλου σήματος στην ονομαστική συχνότητα του συστήματος (20 ή 16,67 ms για συχνότητα 50 ή 60 Hz, αντίστοιχα). Για παράδειγμα, με ρυθμό αναφοράς 10 μετρήσεων ανά δευτερόλεπτο, τα στιγμιότυπα UTC που σχετίζονται με τις μετρήσεις φασιθέτη είναι $T_r = T_{\text{second}}, T_{\text{second}+100\text{ms}}, T_{\text{second}+200\text{ms}}, \dots, T_{\text{second}+900\text{ms}}$ για κάθε δευτερόλεπτο εμφάνισης T_{second} . Έτσι, εάν λαμβανόταν υπόψη ένα ιδανικό σήμα στην ονομαστική συχνότητα, ο μετρούμενος φασιθέτης θα ήταν σταθερός στο χρόνο.

Τέτοιες κοινές στιγμές επιτρέπουν την ευθυγράμμιση όλων των μετρήσεων που εκτελούνται από διαφορετικά PMU στην ίδια χρονική κλίμακα ώστε να αποδοθεί μια συντονισμένη εικόνα ενός συστήματος. Όπως είναι σαφές από την εξίσωση 8, μια άλλη θεμελιώδης παράμετρος για τον χαρακτηρισμό του προς μέτρηση σήματος εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η συχνότητα f και επομένως, τα PMU πρέπει να τη μετρήσουν μαζί με το ROCOF:

$$\text{ROCOF} = \frac{df}{dt} \quad (11)$$

Το ROCOF μετριέται σε hertz ανά δευτερόλεπτο (Hz/s) και, όπως οι μετρήσεις της συχνότητας και του φασιθέτη, πρέπει να αναφέρονται στον χρόνο αναφοράς UTC T_r .

Στο παρουσιαζόμενο μοντέλο σταθερής κατάστασης, προφανώς δεν υπάρχει διακύμανση της συχνότητας, αλλά σε ένα πραγματικό σύστημα ισχύος, όπως θα συζητηθεί παρακάτω, μπορούν να συμβούν διαφορετικές δυναμικές συνθήκες και, για το λόγο αυτό, πρέπει να υπάρχει ένα ελαφρώς διαφορετικό πλαίσιο που ορίζεται για του φασιθέτες.

2.2 Μόνιμη κατάσταση και δυναμικές συνθήκες σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος

Σε μια ιδανική περίπτωση, το σύστημα ισχύος θα πρέπει να λειτουργεί σε μια ημιτονοειδή σταθερή κατάσταση, που χαρακτηρίζεται από μια ονομαστική συχνότητα είτε 50 είτε 60 Hz. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, τα σήματα τάσης και ρεύματος διαφέρουν από αυτές τις ιδανικές συνθήκες, όσον αφορά τόσο τη μεταβλητή θεμελιώδη συχνότητα όσο και στην παρουσία μιας παραμορφωμένης κυματομορφής.

Όσον αφορά στη συχνότητα του συστήματος, το σύστημα συνήθως λειτουργεί σε μια στενή ζώνη γύρω από την ονομαστική συχνότητα, αλλά είναι δυνατό να απαντηθούν συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου η πραγματική συχνότητα του συστήματος απέχει πολύ από την ονομαστική τιμή (έως +4% - 6% σε διασυνδεδεμένα συστήματα, σύμφωνα με το [80]). Η PMU πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθεί τέτοιες διακυμάνσεις συχνότητας και να μετράει με ακρίβεια τον φασιθέτη ακόμα και σε τέτοιες συνθήκες εκτός ονομαστικής συχνότητας. Ειδικότερα, όταν συμβαίνουν κρίσιμα γεγονότα, η δυνατότητα σωστής παρακολούθησης των φασιθετών που σχετίζονται με τις ποσότητες ενδιαφέροντος μπορεί να γίνει πιο σημαντική από ποτέ.

Επιπλέον, τα φορτία και οι έξοδοι της γεννήτριας, καθώς και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας, ενδέχεται να αλλάζουν συνεχώς, προκαλώντας έτσι ένα ευρύ φάσμα διαταραχών, όπως αρμονικές, διααρμονικές, μεταβατικά εξαρτήματα και διακυμάνσεις ισχύος. Τα σφάλματα μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως ιδιαίτερες συνθήκες που οδηγούν σε απροσδόκητες εξελίξεις στα σήματα ισχύος. Το PMU πρέπει να μετρήσει τόσο τις τάσεις όσο και τα ρεύματα και οι διαταραχές ή η δυναμική μπορούν να επηρεάσουν τέτοια σήματα σε διαφορετικό βαθμό.

Τα μη ημιτονοειδή συμβάντα στα συστήματα ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με τη φυσική φύση των παραμορφωτικών φαινομένων που προκύπτουν [81,82]:

Οι **αρμονικές και οι διααρμονικές** είναι φαινόμενα που παράγονται συνήθως από ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος και μη γραμμικά φορτία. Οι συχνότητες των αρμονικών είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας δικτύου και είναι συνήθως κάτω από μερικά kilohertz. Οι διααρμονικές μπορούν να βρεθούν σε όλες τις συχνότητες που δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους [83]. Δεν είναι σταθερές, αλλά μπορούν να κινούνται κατά μήκος του φάσματος, εισάγοντας έτσι ζητήματα ανάλυσης και μέτρησης που σχετίζονται με την αλλαγή της περιοδικότητας της κυματομορφής.

Τα **σφάλματα συστήματος και οι λειτουργίες μεταγωγής** συνήθως προκαλούν αλλαγές βαθμίδας στις κυματομορφές τάσης και ρεύματος και δημιουργούν στοιχεία πολύ υψηλής συχνότητας στο σήμα (έως 105 Hz).

Οι **κεραυνοί και τα κινούμενα κύματα** προκαλούν πολύ γρήγορα μεταβατικά ρεύματα με συχνότητες που μπορεί να είναι μεγαλύτερες από 106 Hz.

Οι **διακυμάνσεις ισχύος** δημιουργούνται από την υπέρθεση διαφορετικών κυματομορφών που χαρακτηρίζονται από άνισες συχνότητες, οι οποίες προκαλούνται από την έλλειψη ισορροπίας μεταξύ παραγωγής συστήματος και φορτίου. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί αργό φαινόμενο (0,1–10 Hz) και μπορεί να εκφραστεί με όρους πλάτους ή/και διαμόρφωσης φάσης ενός ημιτονοειδούς σήματος. Είναι σημαντικό να κατανοηθούν ποια από τα παραπάνω φαινόμενα προκαλούν ανησυχία στη λειτουργία των PMU, δηλαδή σε φασιθέτες, καις την εκτίμηση συχνότητας και ROCOF. Όλα τα μη ημιτονοειδή συμβάντα υψηλής συχνότητας, όπως αυτά που προκύπτουν από κεραυνούς, είναι ξεκάθαρα διαταραχές και αφαιρούνται εύκολα από την είσοδο σήματος της PMU μέσω της βαθμίδας φιλτραρίσματος. Μια τυπική μονάδα απόκτησης δεδομένων (που λειτουργεί με 10 kS/s, για παράδειγμα) απαιτεί ένα φίλτρο κατά της παραμόρφωσης που περιορίζει το εύρος ζώνης του σήματος εισόδου.

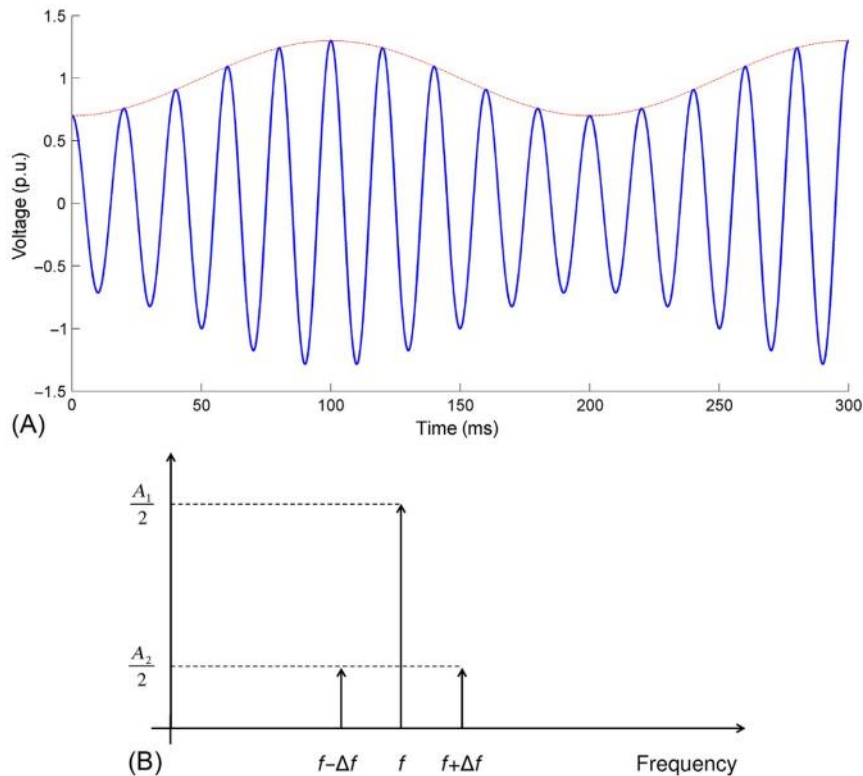
Οι αρμονικές και οι διααρμονικές μπορούν να θεωρηθούν ως διαταραχές που συμβαίνουν στη ζώνη εισόδου της PMU και εισάγουν παραμορφώσεις που μπορούν να επηρεάσουν την εκτίμηση του φασιθέτη.

Άλλες μεταβατικές συνθήκες, όπως αυτές που δημιουργούνται από σφάλματα και τη λειτουργία μεταγωγής, όπως οι απότομες αλλαγές μεγέθους και/ή γωνίας φάσης, είναι αντιπροσωπευτικές συγκεκριμένων καταστάσεων και μια PMU θα πρέπει να τις παρακολουθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Ωστόσο, λόγω του εγγενούς περιεχομένου υψηλής συχνότητας μιας τέτοιας δυναμικής, μια PMU δεν μπορεί να αποφύγει να υποστεί ένα μεταβατικό, κατά το οποίο οι μετρήσεις υποφέρουν από ακραίες τιμές που δεν έχουν φυσικό νόημα. Κατά τη διάρκεια τέτοιων συμβάντων, οι μετρήσεις συγχρονισμού, συχνότητας και ROCOF δεν είναι πραγματικά χρήσιμες και, για αυτόν τον λόγο, η μεταβατική συμπεριφορά της PMU θα πρέπει να είναι περιορισμένη τόσο σε πλάτος όσο και σε διάρκεια.

Άλλα φαινόμενα μεταξύ των προαναφερθέντων παρουσιάζουν, αντίθετα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της δυναμικής του συστήματος ισχύος και επομένως θα πρέπει να θεωρούνται εγγενώς ως μέρος του υπό μέτρηση σήματος. Οι διακυμάνσεις ισχύος, ακόμα κι αν υποδηλώνουν απόκλιση από τις καθарές ημιτονοειδείς συνθήκες, είναι διακυμάνσεις χαμηλής συχνότητας που πρέπει να ακολουθούνται με ακρίβεια από μετρήσεις των PMU. Στην πραγματικότητα, αργές διαμορφώσεις πλάτους ή διακυμάνσεις φάσης και συχνότητας περιγράφουν την εξέλιξη της φάσης

με το χρόνο. Τέτοιες παραλλαγές μπορούν να θεωρηθούν ως μια ακολουθία συνθηκών όπου το ημιτονοειδές μοντέλο ισχύει περίπου και η ακολουθία των μετρήσεων PMU μπορεί να ερμηνευθεί ως μια συνεχής παρακολούθηση των ελαφρώς μεταβαλλόμενων παραμέτρων ημιτονοειδούς.

Στον πεδίο συχνότητων, τέτοια συμβάντα μπορούν να αναπαρασταθούν ως σήμα ζώνης διέλευσης γύρω από τη συχνότητα του συστήματος. Η εικόνα 8 παρουσιάζει ένα παράδειγμα, τόσο στον πεδίο του χρόνου όσο και πεδίο συχνότητων, ενός ημιτονοειδούς σήματος διαμορφωμένου πλάτους όπου το διαμορφούμενο σήμα είναι επίσης ημιτονοειδές.



Εικόνα 9 Σήμα διαμορφωμένο πλάτος: (Α) αναπαράσταση πεδίου χρόνου και (Β) αναπαράσταση πεδίου συχνότητων [85]

Το φέρον ημιτονοειδές έχει συχνότητα f και πλάτος A_1 , ενώ το διαμορφωτικό ημιτονοειδές έχει συχνότητα Δf και πλάτος A_2 . Σύμφωνα με το [81], το σήμα ενδιαφέροντος, όταν λαμβάνεται υπόψη το πλάτος της φάσης, είναι το σήμα διαμόρφωσης, το οποίο μπορεί να έχει συχνότητα Δf που περιλαμβάνεται μεταξύ 0,1 και 10 Hz. Αλλά το φάσμα του παρατηρούμενου σήματος περιλαμβάνεται στο $[f-\Delta f, f+\Delta f]$.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το εύρος που εξετάζεται για τις συχνότητες ταλάντευσης ισχύος υπερτίθεται σε ένα τμήμα του εύρους συχνότητων των διααρμονικών που προκαλούνται από διαφορετικά φαινόμενα, τα οποία, σύμφωνα με τις προηγούμενες θεωρήσεις, θα πρέπει να φιλτράρονται. Το όριο μεταξύ των δύο εννοιών εμφανίζεται, επομένως, αρκετά θολό και πιθανές διααρμονικές κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα του σήματος θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως μέρος του μετρούμενου συγχρονισμού: σε αυτήν την περίπτωση, ανάλογα με την εφαρμογή, ο εκτιμώμενος φασοθέτης θα θεωρούταν εσφαλμένα ως επηρεασμένος από μια ταλάντευση ισχύος.

2.3 Η σημασία του μοντέλου: Κλασικός φασιθέτης και δυναμικός φασιθέτης

Στα προηγούμενα εξετάστηκε πώς το ηλεκτρικό σήμα ενδιαφέροντος σε ένα σύστημα ισχύος δεν μπορεί γενικά να μοντελοποιηθεί ακριβώς σύμφωνα με την εξίσωση 8 και έτσι ο φάσορας δεν μπορεί να είναι πάντα μια σταθερή τιμή. Λόγω της σημασίας της δυναμικής, ιδίως εάν ληφθούν υπόψη μελλοντικά δίκτυα και εάν τα PMU θεωρηθούν ως ένα στοιχειώδες εργαλείο για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς τάσης ή ρεύματος, πρέπει να εισαχθεί ένα γενικότερο πλαίσιο (και το πρότυπο του φασιθέτη [77]) βασίζεται σε αυτό): ο λεγόμενος *δυναμικός φάσορας* ή αναλογικά *δυναμικός φασιθέτης* όταν λαμβάνεται υπόψη η χρονική αναφορά UTC [84]. Μια γενική αναπαράσταση μιας ποσότητας συστήματος ισχύος, η οποία μπορεί να εξελιχθεί στο χρόνο, μπορεί να ληφθεί με ένα διαμορφωμένο συνημιτονοειδές σήμα $x(t)$:

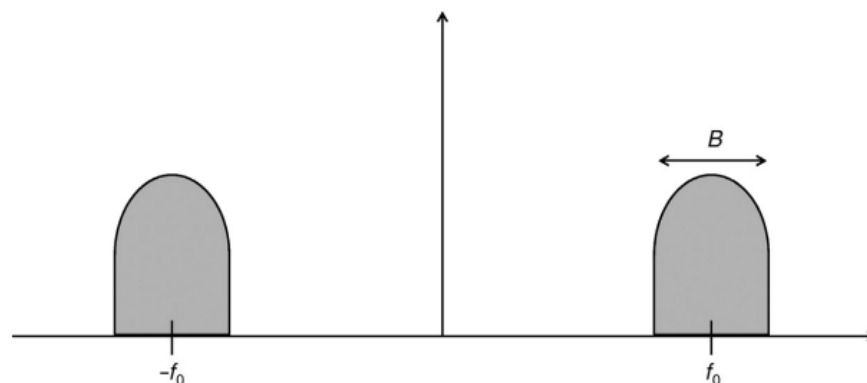
$$\hat{X}(t) = X_m g(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \quad (12)$$

όπου $X_m g(t)$ είναι το διαμορφωμένο μέγεθος σήματος, $\omega_0 = 2\pi f_0$ είναι η ονομαστική γωνιακή συχνότητα του συστήματος και $\varphi(t)$ είναι μια πραγματική συνάρτηση που περιγράφει τη διαμόρφωση ή τη δυναμική φάσης. Ο ισοδύναμος φάσορας μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\hat{X}(t) = a(t) e^{i\varphi(t)} = \frac{X_m g(t)}{\sqrt{2}} e^{i\varphi(t)} \quad (13)$$

Αυτός ο δυναμικός φάσορας είναι η γενίκευση της βασικής έννοιας του φάσορα, όταν τόσο το πλάτος όσο και η γωνία φάσης δεν είναι σταθερά (εφόσον επιλεγεί η στιγμή του χρόνου αναφοράς $t=0$).

Ο ορισμός της εξίσωσης (13) είναι κατάλληλος για να ακολουθεί τις μη ημιτονοειδή συνθήκες ενδιαφέροντος, επειδή υπογραμμίζει τη χρονικά μεταβαλλόμενη συμπεριφορά του πλάτους του φάσορα $a(t)$ και της φάσης $\varphi(t)$. Το σήμα στην εξίσωση (12) λειτουργεί σαν σήμα ζώνης διέλευσης με κέντρο τη συχνότητα f_0 στο πεδίο συχνοτήτων, του οποίου το πλάτος και η φάση ποικίλλουν με το χρόνο: η κύρια ιδέα είναι ότι όλα τα στοιχεία συχνότητας εντός της ζώνης θεωρούνται σημαντικά, ενώ τα στοιχεία εκτός αυτής θεωρούνται ως διαταραχές (Εικ. 9).



Εικόνα 10 Ποιοτική συμπεριφορά του δυναμικού μοντέλου φάσορα στο πεδίο συχνοτήτων [85]

Στο πλαίσιο του φασιθέτη, όπως έχει ήδη συζητηθεί, η έννοια της αρχικής χρονικής στιγμής δεν ισχύει πλέον και αντικαθίσταται από τη στιγμή μέτρησης αναφοράς, η οποία αναφέρεται σε χρόνο UTC. Για το λόγο αυτό, το πλάτος του δυναμικού φασιθέτη σε δεδομένη στιγμή T_r είναι $a(T_r)$, ενώ η γωνία φάσης είναι $\omega_0 T_r + \varphi(T_r)$: η περιστρεφόμενη γωνία φάσης (με ταχύτητα ω_0) είναι θεμελιώδες στοιχείο για την επίτευξη του ακριβούς συνημιτονοειδούς φάση και του σωστού ορισμού του φασιθέτη.

Σε αυτή τη βάση, ξεκάθαρα, ο δυναμικός φασιθέτης σχετίζεται με το δυναμικό φάσορα ακριβώς όπως ο φασιθέτης σχετίζεται με το φάσορα. Ο ορισμός συνεχούς χρόνου της εξίσωσης (13) μπορεί να μεταφραστεί στη διακριτή χρονική περιοχή των μετρήσεων φασιθέτη, ως εξής:

$$\hat{X} = a(nT_s)e^{i(\omega_0 nT_s + \varphi(nT_s))}, n = 0, 1, \dots \quad (14)$$

όπου T_s είναι το χρονικό διάστημα αναφοράς.

Όπως προαναφέρθηκε, το πρότυπο [77] ορίζει ότι η PMU χρησιμοποιεί πολλαπλάσια του θεμελιώδους κύκλου (στην ονομαστική συχνότητα του συστήματος) ως πιθανά διαστήματα αναφοράς. Σε τέτοιους ρυθμούς, η περιστρεφόμενη συνιστώσα της γωνίας φάσης στην εξίσωση (12) είναι πάντα μηδέν ($\omega_0 nT_s = 0$). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο ορισμός του φασιθέτη ισχύει για γενικές στιγμές μέτρησης και ταχύτητες αναφοράς υψηλότερες από 50 καρέ/δευτερόλεπτο (ή 60 καρέ/δευτερόλεπτα για συστήματα 60 Hz) είναι ήδη διαθέσιμα σε ορισμένες εμπορικές εφαρμογές PMU.

Στη συνέχεια, εκτός εάν καθορίζεται διαφορετικά, οι φάσορες θεωρείται ότι μετρούνται με τον μέγιστο διαθέσιμο ρυθμό (ιδίως, ένας νέος φασιθέτης υπολογίζεται όταν αποκτάται νέο δείγμα). Αυτή η επιλογή βοηθά στην κατανόηση της απόδοσης του υπολογισμού PMU υπό διαφορετικές συνθήκες και οι πραγματικές μετρήσεις PMU εξόδου μπορούν να θεωρηθούν απλώς ως υποδειγματοληψία. Στην εξίσωση (15), η συμπεριφορά συχνότητας του σήματος ορίζεται επίσης σωπηρά. Στην πραγματικότητα, η συχνότητα είναι επίσης μια χρονικά μεταβαλλόμενη παράμετρος του μοντέλου:

$$f(t) = f_0 + \Delta f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} \quad (15)$$

όπου $\Delta f(t)$ είναι η απόκλιση ως προς την ονομαστική συχνότητα, που θεωρείται συνάρτηση του χρόνου. Χρησιμοποιώντας έναν τέτοιο ορισμό, η εξίσωση (12) μπορεί εναλλακτικά να εκφραστεί ως:

$$\chi(\tau) = X_m g(t) \cos\left(\int_0^\tau f(\tau) d\tau\right) = X_m g(t) \cos\left(f_0 t + \int_0^\tau \Delta f(\tau) d\tau\right) \quad (16)$$

όπου επισημαίνεται η συμβολή στη γωνία φάσης λόγω διακυμάνσεων συχνότητας. Με τον ίδιο συμβολισμό, το ROCOF γίνεται η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης γωνίας φάσης:

$$\text{ROCOF}(t) = \frac{df}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (17)$$

Το εισαγόμενο δυναμικό μοντέλο δίνει την ιδανική αναφορά για οποιαδήποτε αλγόριθμο εκτίμησης φασιθέτη, συχνότητας και ROCOF, αφήνοντας στον εκτιμητή τον ορισμό μιας κατάλληλης υπολογιστικής διαδικασίας που επιτρέπει τον υπολογισμό των φάσορων στις επιλεγμένες στιγμές αναφοράς, με δεδομένους περιορισμούς ακρίβειας.

Το δυναμικό μοντέλο είναι επίσης σημαντικό επειδή περιλαμβάνει τη δυναμική του μετρούμενου σήματος μέσα στα παράθυρα παρατήρησης που χρησιμοποιούνται για κάθε μέτρηση PMU και, επομένως, επιτρέπει σε ένα μοντέλο να υπολογίζει δυναμικούς φασιθέτες λαμβάνοντας υπόψη τέτοιες παραλλαγές [84].

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Βέλτιστη τοποθέτηση PMU και PDC, Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ένα σύστημα θεωρείται παρατηρήσιμο όταν οι μετρήσεις που διαθέτει, τόσο σε αριθμό όσο και σε διάταξη, είναι επαρκείς για να επιτρέπουν την εκτίμηση της κατάστασής του. Αντίθετα, εάν η εκτίμηση της κατάστασής του δεν είναι εφικτή, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μη παρατηρήσιμο.

Πρόσφατα, η ταχύτατη αύξηση της εγκατάστασης μονάδων PMU σε υποσταθμούς του δικτύου έχει επεκτείνει το σύστημα μετρήσεων, ενσωματώνοντας πλέον και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών. Αυτό το κεφάλαιο εστιάζει στην ανάλυση της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο μειωμένης τάξης, το οποίο περιλαμβάνει τόσο συμβατικές όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις. Η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης είτε συμβατικών είτε συγχρονισμένων μετρήσεων.

Η παρατηρησιμότητα ενός δικτύου συνδέεται άμεσα με τη διάταξη των μετρήσεων στο σύστημα. Οι συνεχείς αλλαγές στα ηλεκτρικά συστήματα, λόγω αλλαγών στην τοπολογία του δικτύου ή σφαλμάτων στις μετρητικές συσκευές, υποχρεώνουν τους διαχειριστές των συστημάτων να ελέγχουν την παρατηρησιμότητα του δικτύου πριν εφαρμόσουν την εκτίμηση της κατάστασης. Όταν οι διαθέσιμες μετρήσεις δεν επαρκούν για να υπολογιστεί η κατάσταση του δικτύου, ακολουθείται μια διαδικασία προσθήκης επιπλέον μετρήσεων για να καταστεί το σύστημα ξανά παρατηρήσιμο.

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται τεχνικές τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMUs) με στόχο την επιλογή του βέλτιστου συνόλου ζυγών για την τοποθέτηση των PMUs καθώς και τεχνικές ταυτόχρονου καθορισμού των σημείων τοποθέτησης τόσο των PMU όσο και των PDC. Ο όρος "βέλτιστο" αναφέρεται στον ελάχιστο αναγκαίο αριθμό και τις θέσεις των PMUs, ώστε το δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο.

Οι Manousakis et al., [85] στην εργασία τους προσέφεραν μια ταξινόμια των μεθοδολογιών για την βέλτιστη τοποθέτηση των PMU. Εν γένει όρισαν τον πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης στην γενική μαθηματική του μορφή ως εξής.

Το τυπικό πρόβλημα της εύρεσης της βέλτιστης τοποθέτησης των PMU συνίσταται στον καθορισμό του ελάχιστου αριθμού αυτών και του καθορισμού του συνόλου των σημείων τοποθέτησης τους ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Η μαθηματικός τύπος αυτής της γενικευμένης μορφής δίνεται ως:

$$\min_{n_{PMU}} \left\{ \min_{S(n_{PMU})} G(n_{PMU}, S(n_{PMU})) \right\}$$

ώστε

$$f(n_{PMU}, S(n_{PMU})) = 1$$

Όπου

n_{PMU} ο αριθμός των PMU στο δίκτυο

$S(n_{PMU})$ Το σύνολο των σημείων τοποθέτησης των PMU στο δίκτυο

$G(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ Ο αριθμός των μη παρατηρήσιμων ζυγών

$f(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ μια λογική συνάρτηση αξιολόγησης πολλαπλών στόχων που δίνεται ως:

$$f(n_{PMU}, S(n_{PMU})) = O_{bs}(n_{PMU}, S(n_{PMU})) + O_{bs}(n_{PMU}, S(n_{PMU})) \cdot C_{on}(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$$

Όπου

O_{bs} η αξιολόγηση ως προς την παρατηρησιμότητα της λογικής συνάρτησης

C_{on} η αξιολόγηση των περιορισμών της λογικής συνάρτησης

+ και \cdot οι λογικοί τελεστές Η και ΚΑΙ αντίστοιχα

Σύμφωνα με αυτή την γενίκευση του προβλήματος, οι συγγραφείς συνέκριναν τους προτεινόμενους στην βιβλιογραφία αλγόριθμους και μεθοδολογίες και κατέληξαν στην κατάταξη τους σε δύο κύριες κατηγορίες, αυτές των μαθηματικών αλγορίθμων και των ευρεστικών αλγορίθμων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει γνωστές τεχνικές όπως ο ακέραιος προγραμματισμός, που αφορά στην επίλυση ενός προβλήματος υπό την θεώρηση ότι οι τιμές των μεταβλητών μπορούν να λάβουν ακέραιες τιμές μόνο και οι μέθοδοι εξαντλητικής έρευνας που διερευνά όλο το χώρο λύσης. Στην δεύτερη κατηγορία, ανήκουν διάφοροι αλγόριθμοί που προέρχονται από μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης, όπως εξελικτικοί αλγόριθμοί (Γενετικοί), η μέθοδος Tabu, η μέθοδος προσομοιωμένης αν όπτησης, ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO) και άλλοι. Μια παρόμοια έρευνα έλαβε χώρα στο [86], όπου οι συγγραφείς εξέτασαν αναλυτικά τις προτεινόμενες μεθόδους στην βιβλιογραφία καταλήγοντας σε συμπεράσματα σε σχέση με τους φορείς και τα επιστημονικά περιοδικά που παρουσίαζαν την μεγαλύτερη επιρροή σε αυτό το ερευνητικό πεδίο.

Στο [87] προτάθηκε μια μέθοδος αναδρομικής αναζήτησης Tabu (RTS) για την επίλυση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο παραδοσιακός μεταερευνητικός αλγόριθμος αναζήτησης Tabu (TS) εκτελέστηκε πολλές φορές, ενώ στην αρχικοποίηση κάθε χρήσης του χρησιμοποιήθηκε η καλύτερη λύση που προέκυψε από όλες τις προηγούμενες εκτελέσεις. Η προτεινόμενη RTS βρέθηκε ότι είναι το καλύτερο μεταξύ τριών εναλλακτικών σχημάτων αρχικοποίησης TS, όσον αφορά τον αντίκτυπο στο ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου. Προτάθηκε μια αριθμητική μέθοδος για τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας του δικτύου, σε αντίθεση με τις περισσότερες υπάρχουσες μεταερευνητικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος, οι οποίες βασίζονται σε μεθόδους τοπολογικής παρατηρησιμότητας. Η προτεινόμενη μέθοδος RTS δοκιμάστηκε στα συστήματα δοκιμών IEEE 14, 30, 57 και 118-bus, στο σύστημα δοκιμής 39-bus της Νέας Αγγλίας και στο σύστημα ισχύος 2383-bus. Τα αποτελέσματα της χρήσης της μεθόδου, συγκρίθηκαν με άλλες αναφερόμενες μεθόδους τοποθέτησης PMU από την βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος RTS καθόριζε τον ελάχιστο αριθμό PMU, σε αντίθεση με τις συγκρινόμενες μεθόδους που κατέληγαν στον ίδιο ή ακόμη μεγαλύτερο αριθμό PMU.

Αντίστοιχα στο [88] παρουσιάστηκε μια μέθοδος βέλτιστης τοποθέτησης των PMU με στόχο την πλήρη παρατηρησιμότητα του συστήματος ισχύος. Το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU (OPP) διατυπώθηκε ως πρόβλημα τετραγωνικής ελαχιστοποίησης με συνεχείς μεταβλητές απόφασης που υπόκεινται σε μη γραμμικούς περιορισμούς παρατηρησιμότητας. Η βέλτιστη λύση προέκυψε με μια προσέγγιση μη περιορισμένων μη γραμμικών σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (WLS). Στην εργασία παρουσιάστηκαν προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα σε διαφορετικά συστήματα IEEE (14-bus, 30-bus, 57-bus, and 118-bus) για να αποδειχθεί η εγκυρότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Περαιτέρω, στο [89] παρουσιάστηκε μια διατύπωση ημικαθορισμένου προγραμματισμού (SDP) με δυαδικές μεταβλητές απόφασης, για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU, όπου λαμβανόταν υπόψη η ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων και ο αντίκτυπος της περιορισμένης χωρητικότητας του διαύλου (OPP-LCC). Το προτεινόμενο πρόβλημα ελαχιστοποιούσε μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση που υπόκεινταν σε περιορισμούς παρατηρησιμότητας γραμμικής ανισότητας πίνακα (LMI). Στην εργασία παρουσιάστηκαν σειρά από προσομοιώσεις αξιοποιώντας λογισμικό SDP βασισμένο στο Matlab, σε διαφορετικά συστήματα IEEE για να αποδειχθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Στο [90] παρουσιάστηκε μια διαφορετική προσέγγιση για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs που είχε σαν στόχο την διασφάλιση της πλήρους παρατηρησιμότητας του συστήματος ισχύος παρουσία μη σύγχρονων συμβατικών μετρήσεων και μηδενικών εγχύσεων. Η κατανομή των PMU βελτιστοποιήθηκε με βάση τα κριτήρια παρατηρησιμότητας των μετρήσεων για την επίτευξη επιλυτότητας της εκτίμησης κατάστασης του συστήματος ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος ήταν ικανή να καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό και τις βέλτιστες θέσεις των PMU που απαιτούνται για να γίνει το σύστημα ισχύος αριθμητικά παρατηρήσιμο. Το πρόβλημα διατυπώθηκε ως μοντέλο δυαδικού ημι-καθορισμένου προγραμματισμού (BSDP), με δυαδικές μεταβλητές απόφασης, και ελαχιστοποιούσε μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση που υπόκεινταν σε περιορισμούς παρατηρησιμότητας ανισότητας γραμμικού πίνακα. Το πρόβλημα BSDP επιλύθηκε χρησιμοποιώντας ένα σχήμα εξωτερικής προσέγγισης που βασιζόταν σε δυαδικό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε αξιοποιήθηκε σε προσομοιώσεις σε τυπικά συστήματα δοκιμών IEEE. Ένα σύστημα μεγάλης κλίμακας με 3120 ζυγούς αναλύθηκε επίσης για να αναδειχθεί η δυνατότητα εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου σε πρακτικές περιπτώσεις συστημάτων ισχύος.

Στο [91], παρουσιάστηκε μια προσέγγιση ημικαθορισμένου προγραμματισμού (SDP) 0-1 για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης PMUs, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων και μηδενικών εγχύσεων καθώς και την επίδραση των ορίων των ζυγών των PMU. Η προτεινόμενη σύνθεση ήταν ικανή να αποτρέψει τη άσκοπη χρήση διαφορετικών PMUs που παρατηρούν τις φάσεις ρεύματος διακλάδωσης σε έναν δεδομένο ζυγό περισσότερες από μία φορές. Η μέθοδος δοκιμάστηκε στο σύστημα δοκιμής IEEE 57-bus

Στο [92] παρουσιάστηκε ένα μοντέλο ενοποιημένου δυαδικού ημικαθορισμένου προγραμματισμού (BSDP) με δυαδικές μεταβλητές απόφασης, για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU, που λάμβανε υπόψη τον αντίκτυπο των προϋπαρχουσών συμβατικών και συγχρονισμένων μετρήσεων φάσης καθώς και την περιορισμένη χωρητικότητα καναλιού των μονάδων μέτρησης φασιθετών. Μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιήθηκε υπό τους περιορισμούς παρατηρησιμότητας της ανισότητας γραμμικού πίνακα. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε επιλύθηκε με ένα σχήμα εξωτερικής προσέγγισης που βασιζόταν σε δυαδικό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό. Η προτεινόμενη μέθοδος εξετάστηκε χρησιμοποιώντας το σύστημα δοκιμής IEEE 14-bus. Διεξήχθησαν προσομοιώσεις στα συστήματα δοκιμών IEEE 57-bus και 118-bus για να αποδειχθεί η εγκυρότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Αντίστοιχα, στο [93] παρουσιάστηκε μια προηγμένη μέθοδο για κοινή τοποθέτηση μη συγχρονισμένων συμβατικών μετρήσεων και συγχρονισμένων φασοριακών μετρήσεων σε μη παρατηρήσιμα συστήματα ισχύος. Ο έλεγχος παρατηρησιμότητας και ο προσδιορισμός των μέγιστων παρατηρήσιμων νησιών πραγματοποιήθηκαν είτε με αριθμητική διαδικασία χρησιμοποιώντας τους τριγωνικούς συντελεστές του πίνακα απολαβής είτε με μια μέθοδο δυαδικού ημικαθορισμένου προγραμματισμού (BSDP) που ελαχιστοποιούσε μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση που υπόκεινταν σε περιορισμούς ανισότητας γραμμικού πίνακα που σχετίζονταν με το πίνακα κέρδους που αντιπροσώπευε ολόκληρο το (μη μειωμένο) δίκτυο και το υπάρχον σύστημα μέτρησης. Το ελάχιστο σύνολο μεμονωμένων μετρήσεων ή ομάδων μετρήσεων που καθιστούσαν το σύστημα παρατηρήσιμο καθορίστηκε επίσης από έναν αλγόριθμο τοποθέτησης που βασιζόταν σε BSDP, ο οποίος εφαρμόστηκε σε μειωμένο δίκτυο και σύνολο μετρήσεων, του οποίου το μέγεθος εξαρτώταν από την αντιστρεψιμότητα του Ιακωβιανού που προέκυπτε από τη διαμόρφωση των υφιστάμενων συμβατικών και phasorial μετρήσεων. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης BSDP επιλύθηκε χρησιμοποιώντας ένα σχήμα εξωτερικής προσέγγισης που βασιζόταν σε δυαδικό ακέραιο γραμμικό

προγραμματισμό. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς IEEE για να επιβεβαιωθεί η αποδοτικότητα και η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Στο [94] προτάθηκε ένας ημικαθορισμένος αλγόριθμος προγραμματισμού για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU σε υποσταθμούς, συμπεριλαμβανομένων και των ρυθμίσεων του μετασχηματιστή ως μεταβλητές κατάστασης, με την προσθήκη ενός πλασματικού ζυγού και διακλάδωσης για κάθε μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τα συστήματα δοκιμών IEEE 14-bus και 30-bus που παρουσιάστηκαν απεδείκνυαν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Στο [95] παρουσιάστηκε μια αποτελεσματική και περιεκτική μέθοδος για τον εντοπισμό του ελάχιστου αριθμού και των αντίστοιχων θέσεων των PMUs που εγγυάται την πλήρη αριθμητική παρατηρησιμότητα ενός συστήματος ισχύος καθώς και τη μεγιστοποίηση του πλεονασμού των μετρήσεων σε συνδυασμό με προϋπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις. Επιπλέον, η μέθοδος επέτρεπε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του αριθμού των διαθέσιμων καναλιών των PMU στη βέλτιστη τοποθέτησή τους. Ο προτεινόμενος τύπος βέλτιστης τοποθέτησης PMU (OPP) επεκτάθηκε για να εξετάσει την περίπτωση δύο τύπων απρόβλεπτων, μεμονωμένης απώλειας PMU και διακοπής μεμονωμένης διακλάδωσης. Ο στόχος της μεθόδου ήταν η αριθμητική παρατηρησιμότητα, σε αντίθεση με την πλειονότητα προηγούμενων εργασιών που βασιζόνταν στην τοπολογική παρατηρησιμότητα και δεν διασφάλιζαν πάντα την αριθμητική παρατηρησιμότητα που απαιτείται για την επιτυχή εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης (SE). Το πρόβλημα διατυπώθηκε ως μοντέλο δυαδικού ημιορισμένου προγραμματισμού (BBDP) με δυαδικές μεταβλητές απόφασης, και ελαχιστοποιούσε μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση που υπόκεινταν σε περιορισμούς παρατηρησιμότητας γραμμικής ανισότητας πίνακα (LMI). Το πρόβλημα BBDP επιλύθηκε χρησιμοποιώντας ένα σχήμα εξωτερικής προσέγγισης που βασίζεται σε δυαδικό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό. Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου επαληθεύτηκε σε διαφορετικά συστήματα δοκιμών IEEE.

Στο [96] προτάθηκε μια μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος προσανατολισμένη στον υποσταθμό που βασιζόταν σε έναν δυαδικό ημικαθορισμένο αλγόριθμο προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη την παρατηρησιμότητα των ρυθμίσεων του μετασχηματιστή και την περιορισμένη χωρητικότητα του καναλιού PMU. Η μέθοδος παρουσιάστηκε χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δοκιμής 8 ζυγών. Παρουσιάστηκαν και εξετάστηκαν αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας συστήματα IEEE διαφορετικού μεγέθους. Η προτεινόμενη προσέγγιση εφαρμόστηκε περαιτέρω στο πολωνικό σύστημα 3120-bus για να δείξει την αποτελεσματικότητά του στην επίλυση του προβλήματος OPP για συστήματα ισχύος μεγάλης κλίμακας

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Μεθοδολογία

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην παρουσίαση της μεθοδολογίας που αξιοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

4.1 Ερευνητική μέθοδος

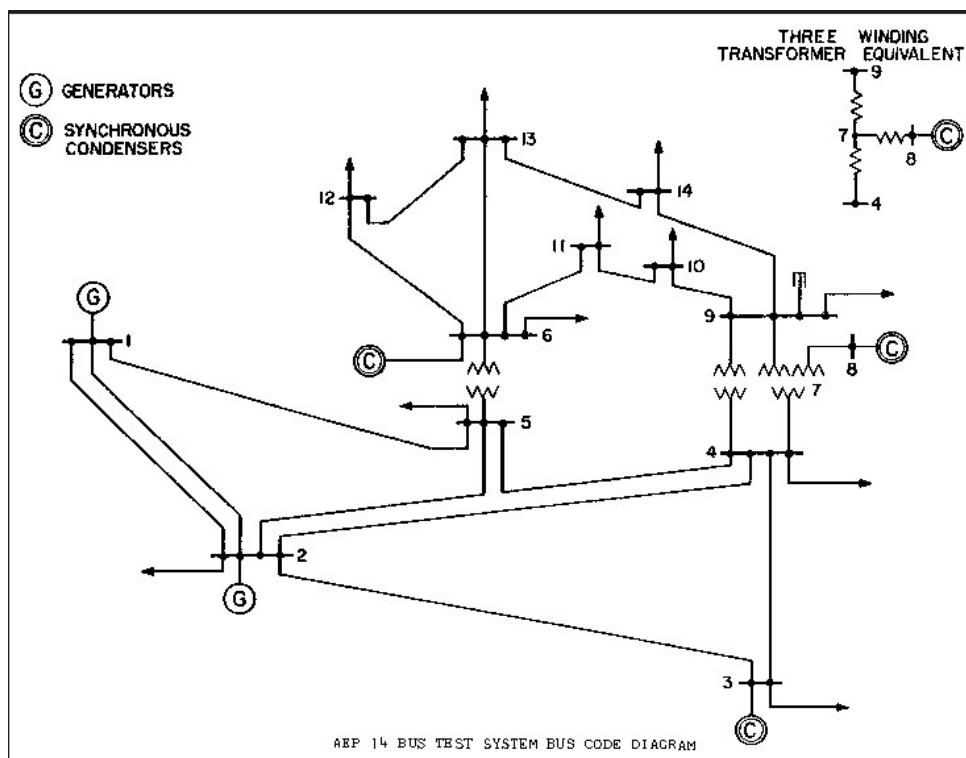
Με δεδομένα τα συμπεράσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που έλαβε χώρα και παρουσιάστηκε σε σχέση με την αναγκαιότητα της εύρεσης της βέλτιστης τοποθέτησης των PMUs και PDCs σε WAMS, το ερευνητικό μέρος της παρούσας εργασίας εστίασε στην μελέτη του State-of-the-Art ως προς αυτή τη κατεύθυνση.

Κατά συνέπεια, επιλέχθηκαν πρόσφατες εργασίες που εξετάζουν το πρόβλημα της ταυτόχρονης τοποθέτησης PMUs και PDCs, μελετήθηκαν τα μοντέλα υπολογισμού που προτείνουν και δημιουργήθηκαν σχετικοί αλγόριθμοί που θα επέτρεπαν τον υπολογισμό των βέλτιστων λύσεων σε μια σειρά δικτύων. Για λόγους συγκρισιμότητας, τα δίκτυα που εξετάστηκαν δεν ήταν τυχαία, αλλά επιλέχθηκαν μεταξύ των διαθέσιμων προτύπων IEEE. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν τα δίκτυα IEEE-14, IEEE-57 και IEEE-118.

4.2 Παρουσίαση εξεταζόμενων πρότυπων δικτύων

4.2.1 IEEE-14

Το πρότυπο δίκτυο IEEE-14 είναι ένα δημοφιλές σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται ευρέως για αναλύσεις και ερευνητικούς σκοπούς στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από 14 διαφορετικούς κόμβους ή σταθμούς, συνδεδεμένους με αγωγούς μεταφοράς, και αποτελεί πρότυπο μελέτης για πολλούς τύπους αναλύσεων, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης φορτίου, της ανάλυσης σταθερότητας, της ανάλυσης συστήματος μετά από διαταραχές και άλλων (εικόνα 10).



Εικόνα 11 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-14

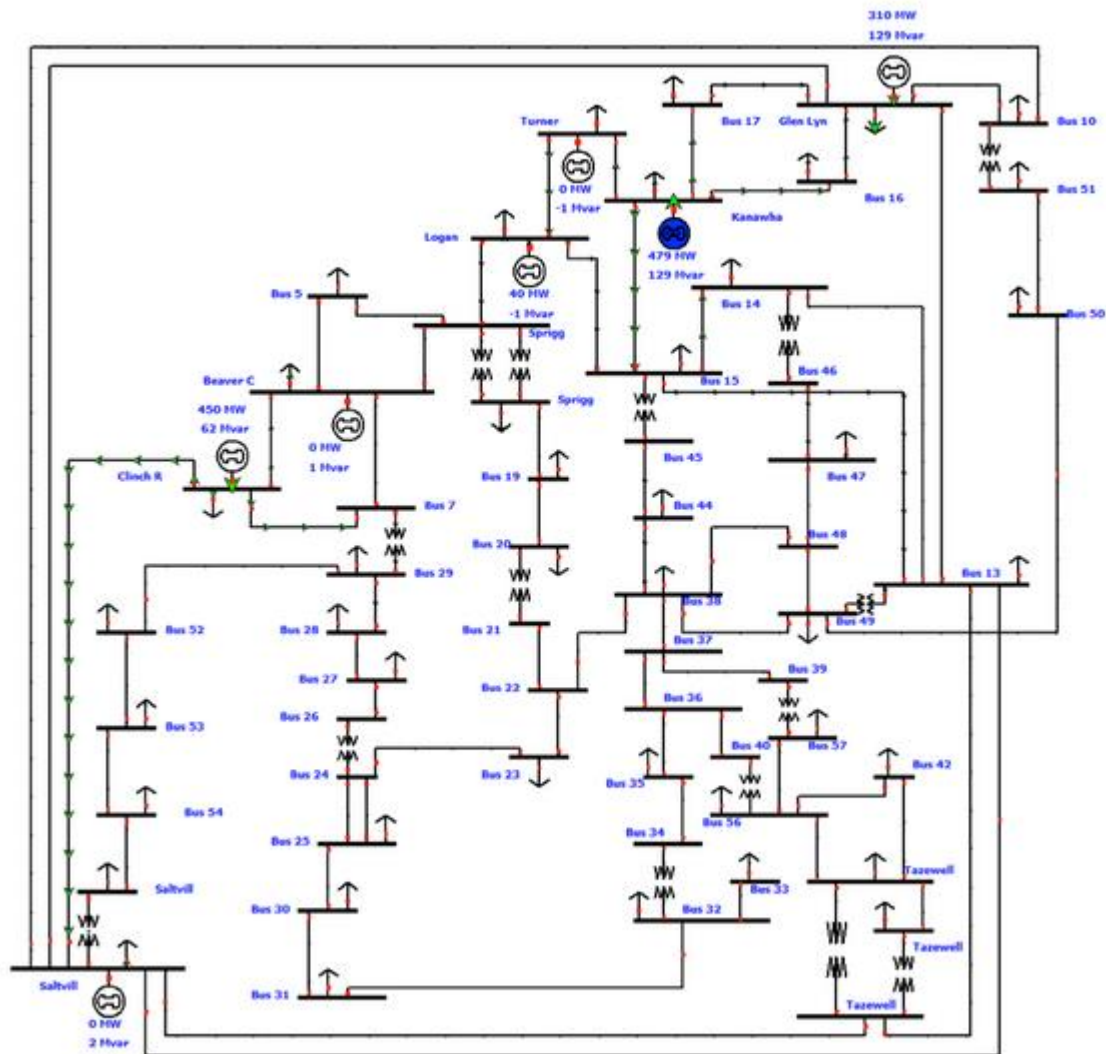
Το δίκτυο αντιπροσωπεύει μια απλή προσέγγιση του αμερικανικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας από τον Φεβρουάριο του 1962. Διαθέτει 14 λεωφορεία, 5 γεννήτριες και 11 φορτία. Το δίκτυο IEEE-14 παρέχει έναν ισορροπημένο συνδυασμό από μεγέθη και χαρακτηριστικά, καθιστώντας το ιδανικό για ποικίλες μελέτες. Κάθε ζυγός του δικτύου αντιπροσωπεύει ένα σημείο σύνδεσης στο σύστημα, ενώ οι αγωγοί μεταφοράς αναπαριστούν τις γραμμές μεταφοράς ενέργειας μεταξύ των κόμβων.

Οι ερευνητές χρησιμοποιούν το δίκτυο αυτό για να εκτελέσουν αναλύσεις που αφορούν την ασφάλεια, τη σταθερότητα και την απόδοση των συστημάτων ενέργειας.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του προτύπου IEEE-14 είναι η σχετική του απλότητα σε σύγκριση με άλλα μεγαλύτερα δίκτυα, όπως το IEEE-30 ή το IEEE-118, κάτι που το καθιστά ιδανικό για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Παράλληλα, παρέχει αρκετή ποικιλία σε όρους τοπολογίας και χαρακτηριστικών, ώστε να επιτρέπει την εξέταση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας.

4.2.2 IEEE-57

Το πρότυπο δίκτυο IEEE-57 αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για ποικίλες μελέτες και αναλύσεις στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Με τους 57 κόμβους του και τις αντίστοιχες συνδέσεις, το IEEE-57 προσφέρει μια πιο λεπτομερή αναπαράσταση του συστήματος σε σύγκριση με μικρότερα πρότυπα όπως το IEEE-14 ή το IEEE-30 (εικόνα 11).



Εικόνα 12 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-57

Το πρότυπο δίκτυο IEEE 57-bus αντιπροσωπεύει μια απλή προσέγγιση του αμερικανικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (στα Μεσοδυτικά των ΗΠΑ) όπως ήταν στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Τα δεδομένα παρασχέθηκαν από τον Iraj Dabbagchi της AEP και μετατράπηκαν στην κοινή μορφή δεδομένων IEEE από τον Rich Christie στο Πανεπιστήμιο της Ουάσιγκτον τον Αύγουστο του 1993.

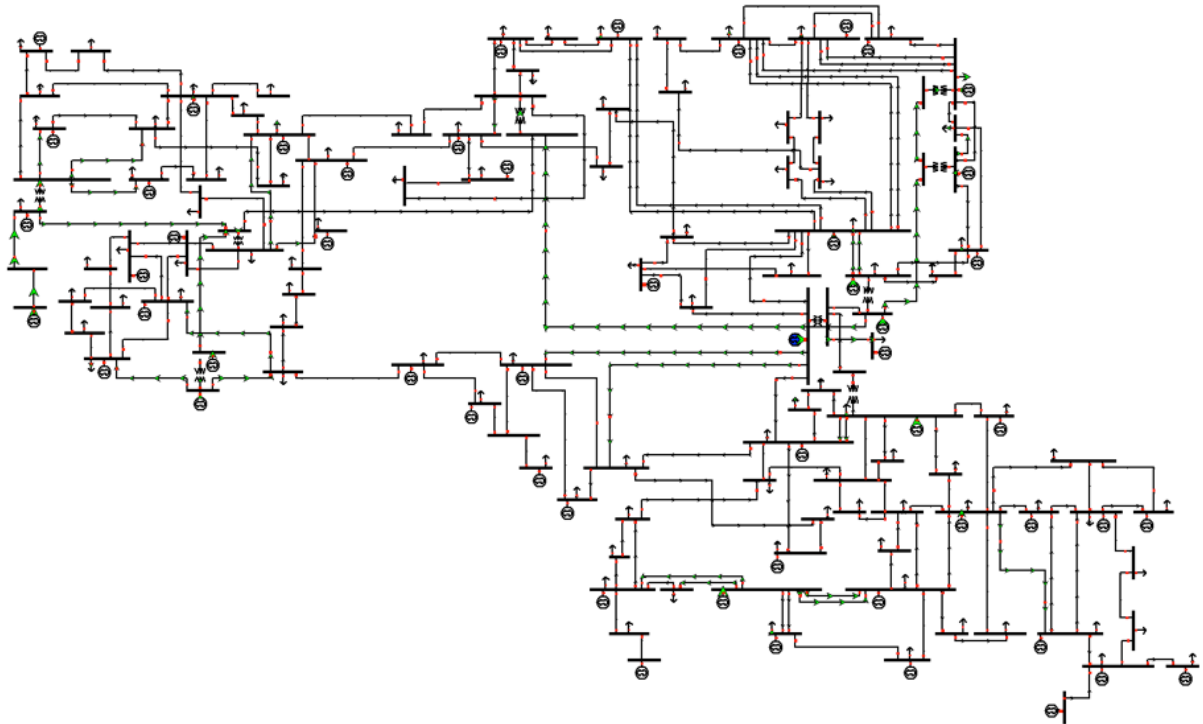
Από το γράφημα, είναι εμφανές ότι το σύστημα δοκιμής 57 διαύλου IEEE έχει 57 ζυγούς, 7 γεννήτριες και 42 φορτία. Η πολυπλοκότητα του IEEE-57 το καθιστά ιδανικό για εκτεταμένες μελέτες και αναλύσεις, συμπεριλαμβανομένων των μελετών φορτίου, των αναλύσεων σταθερότητας, της αξιολόγησης του συστήματος μετά από διάφορες διαταραχές και άλλων.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του προτύπου IEEE-57 είναι η πληθώρα των διαφορετικών τοπολογιών που μπορούν να μελετηθούν. Με 57 κόμβους, υπάρχουν πολλές δυνατότητες σχηματισμού διαφορετικών υποσυστημάτων, καθιστώντας το επιθυμητό για εκτεταμένες συγκρίσεις και αναλύσεις.

4.2.3 IEEE-118

Το πρότυπο δίκτυο IEEE-118 αποτελεί ένα από τα πιο περίπλοκα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται για αναλύσεις, μελέτες και ερευνητικούς σκοπούς στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από 118 διαφορετικούς κόμβους ή σταθμούς, που συνδέονται ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Μίλος Χρήστος

μεταξύ τους μέσω μιας πληθώρας αγωγών μεταφοράς, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο δίκτυο που αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες σε μεγάλα δίκτυα μεταφοράς (εικόνα 12).



Εικόνα 13 Το πρότυπο δίκτυο IEEE-118

Αυτή η περίπτωση αντιπροσωπεύει μια απλή προσέγγιση του αμερικανικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (στην Μεσοδυτική Αμερική) από τον Δεκέμβριο του 1962. Αυτό το σύστημα IEEE 118-bus περιέχει 19 γεννήτριες, 35 σύγχρονους συμπυκνωτές, 177 γραμμές, 9 μετασχηματιστές και 91 φορτία. Τα βασικά επίπεδα KV στα ονόματα των bus είναι μια πολύ πρόχειρη εικασία. Η πλούσια δομή του IEEE-118 το καθιστά ένα ιδανικό πρότυπο για τη μελέτη και την ανάπτυξη νέων τεχνικών και μεθόδων στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Με την πολυπλοκότητα και τη δομή του, το IEEE-118 προσφέρει ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων και σεναρίων που μπορούν να μελετηθούν και να αναλυθούν, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων για πραγματικά προβλήματα στην ενεργειακή βιομηχανία.

Η πολυπλοκότητα του δικτύου IEEE-118 επιτρέπει την ανάλυση πολλών διαφορετικών παραμέτρων και συνθηκών λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων της ανάλυσης φορτίου, της ανάλυσης σταθερότητας, της αξιολόγησης της ασφάλειας και της αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος. Η εκτεταμένη χρήση του IEEE-118 σε εκπαιδευτικά προγράμματα και ερευνητικές δραστηριότητες καταδεικνύει τη σημασία του στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας

4.3 Εξεταζόμενο μοντέλο 1: Το Μοντέλο υπολογισμού των Bronsle & Jungare [85]

Στην εργασία τους, οι Bronsle & Jungare πρότειναν ένα μοντέλο για τον καθορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης PMUs και PDCs σε ένα WAMS, το οποίο ακολουθεί μια προσέγγιση δύο σταδίων.

Πρώτο Στάδιο: Τοποθέτηση PMU

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα το PMU τοποθετείται στο ζυγό δικτύου, συλλαμβάνει και καταγράφει τη φάση τάσης του διαύλου σε αυτόν τον ζυγό και τις φάσεις ρεύματος κατά μήκος όλων των διακλαδώσεων που προσπίπτουν σε αυτόν τον ζυγό. Οι κανόνες για τον προσδιορισμό της

παρατηρησιμότητας του συστήματος ισχύος τοπολογικά κατά το προτεινόμενο μοντέλο είναι όπως αναφέρονται παρακάτω:

1. Για έναν εγκατεστημένο PMU σε ένα ζυγό, είναι γνωστοί οι φάσορες της τάσης αυτού του διαύλου και οι φάσορες ρεύματος όλων των προσιπτουσών διακλαδώσεων σε αυτόν τον ζυγό.
2. Εάν οι φάσορες τάσης και ρεύματος στο ένα άκρο ενός κλάδου είναι γνωστές, τότε ο φάσορας της τάσης στο άλλο άκρο αυτού του κλάδου μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας τον νόμο τάσεων του Kirchoff.
3. Εάν είναι γνωστές οι φάσεις τάσης και των δύο άκρων ενός κλάδου, τότε ο φάσορας του ρεύματος αυτού του κλάδου μπορεί να ληφθεί απευθείας χρησιμοποιώντας τον νόμο ρευμάτων του Kirchoff.

Ο στόχος του προβλήματος τοποθέτησης των PMU είναι να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός PMUs καθώς και η τοποθέτησή τους για να γίνει το δίκτυο ισχύος τοπολογικά παρατηρήσιμο. Το πρόβλημα για την τοποθέτηση PMU διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (18)$$

Υπό τη προϋπόθεση ότι:

$$f_i \geq 1 \quad (19)$$

Όπου

$$f_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (20)$$

με

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν } i = j \text{ ή αν οι δίαυλοι } i, j \text{ είναι συνδεδεμένοι} \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

c_i το κόστος τοποθέτησης του PMU στο ζυγό i (τίθενται ίσα με μονάδα)

f_i ο περιορισμός παρατηρησιμότητας στο ζυγό j

x_i η δυική μεταβλητή τοποθέτησης PMU και

a_{ij} Ο δικός πίνακας συνδεσιμότητας του δικτύου.

Δεύτερο Στάδιο: Τοποθέτηση PDC

Τα νέα συστήματα επικοινωνίας σχεδιάζονται με βάση το μοντέλο επιπέδου διασύνδεσης ανοιχτού συστήματος (open system interconnection - OSI). Το μοντέλο αναφοράς OSI αποτελείται από επτά επίπεδα: φυσικό, σύνδεση δεδομένων, δίκτυο, μεταφορά, περίοδος λειτουργίας, παρουσίαση και εφαρμογή. Τα χαρακτηριστικά των μέσων μετάδοσης παίζουν σημαντικό ρόλο στην υποδομή επικοινωνίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μέσα μετάδοσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ταξινομούνται σε δύο κύριες ομάδες, εξαρτημένα και ανεξάρτητα. Τα εξαρτημένα μέσα αποτελούν μέρος των στοιχείων του δικτύου ισχύος, π.χ., η επικοινωνία γραμμής ισχύος (power line communication - PLC), η ευρυζωνική σύνδεση μέσω γραμμής τροφοδοσίας (broadband over power line - BPL), το καλώδιο οπτικής γείωσης (optical power ground wir - OPGW) και η διηλεκτρική αυτοϋποστήριξη (all-dielectric self supporting - ADSS).

Αντίθετα, τα ανεξάρτητα μέσα δεν εξαρτώνται από το σύστημα ισχύος και μπορεί να είναι του τύπου που είναι διαθέσιμα σε όλους τους χρήστες ως μέσα ανοιχτής πρόσβασης (για παράδειγμα, μέσα

ασύρματης επικοινωνίας) ή αυτά που ανήκουν σε εταιρείες παροχής υπηρεσιών δεδομένων (όπως μισθωμένη γραμμή ή αποκλειστική συνδέσμος δεδομένων). Καθώς τα εξαρτώμενα μέσα είναι μέρος των συστημάτων ισχύος, μπορούν να σχεδιαστούν βέλτιστα σε συνδυασμό με προβλήματα σχεδιασμού συστημάτων ισχύος.

Ο στόχος του προβλήματος τοποθέτησης PDC είναι να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός PDC και η θέση τους από τα εκχωρημένα PMU που έχουν οριστεί για δίκτυο ισχύος που βασίζεται στο WAMS από το προηγούμενο βήμα. Το πρόβλημα για την τοποθέτηση PDC διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Minimize } F = \sum_{j=1}^n x_j \quad (21)$$

Υπό τη προϋπόθεση ότι:

$$f_p \geq b \quad (22)$$

Όπου

$$f_p = \sum_{j=1}^n d_{ij} x_j \quad (23)$$

με

d_{ij}

$= \begin{cases} 1, & \text{αν στο διάυλο } i \text{ είναι εγκατεστημένο PMU ή ο διάυλος } j \text{ με PMU είναι παρατηρήσιμος} \\ 0, & \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases}$

f_p η συνάρτηση περιορισμού της τοποθέτησης των PMU

b τίθεται ίσο με μονάδα στην περίπτωση διαύλου με τοποθετημένο PMU

x_j η δική μεταβλητή τοποθέτησης PDC

d_{ij} ο πίνακας συνδεσιμότητας διαδρομών του δικτύου

4.3.1 Δημιουργία αλγορίθμου υπολογισμού βέλτιστης τοποθέτησης PMUs και PDCs βάσει του μοντέλου των Bronsle & Jungare

Εν γένει στην εργασία τους οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η δομή του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την αξιοποίηση διαφόρων μεθόδων για τον υπολογισμό της βέλτιστης λύσης. Στην περίπτωση της εργασίας, και με δεδομένο τον μεγάλο αριθμό πιθανών συνδυασμών, ιδιαίτερα στα μεγαλύτερα πρότυπα δίκτυα από τα εξεταζόμενα, αξιοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (GAs) αποτελούν μια ευρέως αξιοποιούμενη τεχνική τεχνίτης νοημοσύνης για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, εμπνευσμένοι από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων ακέραίου προγραμματισμού λόγω της ικανότητάς τους να εξερευνούν αποτελεσματικά μεγάλους χώρους λύσεων και να βρίσκουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις με υπολογιστικά εφικτό τρόπο.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν υψηλό βαθμό προσαρμοστικότητας, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων προγραμματισμού ακεραίων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους βελτιστοποίησης που βασίζονται σε τεχνικές που βασίζονται σε κλίση, δεν απαιτούν παράγωγες πληροφορίες, επιτρέποντάς τους να χειρίζονται μη διαφοροποιήσιμες και ασυνεχείς αντικειμενικές συναρτήσεις εγγενείς σε πολλά προβλήματα ακέραίου προγραμματισμού. Αυτή η προσαρμοστικότητα επιτρέπει στους γενετικούς αλγόριθμους

να πλοηγούνται σε δύσκολους χώρους λύσεων που χαρακτηρίζονται από πολυάριθμα τοπικά βέλτιστα, διασφαλίζοντας μια πιο ολοκληρωμένη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης.

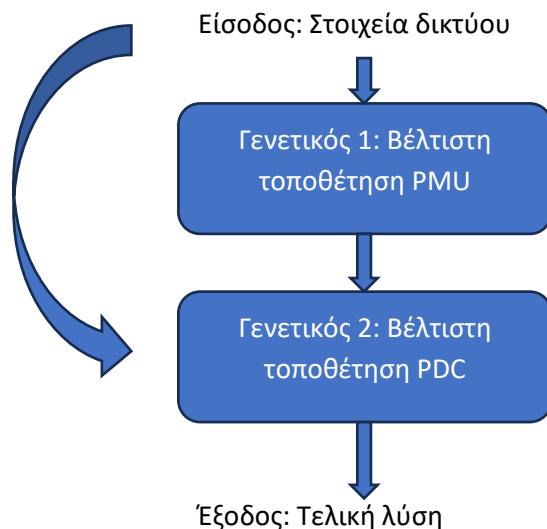
Επιπλέον, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εγγενώς μια παράλληλη φύση, η οποία τους επιτρέπει να εξερευνούν πολλές περιοχές του χώρου λύσης ταυτόχρονα. Αυτός ο παραλληλισμός προκύπτει από την πληθυσμιακή φύση τους, όπου ένας πληθυσμός υποψήφιων λύσεων εξελίσσεται σε πολλές γενιές. Μέσω διαδικασιών όπως η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη, οι γενετικοί αλγόριθμοι διατηρούν ένα ποικίλο σύνολο λύσεων, δειγματίζοντας αποτελεσματικά διαφορετικές περιοχές του χώρου αναζήτησης παράλληλα. Αυτή η παράλληλη εξερεύνηση ενισχύει την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, επιτρέποντας στους γενετικούς αλγόριθμους να συγκλίνουν προς υποσχόμενες λύσεις πιο γρήγορα.

Επιπλέον, η ευρωστία των γενετικών αλγορίθμων τους καθιστά εξαιρετικά κατάλληλους για το χειρισμό σύνθετων προβλημάτων προγραμματισμού ακεραίων με αβέβαιες ή θορυβώδεις αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι γενετικοί αλγόριθμοι ενσωματώνουν εγγενώς μηχανισμούς για τη διατήρηση της διαφορετικότητας εντός του πληθυσμού, αποτρέποντας την πρόωρη σύγκλιση σε μη βέλτιστες λύσεις. Αυτή η ευρωστία τους επιτρέπει να χειρίζονται αποτελεσματικά τη στοχαστικότητα και τον θόρυβο στη διαδικασία βελτιστοποίησης, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία των λύσεων που λαμβάνονται ακόμη και παρουσία αβεβαιότητας.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων έγκειται στην ικανότητά τους να χειρίζονται τους περιορισμούς με φυσικό τρόπο. Πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης του πραγματικού κόσμου, συμπεριλαμβανομένων των σύνθετων προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, συχνά υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς που πρέπει να ικανοποιηθούν για την απόκτηση εφικτών λύσεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν εύκολα να προσαρμόσουν τέτοιους περιορισμούς μέσω της χρήσης εξειδικευμένων σχημάτων κωδικοποίησης, μηχανισμών επιλογής και γενετικών τελεστών προσαρμοσμένων για την επιβολή της σκοπιμότητας. Ενσωματώνοντας περιορισμούς απευθείας στη διαδικασία βελτιστοποίησης, οι γενετικοί αλγόριθμοι διασφαλίζουν ότι οι λύσεις που δημιουργούνται είναι όχι μόνο βέλτιστες αλλά και εφικτές, ικανοποιώντας όλες τις καθορισμένες απαιτήσεις του προβλήματος.

Εκτός από την προσαρμοστικότητα, τον παραλληλισμό, την ευρωστία και τις δυνατότητες χειρισμού περιορισμών, οι γενετικοί αλγόριθμοι προσφέρουν ένα ευέλικτο πλαίσιο που μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί και να επεκταθεί ώστε να ταιριάζει στα ειδικά χαρακτηριστικά σύνθετων προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού. Ερευνητές και επαγγελματίες έχουν αναπτύξει πολλές παραλλαγές και υβριδικές προσεγγίσεις γενετικών αλγορίθμων προσαρμοσμένων για την αντιμετώπιση διαφόρων προκλήσεων που αντιμετωπίζονται στον ακέραιο προγραμματισμό, όπως συνδυαστική βελτιστοποίηση μεγάλης κλίμακας, βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων και δυναμική βελτιστοποίηση. Αυτή η ευελιξία και η ευελιξία καθιστούν τους γενετικούς αλγόριθμους απαραίτητο εργαλείο για την αντιμετώπιση ενός ευρέος φάσματος σύνθετων προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού σε διάφορους τομείς.

Στην περίπτωση του εξεταζόμενου μοντέλου, αξιοποιήθηκαν δύο γενετικοί αλγόριθμοι σε μια σειριακή δομή, ο καθένας εκ των οποίων διερευνούσε την επίλυση του κάθε σταδίου της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Η γενική δομή του κώδικα που δημιουργήθηκε είναι η κάτωθι (εικόνα 13).



Εικόνα 14 Γενική δομή του αλγορίθμου επίλυσης

Όπως φαίνεται στην εικόνα 13, η είσοδος στο σύστημα υπολογισμού είναι η δομή και τα χαρακτηριστικά των πρότυπων δικτύων που εξετάζονται. Τα δεδομένα διατίθενται σε διάφορες διαμορφώσεις στο διαδίκτυο, συμπεριλαμβανομένου και του Matlab. Στην συγκεκριμένη εργασία αξιοποιήθηκαν οι εκδοχές που διατίθενται με το πρόγραμμα matpower (<https://matpower.org/docs/ref/matpower5.0/menu5.0.html>). Με την είσοδο των δεδομένων, ο πρώτος γενετικός αλγόριθμος αξιοποιεί το μαθηματικό μοντέλο του πρώτου σταδίου για να καθορίσει την βέλτιστη τοποθέτηση των PMU στο δίκτυο. Η έξοδος του πρώτου γενετικού αλγορίθμου, καθώς και η δομή του δικτύου, αποτελούν αντίστοιχα την είσοδο στον δεύτερο γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος αξιοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο του δεύτερου σταδίου διερευνά και καθορίζει την βέλτιστη τοποθέτηση των PDC. Στο τέλος ο κώδικας τυπώνει τις λύσεις καθώς και το γράφημα του δικτύου με τις θέσεις των PMU και PDC στους αντίστοιχους κόμβους.

4.3.2 Δομή και λειτουργία πρώτου γενετικού αλγορίθμου

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η είσοδος στον πρώτο αλγόριθμο είναι η δομή του δικτύου. Συγκεκριμένα τα αρχεία για την κάθε περίπτωση δικτύου που εξετάζεται από το matpower περιλαμβάνουν πλειάδα στοιχείων που αφορούν στην σύνδεση των κόμβων, τις αποστάσεις, τις τάσεις και τα ρεύματα κ.α. Στην προκειμένη περίπτωση, τα δεδομένα που ενδιαφέρουν αφορούν τον αριθμό των υπαρχόντων κόμβων και την καταγραφή των συνδέσεων μεταξύ αυτών, ώστε να παραχθεί ο γράφος του δικτύου, που αποτελεί και το πρώτο βήμα στην λειτουργία αυτού του σημείου του κώδικά. Από τα δεδομένα των συνδέσεων των κόμβων, παράγεται και ο δικός πίνακας συνδεσιμότητας του δικτύου (εξ. 20).

Στο επόμενο βήμα, γίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων του γενετικού, ήτοι ο μέγιστος αριθμός γενεών, το μέγεθος του πληθυσμού και οι πιθανότητες crossover και μετάλλαξης. Οι τιμές των παραμέτρων που αξιοποιήθηκαν ήταν οι κάτωθι:

Πίνακας 1 Παράμετροι γενετικού 1

Μέγιστος αριθμός γενεών	10000
Μέγεθος πληθυσμού	10000
Πιθανότητα crossover	0.9

Πιθανότητα μετάλλαξης	0.6
-----------------------	-----

Ο μέγιστος αριθμός γενεών αποτελεί ένα από τα δύο κριτήρια τερματισμού του αλγορίθμου, το μέγεθος του πληθυσμού δίνει τον αριθμό ατόμων (χρωμοσώματα ή λύσεις) που περιλαμβάνει η κάθε γενιά του αλγορίθμου. Η πιθανότητα crossover δίνει την πιθανότητα δύο άτομα να συνδυαστούν ως γονείς παράγοντας απογόνους ενώ η πιθανότητα μετάλλαξης δίνει την πιθανότητα να υπάρχει μια μετάλλαξη (αλλαγή) στο χρωμόσωμα επιλεγμένων ατόμων του πληθυσμού.

Μετά την εισαγωγή των παραμέτρων αυτών, δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός. Το κάθε χρωμόσωμα/άτομο περιλαμβάνει αριθμό γονιδίων ίσο με τον αριθμό των κόμβων που περιλαμβάνει το εξεταζόμενο δίκτυο σε ένα διάνυσμα γραμμής. Τα γονίδια (στοιχεία του χρωμοσώματος), λαμβάνουν τυχαία τιμές 0 (δεν εγκαθίσταται PMU στο συγκεκριμένο κόμβο) ή 1 (εγκαθίσταται PMU στο συγκεκριμένο κόμβο).

Κατόπιν, για κάθε άτομο του αρχικού πληθυσμού, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (εξ. 18). Ωστόσο ο υπολογισμός λαμβάνει χώρα με την εξέταση της αντίστοιχης προϋπόθεσης που αφορά στην παρατηρησιμότητας (εξ.19). Στην περίπτωση που δεν παραβιάζεται η συνθήκη, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνει χώρα κανονικά και σύμφωνα με την εξίσωση 18, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το συγκεκριμένο άτομο (λύση) τίθεται ίση με 10^9 ώστε να «τιμωρηθεί» στο επόμενο βήμα.

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για το κάθε άτομο στον αρχικό πληθυσμό, ο γενετικός κατατάσσει τα άτομα του πληθυσμού βάσει αυτών των τιμών από τα καλύτερα (ελάχιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης) προς τα χειρότερα (μέγιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης). Στην συνέχεια, βάσει της κατάταξης παράγει την νέα γενεά με την χρήση τριών τελεστών.

Η αναπαραγωγή (reproduction) λαμβάνει χώρα με την τεχνική του roulette wheel επιλέγοντας άτομα για να περάσουν στην νέα γενιά (επιβίωση) που εν γένει έχουν καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης ενώ άτομα με μεγάλες τιμές τιμωρούνται και δεν τους επιτρέπεται η είσοδος στην νέα γενιά).

Το crossover επιλέγει τυχαία μια σειρά από άτομα (γονείς) και ανά δυάδες (επίσης τυχαία επιλογή) τα αξιοποιεί για την παραγωγή νέων ατόμων (τέκνα) που αποτελούν συνδυασμό τμημάτων των γονέων. Αξιοποιήθηκε η τεχνική του μονού σημείου ως προς αυτό, κατά την οποία, ο κάθε γονέας «κόβεται» στο ίδιο σημείο και τα δύο μέρη που προκύπτουν συνδυάζονται χιαστεί για την παραγωγή των απογόνων.

Η μετάλλαξη (mutation) επιλέγει τυχαία μια σειρά ατόμων και προβαίνει σε εναλλαγή ενός γονιδίου επίσης τυχαία επιλεγμένου από 0 σε 1 ή το αντίθετο.

Με δεδομένο τον νέο πληθυσμό που προκύπτει ο γενετικός επαναλαμβάνει συνεχώς την διαδικασία. Ο τερματισμός λαμβάνει χώρα υπό δύο προϋποθέσεις (όποια ικανοποιηθεί πρώτη):

- Ο αριθμός της τρέχουσας γενιάς είναι ίσος με τον αριθμό μέγιστων γενεών που τέθηκε
- Δεν υπάρχει καμία μεταβολή στην βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τουλάχιστον 100 επαναλήψεις (γενιές).

Η έξοδος του αλγορίθμου είναι το χρωμόσωμα του ατόμου που αποτελεί την βέλτιστη λύση (ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης).

4.3.3 Δομή και λειτουργία δευτέρου γενετικού αλγορίθμου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο δεύτερος γενετικός αλγόριθμος λαμβάνει ως είσοδο την βέλτιστη τοποθέτηση των PMU που προκύπτει από την ολοκλήρωση της λειτουργίας του πρώτου καθώς και των δεδομένων της δομής του δικτύου.

Τα αρχικά του βήματα είναι παρόμοια με του πρώτου, και αξιοποιήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές παραμέτρων.

Πίνακας 2 Παράμετροι γενετικού 2

Μέγιστος αριθμός γενεών	10000
Μέγεθος πληθυσμού	10000
Πιθανότητα crossover	0.5
Πιθανότητα μετάλλαξης	0.2

Το χρωμόσωμα του κάθε ατόμου είναι παρόμοιο σε δομή με εκείνο του πρώτου γενετικού, ωστόσο κατά την δημιουργία του, δεσμεύονται με 0 τα γονίδια όπου είναι τοποθετημένα τα PMU ώστε να μην υπάρχει παραβίαση του προβλήματος. Οι υπόλοιπες διαθέσιμες θέσεις (γονίδια) λαμβάνουν τυχαία τιμές 0 (δεν εγκαθίσταται PDC στο συγκεκριμένο κόμβο) ή 1 (εγκαθίσταται PDC στο συγκεκριμένο κόμβο).

Κατόπιν, για κάθε άτομο του αρχικού πληθυσμού, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (εξ. 21). Ωστόσο ο υπολογισμός λαμβάνει χώρα με την εξέταση της αντίστοιχης προϋπόθεσης (εξ.22). Στην περίπτωση που δεν παραβιάζεται η συνθήκη, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνει χώρα κανονικά και σύμφωνα με την εξίσωση 21, ενώ σε αντίθετη περίπτωση η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το συγκεκριμένο άτομο (λύση) τίθεται ίση με 10^9 ώστε να «τιμωρηθεί» στο επόμενο βήμα.

Με την ολοκλήρωση του υπολογισμού της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για το κάθε άτομο στον αρχικό πληθυσμό, ο γενετικός κατατάσσει τα άτομα του πληθυσμού βάσει αυτών των τιμών από τα καλύτερα (ελάχιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης) προς τα χειρότερα (μέγιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης). Στην συνέχεια, βάσει της κατάταξης παράγει την νέα γενεά με την χρήση τριών τελεστών όπως στην περίπτωση του πρώτου αλγορίθμου. Ωστόσο, οι διαδικασίες του crossover και της μετάλλαξης στην περίπτωση αυτή έχουν παραλλαχθεί ώστε σε κάθε περίπτωση τέκνων (crossover) ή μετάλλαξης να εξασφαλίζεται ότι δεν υφίσταται η περίπτωση να τοποθετηθεί ένα PDC σε θέση που καταλαμβάνει ένα PMU.

Ο τερματισμός του αλγορίθμου λαμβάνει χώρα με την χρήση των ίδιων τελεστών του πρώτου γενετικού αλγορίθμου.

4.4 Εξεταζόμενο μοντέλο 2: Το Μοντέλο υπολογισμού των Haghghatfar et al. [86]

Στην εργασία τους, οι Haghghatfar et al. πρότειναν ένα εναλλακτικό μοντέλο για τον καθορισμό της βέλτιστης τοποθέτησης PMU και PDC. Αυτή η μέθοδος ελαχιστοποιεί την πιθανότητα αστοχιών στη μετάδοση δεδομένων από PMU σε PDC. Στην προτεινόμενη μέθοδο, αρχικά θεωρείται ότι τα PMU είναι εγκατεστημένα σε όλους τους ζυγούς συστήματος. Στη συνέχεια, τα πλεονάζοντα PMU θα παραληφθούν το ένα μετά το άλλο σε μια διαδικασία πολλαπλών σταδίων.

Συμβατικά, η αξιοπιστία ενός μηχανικού συστήματος με συγκεκριμένη είσοδο και έξοδο μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο cut-set ή tie-set. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, δύο προκαθορισμένες διαδρομές είναι πιθανώς διαθέσιμες μεταξύ κάθε PMU (είσοδος) και του

σχετικού PDC (έξοδος) σε ένα WAMS όταν χρησιμοποιείται η προστασία στατικής διαδρομής. Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία του συστήματος μπορεί απλά να διαμορφωθεί με βάση τα χαρακτηριστικά των συνδέσμων αυτών των δύο διαδρομών.

Έστω A η κανονική κατάσταση ενός περιφερειακού δικτύου με n εγκατεστημένα PMU και A_i η κανονική κατάσταση μετάδοσης δεδομένων από το $i^{\text{στο}}$ PMU στο PDC. Το περιφερειακό δίκτυο θα είναι σε κανονική κατάσταση λειτουργίας εάν η μετάδοση δεδομένων μεταξύ όλων των PMU και του PDC είναι κανονική. Επομένως, το A μπορεί να γραφτεί ως:

$$A = \bigcap_{i=1}^n A_i \quad (24)$$

Η μετάδοση δεδομένων μεταξύ του $i^{\text{στο}}$ PMU και του εγκατεστημένου PDC θα είναι κανονική εάν είτε η κύρια διαδρομή είτε η εφεδρική είναι κανονική. Ως εκ τούτου, θα υπάρξει

$$A_i = A_i^p \cup A_i^s \quad (25)$$

όπου τα A_i^p , και A_i^s είναι το σύνολο των συνδέσεων στην κύρια και στην εφεδρική διαδρομή του $i^{\text{στο}}$ PMU σε κανονική κατάσταση, αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, η αξιοπιστία του υπό εξέταση περιφερειακού δικτύου μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P(A) = 1 - P(\bar{A}) \quad (26)$$

όπου το σύμβολο της γραμμής υποδεικνύει το συμπλήρωμα. Εφόσον το A εφαρμόζεται ως κανονική λειτουργία, το \bar{A} αντιπροσωπεύει την ανώμαλη λειτουργία.

Κατά συνέπεια ο αλγόριθμος υπολογισμού έχει ως κάτωθι.

Αρχικά, υποτίθεται ότι τα PMU είναι εγκατεστημένα σε όλους τους ζυγούς συστήματος. Αυτή η τοποθέτηση διατίθεται σε ένα δυαδικό διάνυσμα τοποθέτησης x_{best} . Επομένως, όλες οι καταχωρήσεις αυτού του διανύσματος είναι ίσες με 1 στην αρχή της διαδικασίας. Ο στόχος είναι να διατηρηθεί η παρατηρησιμότητα του συστήματος ισχύος με τον ελάχιστο αριθμό PMUs μαζί με την επίτευξη της μέγιστης αξιοπιστίας για το δίκτυο επικοινωνίας. Για το σκοπό αυτό, τα πλεονάζοντα PMU θα εξαλειφθούν το ένα μετά το άλλο σε βρόχο. Σε αυτόν τον βρόχο, όλες οι παραγόμενες ρυθμίσεις PMU που μπορούν να παρέχουν την παρατηρησιμότητα του συστήματος ισχύος εξαλείφοντας ένα PMU από το x_{best} θα αξιολογηθούν ως προς την αξιοπιστία. Η ρύθμιση με την υψηλότερη αξιοπιστία θα ανακαταναμηθεί στο x_{best} .

Αυτή η διαδικασία θα συνεχιστεί έως ότου η παρατηρησιμότητα του συστήματος να χαθεί εξαλείφοντας κάθε PMU από το x_{best} . Έτσι, η τελευταία αποθηκευμένη τοποθέτηση καθορίζει καλύτερα τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMU. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι, αναλυτικά ως εξής:

- (1) Πρώτον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υποτίθεται ότι τα PMU είναι εγκατεστημένα σε όλους τους ζυγούς συστήματος. Είναι σαφές ότι σε αυτή την κατάσταση το σύστημα ισχύος είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Αυτή η τοποθέτηση θα εκχωρηθεί στη διανυσματική μεταβλητή x_{best} , η οποία θα ενημερωθεί από την καλύτερη τοποθέτηση στο τέλος κάθε σταδίου εξάλειψης. Στο πρώτο βήμα, το x_{best} είναι ένα $N \times 1$ διάνυσμα με όλα τα στοιχεία 1, στο οποίο N είναι ο αριθμός των ζυγών συστήματος.
- (2) Εξετάζονται όλες τις πιθανές ρυθμίσεις των PMU που θα ληφθούν με την εξάλειψη ενός PMU από την καλύτερη ληφθείσα τοποθέτηση μέχρι αυτό το στάδιο που αποθηκεύεται στο x_{best} . Κάθε διάταξη προκύπτει μετατρέποντας ένα στοιχείο

- μονάδας του x_best σε 0. Κάθε διάταξη θα πρέπει να αποθηκεύεται σε μια νέα διανυσματική μεταβλητή
- (3) Μεταξύ των ληφθέντων διευθετήσεων στο βήμα (2), θα διατηρηθούν εκείνες που παρέχουν την παρατηρησιμότητα του συστήματος ισχύος. Εάν κανένα από αυτά δεν κάνει το σύστημα ισχύος παρατηρήσιμο, το αποθηκευμένο x_best θα καθορίσει την καλύτερη τοποθέτηση και μετά πηγαίνει στο βήμα (6).
 - (4) Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο αξιολόγησης που αναφέρεται παραπάνω, για κάθε διάταξη που τηρείται στο βήμα (3), υπολογίζεται η υψηλότερη αξιοπιστία που θα επιτευχθεί με την αντικατάσταση του PDC σε όλους τους διαθέσιμους ζυγούς συστήματος. Στη συνέχεια, αποθηκεύεται η λαμβανόμενη τιμή ως αυτή της αντικειμενικής συνάρτησης αυτής της διάταξης. Θα πρέπει επίσης να αποθηκευτεί η θέση του PDC που αφορά την υψηλότερη αξιοπιστία.
 - (5) Σύμφωνα με τις αποθηκευμένες τιμές καταλληλότητας στο βήμα (4), αποθηκεύεται το διάνυμα τοποθέτησης με την υψηλότερη τιμή καταλληλότητας στο x_best . Στη συνέχεια, γίνεται μετάβαση στο βήμα (2).
 - (6) Εκτυπώνεται το διάνυμα τοποθέτησης x_best και η σχετική θέση PDC ως η καλύτερη ταυτόχρονη τοποθέτηση των PMU και του PDC

4.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

4.5.1 Μοντέλο υπολογισμού των Bronsle & Jungare

Η αξιοποίηση του μαθηματικού μοντέλου παράλληλα με την χρήση του κώδικα των δύο γενετικών όπως περιγράφηκε, απέδωσε εξ αρχής δύο σημαντικά συμπεράσματα.

Αφενός, το μαθηματικό μοντέλο είναι αρκετά απλό σε σχέση με τον υπολογισμό των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτό συνεπάγεται ότι ιδιαίτερα στην περίπτωση του δικτύου IEEE-14 ο όγκος των υπολογισμών, και κατά συνέπεια ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος είναι αρκετά μειωμένος και εν γένει επηρεάζεται κυρίως από τις απαιτήσεις υπολογισμών στις επιμέρους συναρτήσεις των τελεστών των δύο γενετικών αλγορίθμων. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου γίνεται εμφανής στην περίπτωση των δύο άλλων δικτύων, ιδιαίτερα του IEEE-118 που αποτελεί και μεγαλύτερη πρόκληση δεδομένου του σημαντικά αυξημένου χώρου λύσης.

Αφετέρου, η στοχαστική φύση των γενετικών αλγορίθμων καθώς και ένα ζήτημα που είναι εγγενές στο μοντέλο και αναφέρεται και από τους συγγραφείς, οδηγούν σε διαφορετικές λύσεις, απαιτώντας επιπλέον «τρεξίματα» του κώδικα στην κάθε περίπτωση για την διερεύνηση της αξίας τους ως βέλτιστες. Εκκινώντας από την στοχαστικότητα των γενετικών αλγορίθμων, η οποία αναφέρθηκε και στην σύντομη παρουσίαση τους, αυτή έχει ως αποτέλεσμα σε αρκετές εφαρμογές την εύρεση μιας υπό-βέλτιστης λύσης (τοπικό ακρότατο του χώρου έρευνας) αντί της βέλτιστης (ολικού ακρότατου). Εν γένει αυτό αντιμετωπίζεται με την χρήση υψηλών τιμών στους τελεστές του crossover και του mutation, όπως έλαβε χώρα και στην παρούσα εργασία, ώστε να δοθεί η δυνατότητα στον αλγόριθμο να «ξεκολλήσει» από μια περιοχή που περιλαμβάνει τοπικά ακρότατα και να κινηθεί (πιθανώς) προς την περιοχή που περιλαμβάνει το ολικό. Στην περίπτωση αυτή ωστόσο, αυτό δυσχεραίνεται από το ζήτημα που προαναφέρθηκε παραπάνω και αφορά στο προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι τα κόστη στην εξίσωση 18, στην περίπτωση της τοποθέτησης των PMUs τίθενται ίσα με την μονάδα. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε πολλαπλότητα λύσεων καθώς διάφοροι

συνδυασμοί που ικανοποιούν την προϋπόθεση της παρατηρησιμότητας παρουσιάζουν ενδεχόμενα την ίδια τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση και κατά συνέπεια αξιολογούνται ως ισάξιοι. Είναι προφανές ότι αυτό το γεγονός επιδρά και έπειτα στην εύρεση τη βέλτιστης λύσης σε σχέση με την τοποθέτηση των PDCs. Εν γένει στην κάθε περίπτωση, ο αλγόριθμος «έτρεξε» αρκετές φορές ώστε να συγκεντρωθούν αρκετές λύσεις και οι οποίες παρουσιάζονται σε αντίστοιχο πίνακα στην εκάστοτε περίπτωση δικτύου.

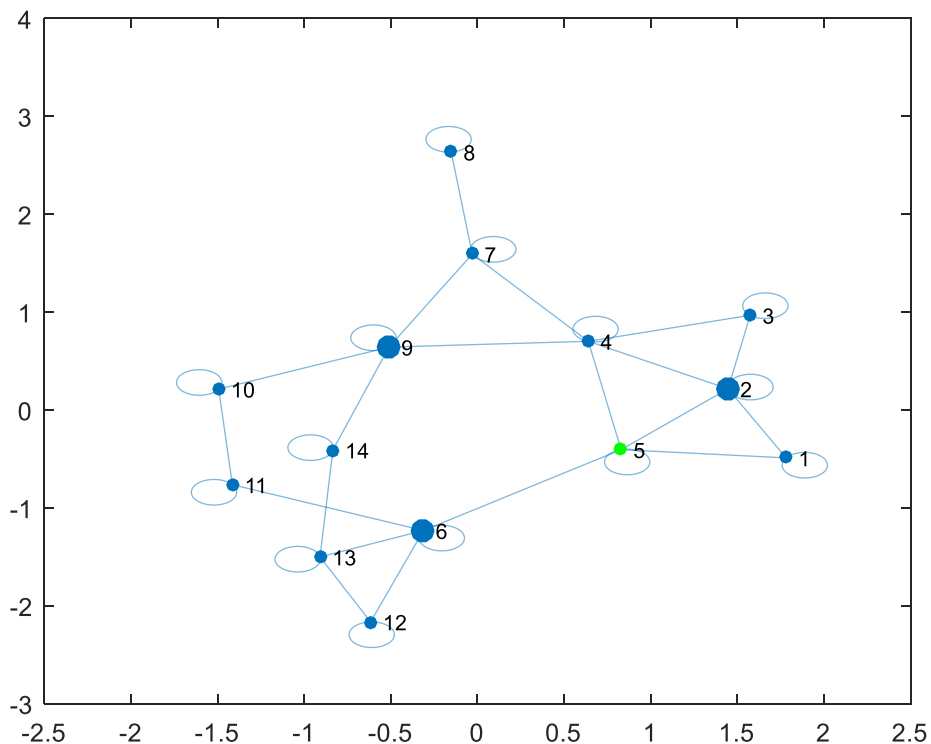
Αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE-14

Ο πίνακας 3 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα που ελήφθησαν για το δίκτυο IEEE-14. Οι λύσεις είναι εκείνες που αποδόθηκαν από την χρήση του αλγορίθμου περισσότερες φορές.

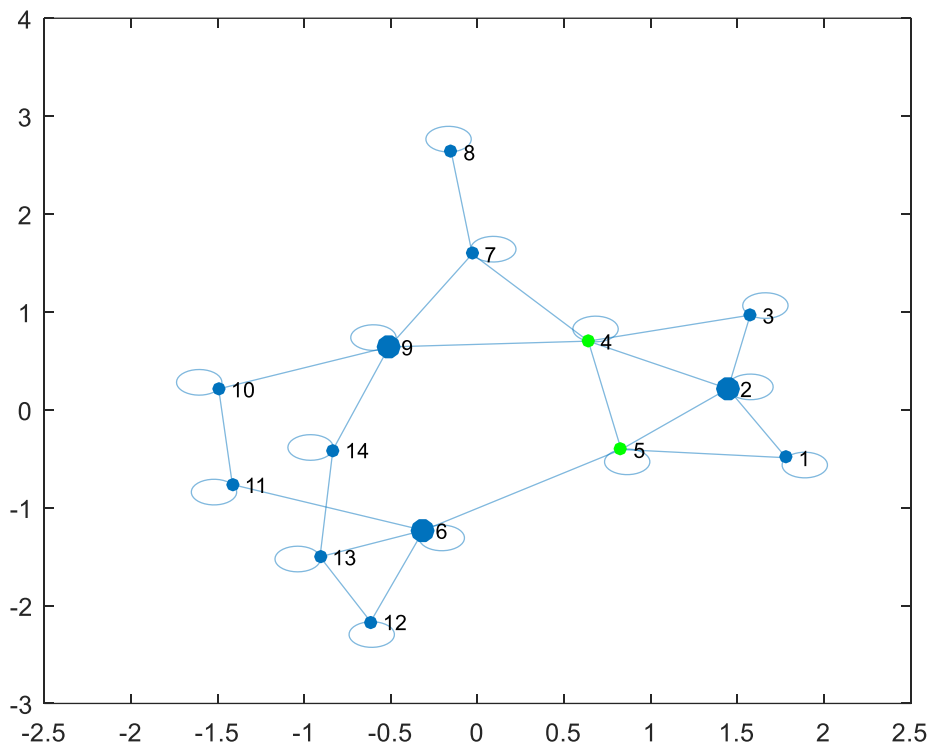
Πίνακας 3 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-14

Αριθμός λύσης	Θέσεις PMU (Αριθμός εγκατεστημένων PDU)	Θέσεις PDC (Αριθμός εγκατεστημένων PDC)	Συνολικός υπολογιστικός χρόνος (s)
1	2,6,9 (3)	5 (1)	108.28
2	2,6,9 (3)	4,5(2)	109.62
3	2,6,7,9 (4)	4,12 (2)	118.30
4	2,6,9,8 (4)	5,7 (2)	111.70
5	2,7,11,13 (4)	4,6 (2)	111.95

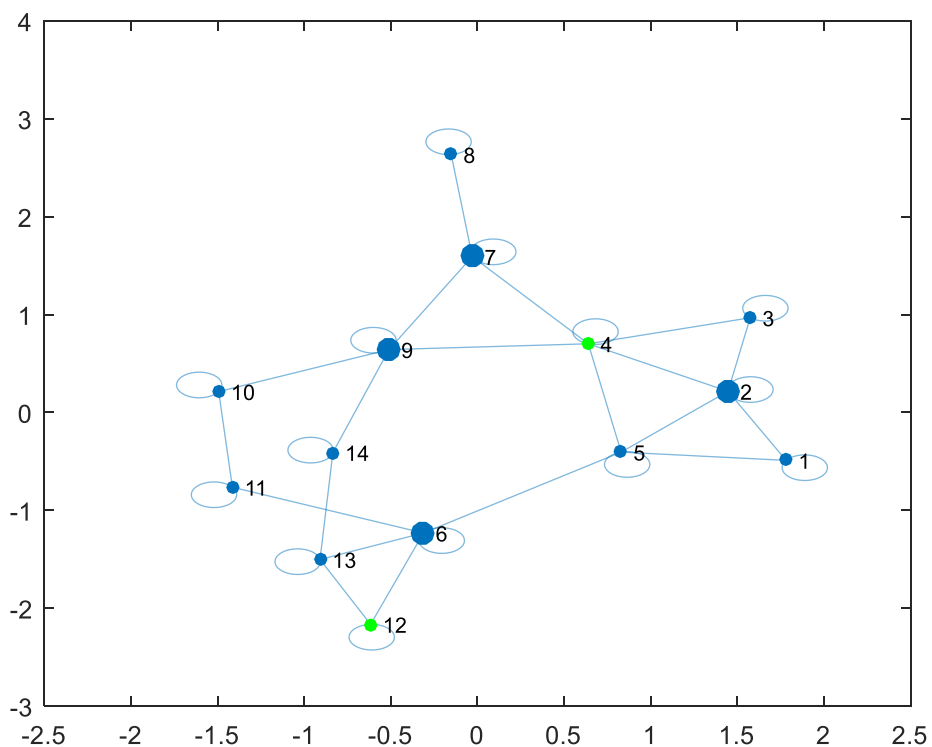
Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν γραφικά το δίκτυο στην περίπτωση της κάθε λύσης όπου με έντονο μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις των PMUs και με πράσινο χρώμα οι θέσεις των PDCs.



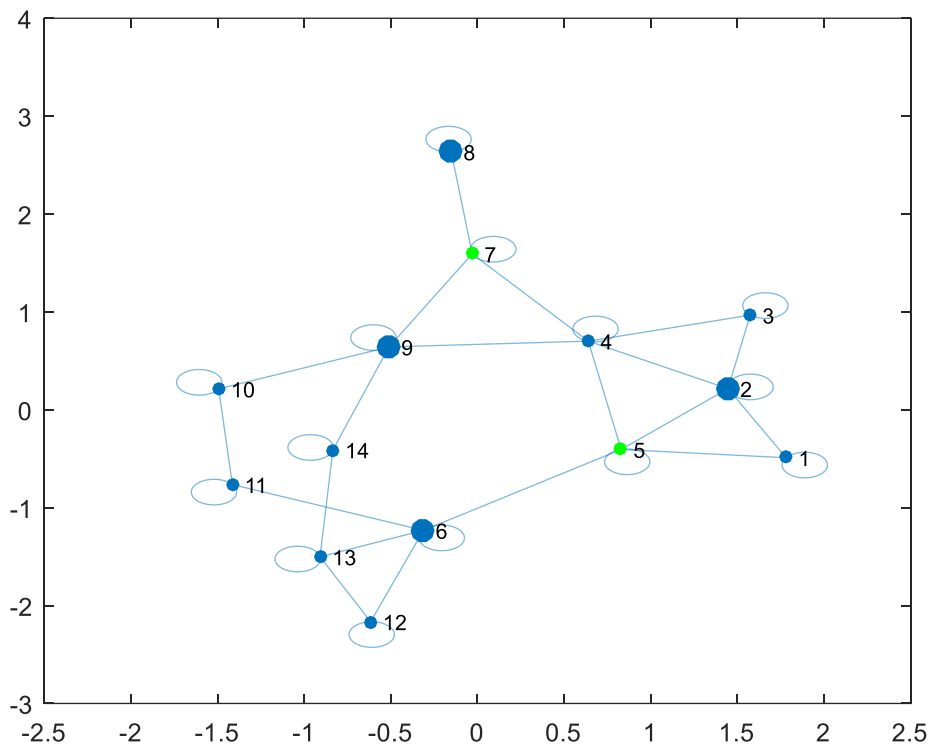
Εικόνα 15 Γραφική αποτύπωση λύσης 1 για το δίκτυο IEEE-14



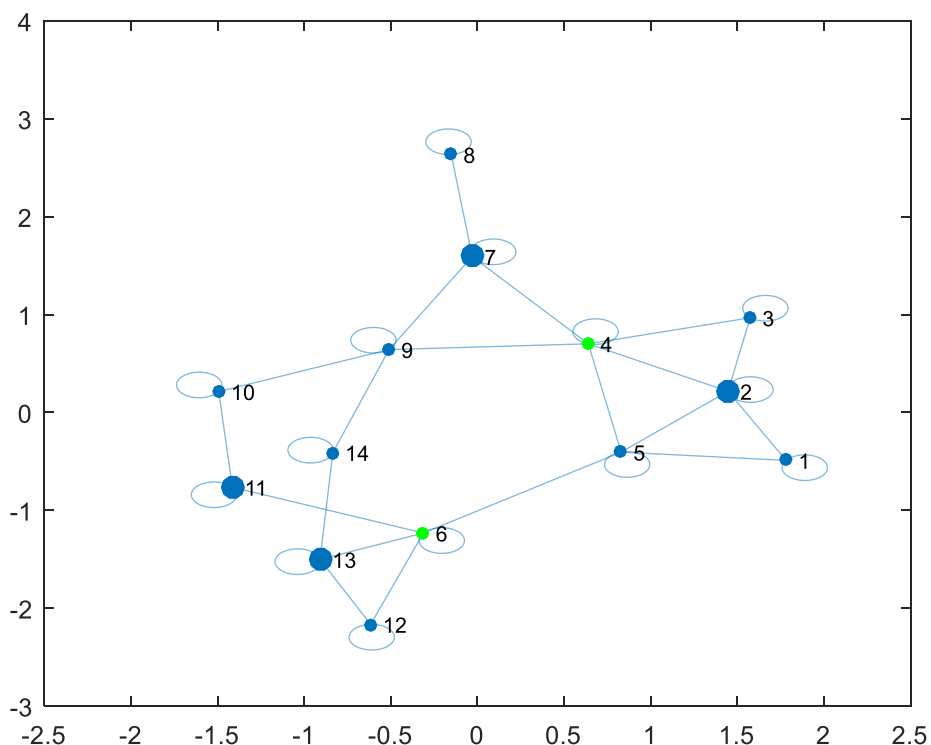
Εικόνα 16 Γραφική αποτύπωση λύσης 2 για το δίκτυο IEEE-14



Εικόνα 17 Γραφική αποτύπωση λύσης 3 για το δίκτυο IEEE-14



Εικόνα 18 Γραφική αποτύπωση λύσης 4 για το δίκτυο IEEE-14



Εικόνα 19 Γραφική αποτύπωση λύσης 5 για το δίκτυο IEEE-14

Στην συναφή βιβλιογραφία, η λύση 1 του πίνακα 3 αντιστοιχί στην αναφερόμενη ως βέλτιστη για την περίπτωση του εξεταζόμενου δικτύου. Είναι συνεπώς εμφανές ότι το μοντέλο όντως καταλήγει

στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, μετά από όμως αρκετό αριθμό «τρεξιμάτων» του αλγορίθμου. Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι οι υπόλοιπες λύσεις δεν αποτελούν την βέλτιστη, έχει ενδιαφέρον να εξεταστούν ως προς την ικανοποίηση των προδιαγραφών του συστήματος. Εν γένει η πρώτη παρατήρηση αφορά στο γεγονός ότι όλες οι λύσεις (συμπεριλαμβανομένης και της βέλτιστης) ικανοποιούν το κριτήριο της παρατηρησιμότητας, καθώς όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι παρατηρήσιμοι από τα PMUs που τοποθετήθηκαν αφενός, ενώ η τοποθέτηση των PDC επίσης εξασφαλίζει ότι οι κόμβοι με PMUs είναι παρατηρήσιμοι από αυτά. Αυτό συνεπάγεται ότι παρά το γεγονός ότι δεν είναι όλες οι λύσεις βέλτιστες, ωστόσο είναι εφικτές και υλοποιήσιμες. Στην περίπτωση του IEEE-14 όπου ο αριθμός των κόμβων είναι μικρός ωστόσο, είναι σαφές ότι αναζητείται η βέλτιστη λύση με στόχο την καλύτερη λειτουργία του συστήματος και του δικτύου με το μικρότερο δυνατό κόστος. Σημειώνεται επίσης ότι η λύση που προτείνουν ως βέλτιστη οι συγγραφείς είναι η λύση 3.

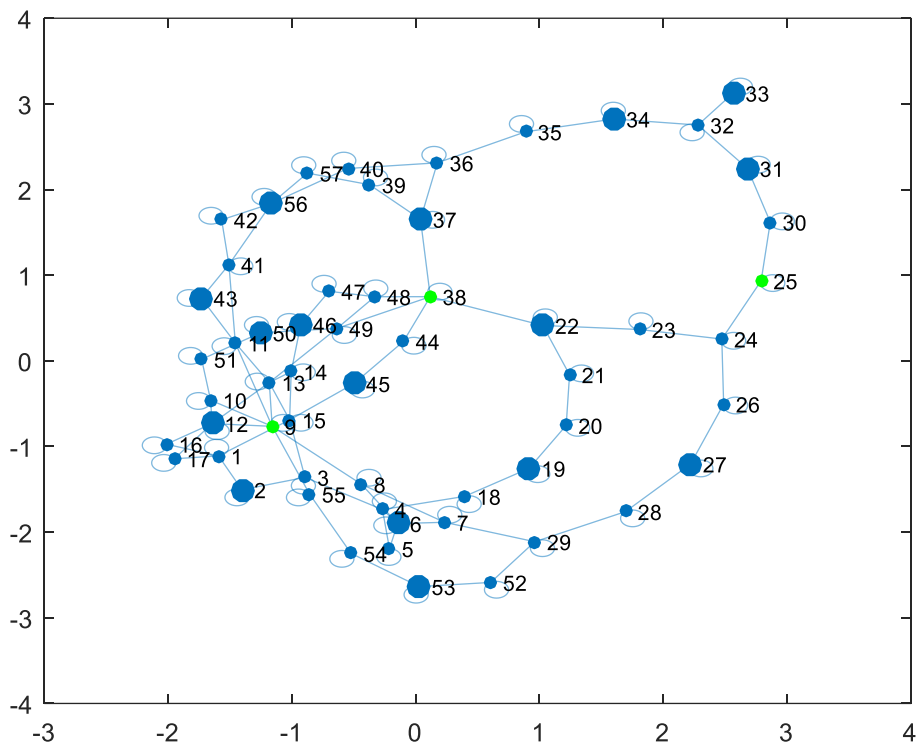
Αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE-57

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα που ελήφθησαν για το δίκτυο IEEE-57.

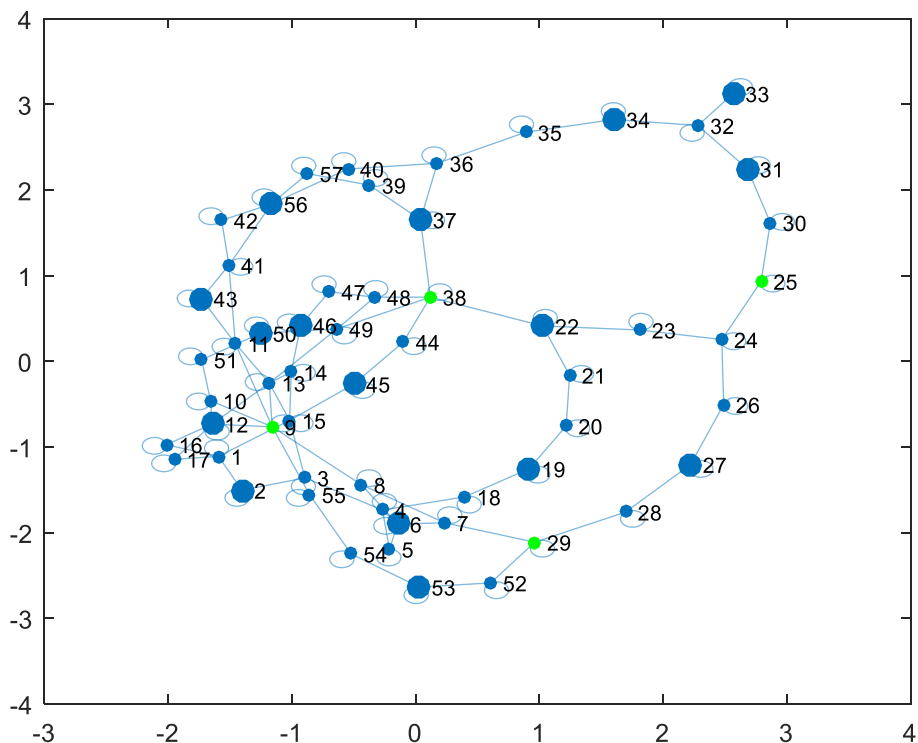
Πίνακας 4 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-57

Αριθμός λύσης	Θέσεις PMU (Αριθμός εγκατεστημένων PDU)	Θέσεις PDC (Αριθμός εγκατεστημένων PDC)	Συνολικός υπολογιστικός χρόνος (s)
1	2,6,12,19,22,27,31,33,34,37,43,45,46,50,53,56 (16)	9,25,38 (3)	482.64
2	2,6,12,19,22,27,31,33,34,37,43,45,46,50,53,56 (16)	9,25,29,38 (4)	474.55
3	2,6,12,19,22,27,31,33,34,37,43,45,46,50,53,56 (16)	13,25,29,38 (4)	481.67
4	2,6,12,19,22,27,31,33,34,37,43,45,46,50,53,56 (16)	3,9,29,32,38 (5)	485.31
5	1,4,6,7,10,15,20,22,23,24,27,29,31,34,38,39,40,41,47,51,52,55,57 (23)	3,9,11,16,19,21,28,32,37,42,46,48,54 (14)	473.53

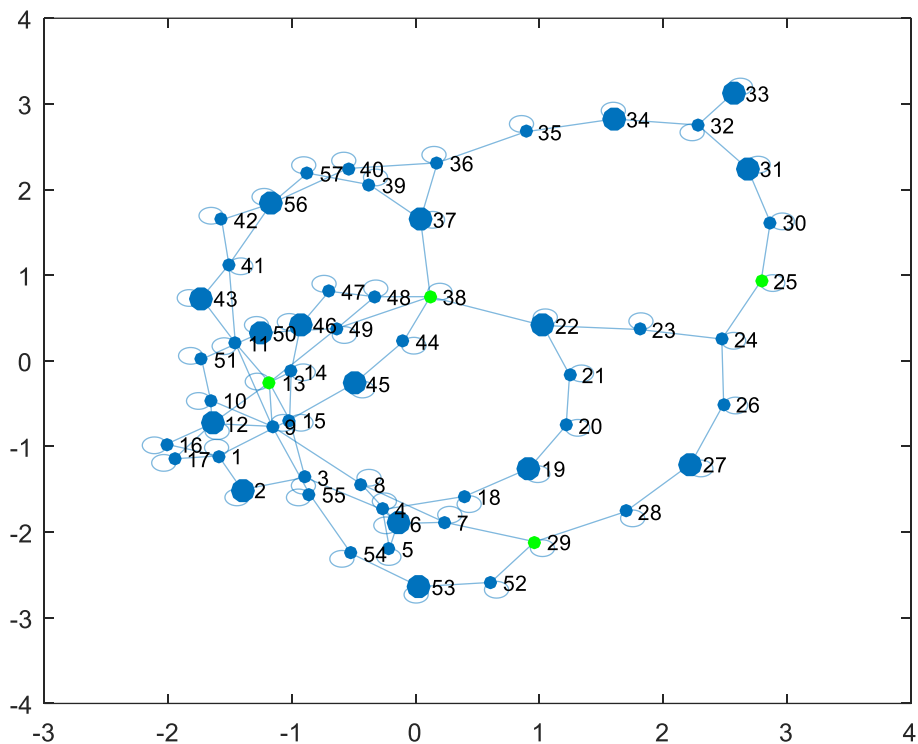
Τα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζουν γραφικά το δίκτυο στην περίπτωση της κάθε λύσης όπου με έντονο μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι θέσεις των PMUs και με πράσινο χρώμα οι θέσεις των PDCs.



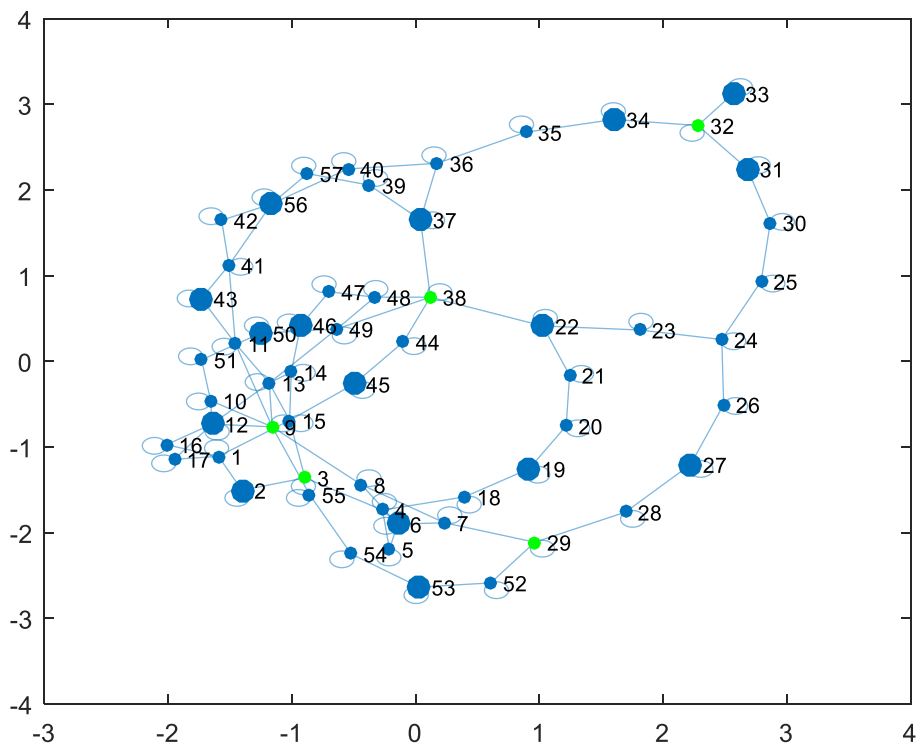
Εικόνα 20 Γραφική αποτύπωση λύσης 1 για το δίκτυο IEEE-57



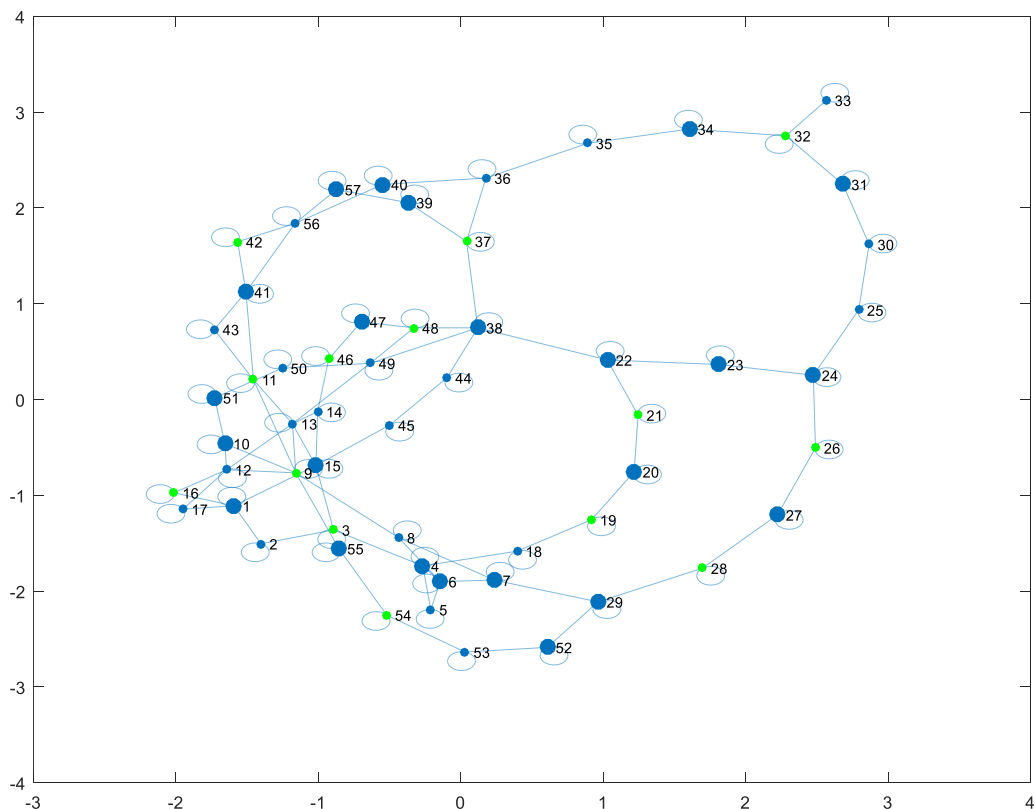
Εικόνα 21 Γραφική αποτύπωση λύσης 2 για το δίκτυο IEEE-57



Εικόνα 22 Γραφική αποτύπωση λύσης 3 για το δίκτυο IEEE-57



Εικόνα 23 Γραφική αποτύπωση λύσης 4 για το δίκτυο IEEE-57



Εικόνα 24 Γραφική αποτύπωση λύσης 5 για το δίκτυο IEEE-57

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα στο πίνακα 4 και στις εικόνες 19-23, στην περίπτωση του δικτύου IEEE-57 ο αλγόριθμος αφενός καθυστερεί χαρακτηριστικά, γεγονός αναμενόμενο, λόγω του αυξημένου αριθμού συνδυασμών που εξετάζει, αφετέρου, αποδίδει σειρά λύσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Το παράδειγμα της λύσης 5 τοποθετήθηκε ενδεικτικά σε αυτή τη περίπτωση, καθώς είναι χαρακτηριστικό. Παρά τον μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και τον ιδιαίτερα μεγάλο πληθυσμό, είναι εμφανές ότι απαιτούνται αρκετές δοκιμές για την επίλυση του προβλήματος καθώς είναι πιθανό το μπλοκάρισμα του αλγορίθμου σε ένα τοπικό ελάχιστο όσον αφορά στην τοποθέτηση των PMUs κάτι που επηρεάζει σημαντικά και την τοποθέτηση των PDCs. Ωστόσο, ο αλγόριθμος αποδίδει λύσεις που προσεγγίζουν τις βέλτιστες που αναφέρονται στην συναφή βιβλιογραφία (λύσεις 1,2 και 3) καθώς και υποβέλτιστες λύσεις (λύση 4) που είναι εφικτές και ικανοποιούν το κριτήριο της παρατηρησιμότητας. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι οι θέσεις των PMUs για τις πρώτες τέσσερις λύσεις είναι ταυτόσημες, γεγονός που υποδηλώνει ότι πιθανώς όσον αφορά στα PMU, η διάταξη αυτή είναι και η βέλτιστη.

Αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE-118

Ο πίνακας 5 παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα που ελήφθησαν για το δίκτυο IEEE-118.

Πίνακας 5 Καλύτερες λύσεις εφαρμογής του μοντέλου για το δίκτυο IEEE-118

Αριθμός λύσης	Θέσεις PMU (Αριθμός εγκατεστημένων PDU)	Θέσεις PDC (Αριθμός εγκατεστημένων PDC)	Συνολικός υπολογιστικός χρόνος (s)
1	2, 8, 11, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 114, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 71, 75, 77, 80, 84, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110 (30)	5, 35, 39, 54, 70, 84, 104 (7)	1512.36
2	1, 5, 9, 11, 12, 15, 17, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 37, 41, 43, 46, 49, 52, 54, 56, 59, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 92, 96, 100, 105, 110, 115 (40)	8, 10, 16, 24, 27, 33, 87, 93, 111, 114 (11)	1489.33
3	2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 24, 26, 29, 30, 36, 40, 44, 48, 50, 51, 54, 56, 57, 59, 64, 66, 68, 69, 70, 73, 79, 80, 81, 83, 87, 88, 89, 91, 92, 96, 98, 99, 100, 107, 108, 110, 113, 115, 118 (54)	1, 14, 20, 25, 28, 33, 35, 39, 49, 55, 58, 60, 62, 65, 77, 84, 85, 93, 95, 101, 112, 114, 117 (23)	1432.45
4	1, 4, 5, 9, 11, 12, 15, 17, 21, 23, 25, 26, 28, 30, 34, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 46, 52, 53, 56, 57, 62, 63, 64, 65, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 79, 80, 82, 85, 88, 89, 90, 94, 95, 99, 102, 103, 104, 105, 109, 110, 113, 115, 116, 117 (56)	8, 10, 16, 20, 24, 27, 32, 33, 36, 40, 47, 69, 77, 86, 87, 93, 96, 100, 101, 108, 111, 114, 118 (23)	1435.32
	1, 2, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 17, 18, 20, 21, 23, 24, 27, 28, 29, 32, 34, 36, 37, 40, 41, 44, 45,	5, 10, 16, 19, 22, 25, 26, 31, 33, 38, 40, 43, 47, 69, 78, 84, 88, 93,	1399.62

	46, 49, 51, 52, 54, 56, 57, 60, 62, 66, 68, 70, 72, 75, 77, 79, 80, 83, 85, 86, 87, 89, 90, 92, 94, 96, 100, 102, 105, 107, 109, 110, 111, 112, 115, 117, 118 (64)	97, 101, 104, 108, 113, 114, 116 (25)	
--	--	---------------------------------------	--

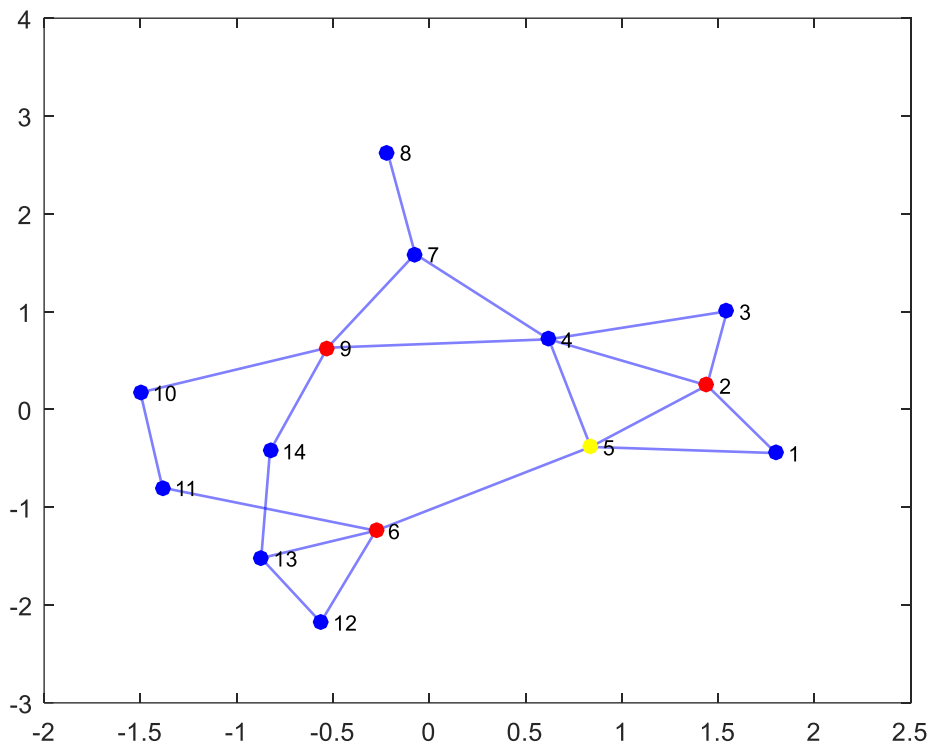
Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα του πίνακα 5 ο αλγόριθμος στην περίπτωση του δικτύου IEEE-118 αποδίδει ιδιαίτερα διαφοροποιημένα αποτελέσματα. Η λύση 1 δείχνει να αποτελεί την βέλτιστη επιλογή, δεδομένου του μικρού αριθμού των μονάδων που εγκαθίστανται στο δίκτυο. Ωστόσο και οι υπόλοιπες λύσεις αναφέρονται (ειδικά σε σχέση με την τοποθέτηση των PMUs). Ωστόσο είναι εμφανές ότι η αύξηση της πολυπλοκότητας του προβλήματος απαιτεί ιδιαίτερα αυξημένο υπολογιστικό χρόνο και ισχύ, ενώ η εν γένει στοχαστικότητα του γενετικού απαιτεί την επανάληψη της διαδικασίας αρκετές φορές ώστε να προκύψουν κατάλληλα συμπεράσματα σε σχέση με το κατά πόσο μια λύση είναι ή όχι βέλτιστη.

4.5.2 Μοντέλο υπολογισμού των Haghghatfar et al.

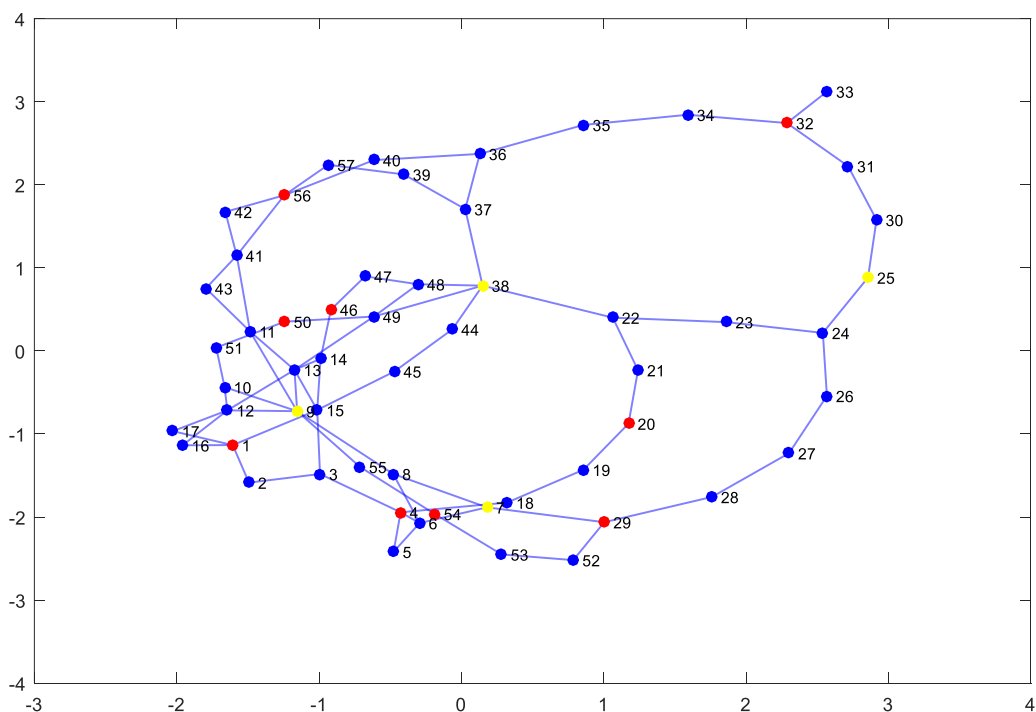
Στην περίπτωση του αλγορίθμου που αφορά στο μοντέλο των Haghghatfar et al., δεδομένου ότι η περιγραφόμενη διαδικασία είναι εν γένει εξαντλητική, δεν υφίσταται το ζήτημα της επανάληψης της όπως στην περίπτωση του γενετικού αλγορίθμου στο προηγούμενο μοντέλο. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 6 και στις εικόνες 24 και 25 για τα δίκτυα IEEE-14 και -57.

Πίνακας 6 Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου των Haghghatfar et al.

Δίκτυο	Θέσεις PMU (Αριθμός εγκατεστημένων PDU)	Θέσεις PDC (Αριθμός εγκατεστημένων PDC)	Συνολικός υπολογιστικός χρόνος (s)
IEEE-14	2,6,9 (3)	5 (1)	123.06
IEEE-57	1, 4, 9, 20, 25, 29, 32, 38, 46, 50, 54, 56 (12)	7,9,25,38 (4)	511.02
IEEE-118	2, 8, 11, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 114, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 71, 75, 77, 80, 84, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110 (30)	5, 35, 39, 54, 70, 84, 104 (7)	1845.56



Εικόνα 25 Γραφική αποτύπωση λύσης για το δίκτυο IEEE-14



Εικόνα 26 Γραφική αποτύπωση λύσης για το δίκτυο IEEE-57

4.6 Σύγκριση εξεταζόμενων αλγορίθμων

Με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των επιμέρους μεθόδων, είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση τους.

Ο πίνακας 7 παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα των τριών δικτύων που εξετάστηκαν από την εκάστοτε μέθοδο.

Μέθοδος	Δίκτυο	Θέσεις PMU (Αριθμός εγκατεστημένων PDU)	Θέσεις PDC (Αριθμός εγκατεστημένων PDC)	Συνολικός υπολογιστικός χρόνος (s)
Bronsle & Jungare (καλύτερη λύση)	IEEE-14	2,6,9 (3)	5 (1)	108.28
Haghighatfar et al.		2,6,9 (3)	5 (1)	123.06
Bronsle & Jungare (καλύτερη λύση)	IEEE-57	2,6,12,19,22,27,31,33,34,37,43,45,46,50,53,56 (16)	9,25,38 (3)	482.64
Haghighatfar et al.		1, 4, 9, 20, 25, 29, 32, 38, 46, 50, 54, 56 (12)	7,9,25,38 (4)	511.02
Bronsle & Jungare (καλύτερη λύση)	IEEE-118	2, 8, 11, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 114, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 71, 75, 77, 80, 84, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110 (30)	5, 35, 39, 54, 70, 84, 104 (7)	1512.36
Haghighatfar et al.		2, 8, 11, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 114, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 71, 75, 77, 80, 84, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110 (30)	5, 35, 39, 54, 70, 84, 104 (7)	1845.56

Ξεκινώντας με το δίκτυο IEEE-14, και οι δύο μέθοδοι επιλέγουν τις ίδιες θέσεις για τις PMU και PDC. Η μέθοδος Bronsle & Jungare τοποθετεί τις PMU στις θέσεις 2, 6 και 9, και τις PDC στη θέση 5, χρησιμοποιώντας συνολικά τρεις PMU και μία PDC. Η μέθοδος Haghighatfar et al. επιλέγει τις ίδιες θέσεις, αλλά ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος της είναι μεγαλύτερος. Συγκεκριμένα, η μέθοδος Bronsle & Jungare έχει υπολογιστικό χρόνο 108.28 δευτερόλεπτα, ενώ η μέθοδος Haghighatfar et al. έχει υπολογιστικό χρόνο 123.06 δευτερόλεπτα. Αυτό υποδεικνύει ότι η μέθοδος με τον γενετικό αλγόριθμο είναι πιο αποδοτική από άποψη ταχύτητας για το δίκτυο IEEE-14.

Για το δίκτυο IEEE-57, οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων είναι πιο εμφανείς. Η μέθοδος Bronsle & Jungare τοποθετεί τις PMU στις θέσεις 2, 6, 12, 19, 22, 27, 31, 33, 34, 37, 43, 45, 46, 50, 53 και 56, ενώ οι PDC τοποθετούνται στις θέσεις 9, 25 και 38. Αυτή η λύση χρησιμοποιεί συνολικά 16 PMU και τρεις PDC, και ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος είναι 482.64 δευτερόλεπτα. Αντίθετα, η μέθοδος Haghighatfar et al. επιλέγει διαφορετικές θέσεις για τις PMU, συγκεκριμένα στις θέσεις 1,

4, 9, 20, 25, 29, 32, 38, 46, 50, 54 και 56, ενώ οι PDC τοποθετούνται στις θέσεις 7, 9, 25 και 38. Αυτή η λύση χρησιμοποιεί συνολικά 12 PMU και τέσσερις PDC, και ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος είναι 511.02 δευτερόλεπτα. Παρατηρείται ότι η μέθοδος Bronsle & Jungare απαιτεί περισσότερες PMU αλλά λιγότερες θέσεις για PDC, και είναι επίσης ταχύτερη από τη μέθοδο Haghghatfar et al.

Στο δίκτυο IEEE-118, οι δύο μέθοδοι επιλέγουν ακριβώς τις ίδιες θέσεις για τις PMU και PDC. Οι PMU τοποθετούνται στις θέσεις 2, 8, 11, 12, 15, 17, 20, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 71, 75, 77, 80, 84, 86, 89, 92, 96, 100, 105 και 110, και οι PDC τοποθετούνται στις θέσεις 5, 35, 39, 54, 70, 84 και 104. Και οι δύο λύσεις χρησιμοποιούν συνολικά 30 PMU και επτά PDC. Ωστόσο, η μέθοδος Bronsle & Jungare έχει συνολικό υπολογιστικό χρόνο 1512.36 δευτερόλεπτα, ενώ η μέθοδος Haghghatfar et al. χρειάζεται 1845.56 δευτερόλεπτα.

Η πρώτη μέθοδος, που χρησιμοποιεί γενετικό αλγόριθμο, είναι αξιοσημείωτη για τη στοχαστική της φύση, η οποία απαιτεί πολλαπλά τρεξίματα για την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο γενετικός αλγόριθμος, λόγω της τυχαίας εξελικτικής διαδικασίας που ακολουθεί, βασίζεται σε ένα πλήθος τρεξιμάτων για να εξερευνήσει τον χώρο των πιθανών λύσεων και να φτάσει στην καλύτερη δυνατή απόδοση. Αυτό σημαίνει ότι, αν και οι καλύτερες λύσεις προκύπτουν σε μικρότερο χρόνο σε σχέση με τη δεύτερη μέθοδο, που είναι πιο εξαντλητική, ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία μπορεί να είναι μεγαλύτερος.

Η δεύτερη μέθοδος, που χρησιμοποιεί έναν πιο εξαντλητικό μαθηματικό αλγόριθμο, τείνει να εξετάζει συστηματικά όλες τις πιθανές λύσεις ή ένα πολύ μεγάλο υποσύνολο αυτών, επιδιώκοντας να βρει τη βέλτιστη λύση χωρίς την ανάγκη πολλαπλών τρεξιμάτων. Αυτό σημαίνει ότι, ενώ η δεύτερη μέθοδος μπορεί να χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να βρει την καλύτερη λύση σε μία μεμονωμένη εκτέλεση, ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος για την επίτευξη της βέλτιστης λύσης είναι τελικά μικρότερος, καθώς δεν απαιτούνται επανειλημμένες εκτελέσεις.

Επιπλέον, λόγω της στοχαστικής φύσης του γενετικού αλγορίθμου, δεν υπάρχει εγγύηση ότι κάθε τρέξιμο θα αποφέρει την απόλυτα βέλτιστη λύση. Αντιθέτως, συχνά προκύπτουν υπό-βέλτιστες λύσεις, οι οποίες, ενώ είναι πολύ καλές, δεν είναι οι καλύτερες δυνατές. Αυτό αυξάνει την ανάγκη για μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων, ώστε να αυξηθεί η πιθανότητα εύρεσης της πραγματικά βέλτιστης λύσης.

Το πρόβλημα της στοχαστικής φύσης του γενετικού αλγορίθμου και η τάση του να καταλήγει σε υπό-βέλτιστες λύσεις αναδεικνύεται σαφώς στην περίπτωση του δικτύου IEEE-57. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μέθοδος Bronsle & Jungare, που χρησιμοποιεί τον γενετικό αλγόριθμο, δεν καταφέρνει να βρει την πραγματικά βέλτιστη λύση, σε αντίθεση με τη μέθοδο Haghghatfar et al., η οποία χρησιμοποιεί έναν πιο εξαντλητικό μαθηματικό αλγόριθμο.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος Bronsle & Jungare τοποθετεί τις PMU στις θέσεις 2, 6, 12, 19, 22, 27, 31, 33, 34, 37, 43, 45, 46, 50, 53 και 56, με συνολικά 16 PMU, και τις PDC στις θέσεις 9, 25 και 38, με συνολικά 3 PDC. Ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος για αυτή τη λύση είναι 482.64 δευτερόλεπτα. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Haghghatfar et al. τοποθετεί τις PMU στις θέσεις 1, 4, 9, 20, 25, 29, 32, 38, 46, 50, 54 και 56, με συνολικά 12 PMU, και τις PDC στις θέσεις 7, 9, 25 και 38, με συνολικά 4 PDC, έχοντας συνολικό υπολογιστικό χρόνο 511.02 δευτερόλεπτα.

Αν και ο γενετικός αλγόριθμος της μεθόδου Bronsle & Jungare φτάνει σε μια λύση με μικρότερο υπολογιστικό χρόνο, αυτή η λύση δεν είναι η βέλτιστη. Η μέθοδος Haghghatfar et al., που είναι πιο εξαντλητική και συστηματική, καταφέρνει να βρει τη βέλτιστη λύση, η οποία χρησιμοποιεί λιγότερες PMU (12 αντί για 16) και περισσότερες PDC (4 αντί για 3). Αυτή η βέλτιστη λύση εξασφαλίζει

μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην κατανομή των πόρων, κάτι που είναι κρίσιμο για τη λειτουργία του δικτύου.

Η αποτυχία του γενετικού αλγορίθμου να εντοπίσει τη βέλτιστη λύση στο δίκτυο IEEE-57 αναδεικνύει το βασικό μειονέκτημά του. Λόγω της στοχαστικής του φύσης, οι λύσεις που παράγονται από τον γενετικό αλγόριθμο μπορεί να μην είναι πάντα οι καλύτερες δυνατές. Η τυχαιότητα στην επιλογή και εξέλιξη των λύσεων οδηγεί συχνά σε τοπικά βέλτιστες λύσεις που δεν αντιστοιχούν στην πραγματική βέλτιστη λύση για το σύστημα. Αυτό συμβαίνει επειδή ο γενετικός αλγόριθμος αναζητά τη βέλτιστη λύση μέσα από μια διαδικασία επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης, η οποία βασίζεται σε πιθανότητες και όχι σε εξαντλητική ανάλυση όλων των πιθανών λύσεων.

Στην περίπτωση του IEEE-57, η μέθοδος Bronsle & Jungare κατέληξε σε μια υπό-βέλτιστη λύση με μεγαλύτερο αριθμό PMU, κάτι που υποδεικνύει ότι δεν διερεύνησε επαρκώς όλες τις πιθανές διατάξεις για να βρει τη βέλτιστη κατανομή των μετρητικών μονάδων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος Haghghatfar et al., με τη συστηματική και εξαντλητική προσέγγισή της, εξετάζει όλες τις πιθανές λύσεις ή ένα πολύ μεγάλο υποσύνολο αυτών, διασφαλίζοντας ότι η λύση που επιλέγεται είναι πραγματικά η βέλτιστη.

Η περίπτωση του IEEE-57 αποτελεί μια σαφή ένδειξη ότι ενώ οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να παρέχουν καλές λύσεις σε μικρότερο χρόνο, δεν εγγυώνται πάντοτε την απόλυτα βέλτιστη λύση. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι χρήσιμοι για την αντιμετώπιση προβλημάτων με μεγάλο χώρο λύσεων, όπου μια εξαντλητική αναζήτηση είναι πρακτικά αδύνατη ή εξαιρετικά χρονοβόρα. Ωστόσο, για προβλήματα όπου η βέλτιστη λύση είναι κρίσιμη και η εξαντλητική αναζήτηση είναι εφικτή, οι πιο συστηματικές μέθοδοι, όπως ο μαθηματικός αλγόριθμος της μεθόδου Haghghatfar et al., είναι πιο κατάλληλες, καθώς διασφαλίζουν την εύρεση της πραγματικής βέλτιστης λύσης.

Συνεπώς, η χρήση γενετικού αλγορίθμου απαιτεί την εκτέλεση πολλαπλών προσομοιώσεων για να διασφαλιστεί η εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης. Κάθε προσομοίωση μπορεί να δώσει διαφορετικό αποτέλεσμα λόγω της τυχαίας φύσης του αλγορίθμου, και έτσι, για να επιτευχθεί μια υψηλής ποιότητας λύση, είναι αναγκαίο να εκτελεστούν πολλές φορές οι προσομοιώσεις.

Συμπερασματικά, η μέθοδος με τον γενετικό αλγόριθμο, ενώ μπορεί να προσφέρει βέλτιστες λύσεις σε μικρότερο χρόνο ανά τρέξιμο, απαιτεί μεγαλύτερο συνολικό υπολογιστικό χρόνο λόγω της ανάγκης για πολλαπλές εκτελέσεις. Η στοχαστική φύση του γενετικού αλγορίθμου, αν και ισχυρή στην εξερεύνηση του χώρου λύσεων, συνεπάγεται ότι η επίτευξη της πραγματικά βέλτιστης λύσης απαιτεί σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων, καθιστώντας τη διαδικασία πιο χρονοβόρα σε σύγκριση με την πιο εξαντλητική αλλά απευθείας μέθοδο του μαθηματικού αλγορίθμου.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βέλτιστη τοποθέτηση PMU και PDC σε WAMS αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης και ανίχνευσης ανωμαλιών και εκτάκτων καταστάσεων, η βέλτιστη τοποθέτηση PMU και PDC επιτρέπει την άμεση αντίδραση και τη λήψη αποφάσεων για την πρόληψη ή την αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων στο δίκτυο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατανόηση των υφιστάμενων προσεγγίσεων και αλγορίθμων. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικοί αλγόριθμοι στο περιβάλλον του Matlab, όπου πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση και η σύγκρισή τους.

Τελικά, από τις παρατηρήσεις μας προκύπτει ότι το πρώτο μοντέλο παρουσιάζει απλότητα στη χρήση και την εφαρμογή του, αλλά απαιτεί τη χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης όπως ο γενετικός αλγόριθμος λόγω του μεγάλου χώρου λύσεων. Αντίθετα, το δεύτερο μοντέλο προσφέρει έναν εξαντλητικό έλεγχο του χώρου λύσεων, παρουσιάζοντας σιγουριά στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, αν και καθυστερεί κάπως λόγω του αυξημένου χρόνου εκτέλεσης. Συνολικά, οι δύο προσεγγίσεις παρέχουν σημαντική εναλλακτική και επιλογή στον τομέα της βέλτιστης τοποθέτησης PMU και PDC σε WAMS, επιτρέποντας την επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προτεραιότητες του κάθε συγκεκριμένου περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1]. Kamran, Muhammad. *Fundamentals of smart grid systems*. Elsevier, 2022.
- [2]. Hauer J., Trudnowski D., Rogers G., Mittelstadt B., Litzenberger W., Johnson J. ‘Keeping an eye on power system dynamics’. *IEEE Computer Applications in Power*. 1997, vol. 10(4), pp. 50–4.
- [3]. Phadke A.G., Volskis H., de Moraes R.M., et al. ‘The wide world of wide-area measurement’. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2008, vol. 6(5), pp. 52–65.
- [4]. Terzija V., Wall P., Dattaray P., et al. ‘Deployment and demonstration of wide area monitoring system in power system of great Britain’. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016, vol. 4(3), pp. 506–18.
- [5]. Cai D., Wall P., Osborne M., Terzija V. ‘Roadmap for the deployment of WAMPAC in the future GB power system’. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2016, vol. 10(7), pp. 1553–62.
- [6]. Santos L.F.D., Antonova G., Larsson M., Fujii S. ‘The use of synchrophasors for wide area monitoring of electrical power grids’. *Actual Trends in Development of Power System Protection and Automation Yekaterinburg*. 2013, pp. 03.06–7.
- [7]. Wen J., Liu W.-H.E., Arons P.L., Pandey S.K. ‘Evolution pathway towards wide area monitoring and protection—a real-world implementation of centralized RAS system’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2014, vol. 5(3), pp. 1506–13.
- [8]. Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V. ‘Power electronics and power systems series’. *Applications of Time-Synchronized Measurements in Power Transmission Networks*. Switzerland, New York, NY: Springer; 2014.
- [9]. Giri J., Parashar M., Trehern J., Madani V. ‘The situation room: control center analytics for enhanced situational awareness’. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2012, vol. 10(5), pp. 24–39.
- [10]. Novosel D., Madani V., Bhargava B., Vu K., Cole J. ‘Dawn of the grid synchronization – benefits, practical implementations, and deployment strategies for wide-area monitoring, protection, and control’. *IEEE Power & Energy Magazine*. 2008, pp. 49–60.
- [11]. Begovic M., Novosel D., Karlsson D., Henville C., Michel G. ‘Wide-area protection and emergency control’. *Proceedings of the IEEE*. 2005, vol. 93(5), pp. 876–91.
- [12]. Kincic S., Wangen B., Mittelstadt W.A., Perez L. ‘Impact of massive synchrophasor deployment on reliability coordination and reporting’. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting; San Diego, CA; Jul 2012*.
- [13]. Li K., Guo Y., Laverty D., He H., Fei M. ‘Distributed adaptive learning framework for wide area monitoring of power systems integrated with distributed generations’. *Energy and Power Engineering*. 2013, vol. 5(4), pp. 962–9.
- [14]. Wright P.S., Davis P.N., Johnstone K., Rietveld G., Roscoe A.J. ‘Field testing of RoCof algorithms in multiple locations in Bornholm island’. *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018); Paris, France; 2018*.
- [15]. Phadke G., Thorp J.S. *Synchronized Phasor Measurements and their Applications*. New York, NY: Springer; 2008.

- [16]. Cirio D., Lucarella D., Giannuzzi G., Tuosto F. ‘Wide area monitoring in the Italian power system: architecture, functions and experiences’. *European Transactions on Electrical Power*. 2011, vol. 21(4), pp. 1541–56.
- [17]. Hauer J.F., Vakili F. ‘An oscillation detector used in the BPA power system disturbance monitor’. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1990, vol. 5(1), pp. 74–9.
- [18]. Terzija V., Valverde G., Cai D. ‘Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks’. *Proceedings of the IEEE*. 2010, vol. 99(1), pp. 80–93.
- [19]. Atanackovic D., Clapauch J.H., Greg D., Gurney J. ‘First steps to wide area control – implementation of synchronized phasors in control center real-time applications’. *IEEE Power & Energy Magazine*. 2008, pp. 61–8.
- [20]. Giri J., Sun D., Avila-Rosales R. ‘Wanted: a more intelligent grid’. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2009, vol. 7(2), pp. 34–40.
- [21]. Schweitzer S.E.O, III., Whitehead D.E. ‘Real-world synchrophasor’. 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers; College Station, TX; March–April 2009.
- [22]. Holbert K.E., Heydt G.I., Hui Ni. ‘Use of satellite technologies for power system measurements, command, and control’. *Proceedings of the IEEE*. 2005, vol. 93(5), pp. 947–55.
- [23]. Wan Y.H. Synchronized Phasor Data for Analyzing Wind Power Plant Dynamic Behavior and Model Validation. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-5500-57342; January 2013.
- [24]. Harding P.J., Varghese A., Bharat R., Gillies A., Lloyd G. ‘Implementation of a wide area monitoring scheme for the Indian power system’. 13th International Conference on Development in Power System Protection 2016 (DPSP); Edinburgh, UK; 2016.
- [25]. Béland J., Benmouyal G., Boroczky S., CIGRE Working Group C4.601. Wide Area Monitoring and Control for Transmission Capability Enhancement. Technical Brochure 330. Paris; 2007.
- [26]. Appasani, B., & Mohanta, D. K. (2018). A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications. *Protection and control of modern power systems*, 3(4), 1-17.
- [27]. Georges D. ‘Optimal design of a PMU-based monitoring architecture for power systems’. *IFAC Proceedings Volumes*. 2012, vol. 45(21), pp. 478–83.
- [28]. Castillo A., Messina A.R. ‘Data-driven sensor placement for state reconstruction via pod analysis’. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020, vol. 14(4), pp. 656–64.
- [29]. Manohar K., Brunton B.W., Nathan Kutz J., Brunton S.L. ‘Data-driven sparse sensor placement for reconstruction’. *IEEE Control Systems Magazine*. 2018, vol. 38(3), pp. 63–86.
- [30]. Madani V., Parashar M., Giri J., Sheble G. PMU placement considerations – a roadmap for optimal PMU placement. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*; Phoenix, AZ; 2011.
- [31]. Alonso A.A., Kevrekidis I.G., Banga J.R., Frouzakis C.E. ‘Optimal sensor location and reduced order observer design for distributed process systems’. *Computers & Chemical Engineering*. 2004, vol. 28(1–2), pp. 27–35.
- [32]. Benjamin Erichson N., Mathelin L., Yao Z., Brunton S., Mahoney M., Nathan Kutz J. ‘Shallow neural networks for fluid flow reconstruction with limited sensors’. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*; 2020.

- [33]. Golpira H., Messina A.R., Hassan B. *Renewable Integrated Power System Stability and Control*. Hoboken, NJ: IEEE-Wiley Press; 2022.
- [34]. Nabavi S., Zhang J., Chakraborty A. ‘Distributed optimization algorithms for wide-area oscillation monitoring in power systems using Interregional PMU-PDC architectures’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015, vol. 6(5), pp. 2529–38.
- [35]. Taylor G.A., Irving M.R., Hobson P.R., Huang C. ‘Distributed monitoring and control of future power systems via grid computing’. Presented at the 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting; Canada; 2006.
- [36]. Taylor G.A., Irving M.R., Hobson P.R., Huang C., Kyberd P., Taylor R.J. ‘Distributed monitoring and control of future power systems with grid computing’. *IEEE Power Engineering Society General Meeting; QC, Canada*; 2006.
- [37]. Shahraeini M., Javidi M.H., Ghazizadeh M.S. ‘Comparison between communication Infrastructures of centralized and decentralized wide area measurement systems’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2011, vol. 2(1), pp. 206–11.
- [38]. Simpson-Porco J.W., Bullo F. ‘Distributed monitoring of voltage collapse sensitivity indices’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, vol. 7(4), pp. 1979–88.
- [39]. Román-Messina A., Castillo-Tapia A., Román-García D.A., et al. ‘Distributed monitoring of power system oscillations using multiblock principal component analysis and higher-order singular value decomposition’. *Journal of Modern Power Grids*. 2022, pp. 1–12.
- [40]. Zhong Z., Xu C., Billian B.J., et al. ‘Power system frequency monitoring network (FNET) implementation’. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005, vol. 20(4), pp. 1914–21.
- [41]. Zhang Y., Markham P., Xia T., et al. ‘Wide-area frequency monitoring network (FNET) architecture and applications’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010, vol. 1(2), pp. 159–67.
- [42]. Wang W., Sun K., Chen C., Liu Y. *Advanced synchrophasor-based application for potential distributed energy resources management: key technology, challenge and vision*. *IEEE IAS Industrial and Commercial Power System Asia Technical Conference*; 2020.
- [43]. Zhao J., Zhan L., Yin H., Li F., Yao W., Liu Y. ‘Recent development of frequency estimation methods for future smart grid’. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*. 2020, vol. 7, pp. 354–65.
- [44]. Shuman D.I., Narang S.K., Frossard P., Ortega A., Vandergheynst P. ‘The emerging field of signal processing on graphs’. *IEEE Signal Process. Magazine*. May 2013, vol. 30(3), pp. 83–98.
- [45]. Aolaritei L., Bolognani S., Dörfler F. ‘Hierarchical and distributed monitoring of voltage stability in distribution networks’. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018, vol. 33(6), pp. 6705–14.
- [46]. Benson N.C., Daggett V. ‘A chemical group graph representation for efficient high-throughput analysis of atomistic protein simulations’. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*. 2012, vol. 10(4), 1250008.
- [47]. Randles M., Taleb-Bendiab A. *Monitoring and observation for large scale complex systems using network graphs*. 2011 *Developments in E-systems Engineering, IEEE*; Dubai, UAE, December 2011; 2011. pp. 535–40 pp..
- [48]. Wu W., Song C., Liu J., Zhao J. ‘Data-knowledge-driven distributed monitoring for large-scale processes based on digraph’. *Journal of Process Control*. 2022, vol. 109(29), pp. 60–73.
- [49]. Schmid C., Wattenhofer. in Boukerche A. (ed.) *Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc; 2008.

- [50]. El Karoui N., Wu H.-T. ‘Graph connection Laplacian methods can be made robust to noise’. *The Annals of Statistics*. 2016, vol. 44(1), pp. 346–72.
- [51]. Wall P., Dattaray P., Jin Z., et al. ‘Deployment and demonstration of wide area monitoring system in power system of great Britain’. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016, vol. 4(3), pp. 506–18.
- [52]. Talmon R., Cohen I., Gannot S., Coifman R.R. ‘Diffusion maps for signal processing’. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2013, pp. 75–86.
- [53]. Thimmisetty C.A., Ghanem R.G., White J.A., Chen X. ‘High-dimensional intrinsic interpolation using Gaussian process regression and diffusion maps’. *Mathematical Geosciences*. 2018, vol. 50(1), pp. 77–96.
- [54]. Roy S., Xue M., Sundaram S. ‘Graph-theoretic analysis of estimators for stochastically-driven diffusive network processes’. *Annual American Control Conference (ACC)*; Milwaukee, MI; June 2018.
- [55]. Phadke A.G., Wall P., Ding L., Terzija V. ‘Improving the performance of power system protection using wide area monitoring systems’. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2016, vol. 4(3), pp. 319–31.
- [56]. Zhang P., Li F., Bhatt N. ‘Next-generation monitoring, analysis, and control for the future smart control center’. *IEEE Transactions on Smart Grid*. September 2010, vol. 1(2), pp. 186–92.
- [57]. Bhatt N.B. ‘Role of synchrophasor technology in the development of a smarter transmission grid’. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*; Minneapolis, MN, USA; July 2010.
- [58]. Reliability considerations from integration of smart grid - the reliability of the bulk power system. Princeton, NJ, USA: North American Electric Reliability Corporation (NERC); December 2010. pp. 1–137. pp.
- [59]. Thomopoulos S.C.A. ‘Sensor selectivity and intelligent data fusion’. *International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*; Las Vegas, NV; 1994.
- [60]. Savopol F., Armenakis C. ‘Merging of heterogeneous data for emergency mapping: data integration or data fusion?’ *Proceedings of ISPRS*; Ottawa, ON; 2002.
- [61]. Ardnt C. ‘Information gained by data fusion’. *Proceedings of SPIE*; 1996. pp. 32–40.
- [62]. Roman-Messina A. *Data fusion and data mining for power system monitoring*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2020.
- [63]. Callahan J., Maeda K., Brunton S.L. ‘Robust reconstruction of flow fields from limited measurements’. *Physical Review Fluid*. 2019, vol. 4(10), p. 103907.
- [64]. Yu J., Hesthaven J.S. ‘Flowfield reconstruction method using artificial neural network’. *AIAA Journal*. 2019, vol. 57(2), pp. 482–98.
- [65]. Allen A., Santoso S., Muljadi E. *Algorithm for Screening Phasor Measurement Unit Data for Power System Events and Categories and Common Characteristics for Events Seen in Phasor Measurement Unit Relative Phase-Angle Differences and Frequency Signals*. Technical Report, NREL/TP-5500-58611; 2013.
- [66]. Dahal O.P., Brahma S.M. ‘Preliminary work to classify the disturbance events recorded by phasor measurement units’. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*; San Diego, CA; Jul 2012.

- [67]. Lee J.A., Verleysen M. (eds.). Information science and statistics. Nonlinear Dimensionality Reduction. New York: Springer; 2007.
- [68]. Barocio E., Pal B.C., Thornhill N.F., Messina A.R. ‘A dynamic mode decomposition framework for global power system oscillation analysis’. IEEE Transactions on Power Systems. 2015, vol. 30(6), pp. 2902–12.
- [69]. Sandoval B., Barocio E., Korba P., Sevilla F.R.S. ‘Three-way unsupervised data mining for power system applications based on tensor decomposition’. Electric Power Systems Research. 2020, vol. 187(3), p. 106431.
- [70]. Osipov D., Chow J.H. ‘PMU missing data recovery using tensor decomposition’. IEEE Transactions on Power Systems. 2020, vol. 35(6), pp. 4554–63.
- [71]. Zhang Y. ‘Trajectory data mining: an overview’. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology. 2015, vol. 6(3), pp. 1–29.
- [72]. Boem F., Ferrari R.M.G., Keliris C., Parisini T., Polycarpou M.M. ‘A distributed networked approach for fault detection of large-scale systems’. IEEE Transactions on Automatic Control. 2017, vol. 62(1), pp. 18–33
- [73]. Messina, A. R.. *Wide area monitoring of interconnected power systems* (No. 10847). IET, 2022.
- [74]. Steinmetz CP. Complex quantities and their use in electrical engineering. In: Proceedings of the international electrical congress. AIEE; 1893. p. 33–74.
- [75]. IEEE standard for synchrophasors for power systems. IEEE Std 1344-1995(R2001); 1995. <http://dx.doi.org/doi:10.1109/IEEESTD.1995.93278>.
- [76]. IEEE standard for synchrophasors for power systems. IEEE Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995); 2006. p. 0_1–57. <http://dx.doi.org/doi:10.1109/IEEESTD.2006.99376>.
- [77]. IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems. IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005); 2011. p. 1–61.
- [78]. IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems—amendment 1: modification of selected performance requirements. IEEE Std C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std C37.118.1-2011); 2014. p. 1–25. <http://dx.doi.org/doi:10.1109/IEEESTD.2014.6804630>.
- [79]. IEEE standard for synchrophasor data transfer for power systems. IEEE Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005); 2011. p. 1–53. <http://dx.doi.org/doi:10.1109/IEEESTD.2011.6111222>.
- [80]. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks. Standard EN 50160:2010-07, CENELEC, Brussels, Belgium.
- [81]. Phadke AG, Thorp JS. Synchronized phasor measurements and their applications. Springer US; 2008.
- [82]. Kundur P, Paserba J, Ajjarapu V, Andersson G, Bose A, Canizares C, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. IEEE Trans Power Syst 2004;19(3):1387–401.
- [83]. Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply system. IEC Standard 61000-2-1 Std; 1990.
- [84]. Castello P, Lixia M, Muscas C, Pegoraro PA. Impact of the model on the accuracy of synchrophasor measurement. IEEE Trans Instrum Measur 2012;61(8):2179–88. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2193699>.

- [85]. N. M. Manousakis, G. N. Korres and P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU Placement Methodologies," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 2, pp. 1070-1077, May 2012.
- [86]. N. M. Manousakis, G. N. Korres and P. S. Georgilakis, "A detailed bibliographic analysis of optimal PMU placement problem in conventional and smart grids," MedPower 2014, Athens, 2014, pp. 1-6.
- [87]. N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis and G. N. Korres, "Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 7, no. 4, pp. 347-356, Apr. 2013.
- [88]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "A Weighted Least Squares Algorithm for Optimal PMU Placement," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3499-3500, Aug. 2013.
- [89]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal placement of PMUS considering scada measurements and fixed channel capacity by semidefinite programming," MedPower 2014, Athens, 2014, pp. 1-6.
- [90]. G. N. Korres, N. M. Manousakis, T. C. Xygkis and J. Löfberg, "Optimal phasor measurement unit placement for numerical observability in the presence of conventional measurements using semi-definite programming," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 15, pp. 2427-2436, Nov. 2015.
- [91]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal PMU Placement for Numerical Observability Considering Fixed Channel Capacity—A Semidefinite Programming Approach," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 4, pp. 3328-3329, Jul. 2016.
- [92]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Semidefinite programming for optimal placement of PMUs with channel limits considering pre-existing SCADA and PMU measurements," 2016 Power Systems Computation Conference (PSCC), Genoa, 2016.
- [93]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "An Advanced Measurement Placement Method for Power System Observability Using Semidefinite Programming," in IEEE Systems Journal, vol. 12, no. 3, pp. 2601-2609, Sep. 2018.
- [94]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Substation-oriented PMU placement considering transformer tap settings," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), ATHENS, Greece, 2018, pp. 1-4.
- [95]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal Allocation of Phasor Measurement Units Considering Various Contingencies and Measurement Redundancy," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 6, pp. 3403-3411, Jun. 2020.
- [96]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal PMU arrangement considering limited channel capacity and transformer tap settings, " in IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1951.
- [97]. N. M. Manousakis, T. C. Xygkis and G. N. Korres, "Synchrophasor applications using conic optimization," 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Limassol, 2018, pp. 1-6
- [98]. Monti, A., Muscas, C., & Ponci, F. *Phasor measurement units and wide area monitoring systems*. Academic Press. 2016
- [99]. BHONSLE, J. S.; JUNGHARE, A. S. An optimal PMU-PDC placement technique in wide area measurement system. In: *2015 International Conference on Smart Technologies*

- and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*. IEEE, 2015. p. 401-405.
- [100]. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements," in *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1514-1524, Jul. 2011.
- [101]. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "A state estimator including conventional and synchronized phasor measurements," in *Computers & Electrical Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 294-305, Mar. 2012.
- [102]. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 9, pp. 902-913, Sep. 2012.
- [103]. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Observability analysis and restoration for state estimation using SCADA and PMU data," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8.
- [104]. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "A state estimation algorithm for monitoring topology changes in distribution systems," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8.
- [105]. N. M. Manousakis and G.N. Korres, "Observability analysis and restoration for systems with conventional and phasor measurements," in *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 1548-1566, Nov. 2013.
- [106]. N. M. Manousakis, G. N. Korres, J. N. Aliprantis, G. P. Vavourakis and G. J. Makrinas, "A two-stage state estimator for power systems with PMU and SCADA measurements," 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013, pp. 1-6.
- [107]. J. Zhao, G. Zhang, K. Das, G. N. Korres, N. M. Manousakis, A. K. Sinha and Z. He, "Power System Real-Time Monitoring by Using PMU-Based Robust State Estimation Method," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 300-309, Jan. 2016.
- [108]. N. M. Manousakis and G. N. Korres, "A hybrid power system state estimator using synchronized and unsynchronized sensors," in *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 8, pp. 1-19, Aug. 2018.
- [109]. T. A. Alexopoulos, G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Complementarity reformulations for false data injection attacks on PMU-only state estimation," in *Electric Power Systems Research*, vol. 189, Dec. 2020, doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106796.

Παράρτημα Α: Αλγόριθμοί εύρεσης βέλτιστης λύσης για το μοντέλο της εργασίας των Bronsle & Jungare [85]

Βασικός κώδικας (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%PMU and PDC Optimal Placement using GA
clc, clear, close all
clear global
warning ('off', 'all');

%% Design inputs
%set case: Case 1=IEEE-14, Case2=IEEE-57, Case3=IEEE-118
prompt1= 'Please define case 1,2,or 3 (Case 1=IEEE-14, Case2=IEEE-57,
Case3=IEEE-118))' ;
cases=input(prompt1);
if cases==1
    mpc=case14;
elseif cases==2
    mpc=case57;
elseif cases==3
    mpc=case118;
end

%Get system vertices number
Vert=mpc.bus(end,1);
Cons=mpc.branch(:,1:2);

%generate system binary connectivity matrix
for i=1:size(Cons,1)
    A(Cons(i,1),Cons(i,2))=1;
    A(Cons(i,2),Cons(i,1))=1;
end

for i=1:size(A,1)
    A(i,i)=1;
end

%%Intitalize GA Parameters

maxGen=10000; %Maximun generations number
popsize=10000; %Population size
pcross=0.9; %Crossover Probability
pm=0.6; %Mutation Probability

%%Set GA run specifics

%% Initialize population

[gen]=creategeneration(popsize,Vert);
[fitness,object]=fitnessfunct(gen,A);

[bestObj(1),index]=min(object); %find gene with minimum fitness value
bestGen=gen(index,:); %best initial population
[worstObj(1),index1]=max(object); %find gene with maximum fitness value
worstGen=gen(index1,:); %worst inital population
avgObj(1)=0;
for k=1:popsize
```

```

avgObj(1)=avgObj(1)+object(k);
end
avgObj(1)=avgObj(1)/popsize; %mean value of fitness

%start the algorithm
flagout=0;
%for i=1:maxGen
i=0;
while i<=maxGen && flagout<=100
    i=i+1
    [gen]=reproduction(gen,fitness); %reproduction
    [gen]=crossover(gen,pcross); %crossover
    [gen]=mutation1(gen,pm); %mutation1
    [fitness,object]=fitnessfunct(gen,A);
    %find minimum,maximum and average fitness
    [bestCurObj,index]=min(object);
    bestCurGen=gen(index,:);
    [worstObj(i+1),index1]=max(object);
    worstCurGen=gen(index1,:);
    avgObj(i+1)=0;
    for k=1:popsize
    avgObj(i+1)=avgObj(i+1)+object(k);
    end
    avgObj(i+1)=avgObj(i+1)/popsize; %calculate average value of objective function
    if bestCurObj<bestObj(i) %Apply elitist strategy for minimization (set new best
    gene if existing)
    bestGen=bestCurGen;
    % object(index)=bestObj(i);
    bestObj(i+1)=bestCurObj;
    elseif bestCurObj>=bestObj(i) %Apply elitist strategy for minimization (keep
    best gene if no change is achieved)
    bestGen=bestGen;
    bestObj(i+1)=bestObj(i);
    end
    bestGen %Display current best gen
    bestObj(i+1) %Display current best fitness value
    if abs(bestObj(i+1)-bestObj(i)<0.00001)
        flagout=flagout+1;
    else
        flagout=0;
    end
end
end

pmc_loc=ga_main3(Vert,A,bestGen);

%plot results
G=graph(A);
pl=plot(G);
hold on
for i=1:length(bestGen)
    if bestGen(i)==1
        highlight(pl,i);
    end
end
hold on
for i=1:length(bestGen)
    if pmc_loc(i)==1
        highlight(pl,i,'NodeColor','g');
    end
end
end

```

```
hold off
```

Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%%Function to create initial GA generation
function [gen]=creategeneration(popsize,Vert)

for i=1:popsize
    for j=1:Vert
        gen(i,j)=randi([0,1]); %generate random PMU position vector (1: exists,
0: doesn;t exist)
    end
end
```

Συνάρτηση υπολογισμού τιμής αντικειμενικής συνάρτησης (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%%Function to calculate fitness function value

function [fitness,object]=fitnessfunct(gen,A)

%create b matrix for consition examination
b=ones(size(A,1),1);

for i=1:size(gen,1)
    if A*gen(i,:) '>=b %observability condition (Cruz equation 2)
        object(i)=sum(gen(i,:)); %objective function (Cruz equation 1, with
weights =1)
        fitness(i)=object(i); %fitness function
    else
        object(i)=10^9; %"punish" genes that lead to a non observable solution
        fitness(i)=object(i); %fitness function
    end
end
```

Συνάρτηση αναπαραγωγής (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%Reproduction fuction of the GA (Roulette wheel)

function [newGen]=reproduction(oldGen,fitness)

if sum(fitness)==0
    newGen=oldGen;
else

normFit=fitness/sum(fitness);
selected=rand(size(fitness));
sumFit=0;
for i=1:length(fitness)
    sumFit=sumFit+normFit(i);
    index=find(selected<sumFit);
```

```
selected(index)=i*ones(size(index));  
end  
  
newGen=oldGen(selected,:);  
end
```

Συνάρτηση Crossover (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%crossover function of the GA  
  
function newGen=crossover(gen,pcross)  
%select genes for crossover  
crossovered=find(rand(size(gen,1),1)<pcross);  
newGen=gen;  
for j=1:length(crossovered)  
    p=crossovered(j);  
    genCrossovered(j,:)=gen(p,:);  
end  
  
if mod(length(crossovered),2)==0  
    for i=1:2:length(crossovered)  
        x(1,:)=genCrossovered(i,:);  
        y(1,:)=genCrossovered(i+1,:);  
        %split gene  
        pos=randi(length(x));  
        seqa11=x(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the first  
gen  
        seqa12=x(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the  
first gen  
        seqa21=y(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the  
second gen  
        seqa22=y(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the  
second gen  
        x1(1,:)=[seqa11,seqa22]; %first crossed gen  
        y1(1,:)=[seqa21,seqa12]; %second crossed gen  
        genCrossovered(i,:)=x1(1,:);  
        genCrossovered(i+1,:)=y1(1,:);  
    end  
else  
    for i=2:2:length(crossovered)  
        x(1,:)=genCrossovered(i,:);  
        y(1,:)=genCrossovered(i+1,:);  
        %split gene  
        pos=randi(length(x));  
        seqa11=x(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the first  
gen  
        seqa12=x(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the  
first gen  
        seqa21=y(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the  
second gen  
        seqa22=y(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the  
second gen  
        x1(1,:)=[seqa11,seqa22]; %first crossed gen  
        y1(1,:)=[seqa21,seqa12]; %second crossed gen  
        genCrossovered(i,:)=x1(1,:);  
    end  
end  
end
```

```
newGen(crossovered,:) = genCrossovered;
```

Συνάρτηση μετάλλαξης (γενετικός αλγόριθμος 1)

```
%%Mutation function of the GA

function [newGen]=mutation1(oldGen,Pm)
%Finding the chromosomes that will undergo mutation
mutated=find(rand(size(oldGen,1),1)<Pm); %selecting the number of gens that will
undergo mutation
if isempty(mutated)
newGen=oldGen; %replace old with new gens
else
    newGen=oldGen; %replace old with new gens
for j=1:length(mutated)
    p=mutated(j);
    genMutated(j,:)=oldGen(p,:); %gens that will undergo mutation
end

for i=1:length(mutated)
    x=genMutated(i,:); %gen selected for mutation
    pos=randi(length(x));%select random chromosome to mutate
    if x(:,pos)==0
        x(:,pos)=1; %change chromosome value
    else
        x(:,pos)=0; %change chromosome value
    end
    genMutated(i,:)=x;
end

newGen(mutated,:)=genMutated;
end
```

Συνάρτηση κλήσης γενετικού αλγορίθμου 2

```
%GA subfunction to determine optimal PDC placement
function pnc_loc=ga_main3(Vert,A,PMU)

%%Intitalize GA Parameters

maxGen=10000; %Maximun generations number
popsize=10000; %Population size
pcross=0.5; %Crossover Probability
pm=0.2; %Mutation Probability

%%Set GA run specifics

%% Initialize population
```

```
[gen]=creategeneration2 (popsize,Vert,PMU);

[fitness,object]=fitnessfunct2 (gen,A,PMU);

[bestObj(1),index]=min(object); %find gene with minimum fitness value
bestGen=gen(index,:); %best initial population
[worstObj(1),index1]=max(object); %find gene with maximum fitness value
worstGen=gen(index1,:); %worst initial population
avgObj(1)=0;
for k=1:popsize
avgObj(1)=avgObj(1)+object(k);
end
avgObj(1)=avgObj(1)/popsize; %mean value of fitness

%start the algorithm
flagout=0;
%for i=1:maxGen
i=0;
while i<=maxGen && flagout<=100
    i=i+1;
    [gen]=reproduction(gen,fitness); %reproduction
    [gen]=crossover2 (gen,pcross,PMU); %crossover
    [gen]=mutation12 (gen,pm,PMU); %mutation1
    [fitness,object]=fitnessfunct2 (gen,A,PMU);
    %find minimum,maximum and average fitness
    [bestCurObj,index]=min(object);
    bestCurGen=gen(index,:);
    [worstObj(i+1),index1]=max(object);
    worstCurGen=gen(index1,:);
    avgObj(i+1)=0;
    for k=1:popsize
    avgObj(i+1)=avgObj(i+1)+object(k);
    end
    avgObj(i+1)=avgObj(i+1)/popsize; %calculate average value of objective function
    if bestCurObj<bestObj(i) %Apply elitist strategy for minimization (set new best
    gene if existing)
    bestGen=bestCurGen;
    % object(index)=bestObj(i);
    bestObj(i+1)=bestCurObj;
    elseif bestCurObj>=bestObj(i) %Apply elitist strategy for minimization (keep
    best gene if no change is achieved)
    bestGen=bestGen;
    bestObj(i+1)=bestObj(i);
    end
    bestGen; %Display current best gen
    bestObj(i+1) %Display current best fitness value
    if abs(bestObj(i+1)-bestObj(i))<0.00001
        flagout=flagout+1;
    else
        flagout=0;
    end
end

pmc_loc=bestGen;
```

Συνάρτηση δημιουργίας αρχικού πληθυσμού (γενετικός αλγόριθμος 2)

```
%%Function to create initial GA subsystem generation
```

```
function [gen]=creategeneration2 (popsize,Vert,PMU)

for i=1:popsize
    for j=1:Vert
        if PMU(j)==1
            gen(i,j)=0; %(Do not place PMC at PMU location)
        else
            gen(i,j)=randi([0,1]); %generate random PMC position vector (1:
exists, 0: doesn;t exist)
        end
    end
end
end
```

Συνάρτηση υπολογισμού τιμής αντικειμενικής συνάρτησης (γενετικός αλγόριθμος 2)

```
%%Function to calculate fitness function value

function [fitness,object]=fitnessfunct2 (gen,A,PMU)

%create b matrix for consition examination
b=PMU;
idx=find(PMU);

for i=1:size(gen,1)
    %create path connectivity matrix
    D=zeros(size(A,1),size(A,1));
    for j=1:size(A,1);
        for k=1:size(idx,2);
            if A(j,idx(k))==1
                for m=1:size(A,1);
                    if A(j,m)==1
                        D(j,m)=1;
                    else
                        D(j,m)=0;
                    end
                end
            end
        end
    end
    if D*gen(i,:) '>=b'; %observability condition (Cruz equation 7)
        object(i)=sum(gen(i,:)); %objective function (Cruz equation 6, with
weights =1)
        fitness(i)=object(i); %fitness function
    else
        object(i)=10^9; %"punish" genes that lead to a non observable solution
        fitness(i)=object(i); %fitness function
    end
end
end
```

Συνάρτηση αναπαραγωγής (γενετικός αλγόριθμος 2)

```
%Reproduction fuction of the GA (Roulette wheel)

function [newGen]=reproduction(oldGen,fitness)
```

```
if sum(fitness)==0
```

```
newGen=oldGen;
else

normFit=fitness/sum(fitness);
selected=rand(size(fitness));
sumFit=0;
for i=1:length(fitness)
sumFit=sumFit+normFit(i);
index=find(selected<sumFit);
selected(index)=i*ones(size(index));
end

newGen=oldGen(selected,:);
end
```

Συνάρτηση Crossover (γενετικός αλγόριθμος 2)

```
%crossover function of the GA

function newGen=crossover2(gen,pcross,PMU)
%select genes for crossover
crossovered=find(rand(size(gen,1),1)<pcross);
newGen=gen;
for j=1:length(crossovered)
p=crossovered(j);
genCrossovered(j,:)=gen(p,:);
end

if mod(length(crossovered),2)==0
for i=1:2:length(crossovered)
x(1,:)=genCrossovered(i,:);
y(1,:)=genCrossovered(i+1,:);
%split gene
pos=randi(length(x));
seqa11=x(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the first
gen
seqa12=x(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the
first gen
seqa21=y(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the
second gen
seqa22=y(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the
second gen
x1(1,:)=[seqa11,seqa22]; %first crossed gen
y1(1,:)=[seqa21,seqa12]; %second crossed gen
genCrossovered(i,:)=x1(1,:);
genCrossovered(i+1,:)=y1(1,:);
end
else
for i=2:2:length(crossovered)
x(1,:)=genCrossovered(i,:);
y(1,:)=genCrossovered(i+1,:);
%split gene
pos=randi(length(x));
seqa11=x(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the first
gen
seqa12=x(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the
first gen
seqa21=y(1,1:pos); %selecting the elements that will remain in the
second gen
```



```
        seqa22=y(1,(pos+1):end); %selecting the elements that will leave the
second gen
        x1(1,:)=[seqa11,seqa22]; %first crossed gen
        y1(1,:)=[seqa21,seqa12]; %second crossed gen
        genCrossovered(i,:)=x1(1,:);
    end
end

for i=1:size(genCrossovered,1)
    next=genCrossovered(i,:)+PMU;
    index=find(next==2);
    if ~isempty(index)
        genCrossovered(i,:)=gen(i,:);
    end
end

newGen(crossovered,:)=genCrossovered;
```

Συνάρτηση μετάλλαξης (γενετικός αλγόριθμος 2)

%Mutation function of the GA

```
function [newGen]=mutation12(oldGen,Pm,PMU)
%Finding the chromosomes that will undergo mutation
mutated=find(rand(size(oldGen,1),1)<Pm); %selecting the number of gens that will
undergo mutation
if isempty(mutated)
newGen=oldGen; %replace old with new gens
else
    newGen=oldGen; %replace old with new gens
    for j=1:length(mutated)
        p=mutated(j);
        genMutated(j,:)=oldGen(p,:); %gens that will undergo mutation
    end

    for i=1:length(mutated)
        x=genMutated(i,:); %gen selected for mutation
        pos=randi(length(x));%select random chromosome to mutate
        if x(:,pos)==0
            x(:,pos)=1; %change chromosome value
        else
            x(:,pos)=0; %change chromosome value
        end
        genMutated(i,:)=x;
    end

    for i=1:size(genMutated,1)
        next=genMutated(i,:)+PMU;
        index=find(next==2);
        if ~isempty(index)
            genMutated(i,:)=oldGen(i,:);
        end
    end

newGen(mutated,:)=genMutated;
end
```

Παράρτημα Β Αλγόριθμος εύρεσης βέλτιστης λύσης βάσει του μοντέλου των Haghghatfar et al. [86]

```
% Optimal PMU Placement and PDC Placement (OPP)
clc; clear; close all;
tic
cases=1; % Pick a system (see below). These cases are available by MATPOWER
(free online)
if cases==1; mpc=case14; % available online by MATPOWER
elseif cases==2; mpc=case57; % available online by MATPOWER
elseif cases==3; mpc=case118; % available online by MATPOWER
end
branch=mpc.branch; bus=mpc.bus; gen=mpc.gen;
fb = branch(:,1); % from-end bus number
tb = branch(:,2); % to-end bus number
nbranch = length(fb);
Z0=bus(:,3)==0 & ~ismember(bus(:,1),gen(:,1)); % Finding ZIB locations from
MATPOWER cases
ZIB0=find(Z0~=0); ZIB0=ZIB0';
nbus = length(bus(:,1)); busnew=1:nbus;
nbus = max(max(fb),max(tb));
ZIB=ZIB0;
%=====
Y = zeros(nbus,nbus);
Y(sub2ind(size(Y), fb', tb'))=1; % replacing off-diagonal elements of Y with a
unity
Y(sub2ind(size(Y), tb', fb'))=1; % replacing off-diagonal elements of Y with a
unity
Y(logical(eye(size(Y)))) = 1; % replacing diagonal elements of Y with a unity
%=====
Y1=-Y;
Y2=Y1;
for i=1:length(ZIB)
ZIB20=setdiff(ZIB,ZIB(i));
Y2(ZIB(i),ZIB20)=0;
end
Y2=sparse(Y2);
% clear Y % if the system is large, we better clear it for space freedom
Count2= (sum(Y1~=0,2))'; % counting number of lines connected to a bus (useful
for redundancy inclusion)
ZIB2=[];
ZR2=[]; % for plotting
ZIB3=zeros(1,length(ZIB));
ZIC=zeros(length(Y),max(Count2));
for i=1:length(Y)
x=find(int16(Y1(i,:))==int16(-1));
ZIC(i,1:length(x))=x; % all cluster buses for bus-i
end
for i=1:length(ZIB)
ZIB22=find(int16(Y1(ZIB(i),:))==int16(-1));
[ZIB2]=[ZIB2 ZIB22];
Z=nnz(ismember(ZIB22,ZIB));
CN1=0; CN2=0;
for j=1:length(ZIB22)
z=ZIC(ZIB22(j),:);
z=z(z~=0);
if sum(ismember(z,ZIB22))==length(z) && sum(ismember(z,ZIB22))~=length(ZIB22)
CN2=CN2+1;
end
if Count2(ZIB22(j))==2 && ~ismember(ZIB22(j),ZIB)
```

```

CN1=CN1+1;
end
end
if CN2>1
ZIB3(i)=numel(ZIB22)-1;
else
ZIB3(i)=numel(ZIB22)-Z;
end
if CN1>1
[ZR2]=[ZR2 ZIB(i)];
end
end
%=====
ZIB4=ZIB2;
ZIB40=zeros(length(ZIB4),length(Y1(1,:)));
ZIB40(:,(ZIB4))=1;
ZIB40=sparse(ZIB40);
ZIB2 = unique(ZIB2);
B=zeros(length(Y1(1,:)), length(Y1(1,:)));
B(sub2ind(size(B), ZIB2, ZIB2))=-1;
B=sparse(B);
D=-Y1(ZIB,:);
Y1=sparse(Y1);
D=sparse(D);
b1=-ones(1,length(Y1(1,:)));
b3=-ones(1,length(Y1(1,:)));
CC=sparse(zeros(size(Y1)));
b10=zeros(size(b1));
b1(ZIB2)=0;
b10(ZIB2)=-1;
C=sparse(zeros(size(D)));
b1=sparse(b1);
b10=sparse(b10);
BA2=zeros(size(Y1));
BA2(ZIB2,:)=Y1(ZIB2,:);
%=====
k=1; % k=1 for normal operation, k=2 for contingency operation
A=[Y2 -k*B; C -D]; % see the diff. if Y2 is replaced by Y1
b2=-sparse(ZIB3);
b=[k*b1 b2];
Aineq=A;
bineq=b';
%=====Redundancy Consideration (weighting)=====
wr=Count2; % redundancy weight
w0=zeros(1,length(Y1(1,:)));
wt=[wr.^1 wr];
wrc=1/length(Y1(1,:));
w1=[wr.^0 w0];
w2=1/length(A(1,:))* (wt')';
f=wrc+1*(1*w1-1*w2);
%=====Solver=====
lb=zeros(length(A(1,:)),1);ub=1*ones(length(A(1,:)),1);
intcon=1:length(Y1(1,:));
options = optimoptions('intlinprog','ConstraintTolerance',1e-
9,'CutGeneration',...
'advanced','CutMaxIterations',50,'Heuristics','none',
'HeuristicsMaxNodes',100,...
'RootLPAlgorithm','dual-
simplex','RootLPMaxIterations',3e10,'IntegerPreprocess','advanced','LPOptimality
Tolerance',1e-10,...
'LPPreprocess','basic','NodeSelection','mininfeas');
x = intlinprog(f,intcon,A,b,[],[],lb,ub,options);x=x';
t_end=toc;

```

```

x2= find(int16(x));
x3= (x2(x2<=length(Y1(1,:)))));x3=x3';
x4=zeros(1,length(Y1(1,:))); x4(x3)=1;
PMU_Locations_and_TotalNo=[x3' length(x3)]
t_end % display time consumed
%=====PLOTTING=====
S0=Y1;S0=S0(x3,:);S0=sum(S0);
S1=-sum(S0);
S2=sum(S0==0);
S3=find((S0==0));
S=[S1 S2];
ft=[fb tb];
branch_0PMU0=(ft(find(sum(x4(ft)~=0,2)==0)',:))';
branch_1PMU0=(ft(find(sum(x4(ft)~=0,2)==1)',:))';
branch_2PMU0=(ft(find(sum(x4(ft)~=0,2)==2)',:))';
branch_0PMU=reshape(branch_0PMU0, 1, 2*length(branch_0PMU0(1,:)));
branch_1PMU=reshape(branch_1PMU0, 1, 2*length(branch_1PMU0(1,:)));
branch_2PMU=reshape(branch_2PMU0, 1, 2*length(branch_2PMU0(1,:)));
Y1(logical(eye(size(Y1)))) = 0;
G = graph(Y1~=0);
sz=5;
h=plot(G, 'Layout', 'force', 'Iterations', 50, 'MarkerSize', sz, 'NodeColor', 'B', 'EdgeColor', 'B', 'LineWidth', 1);hold on
gen=gen(:, [1 2]);
gen=gen(:, 1);gen=gen(gen~=0);
g0=30*ones(1, .5*length(x));g0(gen)=100;
S30=50*ones(1, .5*length(x));S30(S3)=150;
highlight(h, ZR2, 'NodeColor', 'B', 'MarkerSize', sz);hold on
highlight(h, x3, 'NodeColor', 'r', 'MarkerSize', sz);hold on
if cases==1
    x4=[4];
elseif cases==2
    x4=[9,25,38];
elseif cases==3
    x4=[5;32;39;54;70;84;104];
end
highlight(h, x4, 'NodeColor', 'y', 'MarkerSize', sz);hold on
range=1:length(Y1(1,:));
% h.MarkerSize = 3; % node size
h.Marker = 'o';
labelnode(h, range, range); % labeling bus numbers
numnodes(G);

```