



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Χ. Κουτσούκης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Χ. Κουτσούκης

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Απριλίου 2012

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2012

.....

Νικόλαος Χ. Κουτσούκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Κουτσούκης, 2012.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (PMUs) με στόχο την πλήρη παρατηρησιμότητα των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη τοποθέτηση PMUs αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των υπό εγκατάσταση PMUs, που απαιτείται για να επιτευχθεί πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή από τη σύλληψη της ιδέας των συγχρονισμένων μετρήσεων μέχρι τη σημερινή εκδοχή των PMUs, τις βασικές ιδιότητες του PMU, καθώς και τη σύγκρισή τους με εκείνες της τεχνολογίας SCADA. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και αναλύεται μια τοπολογική μέθοδος παρατηρησιμότητας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις προτείνεται για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης PMU. Ο αλγόριθμος αυτός είναι ένας μετά-ευριστικός αλγόριθμος, ο οποίος χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά το ιστορικό αναζήτησης, αποφεύγει την παγίδευση σε ένα τοπικό ελάχιστο ή μέγιστο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιήθηκε με γραφικό περιβάλλον (GUI) σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο εφαρμόστηκε στα πρότυπα δίκτυα των 14, 30, 39, 57 και 118 ζυγών του IEEE. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων από τη διεθνή βιβλιογραφία, που αποδεικνύουν την αποδοτικότητα και την προσαρμοστικότητα της μεθόδου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασιθετών, εκτίμηση κατάστασης, παρατηρησιμότητα δικτύου, ευριστικές μέθοδοι, μετά-ευριστικές μέθοδοι, αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις, μονάδες μέτρησης φασιθετών.

ABSTRACT

The current Diploma Thesis deals with the optimal placement problem of Phasor Measurement Units (PMUs), in order to achieve full network observability. The Optimal PMU Placement (OPP) problem is formulated as to minimize the number of PMUs to be installed subject to full network observability.

The thesis initially presents the historical development, starting from the original concept of synchronized measurements until the modern standard PMU device, the basic features of the PMU, as well as comparing them with the features of SCADA technology. Furthermore, this thesis presents a fast analysis method for power system topology observability.

Tabu search algorithm is proposed to solve the OPP combinatorial optimization problem. The tabu search algorithm is a meta-heuristic algorithm that uses a flexible memory of search history to prevent cycling and to avoid entrapment in local optima.

This method is developed with a graphical user interface (GUI) in MATLAB. The software was applied to IEEE 14, 30, 39, 57 and 118 bus systems. The obtained results are analyzed and are compared with the results of other methods found in bibliography and the effectiveness and flexibility of the proposed algorithm is verified.

KEY WORDS

Phasor measurement unit (PMU), optimal PMU placement (OPP) problem, state estimation, network observability analysis, heuristic algorithms, meta-heuristic algorithms, tabu search.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, λέκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, καθώς και για τη πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του σε κάθε δυσκολία που προέκυπτε. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή μου Δημήτρη Αναγνωστό για την πολύτιμη βοήθειά του κυρίως σε θέματα προγραμματισμού. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την αδερφή μου και τους φίλους μου για τη στήριξη και βοήθειά τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη μνήμη της γιαγιάς μου, Χαρίκλειας Κουτσούκη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών	1
1.2	Ιστορική ανασκόπηση	1
1.3	Σύγκριση τεχνολογίας SCADA και PMU	3
1.4	Εφαρμογές των PMU	4
1.5	Δομή της εργασίας	5
1.6	Βιβλιογραφία	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1	Εισαγωγή	9
2.2	Ορισμοί	9
2.3	Μοντελοποίηση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τοποθέτηση PMU	10
2.4	Κανόνες παρατηρησιμότητας για τοποθέτηση PMU	10
2.4.1	Πρώτος κανόνας παρατηρησιμότητας	11
2.4.2	Δεύτερος κανόνας παρατηρησιμότητας	11
2.4.3	Τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας	12
2.4.4	Τέταρτος κανόνας παρατηρησιμότητας	13
2.5	Προτεινόμενος τοπολογικός αλγόριθμος παρατηρησιμότητας δικτύου	14
2.6	Βιβλιογραφία	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Χαρακτηριστικά του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις	17
3.2.1	Γενικά αξιώματα	18
3.2.2	Χρήση της μνήμης	19
3.2.3	Εντατικοποίηση και διαφοροποίηση	21
3.3	Θεμελιώδεις αρχές του αλγορίθμου και βραχυπρόθεσμη μνήμη	22
3.3.1	Λίστα υπονήφιων λύσεων	23
3.4	Μνήμη και απαγορευμένες ταξινομήσεις	24
3.4.1	Μνήμη βασισμένη στην πρόσφατη πείρα	25
3.4.2	Κριτήριο έμπνευσης	19

3.5	Το πρόβλημα του ελάχιστου k - Δέντρου	25
3.5.1	Πρώτη επανάληψη	28
3.5.2	Δεύτερη επανάληψη	29
3.5.3	Τρίτη επανάληψη	30
3.5.4	Τέταρτη επανάληψη	32
3.5.5	Πέμπτη επανάληψη	32
3.6	Βιβλιογραφία	34

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

4.1	Εισαγωγή	35
4.2	Μεγιστοποίηση της ποιότητας παρατηρησιμότητας δικτύου	35
4.3	Διατύπωση του προβλήματος	36
4.4	Αρχική λύση	37
4.5	Μέθοδος επίλυσης	40
4.5.1	Συνάρτηση κόστους	40
4.5.2	Βήμα 1 ^ο : Εξέταση λύσης	41
4.5.3	Βήμα 2 ^ο : Λίστα υποψήφιων λύσεων	41
4.5.4	Βήμα 3 ^ο : Αξιολόγηση λύσεων	41
4.5.5	Βήμα 4 ^ο : Κριτήριο έμπνευσης	42
4.5.6	Βήμα 5 ^ο : Κριτήριο τερματισμού	42
4,7	Επαναληπτικός αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις	44
4.4	Βιβλιογραφία	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU

5.1	Δεδομένα του υπό εξέταση συστήματος	47
5.2	Αναλυτικοί υπολογισμοί	48
5.2.1	Υπολογισμός μήτρας πρόσπτωσης	48
5.2.2	Αρχική λύση με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου	48
5.2.3	Εφαρμογή του αλγόριθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU	52
5.3.2.1	Πρώτη επανάληψη	53

5.3.3.2	Δεύτερη επανάληψη	59
5.3.3.3	Τρίτη επανάληψη	61
5.3.3.4	Τέταρτη επανάληψη	63
5.3.3.5	Πέμπτη επανάληψη	65
5.3.3.6	Έκτη επανάληψη	67
5.3.3.7	Έβδομη επανάληψη	69
5.3.3.8	Όγδοη επανάληψη	71
5.3.3.9	Ένατη επανάληψη	72
5.3.3.10	Δέκατη επανάληψη	74
5.2.4	Συμπεράσματα	76
5.3	Βιβλιογραφία	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

6.1	Εισαγωγή	79
6.2	Το γραφικό περιβάλλον (GUI) της Matlab	79
6.3	Χαρακτηριστικά λογισμικού για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU με την εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις	83
6.3.1	Περιβάλλον ανάπτυξης και απαιτήσεις συστήματος	83
6.3.2	Λειτουργίες λογισμικού	84
6.3.2.1	Γραφικό περιβάλλον	84
6.3.2.2	Εισαγωγή δεδομένων	86
6.3.2.3	Μελέτη και ανάλυση αποτελεσμάτων	86
6.3.2.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων	90
6.3.2.5	Συναρτήσεις λογισμικού	90
6.3.2.6	Μελλοντικές επεκτάσεις λογισμικού	92
6.4	Βιβλιογραφία	93

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1	Εισαγωγή	95
7.2	Εφαρμογή στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE	96
7.2.1	Δεδομένα του συστήματος	96
7.2.2	Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο	96
7.2.3	Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με	98

	εφαρμογή επαναληπτικού TS	
7.2.4	Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	100
7.2.5	Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	102
7.2.6	Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	104
7.2.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	106
7.3	Εφαρμογή στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE	108
7.3.1	Δεδομένα του συστήματος	108
7.3.2	Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο	109
7.3.3	Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	111
7.3.4	Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	113
7.3.5	Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	115
7.3.6	Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	117
7.3.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	119
7.4	Εφαρμογή στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE	121
7.4.1	Δεδομένα του συστήματος	121
7.4.2	Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο	122
7.4.3	Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	124
7.4.4	Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	126
7.4.5	Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	128
7.4.6	Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	130
7.4.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	132
7.5	Εφαρμογή στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE	134
7.5.1	Δεδομένα του συστήματος	134

7.5.2	Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο	135
7.5.3	Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	138
7.5.4	Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	140
7.5.5	Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	142
7.5.6	Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	144
7.5.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	146
7.6	Εφαρμογή στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE	148
7.6.1	Δεδομένα του συστήματος	148
7.6.2	Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο	149
7.6.3	Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	151
7.6.4	Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	153
7.6.5	Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης	155
7.6.6	Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS	157
7.6.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	159
7.7	Σύγκριση αποτελεσμάτων	161
7.8	Βιβλιογραφία	163

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της	165
8.2	Επεκτάσεις της εργασίας	167

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

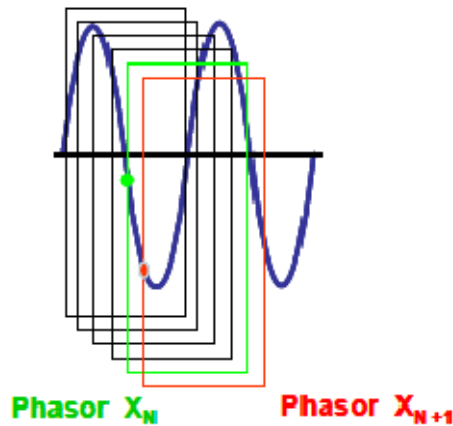
1.1 ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ

Η μονάδα μέτρησης φασιθετών (PMU) είναι μια συσκευή μέτρησης των συγχρονισμένων φασιθετών τάσης και ρεύματος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συγχρονισμός μεταξύ των PMU επιτυγχάνεται από την ταυτόχρονη δειγματοληψία των κυματομορφών τάσης και ρεύματος χρησιμοποιώντας ένα κοινό συγχρονισμένο σήμα που εκπέμπεται χάρη στην τεχνολογία του παγκόσμιου συστήματος θεσιθεσίας (GPS). Η δυνατότητα υπολογισμού συγχρονισμένων φασιθετών καθιστά το PMU ένα από τις πιο σημαντικές μονάδες μέτρησης στη μελλοντική τεχνολογία εποπτείας και ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [1.1].

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

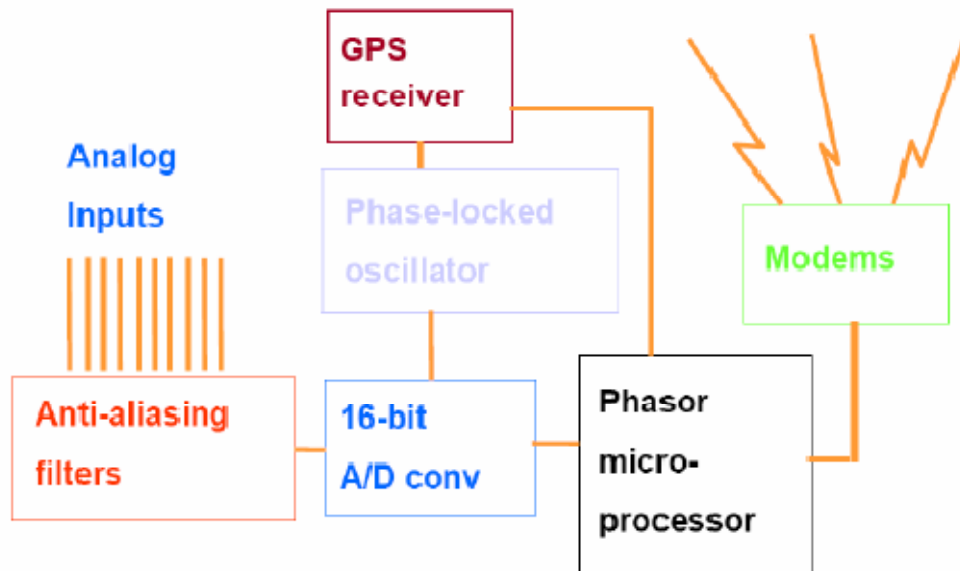
Η σύγχρονη εποχή των συγχρονισμένων μετρήσεων ταυτίζεται με την εμφάνιση των μικροεπεξεργαστών και του πρώτου ψηφιακού ηλεκτρονόμου τη δεκαετία του 1970. Η περίοδος αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί και ως περίοδος γενικότερης μετάβασης των συστημάτων προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλεκτρομηχανική στην ψηφιακή. Η τεχνική των αλγόριθμων υπολογισμού φασιθετών βασίζεται στον υπολογισμό μιας συμμετρικής (ανά φάση) θετικής ακολουθίας τάσης και ρεύματος χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier. Η διαδικασία δειγματοληψίας περιγράφεται στο Σχήμα 1.1. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος ανανεώνει συνεχώς ένα πίνακα με τα δεδομένα δειγματοληψίας εισάγοντας κάθε φορά τα πιο πρόσφατα δεδομένα και αφαιρώντας τα παλιότερα με σκοπό τη δημιουργία ενός συνεχούς φασιθέτη [1.2] [1.3].

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_r + j\mathbf{X}_i = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N (x_k \cos \frac{2\pi k}{N} - jx_k \sin \frac{2\pi k}{N})$$



Σχήμα 1.1 : Διαδικασία δειγματοληψίας των πρώτων αλγορίθμων PMU

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας του GPS στη δεκαετία του 1980 κατέστη δυνατός ένας πιο αποδοτικός τρόπος συγχρονισμού μετρήσεων, ιδιαίτερα σε μεγάλες αποστάσεις. Πρώτοι ερευνητές του εργαστηρίου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας του πανεπιστημίου της Virginia χρησιμοποίησαν παλμούς από δορυφόρους GPS για να συγχρονίσουν τα δεδομένα ενός φασιθέτη με ακρίβεια του 1.0 μs [1.4]. Το Σχήμα 1.2 δείχνει το λειτουργικό διάγραμμα ενός PMU.



Σχήμα 1.2 : Λειτουργικό διάγραμμα ενός PMU

Η πρώτη εμπορική εκδοχή των PMU υλοποιήθηκε το 1991 σε συνεργασία του VirginiaTech με την εταιρεία Macrodyne. Την ίδια χρονιά η IEEE καθόρισε τα πρότυπα των αρχείων δεδομένων που δημιουργούνται και αποστέλλονται από τα PMU, η τελική τροποποίηση των οποίων πραγματοποιήθηκε το 2005. Σήμερα οι περισσότερες εταιρίες του χώρου κατασκευάζουν PMU σαν εμπορικά προϊόντα, τη στιγμή που τα PMU έχουν αρχίσει

να διεισδύουν με σταθερό ρυθμό στα δίκτυα διανομής πολλών κρατών. Μπορεί, λοιπόν, να ειπωθεί ότι η τεχνολογία των συγχρονισμένων μετρήσεων έχει πλέον τυποποιηθεί και ότι τα επόμενα χρόνια όλο και περισσότερα ηλεκτρικά δίκτυα ανά τον κόσμο θα μπορούν να εποπτεύονται γρήγορα και εξολοκλήρου μέσω των PMU.

1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ SCADA ΚΑΙ PMU

Η εποπτεία και ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία 50 χρόνια βασίστηκε στα Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA) και στα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (Energy Management Systems –EMS).

Ένα σύστημα SCADA είναι ένα σύστημα τηλεμέτρησης. Το σύστημα υπό έλεγχο ή ένα τμήμα του είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται σε απομακρυσμένα σημεία. Με την τοποθέτηση στα σημεία αυτά Απομακρυσμένων Μονάδων Τηλεμετρίας (Remote Telemetry Units-RTU) λαμβάνονται μετρήσεις της τάσης, του ρεύματος, της πραγματικής και της αέργου ισχύς ενός δικτύου. Όλες οι μετρήσεις μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και αποστέλλονται μέσω των RTU σε έναν κεντρικό υπολογιστικό σταθμό. Τα ηλεκτρικά αυτά σήματα μπορεί να είναι αναλογικά ή ψηφιακά ή και παλμικά και η μετάδοσή τους γίνεται μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου ενσύρματα ή ασύρματα. Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος SCADA είναι τα παρακάτω:

- Ένας κεντρικός υπολογιστικός σταθμός (Master Station Computer)
- Οι γραμμές επικοινωνίας (radio, καλωδιακή, τηλεφωνική)
- RTUs που κωδικοποιούν και αποκωδικοποιούν σήματα από τον πραγματικό κόσμο
- Το ελεγχόμενο σύστημα

Τα τελευταία χρόνια οι επιστήμονες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι ο έλεγχος και οι χειρισμοί σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω SCADA, εμφανίζει τις ακόλουθες αδυναμίες:

- Έλλειψη συγχρονισμένων δεδομένων.
- Αδυναμία παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.
- Αδυναμία εποπτείας μεγάλων γεωγραφικά περιοχών.

Η τεχνολογία των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών είναι σε θέση να λύσει αυτά τα προβλήματα. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τις μονάδες PMU σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τους προσδίδουν μεγαλύτερη αξία σε σχέση με τις συμβατικές μετρήσεις ενός συστήματος SCADA.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των μετρήσεων PMU είναι η ταχύτητα. Τα PMU μετρούν τάση, ρεύμα και συχνότητα με πολύ υψηλές ταχύτητες (μέχρι 60 παρατηρήσεις ανά δευτερόλεπτο) σε σύγκριση με ένα σύστημα SCADA, όπου το δίκτυο σαρώνεται κάθε δυο δευτερόλεπτα ή και πιο αραιά. Η τεχνολογία των PMU εγγυάται ότι η πραγματική κατάσταση του συστήματος μεταφοράς μπορεί να μετρηθεί λεπτομερώς, με ταχύτητα ανάλογη της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων. Με τα σημερινά δεδομένα ο προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος απαιτεί χρόνο μερικών δευτερολέπτων για τη λήψη των

μετρήσεων. Στη συνέχεια οι μετρήσεις αυτές εισάγονται στον εκτιμητή κατάστασης, ο αλγόριθμος του οποίου χρειάζεται αισθητά λιγότερο χρόνο για να επιστρέψει τις τάσεις και τα ρεύματα των ζυγών του δικτύου, αφού οι μετρήσεις που δέχθηκε έχουν σαν είσοδο πολύ μεγάλη ακρίβεια. Έτσι οι χειριστές μπορούν να έχουν άμεση επίγνωση της κατάστασης του συστήματος σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, γεγονός το οποίο συνεπάγεται άμεση απόκριση σε καταστάσεις ανάγκης.

Επιπλέον τα δεδομένα των PMU διαθέτουν «χρονική σφραγίδα». Η τελευταία ουσιαστικά ορίζεται ως η ενεργός τιμή και η φασική γωνία ενός ημιτονοειδούς σήματος με αναφορά ως προς μια χρονική στιγμή μεγάλης ακρίβειας, που παράγεται στο σημείο της μέτρησης από ένα δέκτη GPS. Η χρονική πληροφορία ενσωματώνεται στα δεδομένα έτσι ώστε οι μετρήσεις που λαμβάνονται από διαφορετικές περιοχές ή από διαφορετικούς ιδιοκτήτες να μπορούν να συγχρονιστούν και να ταξινομηθούν χρονικά στον κεντρικό σταθμό. Με αυτό τον τρόπο η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων στα κανάλια επικοινωνίας δεν αποτελεί πλέον σημαντικό πρόβλημα. Σε ένα σύστημα SCADA αυτό δεν είναι εφικτό, αφού εκεί τα δεδομένα των μετρήσεων ταξινομούνται με βάση το χρόνο άφιξης στον κεντρικό σταθμό, ο οποίος διαφέρει ανάλογα με την απόσταση που διανύουν τα δεδομένα.

Η τεχνολογία PMU προσφέρει εποπτεία ευρύτατων περιοχών δεδομένου ότι ο ακριβής χρονισμός των μετρήσεων φασιθετών προσφέρει δυνατότητα αξιοποίησης των πληροφοριών πέρα από την περιοχή του ζυγού όπου έγιναν οι μετρήσεις. Αυτό διευκολύνει τη διεσπαρμένη τηλεσκόπηση και την ανάληψη και την ανάληψη συντονισμένων δράσεων. Επιπλέον η ευρεία εποπτεία και η ανάλυση των μετρήσεων επιτρέπει στους χειριστές να αναγνωρίσουν αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο, όπως το είδος και το μέγεθος της καταπόνησης, προκειμένου να βελτιώσουν την αξιοπιστία του. Το σύστημα SCADA, αντίθετα, σχεδιάστηκε για εποπτεία μιας περιορισμένης γεωγραφικά περιοχής και ως εκ τούτου δεν μπορεί να ανταποκριθεί στη σύγχρονη ανάγκη για έλεγχο ευρύτερων διασυνδέσεων.

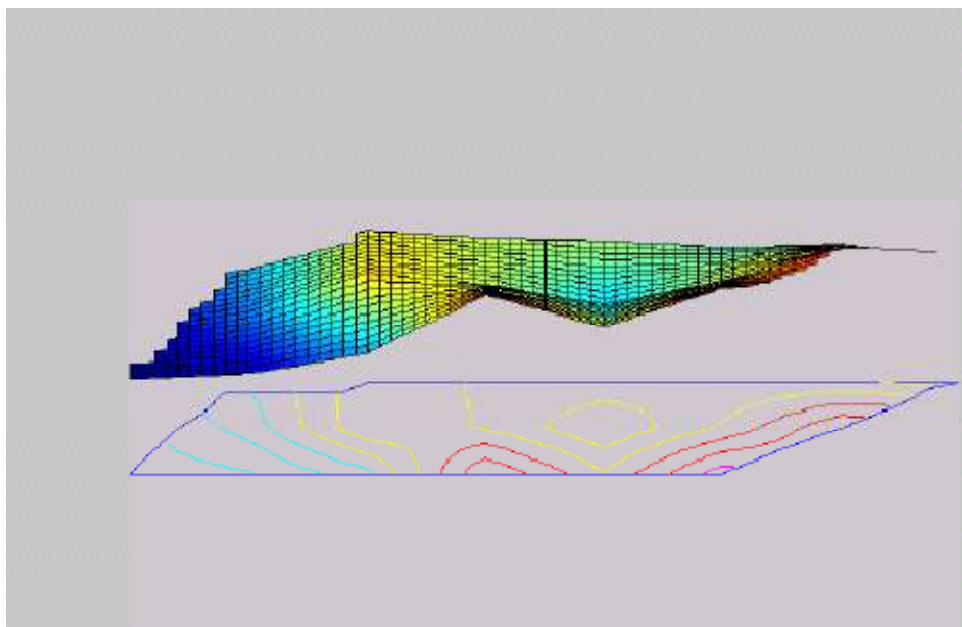
Η αξιοποίηση των PMU στα ηλεκτρικά δίκτυα συνεπάγεται και οικονομικά οφέλη. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει αυξημένη ροή ισχύος πάνω στις ήδη υπάρχουσες γραμμές που αλλάζει τα δεδομένα στην οικονομία της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πληροφορίες από τις μονάδες PMU θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επιτρέπουν τη ροή ισχύος μέχρι το δυναμικό όριο μιας γραμμής μεταφοράς, αντί για το όριο της χειρότερης περίπτωσης [1.4] [1.5].

1.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ PMU

Μια από τις σημαντικές αρχικές εφαρμογές των PMU είναι η εφαρμογή τους για την εκτίμηση κατάστασης ενός συστήματος. Με την άμεση μέτρηση συγχρονισμένων (ανά φάση) θετικών ακολουθιών κυματομορφών τάσεως και ρεύματος, η «εκτίμηση» γίνεται πλέον μέτρηση για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι με τον εξασφαλισμένο συγχρονισμό των μετρήσεων και με δυνατό υψηλό ποσοστό μεταφοράς δεδομένων μέσω τηλεπικοινωνιακών οπτικών ινών, υπάρχει πλέον η δυνατότητα για πρώτη φορά εποπτείας δυναμικών φαινομένων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Η ακριβής κατάσταση ευστάθειας ενός συστήματος μπορεί πλέον να καθοριστεί χωρίς μεγάλη προσπάθεια με τη νέα αυτή τεχνολογία.

Σε άλλες εφαρμογές οι φασιθέτες χρησιμοποιούνται ως ανάδραση σε συστήματα ελέγχου. Είναι επίσης εύκολο να επινοηθούν συστήματα με ψηφιακούς ηλεκτρονόμους τα οποία χρησιμοποιούν φασιθέτες ως μετρήσεις για μεγαλύτερη απόδοση. Κάποιες έρευνες δείχνουν ότι για την πρόβλεψη των περιθωρίων ευστάθειας τάσης θα χρησιμοποιούνται μετρήσεις από PMU.

Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των PMU είναι η δυνατότητα ανάπτυξης μιας φιλικής προς το χρήστη προβολής κατάστασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας μετρήσεις από PMU σε πραγματικό χρόνο. Μια τέτοια προβολή είναι μια τρισδιάστατη προβολή και προβάλλει τη γωνία τάσης στους ζυγούς του δικτύου στον z-άξονα, ενώ οι x και y άξονες αντιστοιχούν στη γεωγραφική τοποθεσία των σημείων μέτρησης. Μια υποθετική περίπτωση μια τέτοιας προβολής που δημιουργήθηκε βασισμένη στις συνθήκες ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Άλλες προβολές των μεγεθών της τάσης είναι επίσης δυνατές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την έγκυρη ειδοποίηση όταν πλησιάζονται τα όρια κατάρρευσης τάσης.



Σχήμα 1.3 : Προβολή μετρήσεων γωνιών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Το αντικείμενο των εφαρμογών των μετρήσεων φασιθετών σε πραγματικό χρόνο είναι νέο και συναρπαστικό. Στο μέλλον αναμένεται ότι θα υπάρξουν πολλές και καινοτόμες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας [1.3].

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βέλτιστη τοποθέτηση PMU με την εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις για την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου. Αναλυτικότερα, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφονται οι κανόνες για την πλήρη παρατηρησιμότητα ενός δικτύου.

- Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις και δίνεται αριθμητικό παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή.
- Στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU, ο οποίος χρησιμοποιείται στο λογισμικό του Κεφαλαίου 6.
- Στο **Κεφάλαιο 5** δίνεται ένα παράδειγμα εκτέλεσης βήμα-βήμα του αλγορίθμου του Κεφαλαίου 4 στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE. Η προσομοίωση αυτή θα βοηθήσει στην κατανόηση λειτουργίας του αλγορίθμου καθώς και στην κατασκευή παρόμοιων μεθόδων.
- Στο **Κεφάλαιο 6** περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής. Το λογισμικό δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB και συνοδεύεται από γραφικό περιβάλλον (GUI) με το οποίο ο χρήστης επικοινωνεί με το πρόγραμμα. Επίσης αναφέρονται στοιχεία απόδοσης και υπολογιστικών πόρων που καταλαμβάνει το συγκεκριμένο λογισμικό.
- Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του λογισμικού στο δίκτυο 14, 30, 39, 57 και 118 ζυγών του IEEE.
- Στο **Κεφάλαιο 8** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.

1.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. PowerDelivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2381-2388, Oct. 2005.
- [1.2] A. G. Phadke, J.S. Thorp, "History and Application of Phasor Measurements," *IEEE PSCE 2006*, pp. 331-335.
- [1.3] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements ~ A historical overview," *Asia Pacific Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002*, 2002. pp. 476-479.
- [1.4] Κ.Π. Νικολόπουλος, "Εμπειρικές Μέθοδοι Βέλτιστης Τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών," Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Ε.Μ.Π., 2011
- [1.5] Σ.Ν. Μανιάς, και Αθανάσιος Καλετσάνος, *Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών, 2003, σελ. 9-1 έως 9-30.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάλυση της παρατηρησιμότητας δικτύου αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την εκτίμηση κατάστασης ενός δικτύου σε πραγματικό χρόνο και αποτελεί τη «ραχοκοκαλιά» για τις εφαρμογές πάνω στη διαχείριση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Management System - EMS). Η θεωρία για την παρατηρησιμότητα δικτύου μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων : την αριθμητική και την τοπολογική μέθοδο. Οι τοπολογικές μέθοδοι βασίζονται στη δυνατότητα κατασκευής ενός συνδετικού δέντρου (spanning tree) πλήρους βαθμού. Ενώ στις αριθμητικές μεθόδους για την εκτίμηση της παρατηρησιμότητας ενός δικτύου επιβάλλεται η κατάστροψη της Ιακωβιανής μήτρας και ο υπολογισμός των στοιχείων της. Για τις μεθόδους αυτές έχουν δημοσιευθεί πολλά επιστημονικά άρθρα στα οποία παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου [2.1]-[2.7]. Συμπερασματικά, οι αριθμητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τον υπολογισμό πινάκων μεγάλων διαστάσεων και είναι υπολογιστικά χρονοβόρες. Επιπλέον η ακρίβεια της λύσης έχει την τάση να εξαρτάται από το υπολογιστικό σφάλμα. Σε αυτήν την ενότητα για την εκτίμηση της παρατηρησιμότητας ενός δικτύου θα προταθεί μια τοπολογική μέθοδος.

2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ

Παρατηρήσιμο θεωρείται ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αν ο αριθμός και η θέση των διαθέσιμων μετρήσεων είναι επαρκείς προκειμένου να είναι δυνατή η εκτίμηση της κατάστασής του [2.8]. Η τοποθέτηση μιας μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) σε κάθε ζυγό ενός δικτύου σίγουρα θα παρείχε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τις τάσεις και τα ρεύματα όλων των ζυγών του δικτύου, ωστόσο κάτι τέτοιο είναι όχι μόνο οικονομικά ασύμφορο, αλλά και αμφίβολης χρησιμότητας.

Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται κάποιοι ορισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη για την παρατηρησιμότητα ενός δικτύου:

- Άμεσα παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός στον οποίο έχει τοποθετηθεί μονάδα PMU.
- Έμμεσα παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός στον οποίο δεν έχει τοποθετηθεί PMU, ωστόσο οι φασιθέτες τάσης και ρεύματος των συνδεδεμένων κλάδων μπορούν να υπολογιστούν από ένα PMU που είναι τοποθετημένο σε κάποιον άλλο ζυγό.

- Μη παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός του οποίου η τάση και το ρεύμα δεν μπορούν να υπολογιστούν.
- Πλήρως παρατηρήσιμο χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο όταν όλοι οι ζυγοί του είναι παρατηρήσιμοι είτε άμεσα είτε έμμεσα.
- Μη παρατηρήσιμο χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο όταν έστω και ένας ζυγός είναι μη παρατηρήσιμος.
- Βέλτιστη τοποθέτηση PMU θεωρείται μια τοποθέτηση PMU με την οποία επιτυγχάνεται πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου με τον ελάχιστο αριθμό PMU.

2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU

Ένα από τα βασικά θέματα που πρέπει να σημειωθούν είναι το πώς ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να αναπαρασταθεί για ένα αλγόριθμο τοποθέτησης PMU. Ο αλγόριθμος τοποθέτησης που θα αναλυθεί σε αυτή τη διπλωματική εργασία καθώς και το σύνολο των αλγορίθμων τοποθέτησης που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία απαιτούν σχεδόν τις ίδιες πληροφορίες σε κοινή μορφή. Για ένα αλγόριθμο τοποθέτησης PMU, οι πληροφορίες που απαιτούνται για ένα δίκτυο είναι μία λίστα των ζυγών του δικτύου, οι συνδέσεις των ζυγών ή η μήτρα πρόσπτωσης και μία λίστα των ζυγών στους οποίους υπάρχει έγχυση ισχύος. Οι αλγόριθμοι τοποθέτησης PMU δεν λαμβάνουν υπό όψιν τη φυσική τοποθεσία των ζυγών, την κατάσταση των στοιχείων του δικτύου ή τον αριθμό των μετασχηματιστών σε ένα υποσταθμό. Για αυτό το λόγο ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός, που θα κληθεί να προσδιορίσει την κατάλληλη τοποθέτηση PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, πρέπει να μετατρέψει το πραγματικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο.

Δεδομένου ότι σκοπός ενός αλγορίθμου τοποθέτησης PMU δεν είναι ο υπολογισμός της ροής ισχύος μεταξύ των ζυγών, ένα απλοποιημένο μοντέλο δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρέχει στον αλγόριθμο τοποθέτησης PMU τις πληροφορίες που χρειάζεται, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί γρήγορα και εύκολα να βρει μια τοποθέτηση PMU ώστε το δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ένα απλοποιημένο μοντέλο δικτύου πρέπει να περιέχει τρία είδη στοιχείων : τους ζυγούς του δικτύου, τις συνδέσεις των ζυγών και τις εγχύσεις στους ζυγούς. Συνδέσεις μεταξύ των ζυγών είναι οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών με γνωστή σύνθετη αντίσταση, ενώ έγχυση ισχύος είναι μια μονάδα παραγωγής ισχύος ή ένα φορτίο, που μπορούν να μεταβάλλουν τη γωνία της τάσης στο συνδεδεμένο ζυγό.

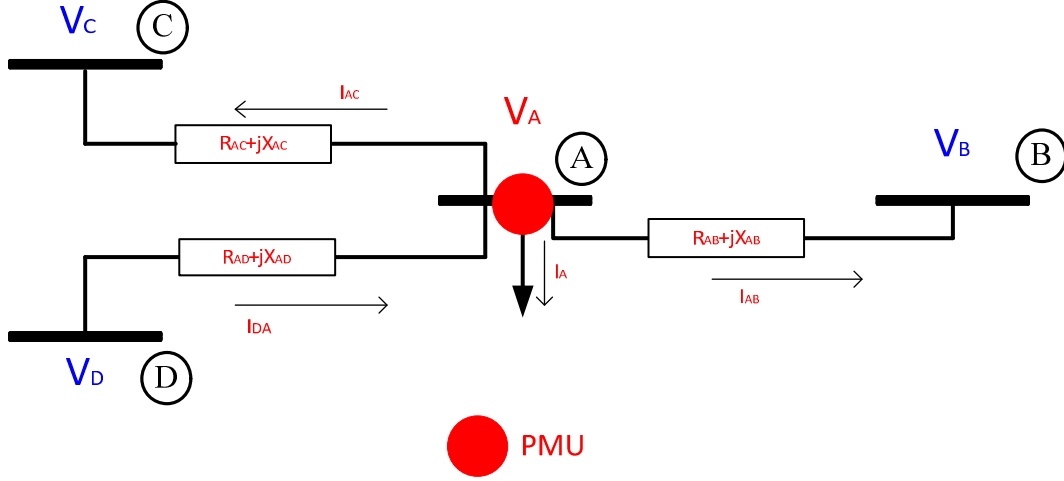
2.4 ΚΑΝΟΝΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ PMU

Στην παρούσα διπλωματική, θεωρείται ότι με την τοποθέτηση ενός PMU σε ένα ζυγό οι ακόλουθοι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν :

- Το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού.
- Οι φασιθέτες ρεύματος όλων των κλάδων που συνδέονται με το ζυγό.

2.4.1 Πρώτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου ο φασιθέτης τάσης ενός ζυγού είναι γνωστός και ο φασιθέτης ρεύματος ενός συνδεδεμένου κλάδου στο ζυγό αυτό είναι γνωστός, τότε ο φασιθέτης τάσης του ζυγού που βρίσκεται στο άλλο άκρο του συνδεδεμένου κλάδου μπορεί να υπολογιστεί μέσω του νόμου του Ohm. Έτσι με την τοποθέτηση PMU σε ένα ζυγό, όλοι οι φασιθέτες τάσης των γειτονικών ζυγών μπορούν να υπολογιστούν. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, με την τοποθέτηση PMU στο ζυγό A, η τάση στο ζυγό A, το ρεύμα I_A καθώς και τα ρεύματα των γραμμών A-B, A-C και A-D θεωρούνται γνωστά.



Σχήμα 2.1: Δίκτυο 4 ζυγών με τοποθέτηση PMU στο ζυγό A.

Στο Σχήμα 2.1 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στο δίκτυο του σχήματος 2.1 προκύπτουν οι εξισώσεις (2.1) έως (2.3) από τις οποίες υπολογίζονται η τάση στους ζυγούς B, C και D.

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A - \vec{I}_{AB} * (R_{AB} + jX_{AB}) \quad (2.1)$$

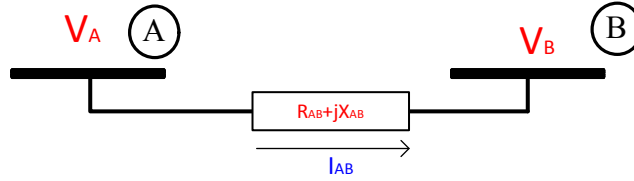
$$\vec{V}_C = \vec{V}_A - \vec{I}_{AC} * (R_{AC} + jX_{AC}) \quad (2.2)$$

$$\vec{V}_D = \vec{V}_A + \vec{I}_{DA} * (R_{AD} + jX_{AD}) \quad (2.3)$$

2.4.2 Δεύτερος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου σε ένα κλάδο οι φασιθέτες τάσης των άκρων του είναι γνωστοί, τότε ο φασιθέτης ρεύματος στον κλάδο αυτό μπορεί να υπολογιστεί. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, το ρεύμα της γραμμής A-B μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο του Ohm ως ακολούθως:

$$\vec{I}_{AB} = \frac{\vec{V}_A - \vec{V}_B}{R_{AB} + jX_{AB}} \quad (2.4)$$

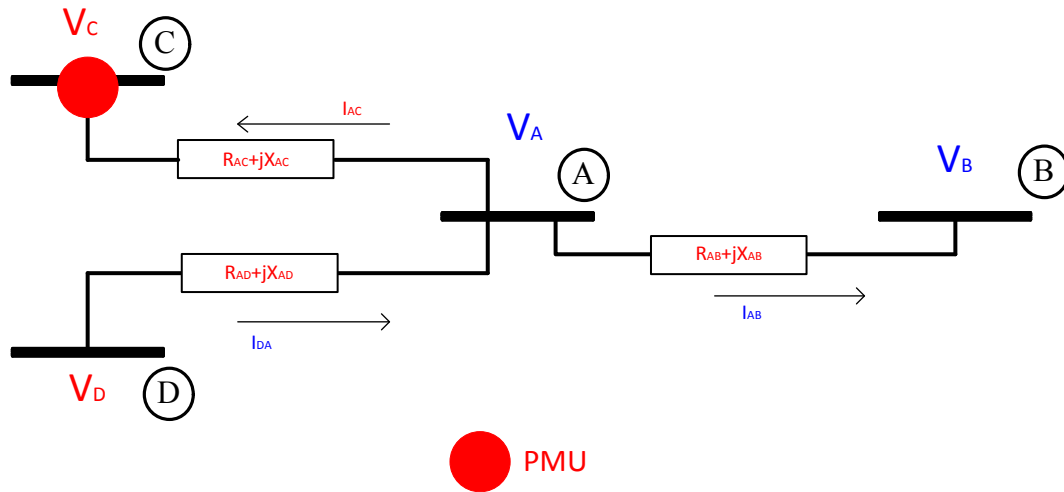


Σχήμα 2.2: Δυο συνδεδεμένοι ζυγοί.

Στο Σχήμα 2.2 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν.

2.4.3 Τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου ένας ζυγός μηδενικής έγχυσης είναι έμμεσα παρατηρήσιμος και το ρεύμα μόνο ενός συνδεδεμένου κλάδου είναι άγνωστο, τότε με την εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff το ρεύμα στον κλάδο αυτό μπορεί να υπολογιστεί και με εφαρμογή του πρώτου κανόνα παρατηρησιμότητας μπορεί να υπολογιστεί και η τάση του ζυγού στο άλλο άκρο του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, θεωρώντας το ζυγό A ως ζυγό μηδενικής έγχυσης, την τάση στο ζυγό D γνωστή και τοποθέτηση PMU στο ζυγό C, μπορούν να υπολογιστούν αρχικά το ρεύμα της γραμμής D-A μέσω του νόμου του Ohm, ύστερα το ρεύμα της γραμμής A-B μέσω του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff και τέλος η τάση του ζυγού B μέσω του νόμου του Ohm.



Σχήμα 2.3: Δίκτυο 4 ζυγών με το ζυγό A ως ζυγό μηδενικής ισχύος και με τοποθέτηση PMU στο ζυγό C.

Στο Σχήμα 2.3 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν. Για το δίκτυο του Σχήματος 2.3 όλοι οι υπολογισμοί των μεγεθών του μπορούν να γίνουν μέσω των εξισώσεων (2.5) έως (2.8).

$$\vec{V}_A = \vec{V}_C + \vec{I}_{AC} * (R_{AC} + jX_{AC}) \quad (2.5)$$

$$\vec{I}_{DA} = \frac{\vec{V}_D - \vec{V}_A}{(R_{AD} + jX_{AD})} \quad (2.6)$$

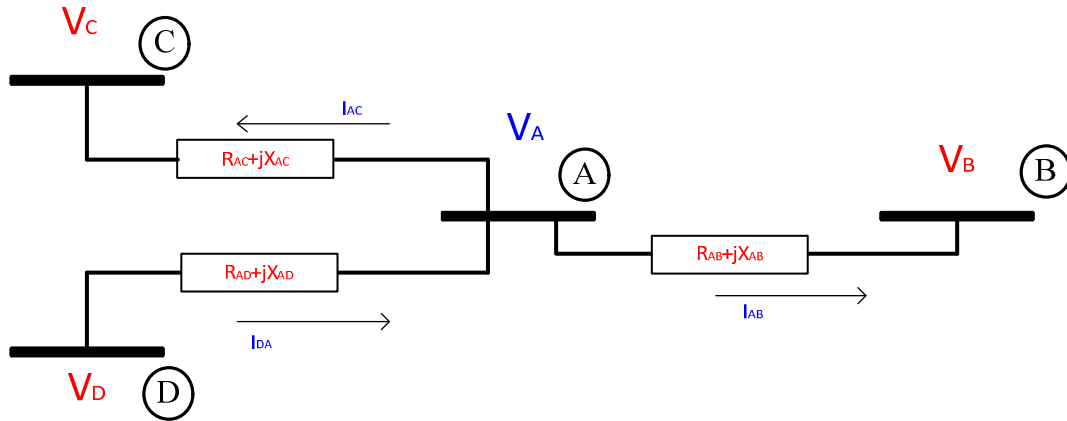
$$\vec{I}_{DA} - \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{AC} = 0 \quad (2.7)$$

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A - \vec{I}_{AB} * (R_{AB} + jX_{AB}) \quad (2.8)$$

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι σε περίπτωση όπου υπάρξει αλλαγή στην κατάσταση παρατηρησιμότητας έστω και σε ένα ζυγό του δικτύου, ο τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας πρέπει να εφαρμοστεί ξανά [2.9].

2.4.4 Τέταρτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου όλοι οι γειτονικοί ζυγοί ενός μη παρατηρήσιμου ζυγού μηδενικής έγχυσης είναι παρατηρήσιμοι, τότε σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff ο ζυγός μηδενικής έγχυσης γίνεται παρατηρήσιμος [2.10]. Στο δίκτυο του Σχήματος 2.4, αν ο ζυγός A θεωρηθεί μηδενικής έγχυσης και η τάση στους ζυγούς B,C και D γνωστή, τότε σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.9) – (2.12) η τάση στο ζυγό A καθώς και τα ρεύματα των γραμμών A-B, A-C και A-D μπορούν να υπολογιστούν.



Σχήμα 2.4: Δίκτυο 4 ζυγών με το ζυγό A ως ζυγό μηδενικής ισχύος.

Στο Σχήμα 2.4 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν.

$$\vec{V}_A = \vec{V}_B + \vec{I}_{AB} * (R_{AB} + jX_{AB}) \quad (2.9)$$

$$\vec{V}_A = \vec{V}_C + \vec{I}_{AC} * (R_{AC} + jX_{AC}) \quad (2.10)$$

$$\vec{V}_A = \vec{V}_D - \vec{I}_{DA} * (R_{AD} + jX_{AD}) \quad (2.11)$$

$$\vec{I}_{DA} - \vec{I}_{AC} - \vec{I}_{AB} = 0 \quad (2.12)$$

2.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

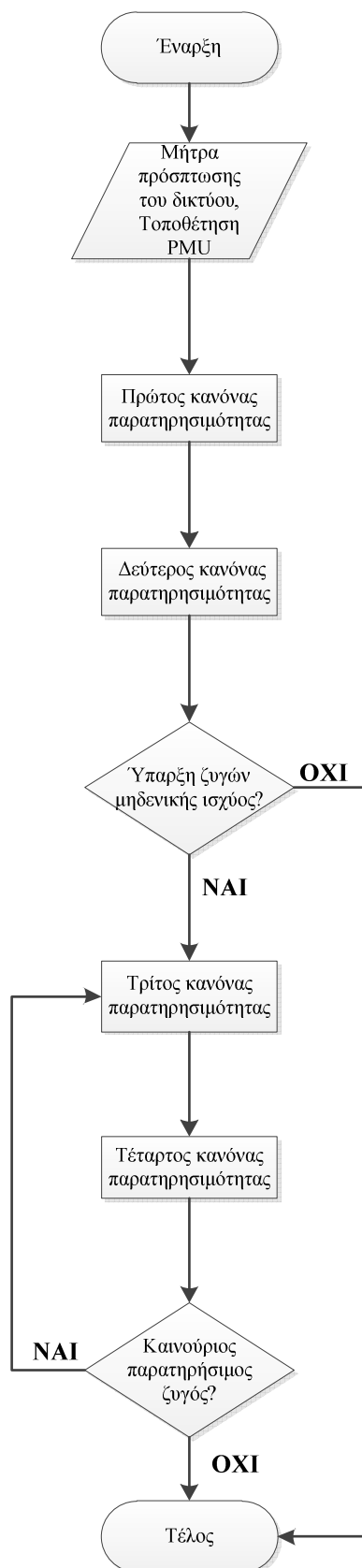
Με βάση τους κανόνες παρατηρησιμότητας, που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.3, καταστρώνεται ένας τοπολογικός αλγόριθμος παρατηρησιμότητας. Με τον αλγόριθμο αυτό, για ένα δεδομένο δίκτυο με γνωστή μήτρα πρόσπτωσης και για μια δεδομένη τοποθέτηση PMU σε ζυγούς του δικτύου, θα υπάρχει η δυνατότητα χαρακτηρισμού του δικτύου αυτού σαν πλήρως παρατηρήσιμο ή μη.

Οι ζυγοί στους οποίους τοποθετούνται PMU θεωρούνται άμεσα παρατηρήσιμοι. Με βάση τη μήτρα πρόσπτωσης του δικτύου εφαρμόζεται ο πρώτος κανόνας παρατηρησιμότητας και όλοι οι γειτονικοί ζυγοί των ζυγών στους οποίους έχει τοποθετηθεί PMU γίνονται παρατηρήσιμοι. Έστερα εφαρμόζεται ο δεύτερος κανόνας παρατηρησιμότητας και τα ρεύματα των κλάδων, που στα δυο άκρα τους η τάση είναι πλέον γνωστή, είναι δυνατό να υπολογιστούν. Στην περίπτωση που στο δίκτυο δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης ισχύος, ο αλγόριθμος τερματίζεται.

Στην αντίθετη περίπτωση όπου στο δίκτυο υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης, στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης εξετάζεται αν ικανοποιείται ο τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας. Στη συνέχεια για τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης που είναι μη παρατηρήσιμοι εξετάζεται αν ικανοποιείται ο τέταρτος κανόνας παρατηρησιμότητας. Στο σημείο αυτό αν έχει αναγνωριστεί ένας καινούριος παρατηρήσιμος ζυγός, τότε εφαρμόζεται εκ νέου ο τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας.

Με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς του δικτύου υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των φασιθετών τάσης και ρεύματος γειτονικών ζυγών, γεγονός το οποίο οδήγησε το Baldwin στην εκτίμηση ότι ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για την πλήρη παρατηρησιμότητα ενός δικτύου να είναι το 20% έως 30% των ζυγών του δικτύου [2.11].

Το λογικό διάγραμμα του τοπολογικού αλγορίθμου παρατηρησιμότητας απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Λογικό διάγραμμα τοπολογικού αλγορίθμου παρατηρησιμότητας.

2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] A. Monticelli, F.F. Wu “Network observability theory, ” *IEEE Trans Power Appar Syst*, vol. 4, No. 5, pp. 1042–1048, 1985.
- [2.2] G. R. Krumpholz, K.A. Clements, P.W. Davis, “Power system observability: a practical algorithm using network topology, ” *IEEE Trans Power Appar Syst*, pp. 1534–1542, July/August 1985.
- [2.3] I. W. Slutsker, J. M. Scudder, “Network observability analysis through measurement Jacobian matrix reduction,” *IEEE Trans Power Syst*, pp. 331-338, 1986.
- [2.4] E. E. Fetzner, P.M. Anderson, “Observability in the state estimation of power Systems,” *IEEE Trans PAS* 9, vol.4, No. 6, pp. 1981-1988, 1975.
- [2.5] E. Baran, J. Zhu, E. Carren Kenneth, “A meter placement method for state estimation,” *IEEE Trans Power Syst*, vol. 10, No. 3, pp. 1704–1710, 1995.
- [2.6] V. H. Quintana, A. S. Costa, and A. Mandel, “Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach,” *IEEE Trans Power Appar Syst*, 1982.
- [2.7] Rong-Liang Chen, “A fast integer algorithm for observability analysis using network topology,” *IEEE Trans Power Syst*, pp.1001–1009, 1990.
- [2.8] Zhao Hong-Shan, Li Ying, Mi Zeng-qiang, Yu Lei. “Sensitivity Constrained PMU Placement for Complete Observability of Power Systems” *Asia and Pacific IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition*, Dalian, China, pp. 1-5, 2005.
- [2.9] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, “Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm,” *Elec. Power Syst. Res.*, vol. 28, no. 4, pp. 223–231, May 2006.
- [2.10] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, “Optimal placement of phasor measurement units: Particle swarm optimization approach,” in *Proc. Int. Conf. Intelligent System Applications to Power Systems*, Nov. 2007, pp. 1–6.
- [2.11] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, R. Adapa, “Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No. 2, May 1993, pp. 701-715.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνηθεί ο μετά-ευριστικός αλγόριθμος που ονομάζεται αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search – TS), ο οποίος δίνει τη δυνατότητα επίλυσης μία σειράς προβλημάτων στα πεδία των εφαρμοσμένων επιστημών, της επιχειρησιακής έρευνας και της μηχανικής. Ο αλγόριθμος TS έχει μεγάλη συγγένεια με τους εξελικτικούς και γενετικούς αλγορίθμους μέσω των κοινών μεθόδων που χρησιμοποιεί για διεσπαρμένη αναζήτηση και επανασύνδεση μονοπατιών. Οι εξελικτικές αυτές διαδικασίες έχουν πρόσφατα τραβήξει την προσοχή για την ικανότητά τους στην επίλυση σύνθετων προβλημάτων. Επιπρόσθετα, η προσαρμοστική μνήμη του TS παρέχει χρήσιμες εναλλακτικές και συμπληρωματικές λύσεις για τα είδη μνημών που ενσωματώνονται σε νευρωνικά δίκτυα, επιτρέποντας τη βελτίωση των διαδικασιών τους σε πρακτικές ρυθμίσεις.

3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΗΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Αντιμέτωποι με την πρόκληση της επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης αυξημένης δυσκολίας, που κυριαρχούν στον πραγματικό κόσμο, οι κλασσικές μέθοδοι συχνά αντιμετωπίζουν μεγάλη δυσκολία στην επίλυσή τους. Ζωτικής σημασίας εφαρμογές στη επιχειρησιακή έρευνα, στη μηχανική, στις οικονομικές και εφαρμοσμένες επιστήμες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με επιτυχία σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα με μεθόδους επίλυσης, οι οποίες έχουν αναλυθεί εκτενώς από τη διεθνή ακαδημαϊκή κοινότητα τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες.

Ο μετά-ευριστικός αλγόριθμος που ονομάζεται αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις δίνει μια νέα δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων μεγάλης πρακτικής σημασίας. Σύγχρονες εφαρμογές του TS λαμβάνουν χώρα στις εφαρμογές προγραμματισμού πόρων, στις τηλεπικοινωνίες, στο σχεδιασμό VLSI, στη χρηματοοικονομική ανάλυση, στον προγραμματισμό, στις αεροδιαστημικές κατασκευές, στη διανομή ενέργειας, στη μοριακή μηχανική, στη διαχείριση αποβλήτων, στις μεταλλευτικές έρευνες, στη βιοϊατρική, στην περιβαλλοντική διαχείριση και σε δεκάδες άλλους τομείς. Τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευτεί σε επιστημονικά περιοδικά, άρθρα και υπολογιστικές μελέτες που επιβεβαιώνουν την επιτυχία του TS στην επίλυση προβλημάτων σε ένα μεγάλο

εύρος επιστημονικών πεδίων. Η ποιότητα των λύσεων που δίνει ο TS συχνά ξεπερνά σημαντικά εκείνη που λαμβάνεται από τις μεθόδους που εφαρμόζονταν προηγουμένως.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα του TS είναι η εκμετάλλευση της προσαρμοστικής μνήμης του αλγορίθμου, η οποία προσδίδει στον αλγόριθμο τη δυνατότητα να προσπεράσει πολυπλοκότητες που άλλες εναλλακτικές μέθοδοι συχνά δεν μπορούν. Ωστόσο, μόλις έχει αρχίσει να αξιοποιούνται οι πλούσιες δυνατότητες της κατάλληλης στρατηγικής προσαρμοστικών μνημών και η έρευνα που γίνεται στο αντικείμενο αυτό είναι πολλά υποσχόμενη. Η γνώση και οι αρχές που έχουν προκύψει από την ανάλυση και μελέτη του TS, έχουν θεμελιώσει τη δημιουργία πρακτικών συστημάτων, των οποίων οι δυνατότητες υπερβαίνουν σημαντικά των ήδη διαθέσιμων. Ταυτόχρονα υπάρχουν πολλές μη δοκιμασμένες παραλλαγές του, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη εξέλιξη του αλγορίθμου. Ένα ευδιάκριτο χαρακτηριστικό του TS είναι ότι αναπτύσσεται δυναμικά και εξελίσσεται, χάρη στη συνεισφορά πολλών ερευνητών.

3.2.1 Γενικά αξιώματα

Η λέξη ταμπού (tabu ή taboo) προέρχεται από τη γλώσσα του νησιού Τόγκα στην Πολυνησία, όπου χρησιμοποιούσαν από τους ιθαγενείς του νησιού για να δείξουν πράγματα τα οποία δεν μπορούσε κάποιος να αγγίξει επειδή ήταν ιερά. Σύμφωνα με το λεξικό του Webster, η λέξη επιπλέον σημαίνει «η απαγόρευση που επιβάλλει η κοινωνία σαν προστατευτικό μέσο» ή κάτι «απαγορευμένο το οποίο είναι επικίνδυνο». Οι σημερινές ερμηνείες της λέξης φαίνεται να συμφωνούν με τη γενική ιδέα του TS. Ο κίνδυνος που πρέπει να αποφευχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι ότι ακολουθώντας μια αντιπαραγωγική πορεία μπορεί να οδηγήσει σε μια παγίδευση χωρίς ελπίδα διαφυγής. Από την άλλη πλευρά, όπως και στο ευρύτερο κοινωνικό πλαίσιο όπου για τις «προστατευτικές απαγορεύσεις» υπάρχει δυνατότητα παράβλεψής τους όταν η περίπτωση το απαιτεί, έτσι και τα «ταμπού» του TS πρέπει να ακυρώνονται όταν υπάρχει ένδειξη για μια εναλλακτική προτιμώμενη λύση.

Ωστόσο, η πιο σημαντική σχέση του TS με τη συνηθισμένη χρήση της λέξης ταμπού πηγάζει από το γεγονός ότι τα ταμπού συνήθως μεταδίδονται μέσω της κοινωνικής μνήμης και τροποποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα θεμελιώδη σύνδεσμο του ορισμού της λέξης «ταμπού» με τον TS. Η κατάσταση των απαγορευμένων στοιχείων του TS εξαρτάται από μία εξελισσόμενη μνήμη, η οποία επιτρέπει στην κατάσταση αυτή να αλλάξει ανάλογα με το χρόνο και την περίπτωση.

Ειδικότερα, ο TS βασίζεται στην αρχή ότι η επίλυση προβλημάτων, προκειμένου να χαρακτηριστεί ευφυής, πρέπει να ενσωματώνει μια προσαρμοστική μνήμη και μια διαδραστική διερεύνηση. Το χαρακτηριστικό της προσαρμοστικής μνήμης του TS επιτρέπει την υλοποίηση διαδικασιών, που έχουν τη δυνατότητα αναζήτησης σε ένα πεδίο λύσεων αποδοτικά και οικονομικά. Δεδομένου ότι οι επιλογές κατευθύνονται από τα στοιχεία που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης, ο TS διαφοροποιείται από τις μεθόδους χωρίς ενσωματωμένη μνήμη, που βασίζονται κυρίως σε ημί-τυχαίες διαδικασίες που εφαρμόζουν κάποια μορφή δειγματοληψίας. Παραδείγματα μεθόδων χωρίς μνήμη είναι οι άπληστοι ευριστικοί αλγόριθμοι, καθώς και οι «γενετικοί» και «εξελικτικοί» μέθοδοι. Επιπλέον η προσαρμοστική μνήμη αντιτίθεται και με τον άκαμπτο σχεδιασμό μνήμης που υλοποιείται σε στρατηγικές διακλάδωσης και φράγματος (branch and bound). Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί

ότι ορισμένοι τύποι εξελικτικών μεθόδων που λειτουργούν με συνδυασμό λύσεων, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, ενσωματώνουν μια μορφή έμμεσης μνήμης.

Η έμφαση στη διαδραστική διερεύνηση, είτε πρόκειται για μια ντετερμινιστική ή για μια πιθανοτική εφαρμογή, προέρχεται από την υπόθεση ότι μια κακή στρατηγικά επιλογή μπορεί να αποφέρει περισσότερες πληροφορίες από μια καλή τυχαία επιλογή. Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μνήμη, μια κακή επιλογή βασισμένη σε μια στρατηγική μπορεί να δώσει χρήσιμα στοιχεία για το πώς αυτή η στρατηγική μπορεί να αλλάξει επικερδώς.

Η διαδραστική διερεύνηση ολοκληρώνει τις βασικές αρχές μια έξυπνης αναζήτησης, αξιοποιώντας τα χαρακτηριστικά ορθών λύσεων ενώ ταυτόχρονα γίνεται εξερεύνηση σε νέες υποσχόμενες περιοχές λύσεων. Ο TS ασχολείται με την εύρεση νέων και πιο αποδοτικών τρόπων εκμετάλλευσης μηχανισμών που σχετίζονται τόσο με την προσαρμοστική μνήμη όσο και με τη διαδραστική διερεύνηση. Η ανάπτυξη νέων σχεδιασμών και η ανάμειξη στρατηγικών μετατρέπουν τον TS σε μια πολλά υποσχόμενη περιοχή για έρευνα και εμπειρική μελέτη.

3.2.2 Χρήση της μνήμης

Οι δομές της μνήμης στον TS αποτελούνται από τέσσερις βασικές διαστάσεις, αποτελούμενες από την πρόσφατη πείρα, τη συχνότητα, την ποιότητα και την επιρροή (Σχήμα 3.1). Η διάσταση της μνήμης που βασίζεται στην πρόσφατη πείρα και αυτή που βασίζεται στη συχνότητα είναι συμπληρωματικές με σημαντικά χαρακτηριστικά. Η διάσταση της ποιότητας αναφέρεται στη δυνατότητα της μνήμης να διαφοροποιήσει την αξία των επισκεπτόμενων λύσεων κατά τη διάρκεια της έρευνας. Στο πλαίσιο αυτό η μνήμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναγνώριση στοιχείων που είναι κοινά σε καλές λύσεις ή σε μονοπάτια που οδηγούν σε τέτοιες λύσεις. Η ποιότητα γίνεται το θεμέλιο για μια μνήμη βασισμένη σε κίνητρα και ποινές, όπου τα κίνητρα που παρέχονται ενισχύουν τις κινήσεις που οδηγούν σε μια καλή λύση και οι ποινές που επιβάλλονται αποθαρρύνουν τις κινήσεις που οδηγούν σε μια κακή λύση. Η ευελιξία αυτής της διάστασης της μνήμης επιτρέπει στην αναζήτηση να οδηγείται σε περιβάλλον με πολλαπλά αντικείμενα, όπου η καλή ποιότητα μια συγκεκριμένης κατεύθυνσης αναζήτησης μπορεί να καθοριστεί από μία ή περισσότερες συναρτήσεις. Η ιδέα της ποιότητας στον TS είναι ευρύτερη από αυτή που έμμεσα χρησιμοποιείται σε πολλές τυποποιημένες μεθόδους βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.1 : Οι τέσσερις διαστάσεις μνήμης της TS.

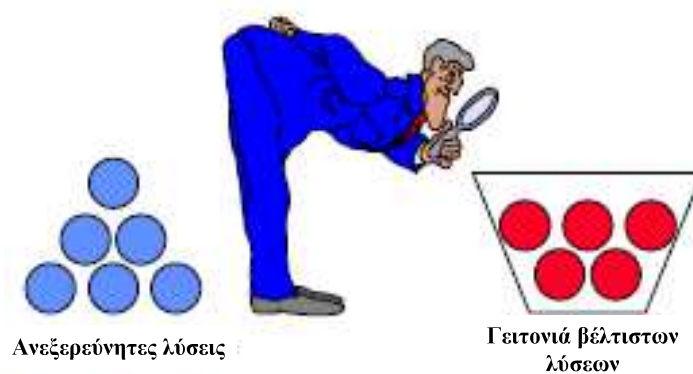
Η τέταρτη διάσταση της μνήμης, η επιρροή, εξετάζει την επίπτωση των επιλογών που έγιναν κατά τη διάρκεια της αναζήτησης, όχι μόνο στην ποιότητα αλλά και στη δομή. Κατά μία έννοια, η ποιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική μορφή της επιρροής. Η καταγραφή πληροφοριών σχετικά με την επιρροή των επιλογών σε συγκεκριμένα στοιχεία λύσεων ενσωματώνουν ένα επιπλέον επίπεδο μάθησης. Αντίθετα σε κάποιες μεθόδους, για παράδειγμα που χρησιμοποιούν διακλαδώσεις και φράγματα, οι κανόνες απόρριψης είναι προκαθορισμένες και η κατεύθυνση των διακλαδώσεων παραμένει σταθερή από τη στιγμή που θα δοθεί ένας κόμβος σε ένα δέντρο απόφασης. Ωστόσο, είναι φανερό ότι κάποιες αποφάσεις έχουν μεγαλύτερη επιρροή σε σχέση με άλλες, συναρτήσει των μετακινήσεων μέσα σε μια γειτονιά λύσεων και της διαπραγμάτευσης των γειτονικών λύσεων. Για παράδειγμα, οι επιλογές κοντά στη ρίζα μιας διακλάδωσης και ενός φράγματος του δέντρου έχουν μεγάλη επιρροή στην αναζήτηση κατά βάθος. Η αξιολόγηση και η αξιοποίηση της επιρροής μιας λύσης από μία μνήμη, που είναι πιο ευέλικτη από αυτές που ενσωματώνονται σε τέτοια δέντρα αποφάσεων, είναι ένα κύριο χαρακτηριστικό του TS.

Η μνήμη που χρησιμοποιείται στον TS είναι σαφής και προσδιοριστική. Η σαφής μνήμη καταγράφει πλήρεις λύσεις, που αποτελούνται από βέλτιστες λύσεις που έχουν βρεθεί κατά την αναζήτηση. Μια τέτοια επέκταση της μνήμης καταγράφει ελκυστικές και ανεξερεύνητες γειτονιές βέλτιστων λύσεων. Οι απομνημονευμένες βέλτιστες λύσεις ή οι ελκυστικές γειτονικές τους, χρησιμοποιούνται για τη διεύρυνση της τοπικής αναζήτησης.

Εναλλακτικά, ο TS χρησιμοποιεί προσδιοριστική μνήμη για κατευθυντήριους σκοπούς. Αυτός ο τύπος της μνήμης καταγράφει πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά που αλλάζουν καθώς γίνεται η μετακίνηση από μια λύση σε μια άλλη. Για παράδειγμα, σε ένα γράφο ή σε ένα δίκτυο τα χαρακτηριστικά μπορούν να αποτελούνται από κόμβους ή κλάδους που προστίθενται, αφαιρούνται ή επανατοποθετούνται από ένα μηχανισμό μετακίνησης. Σε ένα προγραμματισμό παραγωγής, ο δείκτης απασχόλησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν χαρακτηριστικό να αποτρέψει ή να ενθαρρύνει τη μέθοδο να ακολουθήσει ορισμένες κατευθύνσεις αναζήτησης.

3.2.3 Εντατικοποίηση και διαφοροποίηση

Δυο πολύ βασικά στοιχεία του TS είναι οι στρατηγικές εντατικοποίησης και διαφοροποίησης. Οι στρατηγικές εντατικοποίησης βασίζονται στην τροποποίηση των κανόνων επιλογής ώστε να ενθαρρύνουν τη μετακίνηση συνδυασμών και χαρακτηριστικών λύσεων, που έχουν χαρακτηριστεί ως καλά. Από τη στιγμή που οι βέλτιστες λύσεις πρέπει να καταγραφούν ώστε να εξεταστούν οι άμεσες γειτονικές λύσεις, η σαφής μνήμη είναι περισσότερο συνδεδεμένη με την υλοποίηση της στρατηγικής της εντατικοποίησης. Όπως δείχνει και το Σχήμα 3.2, η κύρια διαφορά μεταξύ της εντατικοποίησης και της διαφοροποίησης είναι ότι κατά τα στάδια της εντατικοποίησης η εξερεύνηση επικεντρώνεται στην εξέταση της γειτονιάς των βέλτιστων λύσεων.



Σχήμα 3.2 : Εντατικοποίηση και διαφοροποίηση.

Στην περίπτωση του TS ο όρος «γειτονικός» έχει ένα πιο ευρύ περιεχόμενο από τη συνηθισμένη έννοιά του στη «γειτονική αναζήτηση». Εκτός από τις λύσεις που είναι δίπλα ή κοντά στις βέλτιστες λύσεις, οι οποίες λαμβάνονται μέσω τυποποιημένων μηχανισμών κίνησης, οι στρατηγικές εντατικοποίησης δημιουργούν «γειτονικές λύσεις» είτε συνδυάζοντας στοιχεία από καλές λύσεις είτε χρησιμοποιώντας τροποποιημένες στρατηγικές αξιολόγησης που ευνοούν την εισαγωγή τέτοιων στοιχείων σε μια τρέχουσα (εξελισσόμενη) λύση. Από την άλλη πλευρά η διαφοροποίηση ενθαρρύνει τη διαδικασία αναζήτησης ώστε να εξετάσει ανεξερεύνητες περιοχές και να δημιουργήσει λύσεις, που διαφέρουν με διάφορους σημαντικούς τρόπους από αυτές που υπήρχαν προηγουμένως. Μια τέτοια προσέγγιση βασίζεται στη δημιουργία υποσυνόλων από στοιχεία λύσεων, τα οποία μπορούν αργότερα να εμπλουτιστούν ώστε να δημιουργηθούν πλήρεις λύσεις ή βασίζεται σε τροποποιημένες αξιολογήσεις, οι οποίες προκύπτουν π.χ. από συναρτήσεις ποινών/κινήτρων.

Οι στρατηγικές εντατικοποίησης απαιτούν ένα μέσο για τον προσδιορισμό ενός συνόλου βέλτιστων λύσεων, το οποίο θα είναι η βάση για την ενσωμάτωση χρήσιμων χαρακτηριστικών σε νεοδημιουργηθείσες λύσεις. Η συμμετοχή στο σύνολο των βέλτιστων λύσεων συχνά καθορίζεται με τον καθορισμό ενός ορίου, το οποίο συνδέεται με την τιμή μιας βέλτιστης λύσης, που βρέθηκε κατά την αναζήτηση, από μια αντικειμενική συνάρτηση. Επιπλέον, οι παράγοντες της ομαδοποίησης και της «αντί-ομαδοποίησης» είναι σημαντικές για τη δημιουργία τέτοιων συνόλων και ειδικότερα για τη δημιουργία υποσυνόλων λύσεων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συγκεκριμένες φάσεις της εντατικοποίησης και της διαφοροποίησης. Στις επόμενες ενότητες θα δειχθεί ότι η αντιμετώπιση των εν λόγω

προβλημάτων μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση ειδικών δομών μνήμης. Οι έννοιες της εντατικοποίησης και της διαφοροποίησης του TS αρχίζουν να βρίσκουν θέση και σε άλλου μετά-ευριστικούς αλγορίθμους. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπό όψιν ότι αυτές οι ιδέες είναι διαφορετικές από τις παλιές ιδέες της «αξιοποίησης» και της «διερεύνησης» της θεωρίας ελέγχου, ειδικά για την ανάπτυξη στρατηγικών για την επίλυση προβλημάτων.

3.3 ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΑΡΧΕΣ ΤΟΥ TS ΚΑΙ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΜΝΗΜΗ

Ο TS μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα σε λεκτικές ή συμβολικές καταστάσεις πολλών ειδών προβλημάτων αποφάσεων, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη μετατροπής τους σε ένα μαθηματικό μοντέλο. Παρόλα αυτά, είναι σκόπιμο να εισαχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο ως βάση για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του TS, ώστε να μπορεί να εκφραστεί μιας ευρεία κατηγορία τέτοιων προβλημάτων. Η κατηγορία τέτοιων προβλημάτων χαρακτηρίζονται ως προβλήματα βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) μια συνάρτησης $f(x)$, όπου $x \in X$, η οποία $f(x)$ μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική και X είναι το σύνολο των μεταβλητών απόφασης x . Οι περιορισμοί μπορεί να περιέχουν γραμμικές ή μη γραμμικές ανισότητες και μπορεί να αναγκάζουν τα στοιχεία x να παίρνουν διακριτές τιμές. Παρόλο που αυτή η αναπαράσταση είναι λειτουργική για την εξέταση ενός αριθμού επίλυσης προβλημάτων, πρέπει να τονιστεί ότι σε πολλά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, το κύριο πρόβλημα δεν μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με μία αντικειμενική συνάρτηση συνόλου περιορισμών. Για παράδειγμα για τις προϋποθέσεις του $x \in X$ μπορεί να οριστούν λογικές συνθήκες ή διασυνδέσεις, οι οποίες ενδεχομένως να έκαναν πολύ δύσκολη τη μαθηματική διατύπωση, αλλά θα ήταν προτιμότερο οι προϋποθέσεις να μείνουν ως λεκτικά ορίσματα που αργότερα θα μπορούν να κωδικοποιηθούν ως κανόνες.

Ο TS ξεκινά με το ίδιο συνηθισμένο τρόπο που ξεκινούν οι αλγόριθμοι αναζήτησης, προχωρώντας επαναληπτικά από ένα σημείο (λύση) σε ένα άλλο μέχρι ένα κριτήριο τερματισμού να ικανοποιηθεί. Κάθε $x \in X$ έχει μια γειτονιά $N(x) \subset X$, και κάθε τέτοια λύση $x' \in N(x)$ επιτυγχάνεται μέσω της x με μία συνάρτηση που ονομάζεται *κίνηση*.

Αρχικά γίνεται μια σύγκριση του TS με την απλή μέθοδο καθόδου, όπου στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της $f(x)$ (ή στην αντίστοιχη μέθοδο ανάβασης, όπου ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της $f(x)$). Μια τέτοια μέθοδος επιτρέπει μόνο την κίνηση γειτονικών λύσεων που βελτιώνει την τρέχουσα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και τερματίζεται όταν οι λύσεις, που βρίσκονται δεν μπορούν να βελτιωθούν περισσότερο. Ο ψευδοκώδικας μιας γενικής μεθόδου καθόδου αναπαριστάται στο Σχήμα 3.3. Η τελική τιμή του x , που λαμβάνεται με τη μέθοδο της καθόδου, είναι ένα τοπικό ελάχιστο και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αποτελεί το ολικό ελάχιστο, δηλαδή η $f(x)$ δεν θα ελαχιστοποιηθεί για κάθε $x \in X$.

Βήμα 1^ο: Επιλογή $x \in X$ για έναρξη της διαδικασίας.

Βήμα 2^ο: Εύρεση $x' \in N(x)$, ώστε $f(x') < f(x)$.

Εάν δεν υπάρχει τέτοιο x' , τότε το x είναι
Βήμα 3^ο: το τοπικό ελάχιστο και η μέθοδος σταματά.

Διαφορετικά, όρισε το x' να είναι το νέο x και επανέλαβε το Βήμα 2.

Σχήμα 3.3: Ψευδοκώδικας της μεθόδου κατάβασης.

Μια παραλλαγή της μεθόδου της κατάβασης είναι η απότομη κατάβαση, η οποία εξετάζει ολόκληρη της γειτονιά του x για την αναζήτηση μια λύσης x' , που δίνει τη μικρότερη τιμή $f(x')$ για κάθε $x' \in N(x)$. Μερικές προσεγγίσεις επίλυσης της απότομης κατάβασης μπορούν να εγγυηθούν ένα ολικό ελάχιστο για τα προβλήματα για τα οποία σχεδιάστηκαν, ενώ άλλες παραλλαγές της μεθόδου κατάβασης μπορεί να δώσουν μόνο τοπικά ελάχιστα αντί για ολικά. Παρά την ελκυστικότητα της μεθόδου, σε ορισμένες περιπτώσεις η απότομη κατάβαση είναι κάποιες φορές μη πρακτική επειδή είναι υπολογιστικά ακριβή, εξαιτίας του ότι το $N(x)$ περιέχει πολλά στοιχεία ή κάθε στοιχείο είναι δαπανηρό να υπολογιστεί. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές είναι φρόνιμο να επιλεγεί ένα x' , ώστε σε κάθε επανάληψη να δίνει μια «καλή», αν όχι ελάχιστη, τιμή της $f(x')$.

3.3.1 Λίστα υποψήφιων λύσεων

Η σημασία της επιλογής καλών λύσεων μέσω προηγούμενων γειτονικών λύσεων, ενισχύεται όταν οι μηχανισμοί οδήγησης του TS έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν σε καλύτερα τοπικά ελάχιστα από αυτά της μεθόδου κατάβασης. Έτσι, ένα πρώτο σημαντικό σημείο εξέτασης του TS είναι ο καθορισμός μιας κατάλληλης στρατηγικής για υποψήφιες λύσεις, έτσι ώστε να περιορίσει την εξέταση των στοιχείων του $N(x)$, με σκοπό την επίτευξη μιας αποτελεσματικής ανταλλαγής μεταξύ της ποιότητας του x και της προσπάθειας εύρεσής του. Σε αυτή την περίπτωση, η ποιότητα πρέπει να περιλαμβάνει χρήσιμα στοιχεία πέραν από αυτών που αντικατοπτρίζονται στην τιμή της συνάρτησης $f(x')$. Εάν ο χώρος γειτνίασης των λύσεων είναι εντελώς τυχαίος, τότε τίποτα δεν θα είναι πιο αποδοτικό από μια τυχαία επιλογή. Θεωρώντας ότι οι περιοχές γειτνίασης των λύσεων μπορούν να αναγνωριστούν για μια εύλογη σε μέγεθος δοσμένη κλάση προβλημάτων, η πρόκληση είναι να οριστεί κατάλληλα ένας δείκτης ποιότητας λύσεων, ώστε οι αξιολογήσεις του να έχει πραγματικό νόημα. Με τον TS υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της ιστορίας για τη δημιουργία τέτοιων αξιολογήσεων, που στη συνέχεια γίνεται σημαντική για τη δημιουργία αποτελεσματικών μεθόδων.

3.4 ΜΝΗΜΗ ΚΑΙ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ

Μια σημαντική διαφορά στον TS προκύπτει από τη διαφοροποίηση της βραχυπρόθεσμης και της μακροπρόθεσμης μνήμης. Κάθε τύπος μνήμης συνοδεύεται από τις δικές του ειδικές στρατηγικές. Ωστόσο, η επίδραση και δύο ειδών της μνήμης μπορεί θεωρηθεί ως η τροποποίηση της γειτονιάς $N(x)$ μιας τρέχουσας λύσης x . Ο τροποποιημένος χώρος γειτνίασης, ο οποίος συμβολίζεται ως $N^*(x)$, έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση μιας επιλεκτικής ιστορίας καταστάσεων που προέκυψαν κατά την αναζήτηση.

Στις στρατηγικές του TS που βασίζονται σε βραχυπρόθεσμες εκτιμήσεις, ο $N^*(x)$ είναι ένα υποσύνολο του $N(x)$ και η ταμπού ταξινόμηση χρησιμεύει για την αναγνώριση των στοιχείων του συνόλου $N(x)$ που αποκλείονται από το σύνολο $N^*(x)$. Στις στρατηγικές του TS που λαμβάνουν υπό όψιν μακροπρόθεσμες εκτιμήσεις, το σύνολο $N^*(x)$ μπορεί να επεκταθεί ώστε να εμπεριέχει λύσεις που δεν βρίσκονται συνήθως στο $N(x)$. Για αυτό το λόγο ο TS μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μια δυναμική μέθοδος αναζήτησης σε γειτονικούς χώρους. Αυτό σημαίνει ότι η γειτονιά του x δεν είναι ένα στατικό σύνολο, αλλά ένα σύνολο που αλλάζει σύμφωνα με την ιστορία της έρευνας. Το χαρακτηριστικό της δυναμικής αλλαγής γειτονιών λύσεων μπορεί να εφαρμοστεί σε μια επιλογή στοιχείων περιοχών γειτνίασης από την ένωση γειτονικών χώρων, που περιέχουν πολλαπλούς τύπους ή επίπεδα κινήσεων και παρέχουν μια σημαντική βάση για παράλληλη επεξεργασία. Η διαδικασία του TS βασίζεται αυστηρά σε στρατηγικές βραχυπρόθεσμης μνήμης που επιτρέπουν την επίσκεψη σε μια λύση x περισσότερες από μια φορές, αλλά είναι πιθανή η αντίστοιχη μείωση της γειτονιάς $N^*(x)$ να είναι διαφορετική κάθε φορά. Με την προσθήκη μακροπρόθεσμης μνήμης, η πιθανότητα αναπαραγωγής ενός προηγούμενου χώρου γειτνίασης για επανεξέταση μιας λύσης και γενικότερα η δημιουργία επιλογών, που έχουν επανειλημμένα επισκεφθεί μόνο ένα περιορισμένο υποσύνολο του X , είναι σχεδόν μηδαμινή. Από πρακτική σκοπιά, η μέθοδος θα αναγνωρίσει μια βέλτιστη ή κοντά στη βέλτιστη λύση, πολύ πριν ένα σημαντικό μέρος του συνόλου X εξεταστεί.

Μια κρίσιμη πτυχή του TS περιλαμβάνει την επιλογή ενός κατάλληλου ορισμού του συνόλου $N^*(x)$. Λόγω της εκμετάλλευσης της μνήμης, το $N^*(x)$ εξαρτάται από την πορεία που ακολουθεί η μετακίνηση από μια λύση στην επόμενη ή ένα σύνολο από τέτοιες πορείες σε περιβάλλον παράλληλης επεξεργασίας.

Η μέθοδος της αποθήκευσης ολοκληρωμένων λύσεων (σαφής μνήμη) χρησιμοποιείται συνήθως με ένα εξαιρετικά επιλεκτικό τρόπο, γιατί μπορεί να καταναλώσει ένα τεράστιο ποσό χώρου και χρόνου, όταν εφαρμόζεται σε κάθε λύση που παράγεται. Ένα σύστημα που μιμείται αυτή την προσέγγιση με περιορισμένες απαιτήσεις μνήμης δίνεται από τη χρήση των συναρτήσεων κατακερματισμού. Επιπλέον, η σαφής μνήμη έχει πολύτιμο ρόλο όταν εφαρμόζεται επιλεκτικά σε στρατηγικές που καταγράφουν και αναλύουν συγκεκριμένες «ειδικές» λύσεις. Ανεξάρτητα από τις λεπτομέρειες υλοποίησης, η βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη συνάρτηση μνήμης αποτελούν ακρογωνιαίους λίθους της μεθοδολογίας του TS. Αυτές οι συναρτήσεις κάνουν χρήση της μνήμης με βάση τη πρόσφατη πείρα και της μνήμης με βάση τη συχνότητα. Εδώ θα γίνει ανάλυση της μνήμης που βασίζεται στην πρόσφατη πείρα.

3.4.1 Μνήμη βασισμένη στην πρόσφατη πείρα

Η μνήμη βασισμένη στην πρόσφατη πείρα, όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, παρακολουθεί λύσεις που τα χαρακτηριστικά τους έχουν αλλάξει κατά το πρόσφατο παρελθόν.

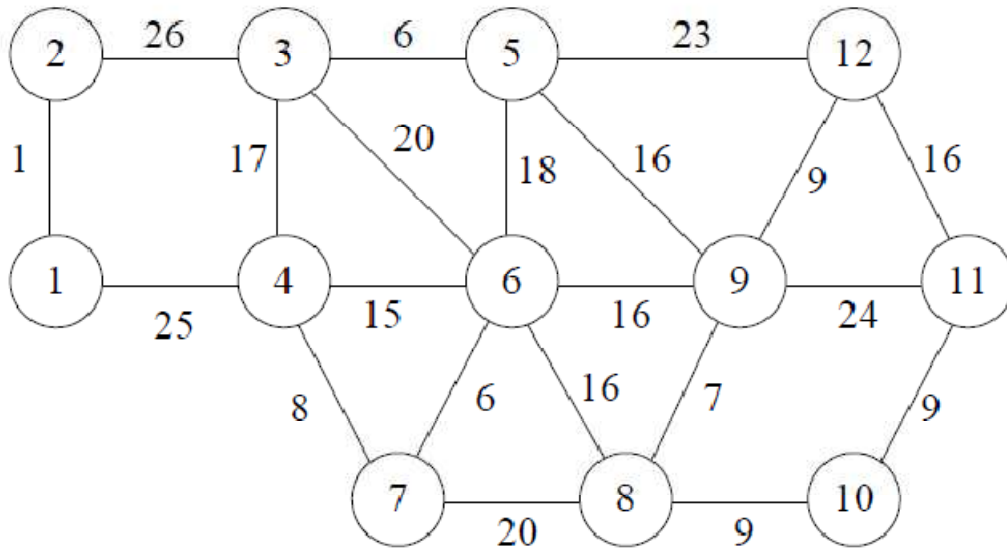
Για την εκμετάλλευση της μνήμης, επιλεγμένα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στις λύσεις που επισκεφθήκατε επισημαίνονται ως απαγορευμένα και οι λύσεις, που περιέχουν απαγορευμένα στοιχεία ή συγκεκριμένο συνδυασμό χαρακτηριστικών των στοιχείων, είναι αυτές που χαρακτηρίζονται ως απαγορευμένες (ταμπού). Ο χαρακτηρισμός αυτός απορρίπτει συγκεκριμένες λύσεις από το πρόσφατο παρελθόν που ανήκουν στο $N^*(x)$ και ως εκ τούτου απορρίπτει την επανεξέτασή τους. Άλλες λύσεις που μοιράζονται, επίσης, ταμπού ενεργά στοιχεία απορρίπτονται και εμποδίζεται η επανεξέτασή τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η απαγορευμένη ταξινόμηση αναφέρεται αυστηρά σε λύσεις που απαγορεύονται να εξεταστούν, επειδή περιέχουν ταμπού ενεργά χαρακτηριστικά, πρέπει και οι κινήσεις που οδηγούν σε τέτοιες λύσεις να χαρακτηρίζονται ως απαγορευμένες (ταμπού).

3.4.2 Κριτήριο έμπνευσης

Πρόσθετες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν για την αποφυγή απόρριψης καλών λύσεων εξαιτίας των απαγορευμένων ταξινόμήσεων. Μια τέτοιου είδους στρατηγική, που ενσωματώνει τέτοιες προφυλάξεις, είναι γνωστή ως κριτήριο έμπνευσης (aspiration criteria). Εναλλακτικές μορφές των κριτηρίων έμπνευσης είναι πολύ σημαντικές για τον TS. Έτσι, αν προέκυπτε μία απαγορευμένη λύση σε μια επανάληψη του TS, η οποία έχει καλύτερη τιμή από αυτή που έχει βρεθεί έως τώρα, τότε η απαγορευμένη ταξινόμηση αυτή της λύσης θα έπρεπε να παρακαμφθεί και να γίνει επιτρεπτή η εξέταση της λύσης αυτής. Είναι σημαντικό να ληφθεί υπό όψιν ότι το κριτήριο έμπνευσης δεν υποχρεώνει συγκεκριμένες λύσεις να επιλεγθούν, αλλά τις κάνει διαθέσιμες ή εναλλακτικά ακυρώνει τις απαγορεύσεις που επιβλήθηκαν από μια απαγορευμένη ταξινόμηση.

3.5 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ k-ΔΕΝΤΡΟΥ

Το πρόβλημα του ελαχίστου k-δέντρου αποσκοπεί στη δημιουργία ενός δέντρου αποτελούμενο από k ακμές ενός γράφου με βάρη, έτσι ώστε το άθροισμα των βαρών των ακμών να είναι ελάχιστο. Ένας μη κατευθυνόμενος γράφος με βάρη δίνεται στο Σχήμα 3.4, όπου οι κόμβοι εμφανίζονται ως αριθμημένοι κύκλοι και οι ακμές ως γραμμές που ενώνουν δυο κόμβους μεταξύ τους. Τα βάρη των ακμών είναι οι αριθμοί που εμφανίζονται πάνω από τις ακμές. Ένα δέντρο είναι ένα σύνολο ακμών που δεν περιέχει ούτε ένα κύκλο, δηλαδή δεν περιέχει μονοπάτια που ξεκινούν και καταλήγουν στον ίδιο κόμβο.



Σχήμα 3.4 : Μη κατευθυνόμενος γράφος με βάρη.

Θεωρείται ότι σαν μηχανισμός κίνησης ορίζεται η εναλλαγή ακμών και ότι ένας άπληστος αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την εύρεση της αρχικής λύσης. Η δημιουργία της «άπληστης» αρχικής λύσης ξεκινά επιλέγοντας από το γράφο την ακμή (i,j) με το μικρότερο βάρος, όπου i και j είναι οι δείκτες των κόμβων στα άκρα της ακμής. Οι υπόλοιπες $k-1$ ακμές θα επιλεγθούν διαδοχικά, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ολοένα και αυξανόμενο βάρος σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Για $k = 4$, τα βήματα του άπληστου αλγορίθμου εμφανίζονται στον Πίνακα 3.1.

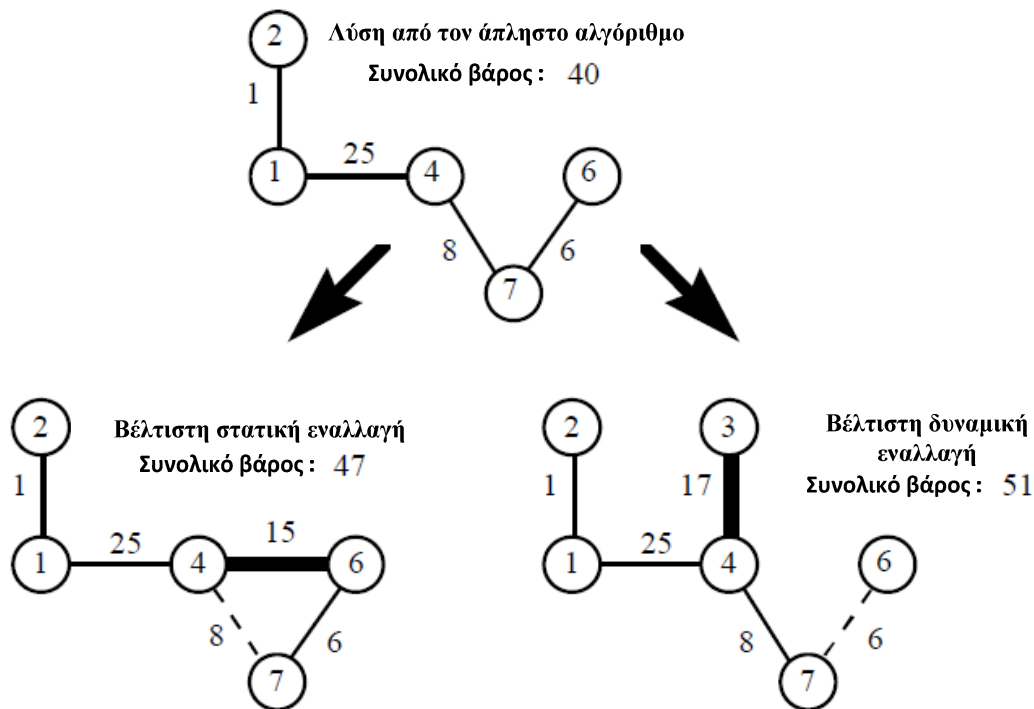
Πίνακας 3.1: Άπληστος αλγόριθμος για το πρόβλημα του ελαχίστου 4-δέντρου.

Βήμα	Υποψήφιες λύσεις	Επιλογή	Συνολικό βάρος
1	(1,2)	(1,2)	1
2	(1,4), (2,3)	(1,4)	26
3	(2,3), (3,4), (4,6), (4,7)	(4,7)	34
4	(2,3), (3,4), (4,6), (6,7), (7,8)	(6,7)	40

Η κατασκευή του δέντρου ξεκινά επιλέγοντας την ακμή $(1,2)$ με βάρος ίσο με 1, το οποίο είναι και το μικρότερο βάρος στο γράφο. Μετά από αυτή την επιλογή, οι υποψήφιες ακμές είναι αυτές που συνδέονται στους κόμβους του τρέχοντος δέντρου, δηλαδή οι ακμές $(1,4)$ και $(2,3)$. Από τη στιγμή που η ακμή $(1,4)$ ελαχιστοποιεί το αυξανόμενο βάρος, επιλέγεται ως μέρος της τρέχουσας μερικής λύσης. Οι υπόλοιπες επιλογές ακολουθούν την ίδια λογική και η κατασκευή του δέντρου τερματίζεται όταν συμπληρώνονται 4 ακμές ($k = 4$). Η αρχική λύση στη προκειμένη περίπτωση έχει συνολικό βάρος ίσο με 40.

Ο μηχανισμός εναλλαγής ακμών, που χρησιμοποιείται από εδώ και στο εξής, αντικαθιστά μια επιλεγμένη ακμή του δέντρου με μία άλλη επιλεγμένη ακμή έξω από το δέντρο, με την προϋπόθεση ότι ο υπόγραφος που προκύπτει να είναι δέντρο. Υπάρχουν στην ουσία δύο είδη εναλλαγών ακμών, ένα το οποίο διατηρεί τους κόμβους του αρχικού δέντρου αμετάβλητους (στατικό) και το δεύτερο που προκαλεί την αντικατάσταση ενός κόμβου από ένα καινούριο (δυναμικό). Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η καλύτερη εναλλαγή κάθε τύπου που μπορεί να γίνει στη λύση που δίνει ο άπληστος αλγόριθμος. Η προστιθέμενη ακμή σε κάθε

περίπτωση φαίνεται από μια έντονη γραμμή και η απορριπτόμενη ακμή συμβολίζεται από μια διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 3.5 : Είδη μηχανισμών εναλλαγής ακμών.

Η καλύτερη επιλογή από τους δύο τύπους εναλλαγής ακμών του Σχήματος 3.5 είναι η στατική εναλλαγή, όπου στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται καλύτερη διότι έχει καλύτερη επίδραση στην αλλαγή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Από τη στιγμή που και οι δύο βέλτιστες εναλλαγές οδηγούν σε μεγαλύτερο αρχικό βάρος σε σχέση με την αρχική λύση, η εκτέλεση τέτοιων κινήσεων ακυρώνει τους κανόνες της μεθόδου κατάβασης και θέτει τις βάσεις για τη διαδικασία του TS. Ο περιορισμός δυνατοτήτων που εισάγει η συγκεκριμένη κατασκευή δέντρου είναι συγκεκριμένη μόνο για αυτό το παράδειγμα, δεδομένου ότι η μεθοδολογία του TS μπορεί να περιλαμβάνει διαδρομές αναζήτησης που παραβιάζουν κάποιους κανόνες δυνατοτήτων.

Δεδομένου ενός μηχανισμού κίνησης, όπως ο μηχανισμός εναλλαγής ακμών που επιλέχθηκε στον συγκεκριμένο παράδειγμα, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή βασικών χαρακτηριστικών που θα χρησιμοποιηθούν στην ταμπού ταξινόμηση. Ο TS είναι πολύ ευέλικτος στο σχεδιασμό αυτό του σταδίου. Η γνώση της αιτίας του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για το συγκεκριμένο σχεδιασμό. Σε προβλήματα όπου οι κινήσεις ορίζονται από την πρόσθεση ή αφαίρεση στοιχείων, τα χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών μπορούν χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή των απαγορευμένων καταστάσεων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι ακμές μπορούν να οριστούν σαν χαρακτηριστικά των κινήσεων, αφού η συμμετοχή τους ή όχι στην κατασκευή του δέντρου μπορεί αυτόματα να είναι γνωστή από μια συνηθισμένη αναπαράσταση λύσης.

Η ταμπού ταξινόμηση μπορεί να είναι και ασύμμετρη, μπορεί δηλαδή να σχεδιαστεί η δομή για τις απαγορευμένες καταστάσεις των στοιχείων που προστίθενται ή αφαιρούνται να είναι διαφορετική. Έστω ότι για το συγκεκριμένο παράδειγμα επιλέγεται η στατική

εναλλαγή του Σχήματος 3.5, η οποία προσθέτει την ακμή (4,6) και αφαιρεί την ακμή (4,7), μια απαγορευμένη κατάσταση ορίζεται και για τις δυο κινήσεις. Στη συνέχεια πρέπει να οριστούν αυτές οι δυο ακμές ταμπού ενεργές ή αλλιώς απαγορευμένες για ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Η απαγορευμένη κατάσταση έχει διαφορετικό νόημα για τις ακμές που προστίθεται και για τις ακμές που αφαιρούνται. Για μια προστιθέμενη ακμή, η απαγορευμένη κατάσταση σημαίνει ότι η ακμή δεν επιτρέπεται να αφαιρεθεί από το τρέχον δέντρο για ένα αριθμό επαναλήψεων, ο οποίος ορίζεται από το μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων. Από την άλλη πλευρά, για μια αφαιρούμενη ακμή η απαγορευμένη κατάσταση σημαίνει ότι για έναν αριθμό επαναλήψεων που ορίζεται από το μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων, η ακμή δεν επιτρέπεται να συμπεριληφθεί στην τρέχουσα λύση. Από τη στιγμή που υπάρχουν πολύ περισσότερες ακμές έξω από το δέντρο από ότι μέσα, φαίνεται λογικό να οριστεί το μήκος απαγορευμένων καταστάσεων για τις ακμές που αφαιρούνται να είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μήκος για τις ακμές που προστίθενται. Πρέπει να τονιστεί ότι το μέγεθος του μήκους των απαγορευμένων καταστάσεων για τις ακμές που προστίθενται έχει όριο τον αριθμό k , από τη στιγμή που εάν δεν προστεθούν ακμές για k επαναλήψεις, μετά από k βήματα όλες οι κινήσεις θα οριστούν ως απαγορευμένες.

Η ιδέα της δημιουργίας ασύμμετρων απαγορευμένων ταξινομήσεων μπορεί να εφαρμοστεί και σε εφαρμογές όπου κινήσεις πρόσθεσης/αφαίρεσης δεν χρησιμοποιούνται.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απαγορευμένες ταξινομήσεις μπορεί ουσιαστικά να αποτρέψουν την έρευνα λύσεων που έχουν προηγουμένως εξεταστεί. Στο πρόβλημα του ελάχιστου k -δέντρου, οι ακμές που αφαιρούνται θεωρούνται απαγορευμένες για 2 επαναλήψεις, ενώ οι ακμές που προστίθενται χαρακτηρίζονται απαγορευμένες για μια μόνο επανάληψη. Κατά την εφαρμογή του TS, εξετάζεται ολόκληρη η γειτονιά των διαθέσιμων εναλλαγών ακμών σε κάθε επανάληψη και επιλέγεται η καλύτερη που δεν είναι απαγορευμένη. Για λόγους ευκολίας, επιλέγεται σαν κριτήριο τερματισμού του TS, ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου, ο οποίος ορίζεται ίσος με 5, για την εφαρμογή της ενότητας 3.5.

3.5.1 Πρώτη επανάληψη

Ως αρχική λύση επιλέγεται η λύση του Σχήματος 3.5, που δόθηκε από τον άπληστο αλγόριθμο και έχει συνολικό βάρος ίσο με 40. Η λύση αυτή αποτελεί το τρέχον μονοπάτι για αυτή την επανάληψη και αποτελείται από τις ακμές:

Τρέχον μονοπάτι 1^{ης} επανάληψης : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Η λύση αυτή, ακόμα, αποθηκεύεται στη μνήμη σαν βέλτιστη. Το βέλτιστο μονοπάτι του γράφου του Σχήματος 3.4 αποτελείται από τις ακμές:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Με εξέταση της γειτονιάς των ακμών που αποτελούν το τρέχον μονοπάτι δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Λίστα υποψηφίων λύσεων της πρώτης επανάληψης του TS.

Αφαίρεση ακμής	Πρόσθεση ακμής	Υποψήφιο μονοπάτι	Συνολικό βάρος
(1,2)	(3,4)	(1,4), (3,4), (4,7), (7,6)	56
(1,2)	(3,6)	(1,4), (4,7), (7,6), (3,6)	59
(1,2)	(5,6)	(1,4), (4,7), (7,6), (5,6)	57
(1,2)	(6,9)	(1,4), (4,7), (7,6), (6,9)	55
(1,2)	(6,8)	(1,4), (4,7), (7,6), (6,8)	55
(1,2)	(7,8)	(1,4), (4,7), (7,6), (7,8)	59
(4,7)	(4,6)	(1,2), (1,4), (4,6), (6,7)	47
(6,7)	(2,3)	(2,3), (1,2), (1,4), (4,7)	65
(6,7)	(3,4)	(1,2), (1,4), (4,3), (4,7)	56
(6,7)	(4,6)	(1,2), (1,4), (4,6), (4,7)	54
(6,7)	(7,8)	(1,2), (1,4), (4,7), (7,8)	59

Από τον πίνακα 3.1 παρατηρείται ότι η καλύτερη λύση δημιουργείται όταν από το τρέχον μονοπάτι αφαιρείται η ακμή (4,7) και προστίθεται η ακμή (4,6). Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται ποιες ακμές χαρακτηρίζονται απαγορευμένες και αποτελούν τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Οι τιμές της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων 1 και 2, υποδεικνύουν τον αριθμό των επαναλήψεων για τον οποίο οι επιλογές των ακμών που βρίσκονται σε αυτή τη λίστα είναι απαγορευμένες.

Πίνακας 3.2 : Λίστα των δύο απαγορευμένων καταστάσεων του TS μετά την πρώτη επανάληψη.

1	2
(4,6)	(4,7)

Τέλος γίνεται σύγκριση των βαρών του καλύτερου μονοπατιού που βρέθηκε μετά το τέλος της πρώτης επανάληψης, δηλαδή του (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) και του βέλτιστου μονοπατιού και παρατηρείται ότι το συνολικό βάρος του βέλτιστου μονοπατιού είναι μικρότερο ($40 < 47$), άρα το βέλτιστο μονοπάτι παραμένει ως έχει:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

3.5.2 Δεύτερη επανάληψη

Ως τρέχουσα λύση επιλέγεται η λύση της πρώτης επανάληψης, που έχει συνολικό βάρος ίσο με 47. Η λύση αυτή αποτελείται από τις ακμές:

Τρέχον μονοπάτι 2^{ης} επανάληψης: (1,2), (1,4), (4,6), (6,7) με Βάρος=47.

Το βέλτιστο μονοπάτι του γράφου του Σχήματος 3.4 παραμένει η λύση που δόθηκε από τον άπληστο αλγόριθμο και αποτελείται από τις ακμές:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Με εξέταση της γειτονιάς των ακμών που αποτελούν το τρέχον μονοπάτι δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Λίστα υποψηφίων λύσεων της δεύτερης επανάληψης του TS.

Αφαίρεση ακμής	Πρόσθεση ακμής	Υποψήφιο μονοπάτι	Συνολικό βάρος
(1,2)	(3,4)	(1,4), (3,4), (4,6), (7,6)	63
(1,2)	(3,6)	(1,4), (4,6), (7,6), (3,6)	66
(1,2)	(5,6)	(1,4), (4,6), (7,6), (5,6)	64
(1,2)	(6,9)	(1,4), (4,6), (7,6), (6,9)	62
(1,2)	(6,8)	(1,4), (4,6), (7,6), (6,8)	62
(1,2)	(7,8)	(1,4), (4,6), (7,6), (7,8)	66
(4,6)	(4,7)	(1,2), (1,4), (4,7), (6,7)	47
(6,7)	(2,3)	(2,3), (1,2), (1,4), (4,6)	58
(6,7)	(3,4)	(1,2), (1,4), (4,3), (4,6)	58
(6,7)	(4,7)	(1,2), (1,4), (4,6), (4,7)	49
(6,7)	(6,8)	(1,2), (1,4), (4,6), (6,8)	57

Στη δεύτερη επανάληψη, η αντίστροφη κίνηση της πρώτης επανάληψης, όπου τώρα προστίθεται η ακμή (4,7) και αφαιρείται η ακμή (4,6), είναι απαγορευμένη καθώς και οι δύο ακμές βρίσκονται στη λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του Πίνακα 3.2. Επιπλέον, η κίνηση που προσθέτει την ακμή (4,6) και αφαιρεί την (6,7) είναι επίσης απαγορευμένη, διότι περιέχει την ακμή (4,7) η οποία απαγορεύεται να χρησιμοποιηθεί για τις επόμενες δυο επαναλήψεις σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2. Η λύση που επιλέγεται από τον Πίνακα 3.3 είναι στη προκειμένη περίπτωση η αμέσως καλύτερη, δηλαδή η λύση που έχει βάρος ίσο με 57 και το μονοπάτι της αποτελείται από τις ακμές (1,2), (1,4), (4,6) και (6,8). Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται ποιες ακμές χαρακτηρίζονται απαγορευμένες και αποτελούν τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Οι τιμές της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων 1 και 2, υποδεικνύουν τον αριθμό των επαναλήψεων για τον οποίο οι επιλογές των ακμών που βρίσκονται σε αυτή τη λίστα είναι απαγορευμένες.

Πίνακας 3.4 : Λίστα των δυο απαγορευμένων καταστάσεων του TS μετά τη δεύτερη επανάληψη.

1	2
(4,7), (6,8)	(6,7)

Τέλος, γίνεται σύγκριση των βαρών του καλύτερου μονοπατιού που βρέθηκε μετά το τέλος της δεύτερης επανάληψης, δηλαδή του (1,2), (1,4), (4,6), (6,8) και του βέλτιστου μονοπατιού και παρατηρείται ότι το συνολικό βάρος του βέλτιστου μονοπατιού είναι μικρότερο ($40 < 57$), άρα το βέλτιστο μονοπάτι παραμένει ως έχει:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

3.5.3 Τρίτη επανάληψη

Ως τρέχουσα λύση επιλέγεται η λύση της δεύτερης επανάληψης, που έχει συνολικό βάρος ίσο με 57. Η λύση αυτή αποτελείται από τις ακμές:

Τρέχον μονοπάτι 3^{ης} επανάληψης: (1,2), (1,4), (4,6), (6,8) με Βάρος=57.

Το βέλτιστο μονοπάτι του γράφου του Σχήματος 3.4 παραμένει η λύση που δόθηκε από τον άπληστο αλγόριθμο και αποτελείται από τις ακμές:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Με εξέταση της γειτονιάς των ακμών που αποτελούν το τρέχον μονοπάτι δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Λίστα υποψηφίων λύσεων της τρίτης επανάληψης του TS.

Αφαίρεση ακμής	Πρόσθεση ακμής	Υποψήφιο μονοπάτι	Συνολικό βάρος
(1,2)	(3,4)	(1,4), (3,4), (4,6), (6,8)	73
(1,2)	(3,6)	(1,4), (4,6), (6,8), (3,6)	76
(1,2)	(5,6)	(1,4), (4,6), (6,8), (5,6)	74
(1,2)	(6,9)	(1,4), (4,6), (6,8), (6,9)	72
(1,2)	(6,7)	(1,4), (4,6), (6,8), (6,7)	62
(1,2)	(4,7)	(1,4), (4,7), (4,6), (6,8)	64
(1,2)	(7,8)	(1,4), (4,6), (6,8), (7,8)	72
(1,2)	(8,9)	(1,4), (4,6), (6,8), (8,9)	63
(6,8)	(2,3)	(2,3), (1,2), (1,4), (4,6)	67
(6,8)	(3,4)	(1,2), (1,4), (4,3), (4,6)	58
(6,8)	(4,7)	(1,2), (1,4), (4,6), (4,7)	49
(6,8)	(3,6)	(1,2), (1,4), (4,6), (3,6)	61
(6,8)	(5,6)	(1,2), (1,4), (4,6), (5,6)	59
(6,8)	(6,9)	(1,2), (1,4), (4,6), (6,9)	57
(6,8)	(6,7)	(1,2), (1,4), (4,6), (6,7)	47

Στην τρίτη επανάληψη η κίνηση όπου αφαιρείται η ακμή (6,8) είναι απαγορευμένη καθώς η ακμή (6,8) βρίσκεται στη λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του Πίνακα 3.4. Επιπλέον, η κίνηση που προσθέτει την ακμή (4,7) ή (6,7) και αφαιρεί την (1,2) είναι επίσης απαγορευμένη, διότι περιέχει την ακμή (4,7) ή (6,7) οι οποίες απαγορεύεται να χρησιμοποιηθούν σύμφωνα με τον Πίνακα 3.4. Η λύση που επιλέγεται από τον Πίνακα 3.5 είναι στη προκειμένη περίπτωση η αμέσως καλύτερη, δηλαδή η λύση που έχει βάρος ίσο με 63 και το μονοπάτι της αποτελείται από τις ακμές (1,4), (4,6), (6,8) και (8,9). Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται ποιες ακμές χαρακτηρίζονται απαγορευμένες και αποτελούν τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Οι τιμές της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων 1 και 2, υποδεικνύουν τον αριθμό των επαναλήψεων για τον οποίο οι επιλογές των ακμών που βρίσκονται σε αυτή τη λίστα είναι απαγορευμένες.

Πίνακας 3.6 : Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του TS μετά την τρίτη επανάληψη.

1	2
(6,7), (8,9)	(1,2)

Τέλος γίνεται σύγκριση των βαρών του καλύτερου μονοπατιού που βρέθηκε μετά το τέλος της πρώτης επανάληψης, δηλαδή του (1,4), (4,6), (6,8), (8,9) και του βέλτιστου μονοπατιού

και παρατηρείται ότι το συνολικό βάρος του βέλτιστου μονοπατιού είναι μικρότερο ($40 < 63$), άρα το βέλτιστο μονοπάτι παραμένει ως έχει:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

3.5.4 Τέταρτη επανάληψη

Ως τρέχουσα λύση επιλέγεται η λύση της τρίτης επανάληψης, που έχει συνολικό βάρος ίσο με 63. Η λύση αυτή αποτελείται από τις ακμές:

Τρέχον μονοπάτι 4^{ης} επανάληψης: (1,4), (4,6), (6,8), (8,9) με Βάρος=63.

Το βέλτιστο μονοπάτι του γράφου του Σχήματος 3.4 παραμένει η λύση που δόθηκε από τον άπληστο αλγόριθμο και αποτελείται από τις ακμές:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Με εξέταση της γειτονιάς των ακμών που αποτελούν το τρέχον μονοπάτι δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 3.7.

Πίνακας 3.7: Λίστα υποψηφίων λύσεων της τέταρτης επανάληψης του TS.

Αφαίρεση ακμής	Πρόσθεση ακμής	Υποψήφιο μονοπάτι	Συνολικό βάρος
(1,4)	(3,4)	(3,4), (4,6), (6,8), (8,9)	55
(1,4)	(4,7)	(4,7), (4,6), (6,8), (8,9)	46
(8,9)	(7,8)	(1,4), (4,6), (6,8), (7,8)	76
(8,9)	(8,10)	(1,4), (4,6), (6,8), (8,10)	64

Στην τέταρτη επανάληψη η κίνηση όπου αφαιρείται η ακμή (8,9) είναι απαγορευμένη καθώς η ακμή (8,9) βρίσκεται στη λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του Πίνακα 3.6. Η λύση που επιλέγεται από τον Πίνακα 3.7 είναι στη προκειμένη περίπτωση η λύση που έχει βάρος ίσο με 46 και το μονοπάτι της αποτελείται από τις ακμές (4,7), (4,6), (6,8) και (8,9). Στον Πίνακα 3.8 φαίνονται ποιες ακμές χαρακτηρίζονται απαγορευμένες και αποτελούν τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Οι τιμές της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων 1 και 2, υποδεικνύουν τον αριθμό των επαναλήψεων για τον οποίο οι επιλογές των ακμών που βρίσκονται σε αυτή τη λίστα είναι απαγορευμένες.

Πίνακας 3.8 : Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του TS μετά την τέταρτη επανάληψη.

1	2
(1,2), (4,7)	(1,4)

Τέλος γίνεται σύγκριση των βαρών του καλύτερου μονοπατιού που βρέθηκε μετά το τέλος της πρώτης επανάληψης, δηλαδή του (4,7), (4,6), (6,8), (8,9) και του βέλτιστου μονοπατιού και παρατηρείται ότι το συνολικό βάρος του βέλτιστου μονοπατιού είναι μικρότερο ($40 < 46$), άρα το βέλτιστο μονοπάτι παραμένει ως έχει:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

3.5.5 Πέμπτη επανάληψη

Ως τρέχουσα λύση επιλέγεται η λύση της τέταρτης επανάληψης, που έχει συνολικό βάρος ίσο με 46. Η λύση αυτή αποτελείται από τις ακμές:

Τρέχον μονοπάτι 5^{ης} επανάληψης: (4,7), (4,6), (6,8), (8,9) με Βάρος=46.

Το βέλτιστο μονοπάτι του γράφου του Σχήματος 3.4 παραμένει η λύση που δόθηκε από τον άπληστο αλγόριθμο και αποτελείται από τις ακμές:

Βέλτιστο μονοπάτι : (1,2), (1,4), (4,7), (6,7) με Βάρος=40.

Με εξέταση της γειτονιάς των ακμών που αποτελούν το τρέχον μονοπάτι δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9: Λίστα υποψηφίων λύσεων της πέμπτης επανάληψης του TS.

Αφαίρεση ακμής	Πρόσθεση ακμής	Υποψήφιο μονοπάτι	Συνολικό βάρος
(4,7)	(1,4)	(1,4), (4,6), (6,8), (8,9)	63
(4,7)	(3,4)	(3,4), (4,6), (6,8), (8,9)	55
(4,6)	(6,7)	(4,7), (6,7), (6,8), (8,9)	37
(4,6)	(7,8)	(4,7), (7,8), (6,8), (8,9)	51
(8,9)	(8,10)	(4,7), (4,6), (6,8), (8,10)	48

Στην τέταρτη επανάληψη η κίνηση όπου αφαιρείται η ακμή (4,7) είναι απαγορευμένη καθώς η ακμή (4,7) βρίσκεται στη λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του Πίνακα 3.6. Η λύση που επιλέγεται από τον Πίνακα 3.9 είναι στη προκειμένη περίπτωση η λύση που έχει βάρος ίσο με 37 και το μονοπάτι της αποτελείται από τις ακμές (4,7), (6,7), (6,8) και (8,9). Στον Πίνακα 3.8 φαίνονται ποιες ακμές χαρακτηρίζονται απαγορευμένες και αποτελούν τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Οι τιμές της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων 1 και 2, υποδεικνύουν τον αριθμό των επαναλήψεων για τον οποίο οι επιλογές των ακμών που βρίσκονται σε αυτή τη λίστα είναι απαγορευμένες.

Πίνακας 3.8 : Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων του TS μετά την πέμπτη επανάληψη.

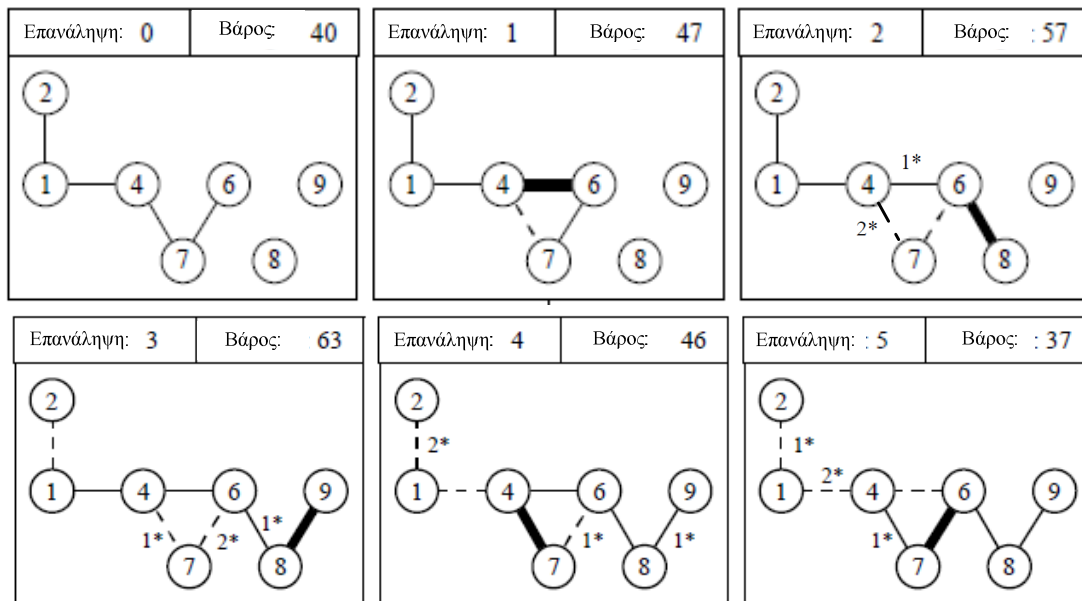
1	2
(6,7), (8,9)	(1,2)

Τέλος, γίνεται σύγκριση των βαρών του καλύτερου μονοπατιού που βρέθηκε μετά το τέλος της πρώτης επανάληψης, δηλαδή του (4,7), (6,7), (6,8), (8,9) και του βέλτιστου μονοπατιού και παρατηρείται ότι το συνολικό βάρος του βέλτιστου μονοπατιού είναι μεγαλύτερο ($40 > 37$), άρα η λύσης της πέμπτης αποθηκεύεται στη μνήμη σαν βέλτιστή λύση. Επομένως τώρα το βέλτιστο μονοπάτι αποτελείται από τις ακμές:

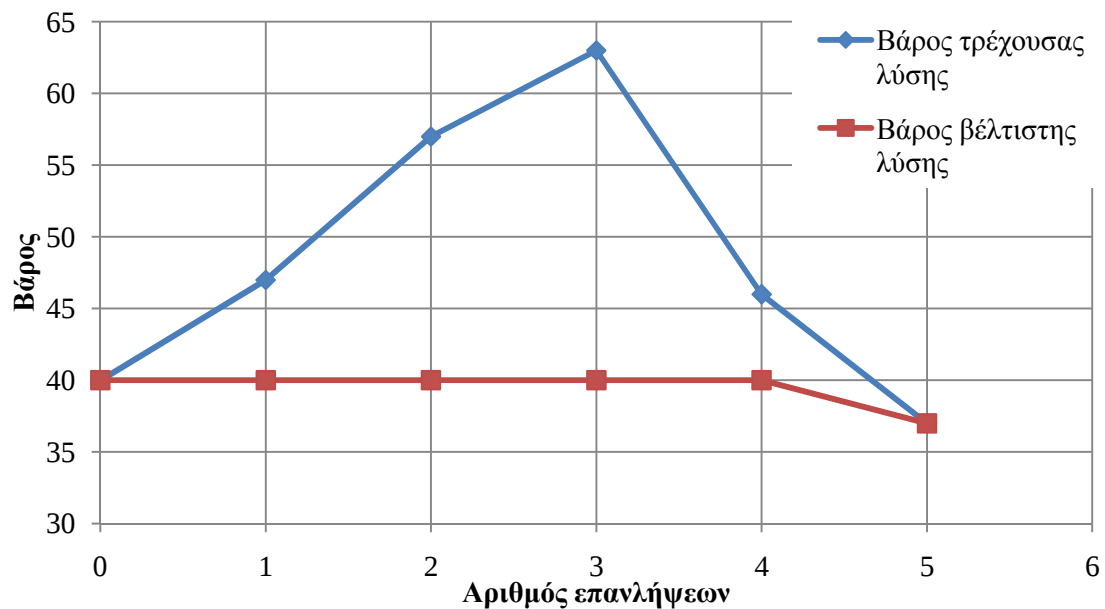
Βέλτιστο μονοπάτι : (4,7), (6,7), (6,8), (8,9) με Βάρος=37.

Οι διαδοχικές λύσεις των πέντε επαναλήψεων φαίνονται στο Σχήμα 3.6 και τα βάρη τους σε κάθε επανάληψη παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.7. Επιπλέον, οι ακμές στο Σχήμα 3.6 που αφαιρούνται σχεδιάζονται με διακεκομμένη γραμμή, ενώ η προστιθέμενες ακμές σχεδιάζονται με έντονη γραμμή. Επιπλέον, οι ακμές που σε κάθε επανάληψη ανήκουν

στη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων σχεδιάζονται ως διακεκομμένες γραμμές και τον αριθμό με αστερίσκο δίπλα τους να συμβολίζει τις επαναλήψεις που δεν επιτρέπονται να χρησιμοποιηθούν.



Σχήμα 3.6: Γραφικές αναπαραστάσεις των λύσεων σε κάθε μια από τις 5 επαναλήψεις του TS.



Σχήμα 3.7 : Πορεία των βαρών των διαδοχικών λύσεων του TS σε 5 επαναλήψεις.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[3.1] Glover, F. and M. Laguna, Tabu Search, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1997

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units – PMU) καθώς και οι τηλεπικοινωνιακές υποδομές, οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία τους, είναι αρκετά δαπανηρές. Δεδομένου ότι για την πλήρη παρατηρησιμότητα ενός δικτύου δεν απαιτείται η εγκατάσταση PMU σε κάθε ζυγό του δικτύου, ο κύριος στόχος της τοποθέτησης PMU είναι ο καθορισμός στρατηγικών σημείων εγκατάστασης του ελαχίστου αριθμού PMU ώστε ολόκληρο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να είναι πλήρως παρατηρήσιμο, δηλαδή να είναι γνωστές όλες οι τάσεις των ζυγών και οι γωνίες τους. Αυτό το πρόβλημα αποτελεί το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης PMU (Optimal PMU placement – OPP). Το OPP έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα πρόβλημα NP-κλάσης [4.1], το οποίο σημαίνει το πρόβλημα δεν μπορεί να επιλυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο. Στο κεφάλαιο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ο μεταευριστικός αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search – TS) για την επίλυση του OPP.

4.2 ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Για ένα συγκεκριμένο αριθμό PMU, υπάρχει η πιθανότητα για ένα πρόβλημα τοποθέτησης PMU να υπάρχουν πολλές διαφορετικές λύσεις με τις οποίες επιτυγχάνεται η πλήρης παρατηρησιμότητα δικτύου. Σε αυτήν την ενότητα προτείνεται ο δείκτης παρατηρησιμότητας ζυγού (Bus Observability Index – BOI) ως δείκτης ποιότητας, που δείχνει την ανωτερότητα μιας λύσης τοποθέτησης PMU σε σχέση με μία άλλη. Σε ένα ΣΗΕ, σε κάποιους από τους ζυγούς του οποίου έχουν τοποθετηθεί PMU, ορίζεται ως δείκτης παρατηρησιμότητας (β_i) ενός ζυγού- i το πλήθος των PMU που κάνουν το συγκεκριμένο ζυγό παρατηρήσιμο. Για παράδειγμα αν ένας ζυγός είναι μη παρατηρήσιμος, τότε έχει $\text{BOI} = 0$. Επίσης, αν ένας ζυγός γίνεται παρατηρήσιμος εξαιτίας ενός PMU, τότε $\text{BOI} = 1$, ενώ όταν γίνεται παρατηρήσιμος εξαιτίας δύο PMU, τότε $\text{BOI} = 2$ κ.ο.κ. Στη γενική περίπτωση, αν ένας ζυγός είναι παρατηρήσιμος, τότε $\text{BOI} \geq 1$.

Για συγκεκριμένη τοποθέτηση PMU ($S(n_p)$) με έναν αριθμό PMU (n_p), το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας των ζυγών n του δικτύου ορίζεται ως εξής [4.2]:

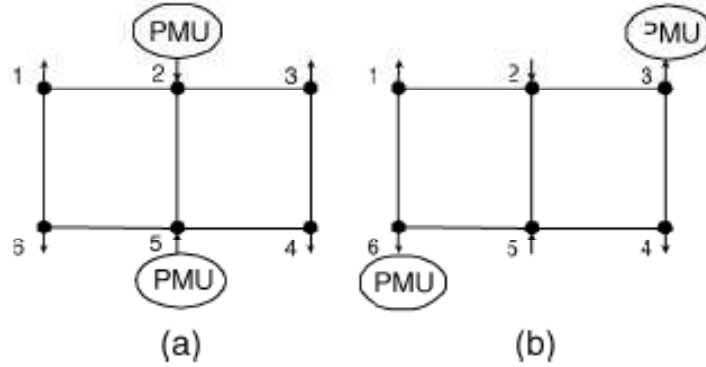
$$R(n_p, S(n_p)) = \sum_{i=1}^n \beta_i$$

Για τις δυο εναλλακτικές τοποθετήσεις PMU στο δίκτυο 6 ζυγών του Σχήματος 4.1, παρατηρείται εύκολα ότι και για τις δυο λύσεις επιτυγχάνεται πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου. Για την τοποθέτηση PMU του Σχήματος 4.1(a), ο BOI για τους ζυγούς 1 έως 6 είναι 1, 2, 1, 1, 2 και 1, αντίστοιχα, επομένως :

$$R_a(n_p, S_a(n_p)) = 8$$

Ενώ για την τοποθέτηση PMU του Σχήματος 4.1(b), ο BOI για τους ζυγούς 1 έως 6 είναι 1, 1, 1, 1, 1 και 1, αντίστοιχα, επομένως:

$$R_b(n_p, S_b(n_p)) = 6$$



Σχήμα 4.1: Δίκτυο 6 ζυγών με δυο διαφορετικές τοποθετήσεις PMU.

Η μεγιστοποίηση του δείκτη $R(n_p, S(n_p))$ έχει το πλεονέκτημα ότι ένα μεγάλο μέρος του δικτύου θα μείνει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας PMU. Για παράδειγμα, η απώλεια ενός PMU στο Σχήμα 4.1(a) θα έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια παρατηρησιμότητας δυο ζυγών, έναντι τριών ζυγών που θα είχε μια αντίστοιχη απώλεια PMU στην περίπτωση του Σχήματος 4.1(b). Έτσι, η απώλεια του PMU στο ζυγό 2 του Σχήματος 4.1(a) θα επιφέρει τη μη παρατηρησιμότητα των ζυγών 1 και 3, ενώ με την απώλεια του PMU στο ζυγό 3 του Σχήματος 4.1(b), οι ζυγοί 2, 3 και 4 θα γίνουν μη παρατηρήσιμοι.

4.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης PMU είναι ο καθορισμός ενός ελαχίστου αριθμού PMU n_p και η τοποθέτηση των PMU αυτών $S(n_p)$, ώστε να ικανοποιείται η πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου. Το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$J = \min_{n_p} \{ \max R(n_p, S(n_p)) \}$$

Μαθηματικά, το OPP είναι πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας και η παρατηρησιμότητα του δικτύου εξαρτάται από δύο παράγοντες, τον αριθμό των PMU n_p και την τοποθέτησή τους $S(n_p)$. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει κάποια προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης που να δίνει άμεσα τη βέλτιστη λύση. Συνήθως, υπολογίζεται με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Το OPP είναι ένα μη γραμμικό, ασυνεχές πρόβλημα και απαιτεί μια έξυπνη τεχνική βελτιστοποίησης, ώστε να διατηρηθεί το υπολογιστικό κόστος χαμηλό. Μια τέτοια μέθοδος είναι ο αλγόριθμος TS.

4.4 ΑΡΧΙΚΗ ΛΥΣΗ

Ο TS είναι ένας μετά-ευριστικός αλγόριθμος, επομένως για να λειτουργήσει χρειάζεται να δοθεί μια αρχική λύση. Η μέθοδος που επιλέγεται για τη δημιουργία μιας αρχικής λύσης είναι ο άπληστος αλγόριθμος. Οι άπληστοι αλγόριθμοι είναι επαναληπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εύρεση βέλτιστων λύσεων για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Οι άπληστοι αλγόριθμοι λαμβάνουν μία απόφαση τη φορά, βασιζόμενοι στην εύρεση της καλύτερης επιλογής σε κάθε βήμα. Από τη στιγμή που επιλέγουν σε κάθε επανάληψη τη λύση που φαίνεται προσωρινά καλύτερη, δεν είναι τόσο διορατικοί όπως οι αλγόριθμοι δυναμικού προγραμματισμού και άλλοι πιο πολύπλοκοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης. Εξαιτίας της έλλειψης πολυπλοκότητας, ο άπληστος αλγόριθμος είναι σχετικά γρήγορος, εύκολα υλοποιήσιμος και προσαρμοστικός [4.3].

Δεδομένου ενός συνόλου S στοιχείων, ο άπληστος αλγόριθμος επιλέγει ένα στοιχείο σε κάθε επανάληψη βασισμένο στην τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης μέχρι ένα κριτήριο τερματισμού να ικανοποιηθεί. Τα στοιχεία του συνόλου S μπορεί να είναι τοποθεσίες, προγραμματισμένες δραστηριότητες, μονοπάτια ή αντικείμενα. Κάθε στοιχείο μπορεί να επιλεγεί μόνο μια φορά και να δώσει μια τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση του αλγορίθμου. Σε κάθε επανάληψη τα στοιχεία με την καλύτερη τιμή θα επιλεγούν και θα αφαιρεθούν από το σύνολο των υποψηφίων λύσεων και τα εναπομείναντα στοιχεία θα επαναξιολογηθούν. Η διαδικασία θα συνεχιστεί μέχρι ένα υποψήφιο στοιχείο να ικανοποιήσει το κριτήριο τερματισμού.

Εξαιτίας της μη ομοιόμορφης δομής των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας, οι περισσότεροι αλγόριθμοι τοποθέτησης PMU βασίζονται στη βαθμιαία αύξηση του συνόλου των PMU. Για το λόγο αυτό, ο άπληστος αλγόριθμος είναι εύκολο να εφαρμοστεί σε προβλήματα τοποθέτησης PMU. Ο στόχος είναι να προστίθενται σταδιακά από ένα PMU τη φορά, μέχρι το σύνολο των PMU να επιτύχουν πλήρη παρατηρησιμότητα στο δίκτυο (κριτήριο τερματισμού). Σε κάθε επανάληψη, η απόφαση για την τοποθέτηση ενός PMU σε ένα ζυγό βασίζεται στο ποιος ζυγός έχει τους περισσότερους μη παρατηρήσιμους γειτονικούς ζυγούς. Μετά από κάθε τοποθέτηση PMU, η κατάσταση παρατηρησιμότητας και η τιμή του κάθε ζυγού πρέπει να υπολογίζονται ξανά. Αυτές είναι βασικές αρχές του άπληστου αλγορίθμου τοποθέτησης PMU, που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα.

Τα βασικά βήματα του άπληστου αλγορίθμου τοποθέτησης PMU είναι :

1. Δημιουργία μιας $n \times n$ μήτρας πρόσπτωσης A , όπου n ο αριθμός των ζυγών του δικτύου, από τις συνδέσεις μεταξύ των ζυγών, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (4.1).

$$A_{k,m} = \begin{cases} 1, & \text{εάν } k = m \text{ ή } k \text{ και } m \text{ είναι συνδεδεμένοι} \\ 0, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.1)$$

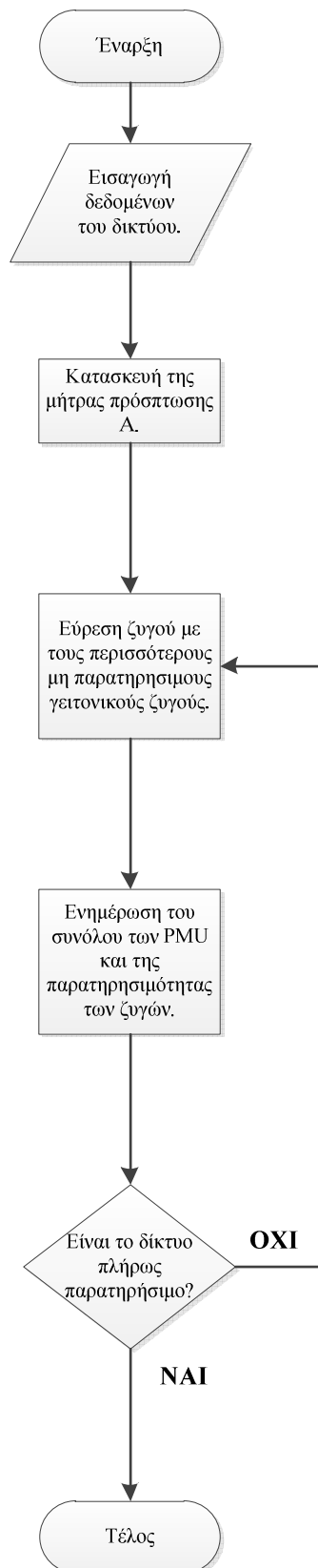
2. Εύρεση ζυγού με τους περισσότερους μη παρατηρήσιμους γειτονικούς ζυγούς. Σε αυτό το σημείο μπορούν να γίνουν δυο τροποποιήσεις. Στην πρώτη εκδοχή να μην επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης, ενώ στη δεύτερη εκδοχή να επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Εάν και στις δύο περιπτώσεις υπάρχουν ζυγοί με το ίδιο πλήθος μη παρατηρήσιμων γειτονικών ζυγών, η επιλογή του ζυγού γίνεται τυχαία.
3. Ενημέρωση του συνόλου των PMU και του συνόλου των παρατηρήσιμων ζυγών. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα χρησιμοποιώντας την εξίσωση, $A = F * x$ [4.4]. Όπου :

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{εάν έχει τοποθετηθεί PMU στον ζυγό } i \\ 0, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.2)$$

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο ζυγός } i \text{ είναι παρατηρήσιμος} \\ 0, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.3)$$

4. Ενημέρωση του πίνακα F , χρησιμοποιώντας τους κανόνες παρατηρησιμότητας (βλ. Κεφάλαιο 2).
5. Επανάληψη των βημάτων 2 έως 4 για κάθε διαδοχική τοποθέτηση PMU μέχρι να επιτευχθεί πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Το λογικό διάγραμμα του άπληστου αλγορίθμου τοποθέτησης PMU φαίνεται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 : Λογικό διάγραμμα άπληστου αλγορίθμου τοποθέτησης PMU.

4.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Είναι φανερό ότι ο άπληστος αλγόριθμος θα οδηγήσει σε μια αρχική τοποθέτηση PMU, η οποία αν και θα παρέχει πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Για το λόγο αυτό, ο αλγόριθμος TS χρησιμοποιείται για την επίλυση της βέλτιστης τοποθέτησης PMU. Ο αλγόριθμος TS θεωρείται ανώτερος σε σχέση με άλλες ευριστικές μεθόδους όπως η προσομοιωμένη εξέλιξη (Simulated Annealing – SA) και ο γενετικός αλγόριθμος (Genetic algorithm – GA) [4.5] [4.6]. Σε αντίθεση με άλλες ευριστικές μεθόδους, ο αλγόριθμος TS έχει το πλεονέκτημα της ευέλικτης μνήμης, η οποία τον αποτρέπει από την παγίδευση σε ένα τοπικό ελάχιστο ή μέγιστο. Έχει αποδειχθεί ότι ο αλγόριθμος TS μπορεί να δώσει το ολικό βέλτιστο ή ελάχιστο ενός προβλήματος. Στη συνέχεια καταγράφονται τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος TS για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU.

4.5.1 Συνάρτηση κόστους

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για τη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου TS είναι ο ορισμός μιας συνάρτησης κόστους, η οποία θα αξιολογεί τις διάφορες λύσεις τοποθέτησης PMU σε ένα δίκτυο. Η συνάρτηση κόστους πρέπει να είναι δομημένη έτσι ώστε για μια τοποθέτηση ενός αριθμού PMU να πληροφορεί για το πόσοι ζυγοί του δικτύου παραμένουν μη παρατηρήσιμοι και επιπλέον να δείχνει μια ποιότητα της συγκεκριμένης λύσης ενσωματώνοντας το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας του δικτύου. Η συνάρτηση κόστους δίνεται στην εξίσωση (4.4).

$$J = A * N_{un} + B * N_{PMU} - C * R \quad (4.4)$$

όπου :

- N_{un} : το πλήθος των μη παρατηρήσιμων ζυγών. Σε περίπτωση όπου για μια τοποθέτηση PMU το δίκτυο είναι πλήρως παρατηρήσιμο τότε $N_{un}=0$.
- N_{PMU} : το πλήθος των PMU.
- R : το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας κάθε ζυγού. Ως δείκτης παρατηρησιμότητας ενός ζυγού (BOI) ορίζεται το πλήθος των PMU που είναι υπεύθυνα για την παρατηρησιμότητά του. Επομένως για να είναι ένας ζυγός παρατηρήσιμος πρέπει: $BOI \geq 1$.

Επειδή το ζητούμενο αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η πλήρης παρατηρησιμότητα ενός δικτύου με την τοποθέτηση κάποιων PMU, ο συντελεστής A της εξίσωσης (4.4) επιλέγεται να έχει τη μεγαλύτερη τιμή και να είναι μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή B και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή C . Μια σοφή επιλογή για τους συντελεστές A , B και C είναι να οριστεί ο συντελεστής A ίσος με τους ζυγούς του δικτύου, ο συντελεστής B ίσος με τη μονάδα και ο C ίσος με 0,1. Η επιλογή αυτή πληροί τους περιορισμούς των συντελεστών, που αναφέρθηκαν, αφού ο ελάχιστος αριθμός PMU, με τον οποίο μπορεί ένα δίκτυο να είναι παρατηρήσιμο, είναι ίσο με το 20% έως 30% του αριθμού των ζυγών του δικτύου [4.7]. Επομένως ο συντελεστής A είναι σίγουρα μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή B και προφανώς ο συντελεστής B είναι μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή C .

4.5.2 Βήμα 1^ο : Εξέταση λύσης

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου γίνεται έλεγχος παρατηρησιμότητας της τρέχουσας λύσης τοποθέτησης PMU. Αν με μία τοποθέτηση PMU με N_{PMU} πλήθος PMU επιτυγχάνεται πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου, τότε από αυτή την λύση αφαιρείται τυχαία ένα PMU από ένα ζυγό, έτσι ώστε στις επόμενες επαναλήψεις ο αλγόριθμος να προσπαθήσει να βρει τη βέλτιστη λύση για $(N_{PMU}-1)$ πλήθος PMU.

4.5.3 Βήμα 2^ο : Λίστα υποψηφίων λύσεων

Για τη δημιουργία της λίστας υποψηφίων λύσεων κάθε φορά θα μετακινείται κάθε PMU από το ζυγό που είναι τοποθετημένο στους άλλους ζυγούς που δεν υπάρχουν τοποθετημένα PMU. Με αυτόν τον τρόπο θα εξετάζεται μια μεγάλη περιοχή γειτονικών λύσεων. Επομένως σε κάθε επανάληψη το πλήθος των υποψηφίων λύσεων θα είναι:

$$N_{PMU} * (N - N_{PMU}) \quad (4.5)$$

όπου,

- N_{PMU} : το πλήθος των PMU.
- N : το πλήθος των ζυγών.

Για παράδειγμα, στο δίκτυο του Σχήματος 4.1(a) η τοποθέτηση των PMU είναι στους ζυγούς 2 και 5, επομένως το πλήθος των υποψηφίων λύσεων θα ήταν $N_{PMU} * (N - N_{PMU}) = 2 * (6 - 2) = 8$. Οι υποψήφιες λύσεις στην περίπτωση αυτή φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Λίστα υποψηφίων λύσεων για το δίκτυο του Σχήματος 4.1(a).

	Μετακίνηση PMU		Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς:
	Από	Προς	
1	2	1	1, 5
2	2	3	3, 5
3	2	4	4, 5
4	2	6	5, 6
5	5	1	1, 2
6	5	3	2, 3
7	5	4	2, 4
8	5	6	2, 6

4.5.4 Βήμα 3^ο : Αξιολόγηση λύσεων και ενημέρωση απαγορευμένων καταστάσεων

Στη συνέχεια, όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται σύμφωνα με τη συνάρτηση κόστους και ταξινομούνται από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη τιμή. Ως νέα τρέχουσα λύση θεωρείται η λύση με τη μικρότερη τιμή της συνάρτησης κόστους. Η κίνηση, δηλαδή η μετακίνηση ενός PMU από ένα ζυγό σε έναν άλλον, που δημιούργησε την υποψήφια λύση με τη μικρότερη τιμή χαρακτηρίζεται απαγορευμένη για ένα συγκεκριμένο αριθμό

επαναλήψεων. Ο αριθμός των επαναλήψεων, όπου μία κίνηση είναι απαγορευμένη, ονομάζεται μήκος απαγορευμένων καταστάσεων και ορίζεται από το χρήστη.

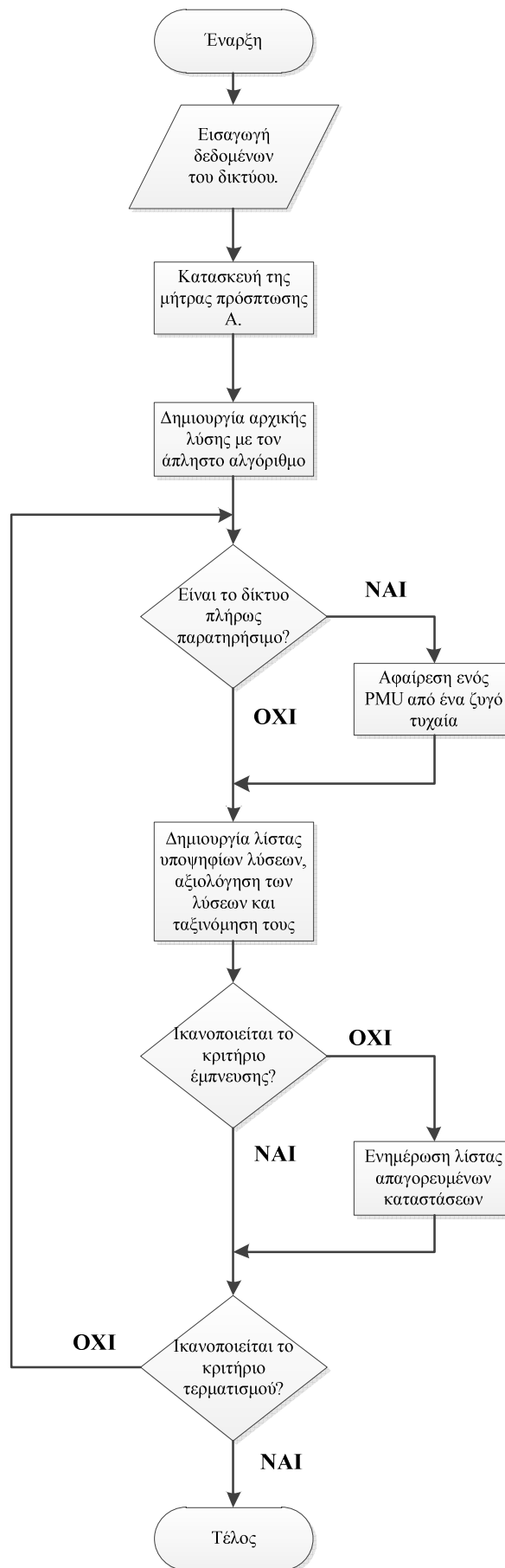
4.5.5 Βήμα 4^ο : Κριτήριο έμπνευσης

Το κριτήριο έμπνευσης μπορεί να παραβλέψει του περιορισμούς των απαγορευμένων καταστάσεων του TS. Το κριτήριο, που πρέπει να πληρείται για να παρακαμφθεί η απαγορευμένη κατάσταση μιας κίνησης, είναι εάν η κίνηση αυτή δίνει μια λύση που είναι καλύτερη από αυτή που έχει αποθηκευτεί στη μνήμη ως βέλτιστη.

4.5.6 Βήμα 5^ο : Κριτήριο τερματισμού

Ως κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου ορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου TS. Ο αριθμός των επαναλήψεων είναι ένας παράγοντας που ορίζεται από το χρήστη. Μόλις συμπληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων, ο αλγόριθμος τερματίζεται και δίνεται η βέλτιστη λύση, που είναι αποθηκευμένη στη μνήμη του αλγορίθμου. Το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Εξαιτίας της τυχαιότητας του αλγορίθμου, που εισάγεται τόσο στη δημιουργία αρχικής λύσης όσο και στο πρώτο βήμα, το τελικό αποτέλεσμα του αλγορίθμου μπορεί να είναι διαφορετικό σε κάθε εκτέλεσή του.



Σχήμα 4.3: Λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU.

4.6 ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ TS

Σε περίπτωση που επιλεγεί να εκτελεστεί η μέθοδος πολλαπλές φορές, τότε δίνεται η δυνατότητα εκτέλεσης του επαναληπτικού TS. Ο επαναληπτικός TS στο τέλος κάθε εκτέλεσης συγκρίνει την τιμή της τελικής λύσης με την τιμή της αρχικής λύσης της προηγούμενης εκτέλεσης του αλγορίθμου και η καλύτερη λύση επιλέγεται ως αρχική λύση της επόμενης εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στην πρώτη εκτέλεση του επαναληπτικού TS, η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο. Στη συνέχεια, ακολουθούνται τα βήματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.5.

4.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] D. J. Brueni and L. S. Heath, "The PMU placement problem," *SIAM J. Discrete Math.*, vol. 19, no. 3, pp. 744–761, Dec. 2005.
- [4.2] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal Multistage Scheduling of PMU Placement: An ILP Approach," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, No 4, pp. 1812-20, Oct. 2008.
- [4.3] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 223-231, May 2006.
- [4.4] Cho Ki-Seon, Shin Joong-Rin and Hyun Seung Ho, "Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver," Fifth international conference on power system control, Seoul, South Korean, June 2001.
- [4.5] Mori Hiroyuki and Matsuzaki Osamu, "A tabu search based approach to meter placement in static state estimation," presented at Intelligent system application to power systems (ISAP99), pp. 365-9, Rio de Janeiro, Brazil, April 4–8, 1999.
- [4.6] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, R. Adapa, "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.8, No. 2, May 1993, pp. 701-715.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU

5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο Κεφάλαιο 4 έγινε αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU. Για να κατανοηθεί πλήρως ο αλγόριθμος, είναι χρήσιμο να δοθεί ένα συγκεκριμένο αριθμητικό παράδειγμα. Η διαδικασία της βήμα προς βήμα επίλυσης συγκεκριμένου παραδείγματος, αναδεικνύει τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου και επιλύει τυχόν απορίες που έχουν δημιουργηθεί κατά την ανάλυση της θεωρίας. Επίσης ένα τέτοιο παράδειγμα είναι χρήσιμο και για τη διαδικασία της εκσφαλμάτωσης (debugging) ενός προγράμματος που έχει φτιαχτεί από κάποιον άλλο προγραμματιστή. Εφόσον έχει γίνει κάποιο λάθος κατά τον προγραμματισμό, με το παράδειγμα του κεφαλαίου αυτού μπορεί να εντοπιστεί σε ποιο σημείο υπάρχει σφάλμα υπολογισμού του αλγορίθμου.

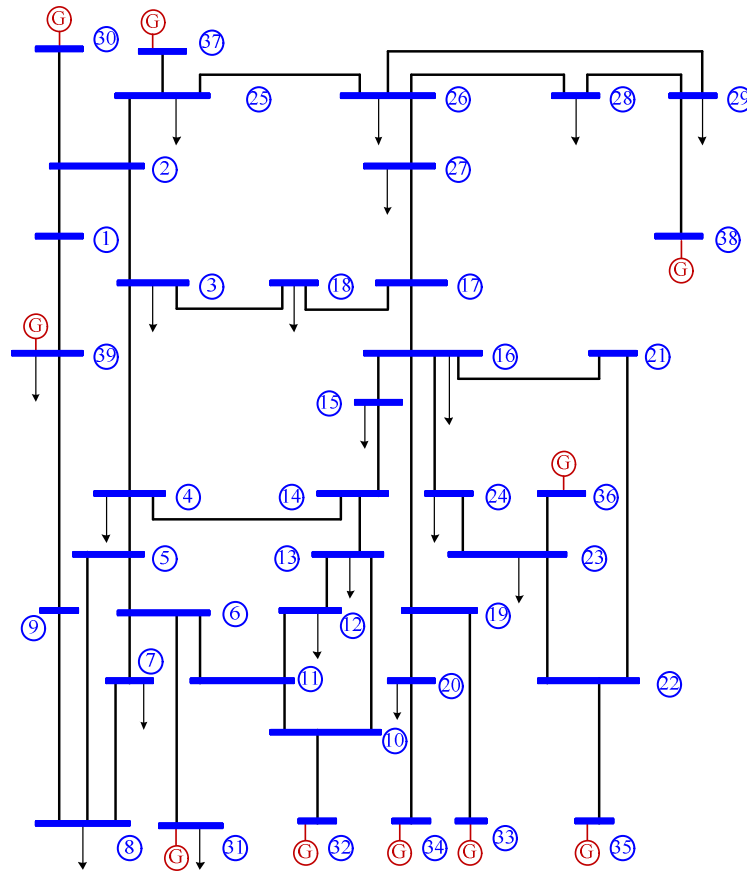
Για να είναι χρήσιμο ένα παράδειγμα θα πρέπει να καλύπτει τις παρακάτω προϋποθέσεις :

1. Να έχει μικρό μέγεθος ώστε να μπορεί να διασχίζεται γρήγορα το δίκτυο.
2. Να καλύπτει μια ευρεία κατηγορία από τις περιπτώσεις που μπορεί να αναλύει ο αλγόριθμος. Για παράδειγμα το δίκτυο θα πρέπει να περιέχει και ζυγούς μηδενικής έγχυσης.

Το σύστημα το οποίο επιλέχθηκε για την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE με τα δεδομένα του Πίνακα 5.1 και με μονογραμμικό διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία δικτύου 39 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 39 ζυγών του IEEE	46	1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 17, 19, 22



Σχήμα 5.1: Δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

5.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

5.2.1 Υπολογισμός μήτρας πρόσπτωσης

Αρχικά ο χρήστης εισάγει στο λογισμικό ένα αρχείο Excel (π.χ. του δικτύου των 39 ζυγών του IEEE) στο πρώτο φύλλο εργασίας, του οποίου υπάρχουν οι συνδέσεις των ζυγών του δικτύου 39 ζυγών του IEEE, ώστε να δημιουργηθεί η μήτρα πρόσπτωσης A (βλ. Κεφ. 2) με τον εξής τρόπο [5.1] :

$$A_{k,m} = \begin{cases} 1, & \text{εάν } k = m \text{ ή } k \text{ και } m \text{ είναι συνδεδεμένοι} \\ 0, & \text{σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Στο δεύτερο φύλλο εργασίας του αρχείου Excel περιέχεται ο πίνακας με τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του δικτύου των 39 ζυγών του IEEE.

5.2.2 Αρχική λύση με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου

Για τη γρήγορη εύρεση μιας αρχικής λύσης χρησιμοποιείται ο άπληστος αλγόριθμος (Greedy algorithm). Ξεκινώντας χωρίς κανένα τοποθετημένο PMU σε κάποιον ζυγό, το

πρώτο βήμα είναι να καθοριστεί το πλήθος των κλάδων που συνδέονται σε ένα ζυγό και στη συνέχεια επιλέγεται κάθε φορά για την τοποθέτηση του PMU ο ζυγός που έχει τη μεγαλύτερο πλήθος συνδεδεμένων κλάδων και δεν είναι ούτε παρατηρήσιμος ούτε μηδενικής έγχυσης ισχύος. Έτσι, υπολογίζεται ο αριθμός των κλάδων που συνδέονται σε κάθε ένα από τους ζυγούς μη μηδενικής έγχυσης ισχύος για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Πλήθος συνδεδεμένων κλάδων στους ζυγούς μη-μηδενικής έγχυσης ισχύος του συστήματος IEEE 39-ζυγών.

Αριθμός Ζυγού	Πλήθος συνδεδεμένων κλάδων
3	3
4	3
7	2
8	2
12	2
15	2
16	5
18	2
20	2
21	2
23	3
24	2
25	3
26	4
27	2
28	2
29	3
30	1
31	1
32	1
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	1
39	2

Από τον Πίνακα 5.2 προκύπτει ότι ο ζυγός 16 είναι ο ζυγός με τους περισσότερους συνδεδεμένους κλάδους (5) και ακολουθεί ο ζυγός 26 με 4 συνδεδεμένους κλάδους. Έτσι το πρώτο PMU τοποθετείται στο ζυγό 16, οπότε γίνεται απευθείας παρατηρήσιμος ο ζυγός 16, ενώ οι φασιθέτες τάσης στους άμεσα συνδεδεμένους ζυγούς 15, 17, 19, 21 και 24 μπορούν να

υπολογιστούν με το Νόμο του Ohm, οπότε και οι τέσσερις αυτοί ζυγοί γίνονται παρατηρήσιμοι. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στο ζυγό 16 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 15, 16, 17, 19, 21, 24

Ο επόμενος ζυγός με το μεγαλύτερο πλήθος συνδεδεμένων κλάδων (4) είναι ο ζυγός 26, επομένως το δεύτερο PMU τοποθετείται στο ζυγό 26 και επομένως οι άμεσα συνδεδεμένοι ζυγοί 25, 26, 27, 28 και 29 είναι παρατηρήσιμοι. Ο ζυγός 17 τώρα συνδέεται μόνο με έναν μη παρατηρήσιμο ζυγό, το ζυγό 18, και από του νόμους του Kirchhoff (βλ. Κεφ. 2) ο ζυγός 18 γίνεται και αυτός παρατηρήσιμος. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 16, 26 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29

Από τους εναπομείναντες ζυγούς, οι ζυγοί 3, 4, 8 και 23 έχουν 3 συνδεδεμένους κλάδους και για να τοποθετηθεί το τρίτο PMU επιλέγεται τυχαία ο ζυγός 8 και κατά συνέπεια οι ζυγοί 5, 7, 8, 9 και 39 γίνονται παρατηρήσιμοι. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 16, 26 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 5, 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 39

Από τους ζυγούς 3, 4 και 23 που έχουν 3 συνδεδεμένους κλάδους, για την τέταρτη τοποθέτηση PMU επιλέγεται τυχαία ο ζυγός 4. Οι φασιθέτες τάσης στους ζυγούς 3, 4, 6 και 14 μπορούν τώρα να υπολογιστούν, άρα οι ζυγοί αυτοί γίνονται παρατηρήσιμοι. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 4, 8, 16, 26 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 39

Στη συνέχεια ο μοναδικός ζυγός με 3 συνδεδεμένους κλάδους που παραμένει μη παρατηρήσιμος και είναι μη μηδενικής έγχυσης ισχύος είναι ο ζυγός 23. Με την τοποθέτηση PMU στο ζυγό 23 μπορούμε να υπολογίσουμε τους φασιθέτες τάσης στους ζυγούς 22, 23, 35 και 36, άρα και οι ζυγοί αυτοί γίνονται παρατηρήσιμοι. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 4, 8, 16, 23, 26 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 39

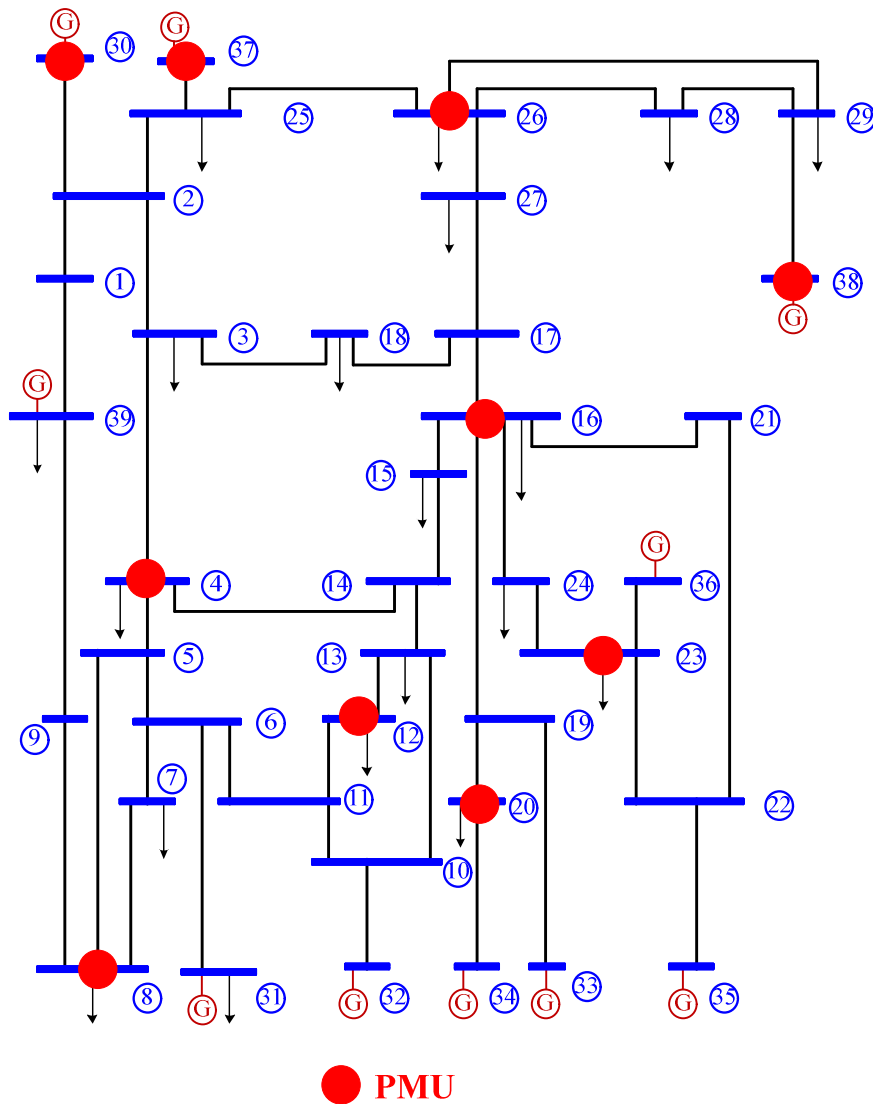
Οι ζυγοί που έχουν 2 συνδεδεμένους κλάδους, είναι μη μηδενικής έγχυσης και παραμένουν μη παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί 12 και 20. Επομένως τοποθετώντας PMU στους ζυγούς 12 και 20 γίνονται παρατηρήσιμοι οι ζυγοί 10, 11, 12, 13, 31 και 32 και οι ζυγοί 20, 33 και 34, αντίστοιχα. Άρα :

Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 4, 8, 12, 16, 20, 23, 26 $\Rightarrow$
Παρατηρήσιμοι είναι οι ζυγοί : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39

Μετά από τις παραπάνω τοποθετήσεις PMU οι ζυγοί 1, 2, 30, 37 και 38 παραμένουν μη παρατηρήσιμοι. Από αυτούς οι μη μηδενικής έγχυσης ισχύος ζυγοί 30, 37 και 38 έχουν ένα (1) συνδεδεμένο κλάδο και επιλέγοντας τυχαία να τοποθετηθεί PMU στο ζυγό 37, ο ζυγός 37 γίνεται παρατηρήσιμος, ύστερα με την τοποθέτηση PMU στο ζυγό 30, οι ζυγοί 1, 2 και 30 γίνονται και αυτοί παρατηρήσιμοι και τέλος με την τοποθέτηση PMU στο ζυγό 38, ο ζυγός 38 γίνεται παρατηρήσιμος και κατά συνέπεια όλο το δίκτυο. Επομένως μια αρχική λύση στο πρόβλημα της τοποθέτησης PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα συστήματος που δίνει ο άπληστος αλγόριθμος είναι η τοποθέτηση 10 PMU ως ακολούθως:

Αρχική Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 4, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38

Η αρχική τοποθέτηση PMU απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Αρχική τοποθέτηση PMU.

5.2.3 Εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU

Δύο πολύ σημαντικοί παράμετροι που πρέπει να οριστούν για την αποδοτική απόκριση του αλγορίθμου αναζήτησης (Tabu Search - TS) είναι ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου καθώς και το μήκος της λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων, δηλαδή για το πόσες επαναλήψεις μια εναλλαγή τοποθέτησης PMU από ένα ζυγό σε έναν άλλο ζυγό θα είναι απαγορευμένη. Ένα πολύ μικρό μήκος της λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων μπορεί να προκαλέσει εγκλωβισμό σε ένα τοπικό ελάχιστο ενώ ένα μεγάλο να απορρίψει κάποιες πιθανές βέλτιστες λύσεις [5.2]. Γι αυτό επιλέγεται αριθμός επαναλήψεων ίσος με 10 και μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 5 στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Η συνάρτηση κόστους (βλ. Κεφ. 4) του αλγορίθμου είναι :

$$J = A * N_{un} + B * N_{PMU} - C * R \quad (5.1)$$

όπου :

- N_{un} : το πλήθος των μη παρατηρήσιμων ζυγών
- N_{PMU} : το πλήθος των PMU.
- R : το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας κάθε ζυγού. Ως δείκτης παρατηρησιμότητας ενός ζυγού (BOI) ορίζεται το πλήθος των PMU που είναι υπεύθυνα για την παρατηρησιμότητά του. Επομένως για να είναι ένας ζυγός παρατηρήσιμος πρέπει: $BOI \geq 1$.

Επειδή το ζητούμενο αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι η πλήρης παρατηρησιμότητα ενός δικτύου με την τοποθέτηση κάποιων PMU, ο συντελεστής A της εξίσωσης (5.1) επιλέγεται να έχει τη μεγαλύτερη τιμή και να είναι μια τάξης μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή B και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από το συντελεστή C . Έτσι, για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE επιλέγεται ο συντελεστής A να είναι ίσος με 39, όσοι και οι ζυγοί του υπό εξέταση δικτύου, ο συντελεστής B να είναι ίσος με 1 και τέλος, ο συντελεστής C να είναι ίσος με 0,1. Επομένως η εξίσωση (5.1) γίνεται :

$$J = 39 * N_{un} + N_{PMU} - 0,1 * R \quad (5.2)$$

Όταν με την τοποθέτηση κάποιων PMU ένα δίκτυο γίνεται πλήρως παρατηρήσιμο τότε $N_{un}=0$, επομένως η (5.2) γίνεται :

$$J = N_{PMU} - 0,1 * R \quad (5.3)$$

Η τιμή της εξίσωσης (5.3) είναι πάντοτε μικρότερη από 39 ακόμα και στην ακραία περίπτωση όπου το πλήθος των PMU είναι ίσο με τους ζυγούς του δικτύου, καθώς το R γίνεται ίσο με μηδέν μόνο όταν δεν υπάρχουν τοποθετημένα PMU σε κάποιο ζυγό. Επομένως στην περίπτωση όπου $J < 39$, δηλαδή το δίκτυο είναι πλήρως παρατηρήσιμο, θα μειώνεται το πλήθος των PMU κατά ένα, αφαιρώντας τυχαία ένα PMU από ένα ζυγό που είναι τοποθετημένο. Από τα παραπάνω, είναι φανερό ότι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους J (5.2) επιτυγχάνεται μόνο όταν έχουμε πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου ($N_{un} = 0$), ελάχιστο αριθμό PMU και το μέγιστο άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας.

Για τη δημιουργία της λίστας υποψήφιων λύσεων κάθε φορά θα μετακινείται κάθε PMU από το ζυγό που είναι τοποθετημένο στους άλλους ζυγούς που δεν υπάρχουν τοποθετημένα PMU. Επομένως σε κάθε επανάληψη το πλήθος των υποψήφιων λύσεων θα είναι:

$$N_{PMU} * (N - N_{PMU}) \quad (5.4)$$

όπου,

- N_{PMU} : το πλήθος των PMU.
- N : το πλήθος των ζυγών.

Σε κάθε επανάληψη θα αξιολογούνται οι υποψήφιες λύσεις με τη συνάρτηση κόστους και θα επιλέγεται η υποψήφια λύση με τη μικρότερη τιμή.

5.2.3.1 Πρώτη επανάληψη

Η αρχική λύση που έδωσε ο άπληστος αλγόριθμος είναι η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 4, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38. Η λύση αυτή αποθηκεύεται αρχικά ως βέλτιστη (Best Solution so Far – BSF). Με τη συγκεκριμένη τοποθέτηση PMU, το δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE είναι πλήρως παρατηρήσιμο, άρα ο αριθμός των μη παρατηρήσιμων ζυγών είναι μηδενικός ($N_{un} = 0$). Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται οι δείκτες παρατηρησιμότητας κάθε ζυγού του δικτύου 39 ζυγών του IEEE. Ο δείκτης παρατηρησιμότητας ενός ζυγού (BOI) δείχνει από πόσα PMU παρατηρείται ένας ζυγός, π.χ. ο ζυγός 5 έχει δείκτη παρατηρησιμότητας ίσο με 2, δηλαδή ο ζυγός αυτός εποπτεύεται από τα δυο PMU που βρίσκονται στους ζυγούς 4 και 8, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.2.

Πίνακας 5.3 : Δείκτες παρατηρησιμότητας των ζυγών του δικτύου 39 ζυγών του IEEE με την αρχική τοποθέτηση PMU.

Αριθμός Ζυγών	Δείκτης παρατηρησιμότητας
1	1
2	1
3	1
4	1
5	2
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	2
20	1
21	1
22	1
23	1
24	2
25	2
26	1
27	1
28	1
29	2
30	1
31	1
32	1
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	1
39	1
Σύνολο	R=44

Από τον Πίνακα 5.3, υπολογίζεται το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας (R) που είναι ίσο με 44. Επομένως, για την αρχική λύση, που έχει πλήθος PMU ίσο με 10 ($N_{PMU}=10$), η τιμή της συνάρτησης κόστους (5.2) γίνεται :

$$J = 39 * N_{un} + N_{PMU} - 0,1 * R = 39 * 0 + 10 - 0,1 * 44 \\ \Rightarrow J = 5,6$$

Αφού για την αρχική λύση ($J=5,6$) ισχύει $J < 39$, τότε το πλήθος των PMU μειώνεται κατά ένα και έτσι επιλέγεται τυχαία να αφαιρεθεί το PMU που είναι τοποθετημένο στο ζυγό 4.

Πίνακας 5.4 : Δείκτες παρατηρησιμότητας των ζυγών του δικτύου 39 ζυγών του IEEE με την αφαίρεση του PMU στο ζυγό 4 από την αρχική τοποθέτηση PMU.

Αριθμός Ζυγών	Δείκτης παρατηρησιμότητας
1	1
2	1
3	1
4	0
5	1
6	0
7	1
8	1
9	1
10	0
11	1
12	1
13	1
14	0
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1
23	1
24	2
25	2
26	1
27	1
28	1
29	2
30	1
31	0
32	0
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	1
39	1
Σύνολο	R=36

Με την απώλεια του PMU από το ζυγό 4, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.2 οι ζυγοί 4, 6, 10, 14, 31 και 32 ($N_{un}=6$) δεν είναι πλέον παρατηρήσιμοι και επομένως οι δείκτες παρατηρησιμότητας των ζυγών αυτών ισούται με το μηδέν, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.4. Από τον Πίνακα 5.4 το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας των ζυγών του δικτύου ισούται με 36 ($R=36$). Από την εξίσωση (5.2) η νέα τοποθέτηση PMU (S_1) στους ζυγούς 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38 ($N_{PMU}=9$) θα έχει τιμή:

$$J_{S1} = 39 * N_{un} + N_{PMU} - 0,1 * R = 39 * 6 + 9 - 0,1 * 36 \Rightarrow J_{S1} = 239,4$$

Στη S_1 εφαρμόζεται ο αλγόριθμος αναζήτησης TS, με πρώτο βήμα τη δημιουργία λίστας υποψηφίων λύσεων που απεικονίζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Λίστα υπογήφριων λύσεων.

#	Μετακίνηση PMU		Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς	Τιμή J
	Από	Προς		
1	8	1	1, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38	395,6
2	8	2	2, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38	395,4
...	...	...	...	...
30	8	39	12, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38, 39	317,5
31	12	1	1, 8, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38	356,5
32	12	2	2, 8, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38	356,3
...	...	...	...	...
40	12	11	8, 11 , 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38	4,7
...	...	...	...	...
60	12	39	8, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38, 39	356,5
61	16	1	1, 8, 12, 20, 23, 26, 30, 37, 38	513,1
62	16	2	2, 8, 12, 20, 23, 26, 30, 37, 38	512,9
...	...	...	...	...
90	16	39	8, 12, 20, 23, 26, 30, 37, 38, 39	513,1
91	20	1	1, 8, 12, 16, 23, 26, 30, 37, 38	356,6
92	20	2	2, 8, 12, 16, 23, 26, 30, 37, 38	356,4
...	...	...	...	...
99	20	10	8, 10 , 12, 16, 23, 26, 30, 37, 38	121,9
...	...	...	...	...
120	20	39	8, 12, 16, 23, 26, 30, 37, 38, 39	356,6
121	23	1	1, 8, 12, 16, 20, 26, 30, 37, 38	395,7
122	23	2	2, 8, 12, 16, 20, 26, 30, 37, 38	395,5
...	...	...	...	...
150	23	39	8, 12, 16, 20, 26, 30, 37, 38, 39	395,7
151	26	1	1, 8, 12, 16, 20, 23, 30, 37, 38	395,8
152	26	2	2, 8, 12, 16, 20, 23, 30, 37, 38	395,6
153	26	3	3, 8, 12, 16, 20, 23, 30, 37, 38	83
...	...	...	...	...
180	26	39	8, 12, 16, 20, 23, 30, 37, 38, 39	395,8
181	30	1	1, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 37, 38	317,5
182	30	2	2, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 37, 38	239,2
183	30	3	3, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 37, 38	4,7
...	...	...	...	...
210	30	39	8, 12, 16, 20, 23, 26, 37, 38, 39	317,4
211	37	1	1, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 38	278,4
212	37	2	2, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 38	278,2
...	...	...	...	...
216	37	6	6 , 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 38	43,6
...	...	...	...	...
238	37	36	8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 36 , 38	278,3
239	37	39	8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 38, 39	278,4
240	38	1	1, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37	278,4
241	38	2	2, 8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37	278,2
...	...	...	...	...
269	38	36	8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 36 , 37	278,3
270	38	39	8, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 39	278,4

Οι υπογήφριες λύσεις του Πίνακα 5.5 αξιολογούνται με την συνάρτηση κόστους (5.2) και ταξινομούνται από την μικρότερη στη μεγαλύτερη τιμή J όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων του Πίνακα 5.5 με βάση την τιμή του J .

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
12	11	4,7
30	3	4,7
37	6	43,6
38	6	43,6
37	5	43,7
37	7	43,7
37	10	43,7

Από τον Πίνακα 5.6 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 12 στο ζυγό 11 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_{new}) θα είναι στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37, 38 με τιμή $J_{S_{\text{new}}} = 4,7$. Όμως κατά την αρχικοποίηση των παραμέτρων της TS, επιλέχθηκε ότι το μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων θα είναι 5, το οποίο σημαίνει ότι για τις επόμενες 5 επαναλήψεις (επανάληψη δεύτερη έως έκτη) δεν θα είναι δυνατή η μετακίνηση PMU από το ζυγό 12 στο ζυγό 11 και αντιστρόφως. Αυτή η πληροφορία φαίνεται κωδικοποιημένη στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων μετά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
12	11	5

Στο τέλος κάθε επανάληψης, αν η τιμή J της τρέχουσας λύσης είναι μικρότερη από την τιμή J της BSF, τότε η τρέχουσα λύση αντικαθιστά την BSF. Στην προκειμένη περίπτωση $J_{S_{\text{new}}} < J_{\text{BSF}}$, επομένως τώρα ως BSF θα είναι η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38, όπως υπολογίστηκε κατά την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου. Άρα, μετά το τέλος της επανάληψης αυτής προκύπτει ότι $J_{\text{BSF}} = 4,7$.

5.2.3.2 Δεύτερη επανάληψη

Ως BSF από την πρώτη επανάληψη υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38 που ταυτίζεται με την τρέχουσα τοποθέτηση PMU (S_{new}), δηλαδή $J_{\text{BSF}} = J_{S_{\text{new}}} = 4,7$. Παρατηρείται ότι $J_{S_{\text{new}}} < 39$, επομένως το πλήθος των PMU μειώνεται κατά ένα και αφαιρείται τυχαία το PMU από το ζυγό 30, έτσι η νέα τοποθέτηση PMU (S_2) θα είναι στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 37 και 38. Η τιμή J της S_2 είναι $J_{S_2} = 160,1$ και υπολογίζεται με την εξίσωση (5.2) με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε στην πρώτη επανάληψη. Από την S_2 δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.8 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.8: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	8	1
2	8	2
...	...	...
31	8	39
32	11	1
33	11	2
...	...	...
62	11	39
63	16	1
64	16	2
...	...	...
93	16	39
94	20	1
95	20	2
...	...	...
124	20	39
125	23	1
126	23	2
...	...	...
155	23	39
178	26	1
179	26	2
...	...	...
186	26	39
187	37	1
188	37	2
...	...	...
217	37	39
218	38	1
219	38	2
...	...	...
248	38	39

Πίνακας 5.9: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
37	2	42,8
38	2	42,8
37	3	42,9
37	30	42,9
38	3	42,9
38	30	42,9
37	25	81,8
26	3	82,1
38	25	120,8
20	2	121
37	39	121
38	29	121,1
20	3	121,1
20	30	121,1
37	1	121,1
38	1	159,9
23	2	160,1
37	4	160,1

Πίνακας 5.10: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
37	2	5
12	11	4

Από τον Πίνακα 5.9 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 37 στο ζυγό 2 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_{2new}) θα είναι στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 26, 38 με τιμή $J_{S_{2new}} = 42,8$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 37 στο ζυγό 2 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S_{2new}} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει

ως έχει, δηλαδή όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 4,7$.

5.2.3.3 Τρίτη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_{2new}) στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 26 και 38, από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.11 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.12.

Πίνακας 5.11: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	2	1
2	2	3
...		...
31	2	39
32	8	1
33	8	3
...	...	...
62	8	39
63	11	1
64	11	3
...	...	...
93	11	39
94	16	1
95	16	3
...	...	...
124	16	39
125	20	1
126	20	3
...	...	...
155	20	39
178	23	1
179	23	3
...	...	...
186	23	39
187	26	1
188	26	3
...	...	...
217	26	39
218	38	1
219	38	3
...	...	...
236	38	25
...	...	...
248	38	39

Πίνακας 5.12: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
38	25	42,6
38	29	42,6
38	37	42,8
2	3	42,9
2	30	42,9
20	34	42,9
38	6	81,6
38	5	81,7
38	7	81,7
38	17	81,7
38	19	81,7
38	21	81,7
38	22	81,7
38	24	81,7
38	27	81,7
38	28	81,7
2	25	81,8

Πίνακας 5.13: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
38	25	5
37	2	4
12	11	3

Από τον Πίνακα 5.12 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 38 στο ζυγό 25 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_3) θα είναι στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 26 με τιμή $J_{S_3} = 42,6$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.13 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 37 στο ζυγό 2 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες

5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S3} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 4,7$.

5.2.3.4 Τέταρτη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_3) στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 26 με τιμή $J_{S3} = 42,6$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.14 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.14: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	2	1
2	2	3
...		...
31	2	39
32	8	1
33	8	3
...	...	...
62	8	39
63	11	1
64	11	3
...	...	...
93	11	39
94	16	1
95	16	3
...	...	...
124	16	39
125	20	1
126	20	3
...	...	...
155	20	39
178	23	1
179	23	3
...	...	...
186	23	39
187	25	1
188	25	3
...	...	...
207	25	29
...	...	...
217	25	39
218	26	1
219	26	3
...	...	...
248	26	39

Πίνακας 5.15: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
25	29	42,6
2	3	42,7
2	4	42,7
2	18	42,7
2	30	42,7
20	34	42,7
25	37	42,8
25	38	42,8
2	29	81,6
20	19	81,6
25	6	81,6
20	33	81,7
23	22	81,7
25	5	81,7
25	7	81,7
25	17	81,7
25	19	81,7

Πίνακας 5.16: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
25	29	5
38	25	4
37	2	3
12	11	2

Από τον Πίνακα 5.15 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 25 στο ζυγό 29 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_4) θα είναι στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 26, 29 με τιμή $J_{S_4} = 42,6$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.16 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 25 στο ζυγό 29 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις

επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S4} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 4,7$.

5.2.3.5 Πέμπτη επανάληψη

Ως BSF από την πρώτη επανάληψη θεωρείται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_4) στους ζυγούς 2, 8, 11, 16, 20, 23, 26, 29 με τιμή $J_{S4} = 42,6$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.17 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.18.

Πίνακας 5.17: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	2	1
2	2	3
...		...
31	2	39
32	8	1
33	8	3
...	...	...
62	8	39
63	11	1
64	11	3
...	...	...
93	11	39
94	16	1
95	16	3
...	...	...
124	16	39
125	20	1
126	20	3
...	...	...
155	20	39
178	23	1
179	23	3
...	...	...
186	23	39
187	26	1
...	...	...
217	26	39
218	29	1
...	...	...
236	29	25
...	...	...
248	29	39

Πίνακας 5.18: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
29	25	42,6
2	3	42,7
2	30	42,7
20	34	42,7
26	3	42,8
26	17	42,8
26	18	42,8
26	27	42,8
29	37	42,8
29	38	42,8
2	25	81,6
20	19	81,6
29	6	81,6
20	33	81,7
23	22	81,7
29	5	81,7
29	7	81,7

Πίνακας 5.19: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
2	3	5
25	29	4
38	25	3
37	2	2
12	11	1

(i) Με **πράσινο** η επιτρεπτή μετακίνηση

(i) Με **κόκκινο** η απαγορευμένη μετακίνηση

Από τον Πίνακα 5.19 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 29 στο ζυγό 25 δίνει την καλύτερη λύση, όμως η κίνηση αυτή βρίσκεται στη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια να προσπεραστεί αυτή η υποψήφια λύση και να επιλεγθεί η αμέσως καλύτερη, δηλαδή η μετακίνηση PMU από το ζυγό 2 στο ζυγό 3. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_5) θα είναι στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 26, 29 με τιμή $J_{S_5} = 42,7$. Έτσι όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.19 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 2 στο ζυγό 3 και

αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S5} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 4,7$.

5.2.3.6 Έκτη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 8, 11, 16, 20, 23, 26, 30, 37 και 38, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_5) στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 26, 29 με τιμή $J_{S5} = 42,7$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.20 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.21.

Πίνακας 5.20: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	3	1
2	3	2
...		...
31	3	39
32	8	1
33	8	2
...	...	...
62	8	39
63	11	1
64	11	2
...	...	...
93	11	39
94	16	1
95	16	2
...	...	...
124	16	39
125	20	1
126	20	2
...	...	...
155	20	39
178	23	1
179	23	2
...	...	...
186	23	39
187	26	1
188	26	2
...	...	...
205	26	25
...	...	...
217	26	39
218	29	1
219	29	2
...	...	...
248	29	39

Πίνακας 5.21: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
26	25	3,7
26	37	3,9
3	2	42,6
3	30	42,7
11	10	42,7
11	12	42,7
11	13	42,7
29	25	42,7
20	34	42,8
26	2	42,8
26	30	42,9
29	37	42,9
29	38	42,9
3	25	81,6
20	19	81,7
29	5	81,7
29	6	81,7

Πίνακας 5.22: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
26	25	5
2	3	4
25	29	3
38	25	2
37	2	1

Από τον Πίνακα 5.21 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 26 στο ζυγό 25 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_6) θα είναι στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29 με τιμή $J_{S_6} = 3,7$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.21 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 26 στο ζυγό 25 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις

επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S_6} < J_{BSF}$, επομένως η τοποθέτηση PMU S_6 αποθηκεύεται και ως BSF, επομένως $J_{BSF} = 3,7$, ενώ η BSF είναι η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25 και 29.

5.2.3.7 Έβδομη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25 και 29, που ταυτίζεται με την τρέχουσα τοποθέτηση PMU (S_6) στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29 με τιμή $J_{S_6} = 3,7$. Παρατηρείται ότι $J_{S_6} < 39$, επομένως το πλήθος των PMU μειώνεται κατά ένα και αφαιρείται τυχαία το PMU από το ζυγό 8, έτσι η νέα τοποθέτηση PMU (S_7) θα είναι στους ζυγούς 3, 11, 16, 20, 23, 25 και 29. Η τιμή J της S_7 είναι $J_{S_7} = 315,5$. Από την S_7 δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.23 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.23: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	3	1
2	3	2
...		...
32	3	39
33	11	1
34	11	2
...	...	...
64	11	39
65	16	1
66	16	2
...	...	...
96	16	39
94	20	1
95	20	2
...	...	...
103	20	8
...	...	...
128	20	39
129	23	1
130	23	2
...	...	...
160	23	39
161	25	1
162	25	2
...	...	...
192	25	39
193	29	1
194	29	2
...	...	...
224	29	39

Πίνακας 5.24: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
20	8	120,1
29	8	120,1
25	8	120,2
3	8	159,2
23	8	159,2
20	9	198,3
20	39	198,3
29	9	198,3
29	39	198,3
25	9	198,4
25	39	198,4
25	2	237,3
25	6	237,3

Πίνακας 5.25: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
20	8	5
26	25	4
2	3	3
25	29	2
38	25	1

Από τον Πίνακα 5.24 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 20 στο ζυγό 8 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU ($S_{7\text{new}}$) θα είναι στους ζυγούς 3, 11, 16, 20, 25, 29 με τιμή $J_{S_{7\text{new}}} = 120,1$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.25 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 20 στο ζυγό 8 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S_{7\text{new}}} > J_{\text{BSF}}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της έκτης επανάληψης, δηλαδή $J_{\text{BSF}} = 3,7$.

5.2.3.8 Όγδοη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25 και 29, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU ($S_{7_{\text{new}}}$) στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 23, 25, 29 με τιμή $J_{S_{7_{\text{new}}}} = 315,5$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψηφίων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.26 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.27.

Πίνακας 5.26: Λίστα υποψηφίων λύσεων

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	3	1
2	3	2
...	...	...
14	3	18
...	...	...
32	3	39
33	8	1
34	8	2
...	...	...
64	8	39
65	11	1
66	11	2
...	...	...
96	11	39
97	16	1
98	16	2
...	...	...
128	16	39
129	23	1
130	23	2
...	...	...
160	23	39
161	25	1
162	25	2
...	...	...
192	25	39
193	29	1
194	29	2
...	...	...
224	29	39

Πίνακας 5.27: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή J
3	18	120,1
11	10	120,1
11	12	120,1
11	13	120,1
29	20	120,1
25	20	120,2
29	34	120,2
25	34	120,3
25	37	120,3
25	26	159,1
29	19	159,1
29	26	159,1
3	20	159,2
23	20	159,2
23	22	159,2

Πίνακας 5.28: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
3	18	5
20	8	4
26	25	3
2	3	2
25	29	1

Από τον Πίνακα 5.27 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 3 στο ζυγό 18 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_8) θα είναι στους ζυγούς 11, 16, 18, 20, 25, 29 με τιμή $J_{S_8} = 120,1$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.28 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 3 στο ζυγό 18 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S_8} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της έκτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 3,7$.

5.2.3.9 Ένατη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25 και 29, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_8) στους ζυγούς 8, 11, 16, 18, 23, 25, 29 με τιμή $J_{S_8} = 120,1$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.28 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.29.

Πίνακας 5.29: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	8	1
2	8	2
...	...	...
32	8	39
33	11	1
34	11	2
...	...	...
64	11	39
65	16	1
66	16	2
...	...	...
96	16	39
97	18	1
98	18	2
99	18	3
...	...	...
128	18	39
129	23	1
130	23	2
...	...	...
160	23	39
161	25	1
162	25	2
...	...	...
192	25	39
193	29	1
194	29	2
...	...	...
208	29	20
...	...	...
224	29	39

Πίνακας 5.30: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή
18	3	120,1
29	20	120,1
29	34	120,2
29	19	159,1
29	26	159,1
18	20	159,2
23	20	159,2
23	22	159,2
25	2	159,2
29	28	159,2
29	33	159,2
18	34	159,3
23	34	159,3
23	35	159,3
25	30	159,3
29	38	159,3

Πίνακας 5.31: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
29	20	5
3	18	4
20	8	3
26	25	2
2	3	1

(ii) Με **πράσινο** η επιτρεπτή μετακίνηση(ii) Με **κόκκινο** η απαγορευμένη μετακίνηση

Από τον Πίνακα 5.30 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 18 στο ζυγό 3 δίνει την καλύτερη λύση, όμως η κίνηση αυτή βρίσκεται στη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Αυτό έχει ως συνέπεια να προσπεραστεί αυτή η υποψήφια λύση και να επιλεγθεί η αμέσως καλύτερη, δηλαδή η μετακίνηση PMU από το ζυγό 29 στο ζυγό 20. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_9) θα είναι στους ζυγούς 8, 11, 16, 18, 23, 25, 29 με τιμή $J_{S_9} = 120,1$. Έτσι όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.30 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 29 στο ζυγό 20 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος,

παρατηρείται ότι $J_{S_9} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της έκτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 3,7$.

5.2.3.10 Δέκατη επανάληψη

Ως BSF υπολογίστηκε η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25 και 29, η τρέχουσα τοποθέτηση PMU είναι η τοποθέτηση PMU (S_9) στους ζυγούς 8, 11, 16, 18, 20, 25 με τιμή $J_{S_9} = 120,1$ από την οποία δημιουργείται η λίστα υποψήφιων λύσεων όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.32 και όλες οι υποψήφιες λύσεις αξιολογούνται και ταξινομούνται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.33.

Πίνακας 5.32: Λίστα υποψηφίων λύσεων.

Μετακίνηση PMU		
#	Από	Προς
1	8	1
2	8	2
...	...	...
32	8	39
33	11	1
34	11	2
...	...	...
64	11	39
65	16	1
66	16	2
...	...	...
96	16	39
97	18	1
98	18	2
...	...	...
115	18	26
...	...	...
128	18	39
129	20	1
130	20	2
...	...	...
160	20	39
161	23	1
162	23	2
...	...	...
192	23	39
193	25	1
194	25	2
...	...	...
224	25	39

Πίνακας 5.33: Αξιολόγηση και ταξινόμηση των υποψηφίων λύσεων.

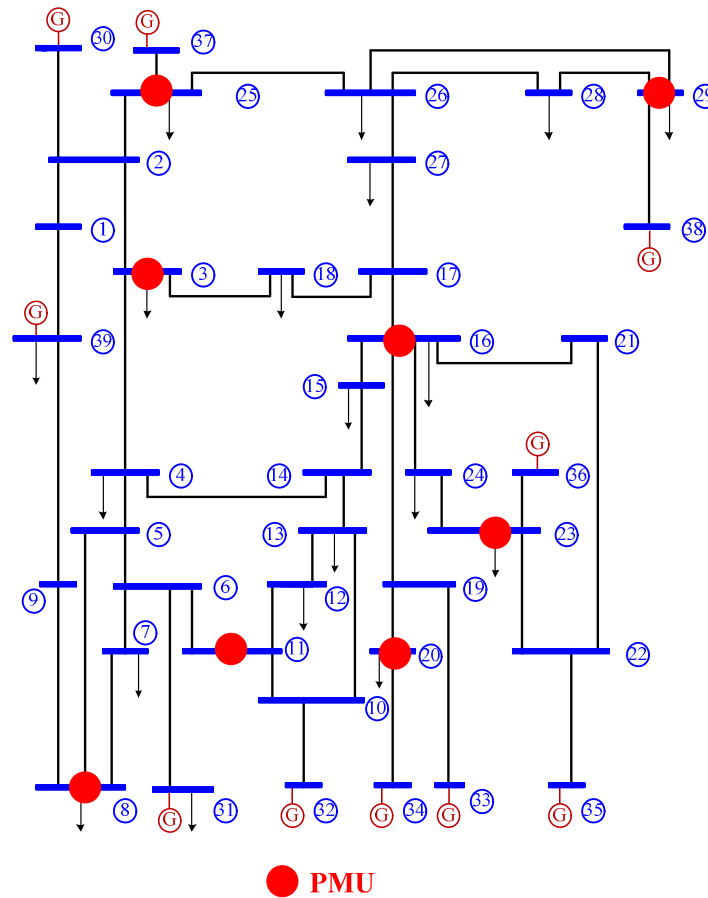
Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Τιμή
18	26	120
18	3	120,1
20	29	120,1
20	34	120,2
20	19	159,1
20	26	159,1
18	29	159,2
20	28	159,2
20	33	159,2
23	22	159,2
23	29	159,2
20	38	159,3
23	35	159,3
18	2	198,2
18	17	198,2
18	27	198,2

Πίνακας 5.34: Λίστα απαγορευμένων καταστάσεων.

Μετακίνηση PMU		
Από	Προς	Μήκος
18	26	5
29	20	4
3	18	3
20	8	2
26	25	1

Από τον Πίνακα 5.32 προκύπτει ότι η μετακίνηση PMU από το ζυγό 18 στο ζυγό 26 δίνει την καλύτερη λύση. Επομένως η νέα τοποθέτηση PMU (S_{10}) θα είναι στους ζυγούς 11, 16, 20, 25, 26, 29 με τιμή $J_{S_{10}} = 120$. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.34 η μετακίνηση PMU από το ζυγό 18 στο ζυγό 26 και αντιστρόφως αποτελεί απαγορευμένη κατάσταση για τις επόμενες 5 επαναλήψεις. Τέλος, παρατηρείται ότι $J_{S_{10}} > J_{BSF}$, επομένως η BSF παραμένει ως έχει, όπως υπολογίστηκε κατά την ολοκλήρωση της έκτης επανάληψης, δηλαδή $J_{BSF} = 3,7$.

Μετά τις 10 επαναλήψεις που ορίστηκε ως κριτήριο τερματισμού της TS, το πρόγραμμα δίνει ως τελική λύση τη BSF, δηλαδή την βέλτιστη, την οποία είχε βρει από την έκτη επανάληψη. Η βέλτιστη λύση απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Βέλτιστη Τοποθέτηση PMU.

Βέλτιστη Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς 3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29

5.2.4 Συμπεράσματα

Με την εκτέλεση του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις επιτεύχθηκε η μείωση του αρχικού αριθμού των PMU που ήταν δέκα σε οκτώ και παράλληλα διατηρήθηκε η πλήρης παρατηρησιμότητα του συστήματος. Η βελτιστοποίηση αυτή οφείλεται κυρίως στη χρήση της λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων που η χρησιμότητά της φαίνεται κυρίως στην 5^η επανάληψη, όπου απαγορεύεται η μετακίνηση του PMU από το ζυγό 29 στο ζυγό 25 κάτι το οποίο, όπως φαίνεται και από τις επόμενες επαναλήψεις, αποτρέπει την «παγίδευση» σε ένα τοπικό ελάχιστο και οδηγεί σε μία βέλτιστη λύση με οκτώ PMU, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.35.

Πίνακας 5.35: Αποτελέσματα αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις.

Σύστημα	Ζυγοί (N)	Αρχικά τοποθετημένα PMU ($N_{PMU_{in}}$)	Βέλτιστα τοποθετημένα PMU ($N_{PMU_{op}}$)	$N_{PMU_{op}}/N$
IEEE-39	39	10	8	0,205

5.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," PSERC Publication 05-20, Oct. 2005.
- [5.2] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 223-231, May 2006.

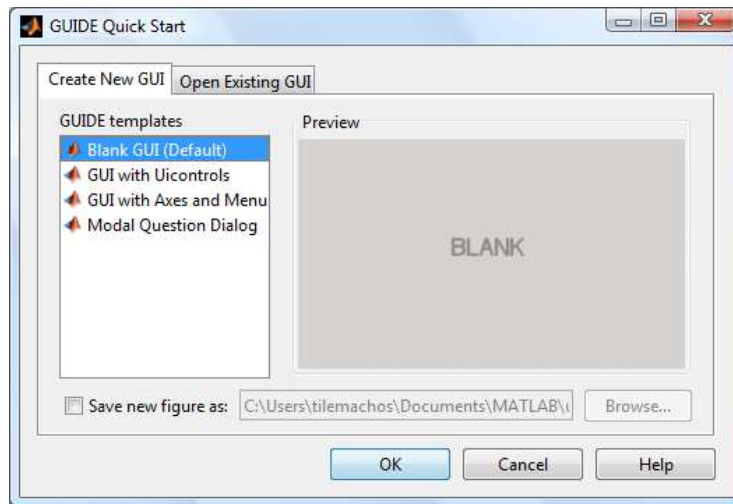
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΕ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΑΠΑΓΟΡΕΥΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

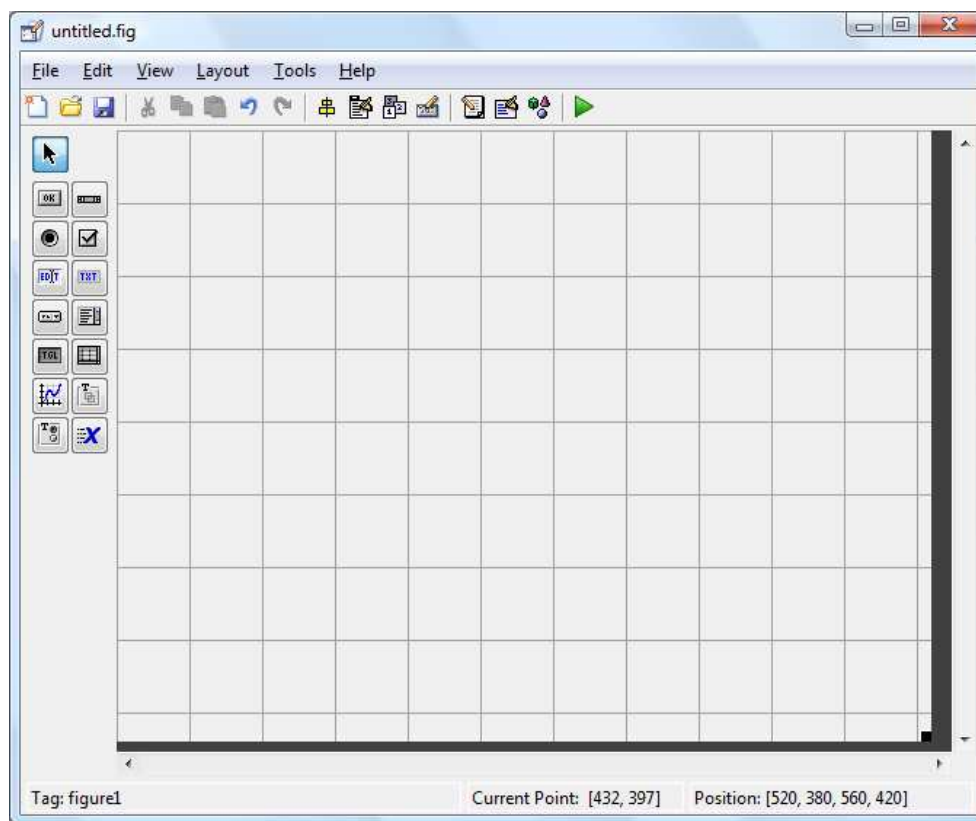
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMU). Αρχικά περιγράφονται χρήσιμα εργαλεία ελέγχου, που προσφέρονται από τη MATLAB για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUIDE - Graphical User Interface Design Environment). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος για την εφαρμογή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search – TS) για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU, στοιχεία για τη δομή του λογισμικού αυτού, καθώς και πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού.

6.2 ΤΟ ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (GUI) ΤΗΣ MATLAB

Η MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει γραφικό περιβάλλον για τις εφαρμογές του. Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται εύκολα με δύο τρόπους. Πρώτον, εκτελώντας την εντολή `guide` στο παράθυρο εντολών. Δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή μενού `File→New→GUI`. Στη συνέχεια, ο οδηγός ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο (Σχήμα 6.1). Στη συνέχεια, αν ο χρήστης αφήσει την προεπιλεγμένη επιλογή “Blank GUI”, θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.1: Διαθέσιμες επιλογές για δημιουργία νέου γραφικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 6.2: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία GUI.

Υστερα, ο χρήστης μπορεί να δει ότι το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μία κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μία κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα είναι το φόντο του παραθύρου. Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει τα παρακάτω 14 αντικείμενα (objects) με τα οποία μπορεί να εμπλουτίσει το γραφικό του περιβάλλον:

1. *Push button*  : ορθογώνιο κουμπί, αφού πατηθεί εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία.
2. *Slider*  : δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα. Η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.
3. *Radio Button*  : στρογγυλό κουμπί με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.
4. *Check Box*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.
5. *Edit Text*  : είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.
6. *Static Text*  : προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.
7. *Pop-up Menu*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί με το ποντίκι.
8. *List Box*  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.
9. *Toggle Button*  : δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.
10. *Table*  : παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.
11. *Axes*  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μια γραφική παράσταση στο παράθυρο.
12. *Panel*  : χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.
13. *Button Group*  : είναι σαν το panel αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.
14. *ActiveX control*  : αντικείμενο ελέγχου ActiveX

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο είναι απλή και γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (widgets). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε αντικείμενο στο παράθυρο. Μέσω του object browser  βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί μέσω του εικονιδίου align objects . Χρησιμοποιώντας τον property inspector (Σχήμα 6.3) μέσω του εικονιδίου  ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη

γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό, ενεργό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται περισσότερο [6.1]. Επιπλέον, με το εικονίδιο  μπορεί να δημιουργήσει γραμμή μενού που μπορεί να περιέχει και υπομενού.

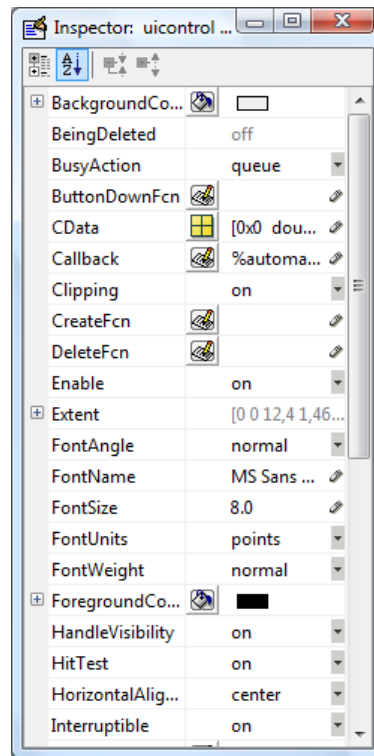
Σε κάθε αντικείμενο αντιστοιχεί ένας δείκτης (handles). Κάποιοι χρήσιμοι αυτόματοι δείκτες είναι οι παρακάτω:

- gcf : δείκτης στο τρέχον figure.
- gco : δείκτης στο τρέχον object. Τρέχον αντικείμενο είναι αυτό το οποίο έχει επιλέξει ο χρήστης με το ποντίκι.
- gca : δείκτης στο τρέχον axes.
- gcbo: δείκτης στο object του οποίου εκτελείται η συνάρτηση callback.

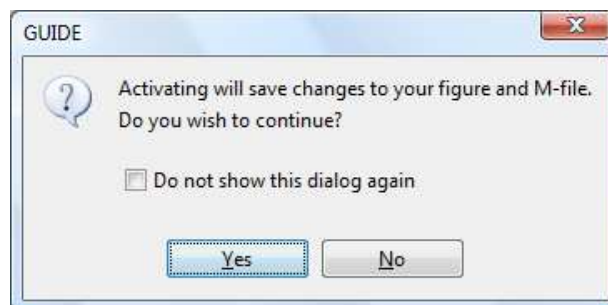
Τα περισσότερα στοιχεία ελέγχου συνοδεύονται από μία συνάρτηση callback, στην οποία ο χρήστης προσθέτει τις εντολές που θέλει να εκτελεί η ενεργοποίηση του κάθε στοιχείου ελέγχου. Όποιες μεταβλητές χρησιμοποιήσει μέσα στη συνάρτηση είναι τοπικές και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες συναρτήσεις. Αρχικά, δημιουργούνται δύο callbacks: η opening function και η output function. Η πρώτη εκτελείται πριν η εικόνα του GUI (figure) γίνει ορατή στο χρήστη, αλλά αφού δημιουργήσει όλα τα αντικείμενα που θέλει και η δεύτερη επιστρέφει δεδομένα στο παράθυρο εντολών. Και στις δύο μεθόδους μπορεί ο χρήστης να προσθέσει δικό του κώδικα, όπως πχ. στην opening function μπορεί να αρχικοποιήσει δεδομένα. Κάθε φορά που εισάγει ένα γραφικό αντικείμενο με το GUIDE, παράγεται και στο M-file το αντίστοιχο callback.

Το GUI δημιουργεί για κάθε παράθυρο δύο αρχεία: το m-αρχείο και το fig-αρχείο. Το fig-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο η MATLAB αποθηκεύει όλα τα αντικείμενα που έχει εισάγει ο χρήστης, την ακριβή τους θέση καθώς και όλες τις τιμές των ιδιοτήτων τους που μπορεί να υπάρχουν. Εδώ ο χρήστης σχεδιάζει την εμφάνιση του παραθύρου. Το m-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο ο χρήστης θα γράψει τον κώδικα που θα ενσωματωθεί στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελέσουν τις επιθυμητές λειτουργίες. Αυτό το αρχείο αναφέρεται και σαν GUI M-file. Κάθε αρχείο *.fig πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο *.m με το ίδιο όνομα. Κάθε φορά που ο χρήστης δημιουργεί ένα νέο παράθυρο (figure), το GUI δημιουργεί αυτόματα και τους δύο τύπους αρχείων.

Δύο χρήσιμες ιδιότητες στον προγραμματισμό του m-file είναι οι: string, value. Με την ιδιότητα string μπορεί να εισάγει κείμενο πάνω σε κάποιο αντικείμενο με την εντολή set ή να πάρει κείμενο με την εντολή get. Η ιδιότητα value δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει ή να πάρει κάποια τιμή από ένα αντικείμενο. Επίσης, η MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας dialogs. Τα dialogs είναι ειδικού τύπου παράθυρα τα οποία χρησιμοποιούνται για να δώσουν πληροφορίες στο χρήστη ή να ζητήσουν εισαγωγή πληροφορίας. Τέλος, αφού κατασκευάσει ο χρήστης το παράθυρο της εφαρμογής με τα κουμπιά που επιθυμεί, μπορεί να τρέξει την εφαρμογή πατώντας το κουμπί “Run” . Το GUI θα ζητήσει να επιβεβαιώσει ο χρήστης τις αλλαγές που έκανε (Σχήμα 6.4). Επιλέγοντας “Yes”, το GUI θα ζητήσει από το χρήστη να δώσει ένα όνομα στην εφαρμογή του και θα την αποθηκεύσει σε δύο αρχεία .fig και .m [6.2].



Σχήμα 6.3: Property inspector.



Σχήμα 6.4: Παράθυρο διαλόγου για αποθήκευση αλλαγών στο GUI.

6.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMU ΜΕ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ TS

6.3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης και απαιτήσεις συστήματος

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Windows 7 στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB σε έκδοση 2009b. Η γλώσσα αυτή προσφέρει μεγάλη ευκολία στη δημιουργία πινάκων, ενώ και οι πράξεις μεταξύ πινάκων είναι αρκετά γρήγορες. Επίσης, παρέχει εργαλεία για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος εξασφαλίζοντας φιλικότητα προς το χρήστη. Οι τυπικές απαιτήσεις συστήματος για τη χρήση του λογισμικού MATLAB είναι: 3-4 GB χώρος στο δίσκο και 1 GB RAM. Επίσης, το λειτουργικό σύστημα

θα πρέπει να είναι νεότερο των Windows XP Service Pack 3, ενώ ο επεξεργαστής (Intel ή AMD x86) θα πρέπει να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2.

Το υπολογιστικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για το τρέξιμο του λογισμικού έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Λογισμικό Windows 7, 32-bit.
- Επεξεργαστή Intel Core i3, 3.07GHz.
- Μνήμη RAM ίση με 4 GB.
- Ελεύθερο χώρο στο σκληρό δίσκο 277GB.

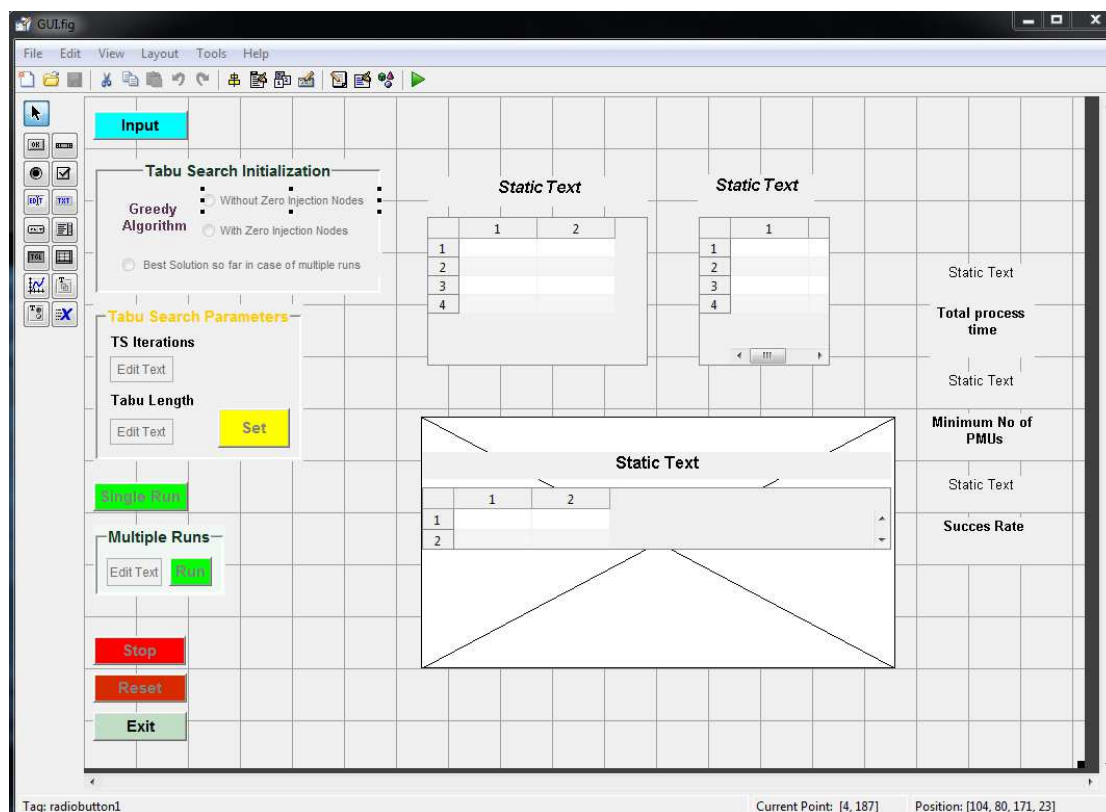
6.3.2 Λειτουργίες λογισμικού

6.3.2.1 Γραφικό περιβάλλον

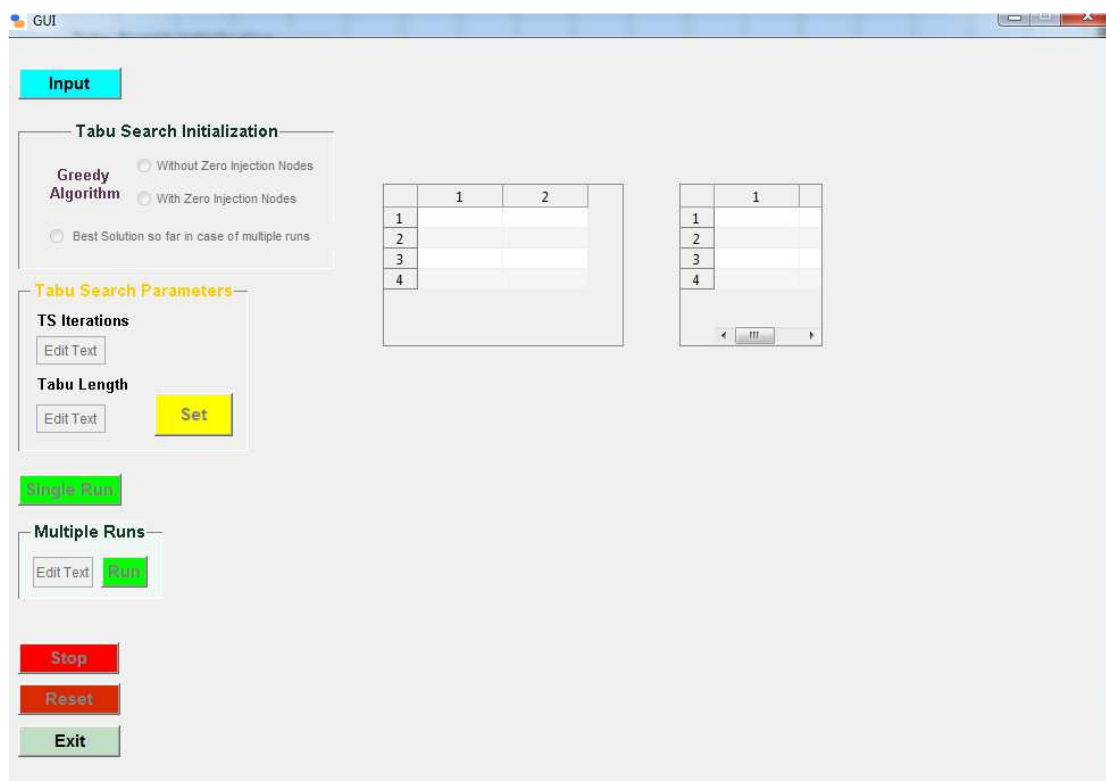
Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε ονομάστηκε GUI. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής:

- 7 push buttons για την εισαγωγή δεδομένων, εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό δεδομένων, αποθήκευση και έξοδο από το πρόγραμμα.
- 9 static texts για εισαγωγή τίτλων.
- 3 tables για εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα.
- 3 panels τα οποία δεν επηρεάζουν το πρόγραμμα, αλλά χρησιμοποιήθηκαν για αισθητικούς λόγους.
- 1 axes για παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά.
- 3 radio buttons για επιλογή και εκτέλεση προγραμμάτων.

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, αφού ο χρήστης επιλέξει να ανοίξει το γραφικό περιβάλλον `transmission_pricing`, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 6.5. Πατώντας το κουμπί “Run” , ο χρήστης μπορεί να τρέξει την εφαρμογή (Σχήμα 6.6) [6.3] [6.4]. Έπειτα, έχει τις ακόλουθες επιλογές: να εισάγει δεδομένα, να καθαρίσει την οθόνη ή να φύγει από το πρόγραμμα. Οι υπόλοιπες λειτουργίες εκτελούνται αφού ο χρήστης επιλέξει κάποιο αρχείο εισόδου και περιγράφονται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 6.5: Εισαγωγή όλων των αντικειμένων του GUI για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU.



Σχήμα 6.6: Το γραφικό περιβάλλον λογισμικού για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU.

6.3.2.2 Εισαγωγή δεδομένων

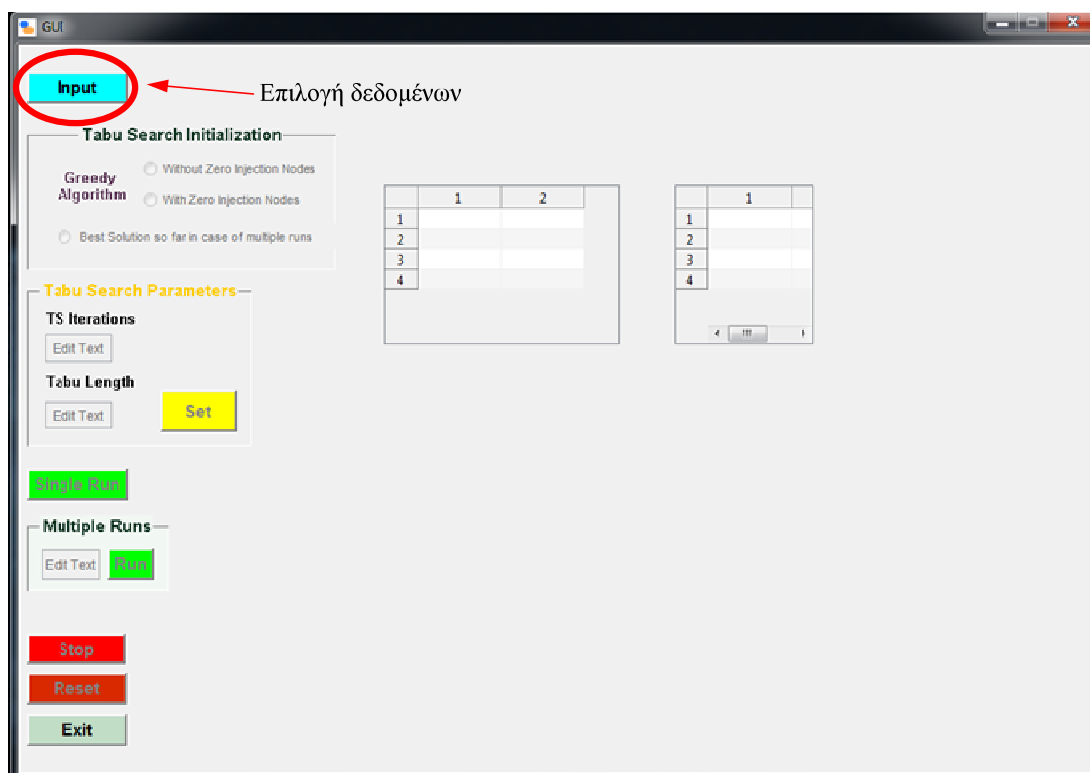
Τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό πρέπει να είναι αρχεία excel (.xls). Ένα λογισμικό βέλτιστης τοποθέτησης PMU το μόνο που απαιτεί, ως δεδομένα εισόδου, είναι ένας πίνακας με τις συνδέσεις των ζυγών και ένας πίνακας με τους ζυγούς με μηδενικής έγχυσης ισχύος. Επομένως το αρχείο excel, που θα εισάγεται θα πρέπει στο πρώτο φύλλο εργασίας να υπάρχει ένας πίνακας με δυο στήλες, όπου σε κάθε γραμμή θα γράφεται ο ζυγός αναχώρησης και ο ζυγός τερματισμού κάθε γραμμής. Στο δεύτερο φύλλο εργασίας πρέπει να δίνονται οι ζυγοί μηδενικής έγχυσης σε μια γραμμή του φύλλου.

6.3.2.3 Μελέτη και ανάλυση αποτελεσμάτων

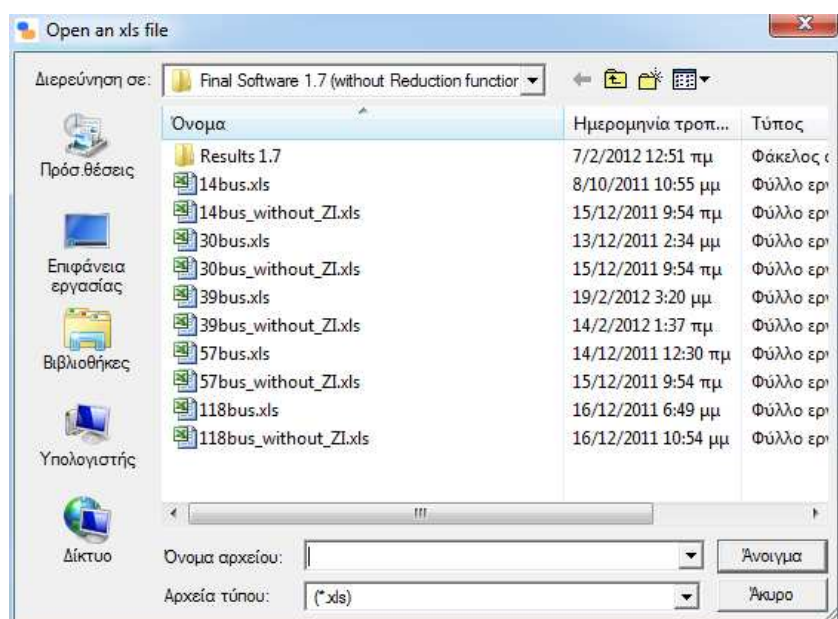
Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η μορφή που έχει το GUI πριν εκτελεστεί ο αλγόριθμος TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση. Είναι φανερό πως ακόμη δεν έχει γίνει η φόρτωση κάποιου δικτύου και δεν υπάρχουν αποτελέσματα. Στο πάνω αριστερά μέρος του Σχήματος 6.7 διακρίνεται το ενεργοποιημένο κουμπί “Input”, με το οποίο γίνεται η εισαγωγή δεδομένων. Πατώντας το συγκεκριμένο κουμπί ένα αναδυόμενο παράθυρο καλεί το χρήστη να επιλέξει το αρχείο excel, στο οποίο είναι αποθηκευμένα τα δεδομένα προς ανάλυση δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8.

Μετά την επιλογή των δεδομένων του δικτύου (Σχήμα 6.9), ενεργοποιείται το πάνελ “Tabu Search Initialization”, μέσα από το οποίο γίνεται η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα δημιουργηθεί η αρχική λύση του αλγορίθμου TS (βλ. Κεφάλαιο 4). Επιπλέον, ενεργοποιείται και το πάνελ “Tabu Search Parameters”, όπου ο χρήστης εισάγει τις δυο παραμέτρους του TS, τον αριθμό των επαναλήψεων (TS iterations) και το μήκος των απαγορευμένων καταστάσεων (tabu length).

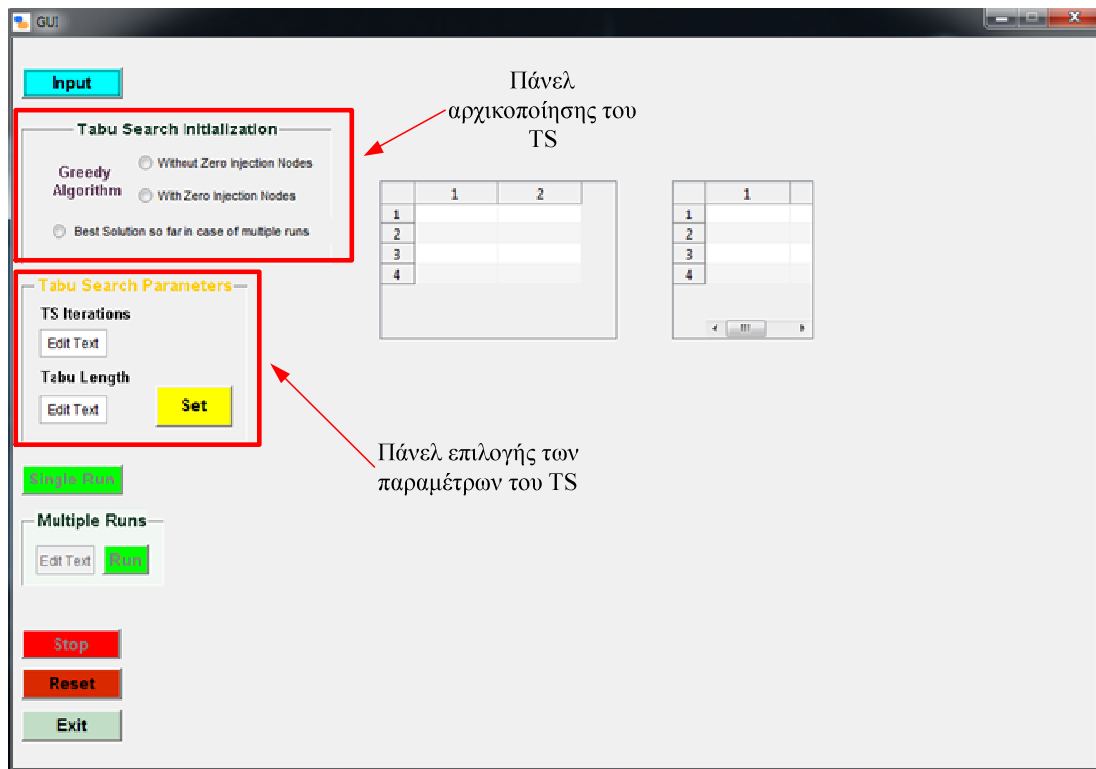
Στη συνέχεια, ο χρήστης με το πάτημα του κουμπιού “Set” εισάγει όλα τα δεδομένα που χρειάζεται ο αλγόριθμος TS για να εκτελεστεί, όπως ακριβώς περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Μετά το πάτημα του κουμπιού “Set” ενεργοποιούνται το κουμπί “Single Run”, με το οποίο γίνεται εκτέλεση του αλγορίθμου μόνο μία φορά και το πάνελ “Multiple Run”, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει στο “edit box” το πόσες συνεχόμενες φορές επιθυμεί ο χρήστης να εκτελεστεί ο αλγόριθμος (Σχήμα 6.10). Στην περίπτωση όπου επιλεγεί η εκτέλεση του αλγορίθμου μόνο μία φορά τότε στο κέντρο του παραθύρου θα δοθεί μια τοποθέτηση PMU, που αποτελεί τη λύση του αλγορίθμου (Σχήμα 6.11), ενώ στην περίπτωση που επιλεγούν πολλαπλές φορές του αλγορίθμου στο κέντρο του παραθύρου θα εμφανιστεί ένα διάγραμμα το οποίο θα δείχνει τον ελάχιστο αριθμό PMU που βρέθηκε σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου (Σχήμα 6.12). Σε κάθε περίπτωση, μετά το τέλος της εκτέλεσης του αλγορίθμου, στο πάνω μέρος του παραθύρου θα εμφανίζονται δυο πίνακες με δεδομένα του δικτύου και δεξιά θα εμφανίζονται τρία πάνελ που θα δείχνουν το συνολικό χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου, τον ελάχιστο αριθμό PMU και το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου.



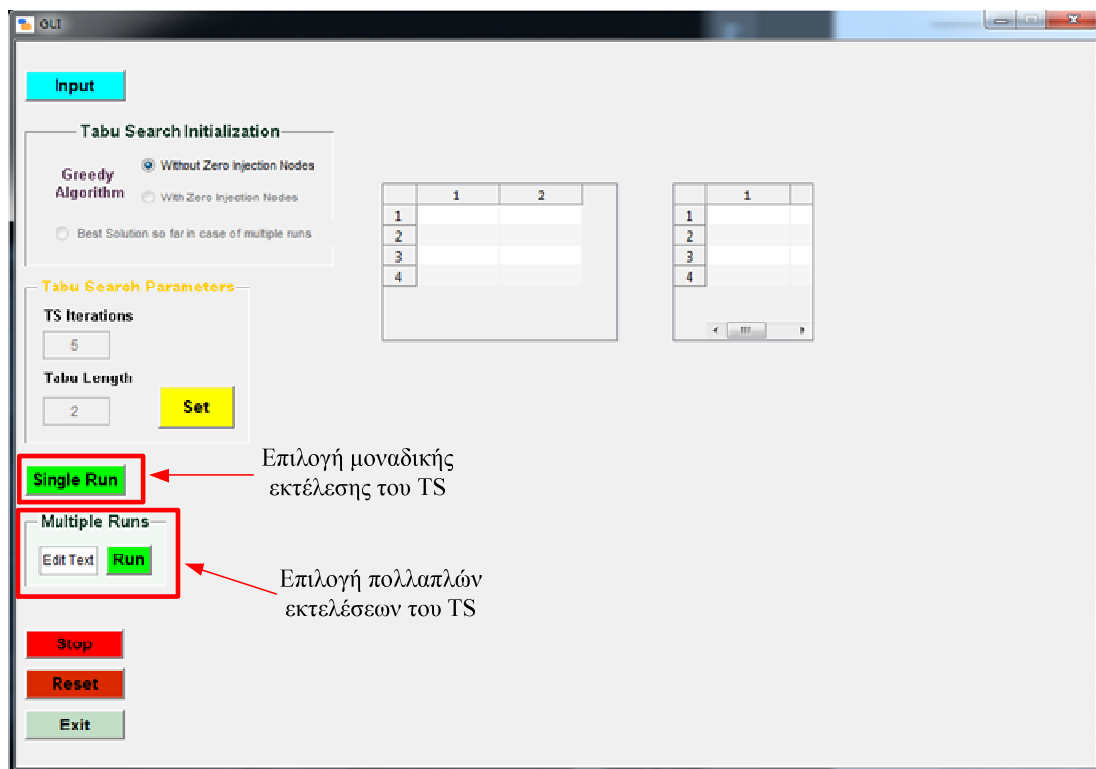
Σχήμα 6.7 : Μορφή GUI πριν την εκτέλεση του αλγορίθμου TS.



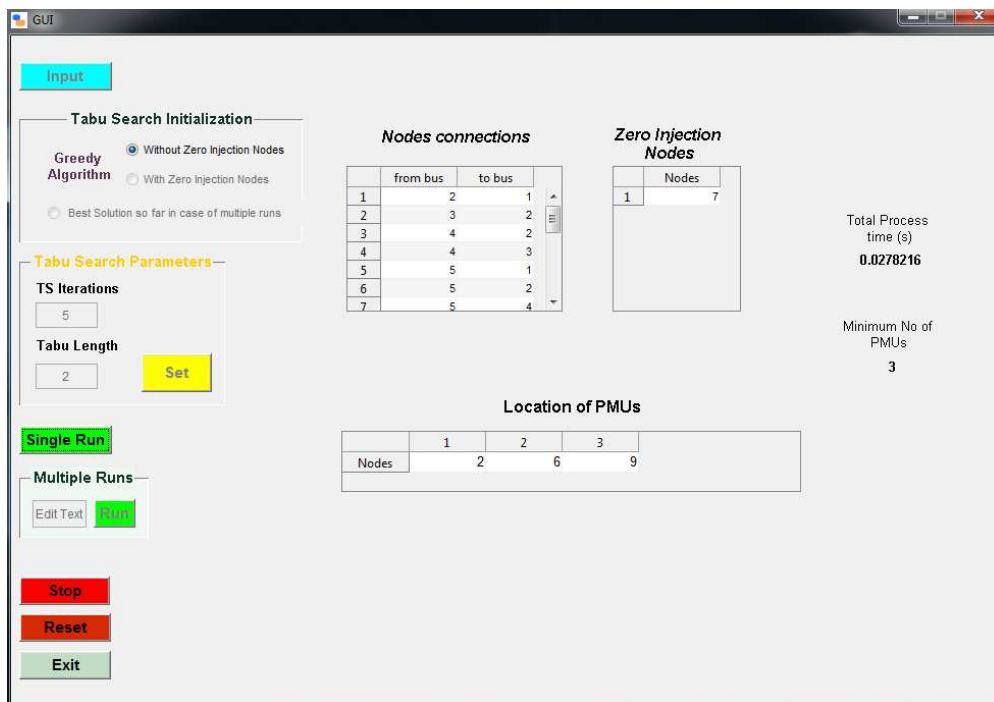
Σχήμα 6.8 : Επιλογή αρχείου excel με δεδομένα εισόδου.



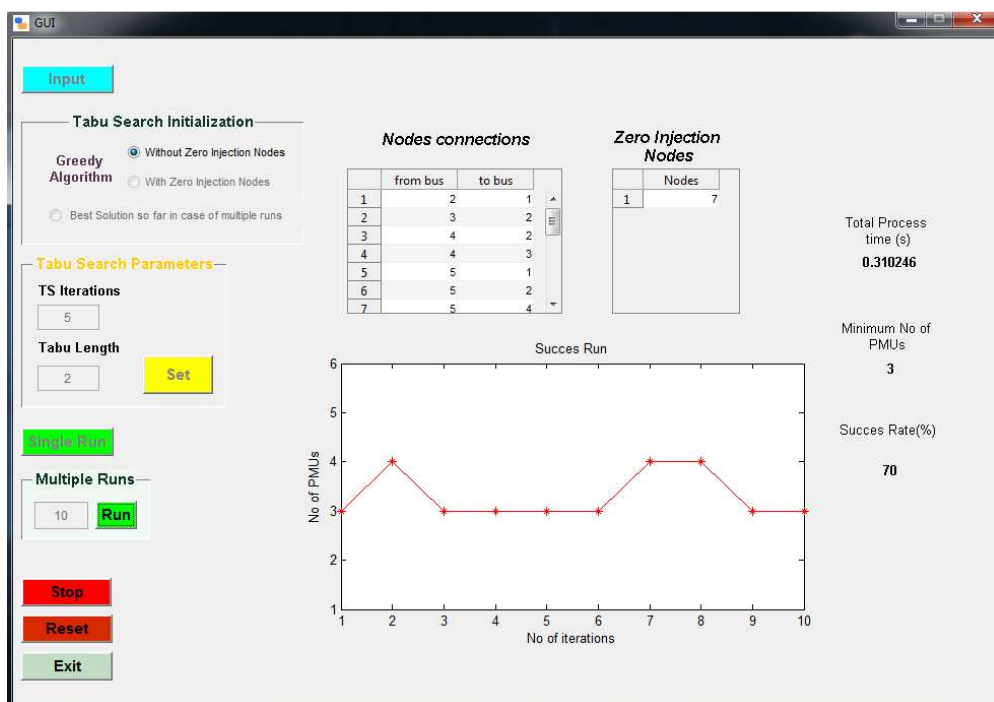
Σχήμα 6.9 : Μορφή GUI μετά την επιλογή δεδομένων.



Σχήμα 6.10 : Μορφή GUI μετά την επιλογή αρχικοποίησης του TS και παραμέτρων του TS.



Σχήμα 6.11 : Μορφή GUI μετά την επιλογή μιας εκτέλεσης του αλγορίθμου TS.



Σχήμα 6.12 : Μορφή GUI μετά την επιλογή 10 εκτελέσεων του αλγορίθμου TS.

Τέλος, η παρουσία του κουμπιού “Stop” έχει ως σκοπό την παύση του αλγορίθμου σε περίπτωση πολλαπλών εκτελέσεων, όποτε το επιθυμεί ο χρήστης. Με το κουμπί “Reset” ο χρήστης επαναφέρει το GUI στην αρχική κατάσταση και με το κουμπί “Exit” γίνεται η έξοδος από το λογισμικό.

6.3.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Μετά το τέλος της εκτέλεσης του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο excel (.xls). Τα αποτελέσματα που αποθηκεύονται στο αρχείο excel είναι ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου, ο αριθμός PMU που βρέθηκαν σε μια λύση και η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς. Επιπλέον, η ονομασία του αρχείου περιέχει τον αριθμό των διαδοχικών επαναλήψεων, το πλήθος των ζυγών του υπό εξέταση δικτύου, των αριθμό των επαναλήψεων του TS και το μήκος της λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων. Για παράδειγμα, αν εισαχθεί το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE και ζητηθεί να εκτελεστεί ο αλγόριθμος TS για 10 φορές με αριθμό επαναλήψεων (TSI) ίσο με 5 και μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL) ίσο με 2, τότε το όνομα του αρχείου που θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα θα είναι “results14buses10runs5TSI2TL.xls” και θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 6.13.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Time	# of PMUs	PMUs location				
2	0,074329	3	2	6	9		
3	0,034592	4	1	4	10	13	
4	0,027169	3	2	6	9		
5	0,017767	3	2	6	9		
6	0,027759	3	2	6	9		
7	0,021823	3	2	6	9		
8	0,019827	4	1	4	10	13	
9	0,021279	4	1	4	10	13	
10	0,034859	3	2	6	9		
11	0,030844	3	2	6	9		

Σχήμα 6.13 : Εμφάνιση αποτελεσμάτων για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE με TSI=5 και TL=2 για 10 εκτελέσεις του αλγορίθμου.

6.3.2.5 Συναρτήσεις λογισμικού

Σε αυτήν την ενότητα θα περιγραφεί η δομή του λογισμικού, αναλύοντας από ποιες συναρτήσεις αποτελείται, έτσι ώστε να μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει αυτοτελώς όποια δυνατότητα του λογισμικού επιθυμεί σε κάποια άλλη εφαρμογή. Κατά την ανάπτυξη του λογισμικού εκτιμήθηκε η δυνατότητα του MATLAB να καλεί διαφορετικές συναρτήσεις μέσα από μια άλλη συνάρτηση και έτσι αρκετά βήματα του αλγορίθμου διαιρέθηκαν σε μικρότερες συναρτήσεις. Το κύριο όμως κομμάτι του αλγορίθμου εισήλθε σε αρχεία .m με τον τίτλο OPP_TS.m.

Παρακάτω αναφέρονται αναλυτικά οι συναρτήσεις, οι οποίες αποτελούν το λογισμικό, μαζί με τα στοιχεία που παίρνουν σαν είσοδο και τα δεδομένα που δίνουν σαν έξοδο:

- Η συνάρτηση με το όνομα “IncidenceMatrix.m” η οποία δίνει τη μήτρα πρόσπτωσης Α ενός δικτύου παίρνει ως είσοδο ένα πίνακα που προέρχεται από το πρώτο φύλλο του αρχείου excel των δεδομένων του δικτύου με τις συνδέσεις των ζυγών. Ως έξοδο

δίνει τη μήτρα πρόσπτωσης A που είναι ένας πίνακας $N \times N$, όπου N το πλήθος των ζυγών του δικτύου.

- Η συνάρτηση με το όνομα “observe.m” εξετάζει την παρατηρησιμότητα του δικτύου για μια τοποθέτηση PMU, σύμφωνα με τους κανόνες παρατηρησιμότητας του Κεφαλαίου 2. Ως είσοδο παίρνει τη μήτρα πρόσπτωσης A , τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης και την υποψήφια τοποθέτηση PMU, που είναι επιθυμητή η εξέταση της παρατηρησιμότητάς της. Ως έξοδο της συνάρτησης δίνεται η μεταβλητή Obs που παίρνει τιμές 0 ή 1. Αν $Obs=1$, η τοποθέτηση PMU που εξετάζεται επιτυγχάνει πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, ενώ σε αντίθετη περίπτωση το δίκτυο είναι μη παρατηρήσιμο. Επιπλέον, η συνάρτηση δίνει το άθροισμα των δεικτών παρατηρησιμότητας του δικτύου, καθώς και το πλήθος των ζυγών που δεν είναι παρατηρήσιμοι.
- Η συνάρτηση με το όνομα “greedy1.m” δίνει στην έξοδό της μια λύση τοποθέτησης PMU, με την οποία επιτυγχάνεται η πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου, με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου χωρίς να επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Ως είσοδος δίνεται η μήτρα πρόσπτωσης A του δικτύου και οι ζυγοί μηδενικής έγχυσης.
- Η συνάρτηση με το όνομα “greedy2.m” δίνει στην έξοδό της μια λύση τοποθέτησης PMU, με την οποία επιτυγχάνεται η πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου, με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου χωρίς να απαγορεύεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Ως είσοδος δίνεται η μήτρα πρόσπτωσης A του δικτύου και οι ζυγοί μηδενικής έγχυσης.
- Η συνάρτηση με το όνομα “evaluation.m” είναι η συνάρτηση κόστους του αλγορίθμου TS που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Ως είσοδο παίρνει τη μήτρα πρόσπτωσης A του δικτύου, τους ζυγούς μηδενική έγχυσης και μια τοποθέτηση PMU. Ως έξοδο δίνεται η τιμή της συνάρτησης κόστους για τη δοθείσα τοποθέτηση PMU.
- Η συνάρτηση με το όνομα “OPP_TS.m” αποτελεί την κύρια συνάρτηση του λογισμικού που δημιουργήθηκε και ενσωματώνει όλα όσα αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Ως είσοδο παίρνει τη μήτρα πρόσπτωσης του δικτύου και τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης και στην έξοδό της δίνει μια τοποθέτηση PMU, το πλήθος των PMU και το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου.
- Η συνάρτηση με το όνομα “singleOPP.m” είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση της συνάρτησης OPP_TS.m μόνο μια φορά και για την ονομασία του αρχείου εξόδου.
- Η συνάρτηση με το όνομα “multi_OPP_TS.m” είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση της συνάρτησης OPP_TS.m πολλαπλές φορές και για την ονομασία του αρχείου εξόδου. Ως είσοδο παίρνει τον αριθμό των εκτελέσεων που επιθυμεί ο χρήστης.
- Η συνάρτηση με το όνομα “GUI.m” φροντίζει την απεικόνιση όλων των παραπάνω και λαμβάνει οδηγίες από το χρήστη μέσω των καταλλήλων κουμπιών και να τις υλοποιεί.
- Η συνάρτηση με το όνομα “progressbar.m” είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση της μπάρας προόδου όταν επιλέγεται να εκτελεστεί ο αλγόριθμος περισσότερες από μία φορές.

Στον Πίνακα 6.1 δίνεται το πλήθος γραμμών κώδικα της κάθε συνάρτησης. Να σημειωθεί ότι σε αυτές τις γραμμές συμπεριλαμβάνεται και η χρήση των σχολίων που κάνουν πιο κατανοητό τον κώδικα.

Πίνακας 6.1 : Πλήθος γραμμών συναρτήσεων λογισμικού.

Όνομα συνάρτησης	Αριθμός γραμμών κώδικα
IncidenceMatrix.m	16
observe.m	189
greedy1.m	42
greedy2.m	37
evaluation.m	16
OPP_TS	110
singleOPP.m	26
multi_OPP_TS.m	35
GUI.m	420
progressbar.m	359

6.3.2.6 Μελλοντικές επεκτάσεις του λογισμικού

Οι δυνατότητες επέκτασης ενός λογισμικού βέλτιστης τοποθέτησης είναι πολλές. Το εν λόγω λογισμικό θα μπορούσε να επεκταθεί έτσι ώστε να ενσωματώνει και άλλες μετα-εвриστικές μεθόδους για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU, έτσι ώστε να δίνεται η δυνατότητα σύγκρισής τους με τον TS. Επίσης, με μια τροποποίηση του λογισμικού να δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα να καθορίζει ο ίδιος τους συντελεστές της συνάρτησης κόστους του αλγορίθμου TS, έτσι όπως αυτός κρίνει. Ακόμη θα μπορούσε να ενσωματωθούν και άλλες εναλλακτικές μέθοδοι για τη δημιουργία αρχικής λύσης ή θα μπορούσε ο ίδιος ο χρήστης να εισάγει μια αρχική λύση.

Επιπλέον, μια διαδικασία που θα μπορούσε να ενσωματωθεί στο λογισμικό θα ήταν η διαδικασία συγχρονισμού των PMU. Έτσι αφού θα δινόταν μια βέλτιστη τοποθέτηση PMU από τον αλγόριθμο TS, το επόμενο βήμα θα ήταν ο σχεδιασμός τοποθέτησης PMU στους αντίστοιχους ζυγούς, δηλαδή με ποια σειρά θα πρέπει να τοποθετηθούν τα PMU έτσι ώστε να υπάρξει ο καλύτερος δυνατός συγχρονισμός τους.

Τέλος, το λογισμικό θα μπορούσε να επεκταθεί έτσι ώστε ο χρήστης να διαλέγει σε ποιους ζυγούς του δικτύου απαγορεύεται ή είναι δυσμενέστερη η τοποθέτηση PMU λόγω εξωτερικών συνθηκών, όπως η έλλειψη τηλεπικοινωνιακών υποδομών.

6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] Δ. Βαρσάμης, "MATLAB - Graphical User Interfaces," [Online]. Διαθέσιμο: http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev_next=prev, προσπελάστηκε το Νοέμβριο 2011.
- [6.2] Κ. Διαμαντάρας, "Εργαστηριακές ασκήσεις νευρωνικών δικτύων και σύντομο εγχειρίδιο MATLAB," [Online]. Διαθέσιμο: http://aetos.it.teithe.gr/~kdiamant/Neural/Matlab_Ref@26_3_2008.pdf, προσπελάστηκε το Νοέμβριο 2011.
- [6.3] "MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing," [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com>, προσπελάστηκε το Νοέμβριο 2011.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (TS – Tabu Search) για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMU) σε πρότυπα δίκτυα του IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Τα δίκτυα τα οποία επιλέχθηκαν είναι τα δίκτυα των 14, 30, 39, 57 και 118 ζυγών του IEEE, λόγω της μεγάλης εμφάνισης των δικτύων αυτών στη διεθνή βιβλιογραφία, κάτι που εξασφαλίζει αξιοπιστία για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε δίκτυο ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα αφού ο TS είναι ένας μέτα-ευριστικός αλγόριθμος και σε κάθε εκτέλεση είναι πιθανό να δίνει διαφορετικά τελικά αποτελέσματα.

Για κάθε δίκτυο που θα εξεταστεί εκτελέστηκαν πέντε διαφορετικά σενάρια ανάλογα με το αν στο υπό εξέταση δίκτυο λαμβάνονται υπ' όψιν οι ζυγοί μηδενικής έγχυσης και ανάλογα με τη μέθοδο που εκτελέστηκε για τη δημιουργία αρχικής λύσης. Τα σενάρια αυτά είναι τα ακόλουθα :

- **Σενάριο 1:** Το υπό εξέταση δίκτυο δεν περιλαμβάνει ζυγούς μηδενικής έγχυσης και η αρχική λύση δίνεται σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου από τον άπληστο αλγόριθμο.
- **Σενάριο 2:** Το υπό εξέταση δίκτυο δεν περιλαμβάνει ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και στο τέλος κάθε εκτέλεσης του αλγορίθμου, το τελικό αποτέλεσμα συγκρίνεται με την αρχική λύση της εκτέλεσης και αν είναι καλύτερο χρησιμοποιείται ως αρχική λύση στην επόμενη εκτέλεση (επαναληπτικός TS).
- **Σενάριο 3:** Το υπό εξέταση δίκτυο περιλαμβάνει ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου από τον άπληστο αλγόριθμο. Κατά την εκτέλεση του άπληστου αλγορίθμου δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος.
- **Σενάριο 4:** Το υπό εξέταση δίκτυο περιλαμβάνει ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου από τον άπληστο αλγόριθμο. Κατά την εκτέλεση του άπληστου αλγορίθμου επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος.
- **Σενάριο 5:** Το υπό εξέταση δίκτυο περιλαμβάνει ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος και στο τέλος κάθε εκτέλεσης του αλγορίθμου, το τελικό αποτέλεσμα συγκρίνεται με την αρχική λύση της εκτέλεσης και αν είναι καλύτερο χρησιμοποιείται ως αρχική λύση στην επόμενη εκτέλεση (επαναληπτικός TS).

Τέλος, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου στο κάθε δίκτυο, θα επισημαίνονται οι βέλτιστες λύσεις καθώς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τις διάφορες παραδοχές που θα πραγματοποιηθούν.

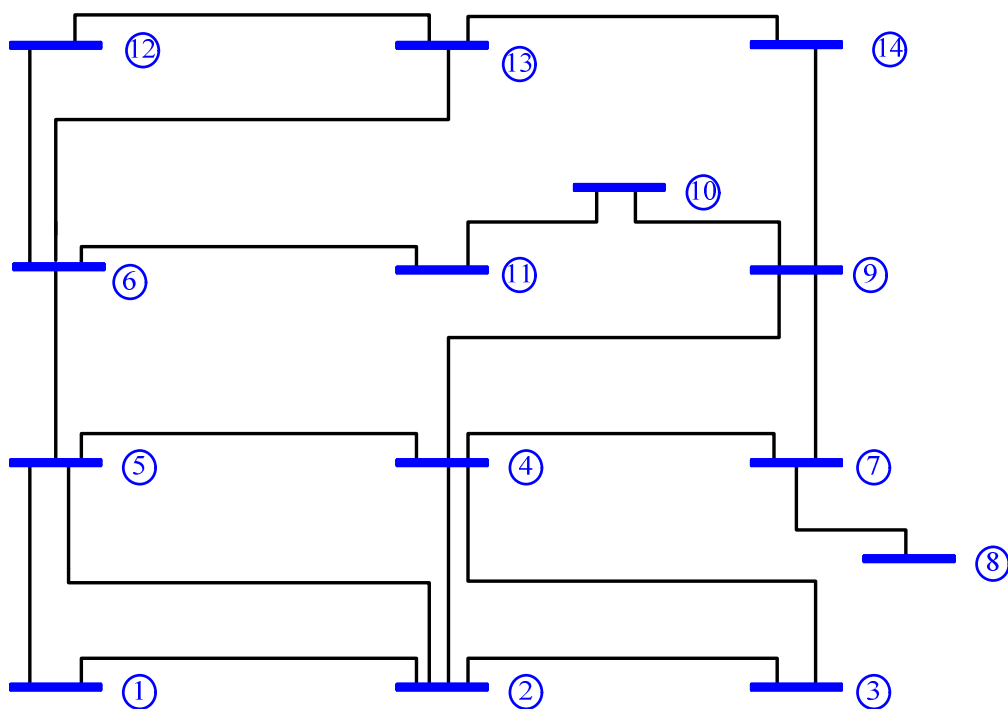
7.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ IEEE

7.2.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE αποτελείται από 20 κλάδους και από 1 ζυγό μηδενικής έγχυσης ισχύος. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού εμφανίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.1 και το μονογραμμικό του σχέδιο στο Σχήμα 7.1.

Πίνακας 7.1: Στοιχεία δικτύου 14 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 14 ζυγών του IEEE	20	7



Σχήμα 7.1: Δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

7.2.2 Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο

αλγόριθμο. Στον Πίνακα 7.2, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.2, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.2 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 1 για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

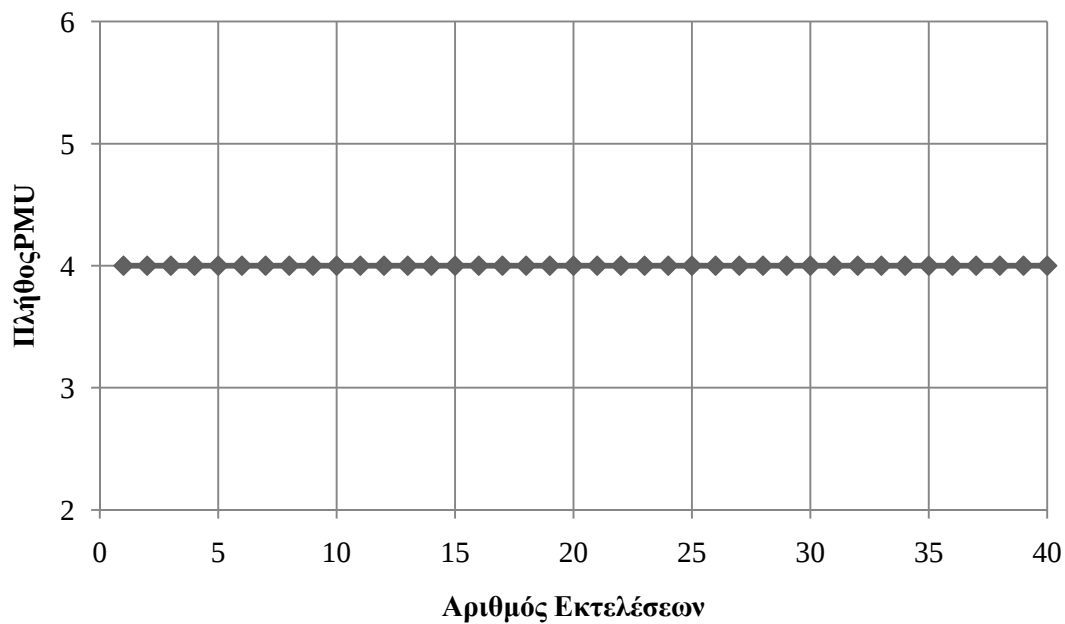
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	4	100	100	0,040
10	2	4	100	100	0,037
5	5	4	100	100	0,024
5	2	4	100	100	0,024
2	2	4	47,5	47,5	0,010
2	1	4	20	20	0,009

Από το Πίνακα 7.2, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 5 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.3 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.3 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, Σενάριο 1, TSI=5, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	4
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (4 διαφορετικές λύσεις με 4 PMU)	2, 6, 8, 9
	2, 6, 7, 9
	2, 7, 10, 13
	2, 8, 10, 13
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,020
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.2 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (4 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.2 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 1, TSI=5 και TL=2.

7.2.3 Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.4, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.4, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.4 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 2 για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

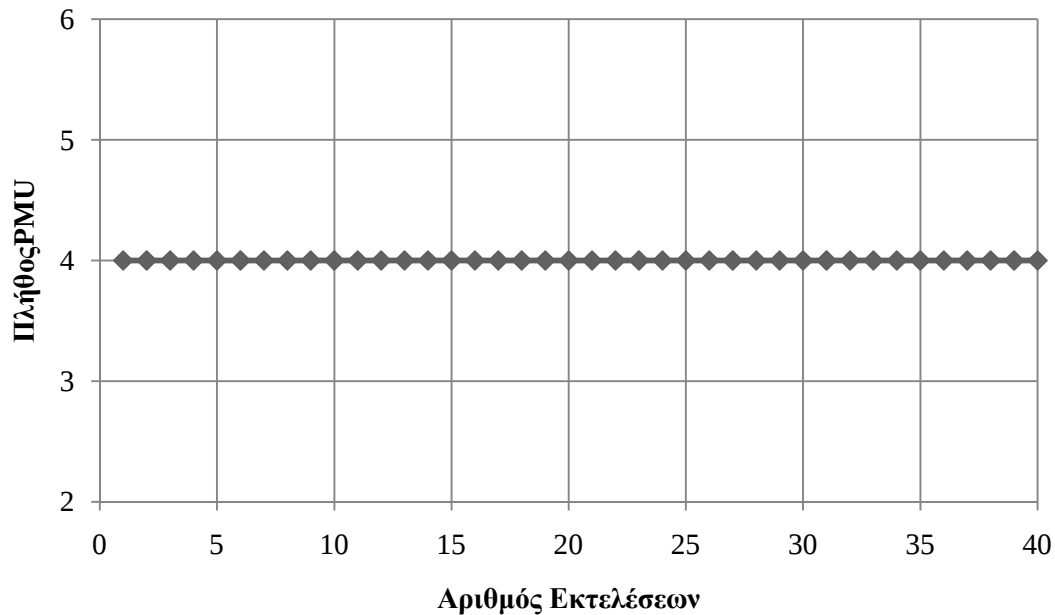
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	4	100	100	0,027
10	2	4	100	100	0,028
5	5	4	100	100	0,015
5	2	4	100	100	0,017
2	2	4	95	95	0,007
2	1	4	100	100	0,007

Από το Πίνακα 7.4, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 2 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 1, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.5 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.5 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, Σενάριο 2, TSI=2, TL=1 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	4
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 8, 9
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,007
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (4 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.3 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 2, TSI=2 και TL=1.

7.2.4 Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.1. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να μην είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.6, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.6, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.6 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 3 για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

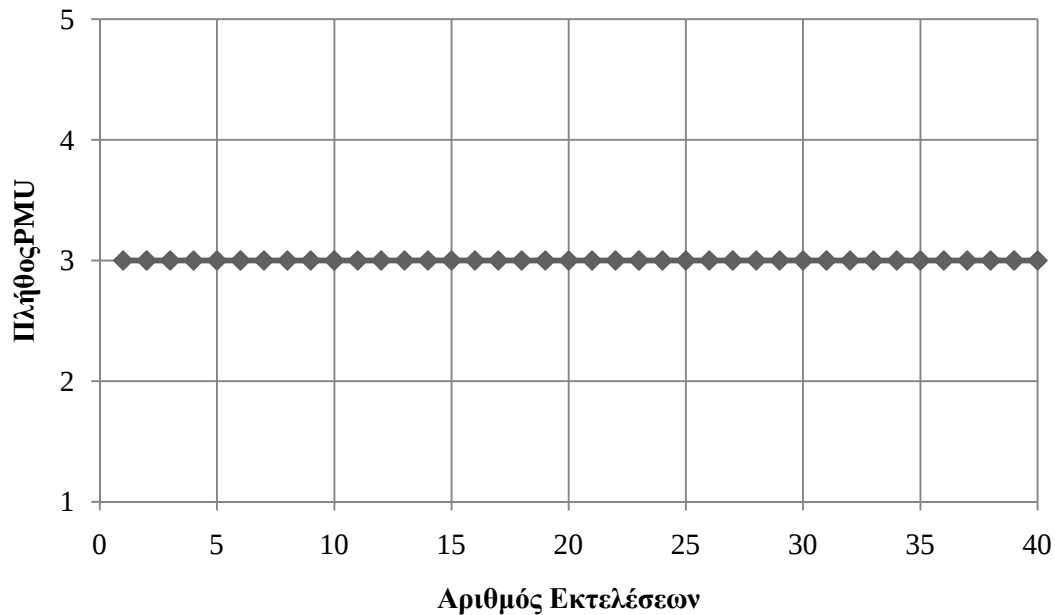
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	3	100	100	0,033
10	2	3	100	100	0,033
5	5	3	87,5	87,5	0,020
5	2	3	92,5	92,5	0,021
2	2	3	12,5	12,5	0,010
2	1	3	22,5	22,5	0,010

Από το Πίνακα 7.6, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.7 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.7 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, Σενάριο 3, TSI=10, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	3
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 9
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,033
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.4 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (3 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.4 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 3, TSI=10 και TL=2.

7.2.5 Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.1. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.8, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.8, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.8 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 4 για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

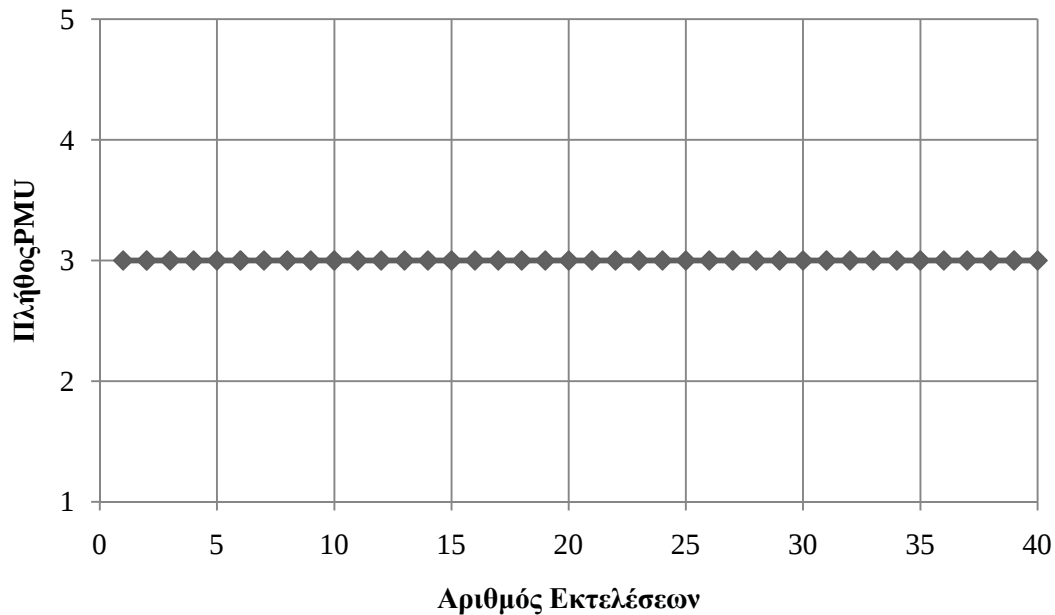
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	3	100	100	0,034
10	2	3	100	100	0,037
5	5	3	80	80	0,020
5	2	3	85	85	0,021
2	2	3	17,5	17,5	0,010
2	1	3	25	25	0,010

Από το Πίνακα 7.8, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 5, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.9 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.9 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, Σενάριο 4, TSI=10, TL=5 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	3
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 9
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,037
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.5 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (3 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.5 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 4, TSI=10 και TL=5.

7.2.6 Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.1 και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.10, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.10, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.10 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 5 για το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

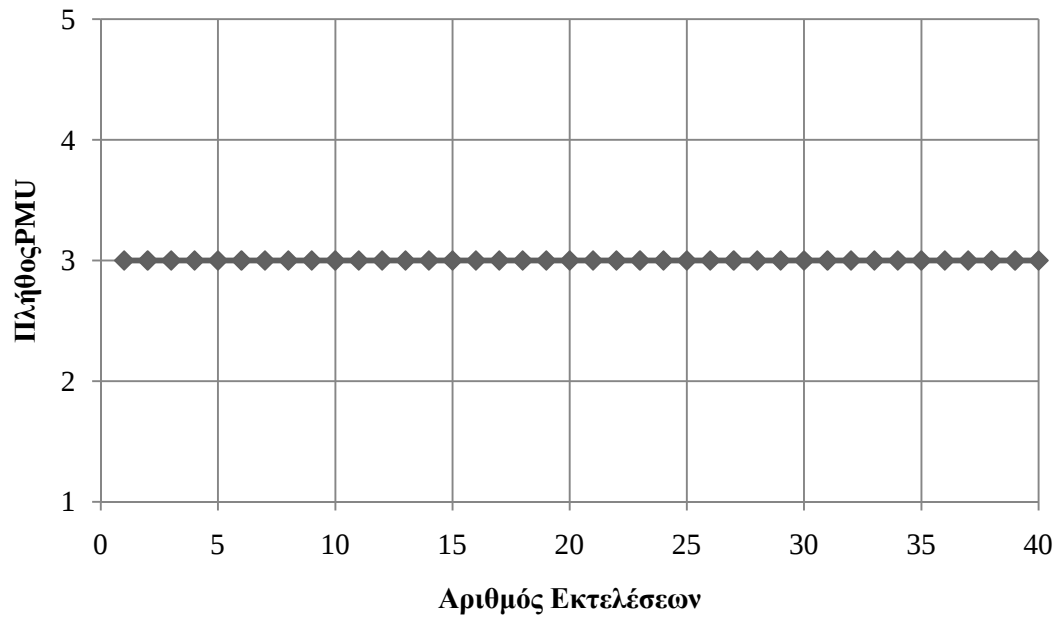
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	3	100	100	0,031
10	2	3	100	100	0,032
5	5	3	100	100	0,017
5	2	3	100	100	0,018
2	2	3	100	100	0,007
2	1	4	100	100	0,009

Από το Πίνακα 7.10, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 2 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.11 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.11 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, Σενάριο 5, TSI=2, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	3
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 9
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,007
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.6 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (3 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.6 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 5, TSI=2 και TL=2.

7.2.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.2.2 έως 7.2.6 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.12.

Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 14 ζυγών του IEEE.

Σενάριο	Περιγραφή	Ελάχιστο πλήθος PMU	Ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου (%)	Μέσος χρόνος εκτέλεσης (sec)
1	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Αρχική λύση με άπληστο αλγόριθμο.	4	100	0,020
2	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	4	100	0,007
3	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	3	100	0,033
4	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	3	100	0,034
5	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	3	100	0,007

Από τις εκτελέσεις του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU στο δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE με τις διαφορετικές μεθόδους για τη δημιουργία αρχικής λύσης προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση και συμπεριφορά του αλγορίθμου ανάλογα με τις παραμέτρους και την αρχική λύση που του δίνεται. Από τα αποτελέσματα των ενοτήτων 7.2.2 έως 7.2.6 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όταν στο δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 1 και 2), με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 4 διαφορετικές λύσεις για την τοποθέτηση 4 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ενώ με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι μικρότερος, δίνει μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 4 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται η παρατηρησιμότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν δίνεται

σαν αρχική λύση στον αλγόριθμο μια πολύ καλή λύση, δηλαδή ένα πολύ μικρός αριθμός PMU, τότε «εγκλωβίζεται» εύκολα σε ένα ελάχιστο.

- Όταν στο δίκτυο των 14 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 3, 4 και 5), τόσο με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης όσο και με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, δίνεται μία μόνο λύση για την τοποθέτηση 3 PMU για τη πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου. Όταν κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ο αλγόριθμος TS παρουσιάζει καλύτερα ποσοστά επιτυχίας αλλά μεγαλύτερους μέσους χρόνους εκτέλεσης από όταν στην εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Αντίθετα με την εφαρμογή του επαναληπτικού TS, αν και μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι μικρότερος, όταν επιλέγεται χαμηλός αριθμός επαναλήψεων (TSI=2) του αλγορίθμου TS, η παρατηρησιμότητα επιτυγχάνεται με 4 PMU αντί με 3 PMU που μας δίνουν στον ίδιο αριθμό επαναλήψεων οι εφαρμογές του αλγορίθμου TS με αρχική λύση από τον άπληστο αλγόριθμο.

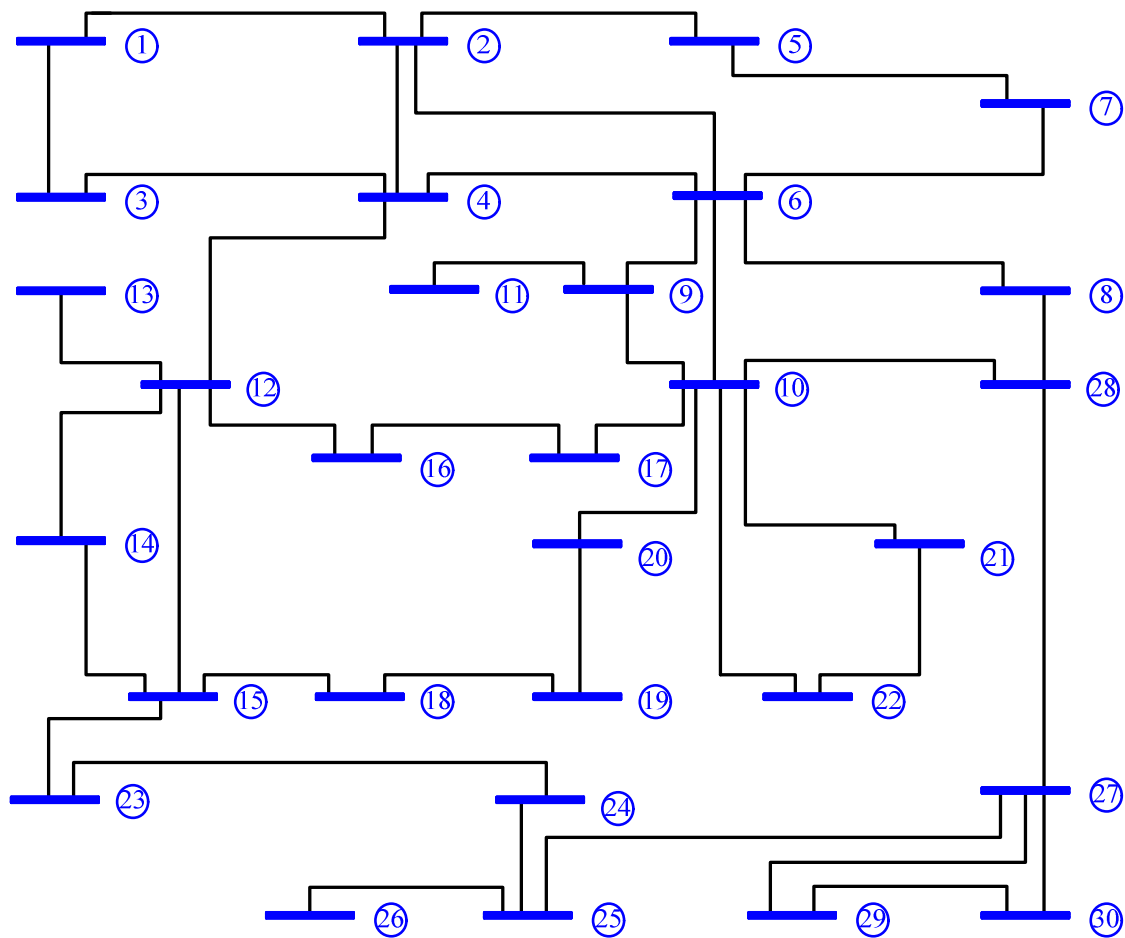
7.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 30 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ IEEE

7.3.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE αποτελείται από 41 κλάδους και από 5 ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού εμφανίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.13 και το μονογραμμικό του σχέδιο στο Σχήμα 7.7.

Πίνακας 7.13: Στοιχεία δικτύου 30 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 30 ζυγών του IEEE	41	6, 9, 11, 25, 28



Σχήμα 7.7 : Δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

7.3.2 Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο. Στον Πίνακα 7.14, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.14, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.14 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 1 για το δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

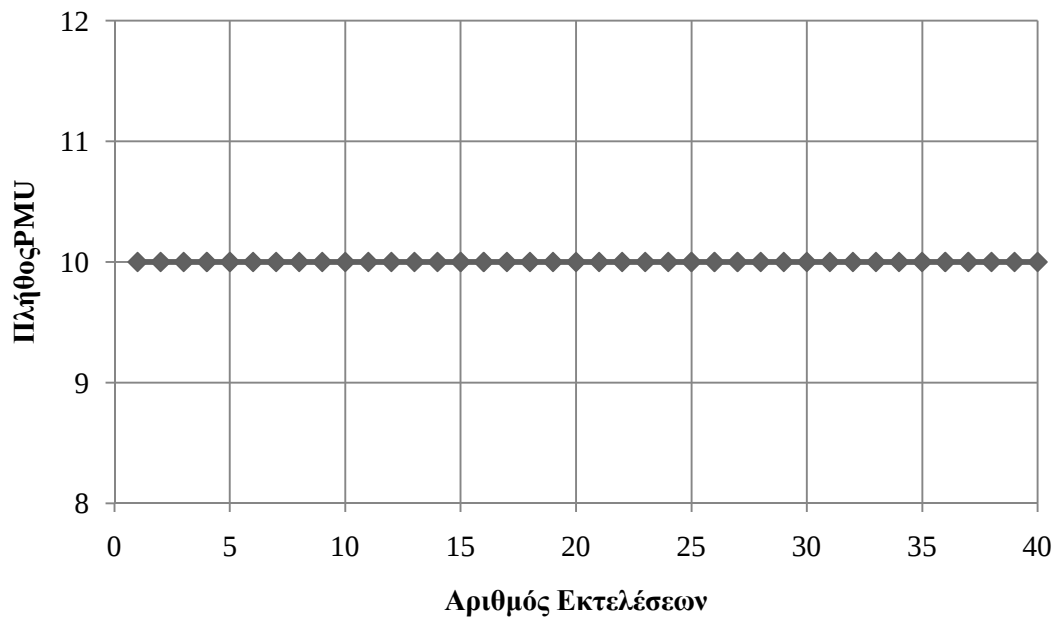
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	10	100	100	0,214
10	2	10	100	100	0,215
5	5	10	97,5	97,5	0,124
5	2	10	87,5	87,5	0,132
2	2	10	17,5	17,5	0,063
2	1	10	30	30	0,050

Από το Πίνακα 7.14, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.15 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.15 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, Σενάριο 1, TSI=10, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	10
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (16 διαφορετικές λύσεις με 10 PMU)	1, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 23, 26, 27
	3, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 23, 26, 27
	1, 5, 6, 10, 11, 12, 19, 24, 26, 27
	1, 5, 6, 9, 10, 12, 19, 23, 26, 27
	1, 2, 6, 9, 10, 12, 18, 24, 26, 27
	1, 2, 6, 10, 11, 12, 18, 24, 26, 27
	3, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 27
	3, 5, 6, 10, 11, 12, 19, 23, 25, 27
	1, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 18, 25, 27
	2, 3, 6, 10, 11, 12, 18, 23, 26, 27
	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 20, 25, 27
	2, 3, 6, 10, 11, 12, 18, 24, 26, 27
	3, 5, 6, 9, 10, 12, 19, 23, 26, 27
	1, 2, 6, 10, 11, 12, 18, 24, 26, 27
	2, 4, 6, 10, 11, 12, 18, 24, 26, 27
	3, 5, 6, 9, 10, 12, 19, 24, 26, 27
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,215
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.8 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (10 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.8 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 1, TSI=10 και TL=2.

7.3.3 Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.16, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.16, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.16 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 2 για το δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

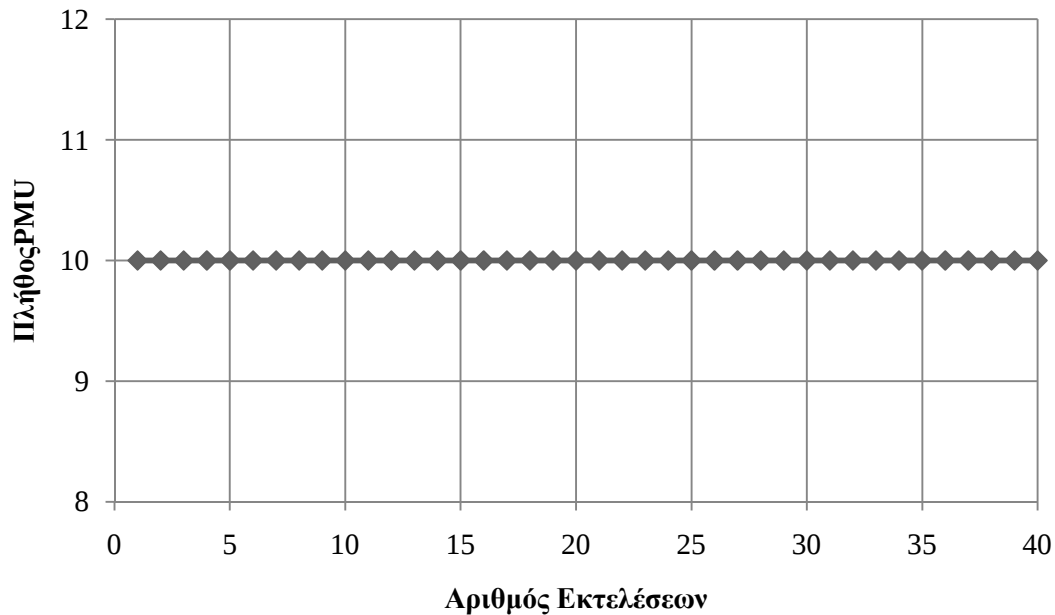
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	10	100	100	0.226
10	2	10	100	100	0.231
5	5	10	100	100	0.119
5	2	10	100	100	0.118
2	2	10	100	100	0.047
2	1	10	100	100	0.049

Από το Πίνακα 7.16, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 2 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 1, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.17 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.17 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, Σενάριο 2, TSI=2, TL=1 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	10
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	3, 5, 6, 10, 11, 12, 19, 23, 25, 27
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,049
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.9 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (10 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.9 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 2, TSI=2 και TL=1.

7.3.4 Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.15. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να μην είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.18, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.18, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.18 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 3 για το δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

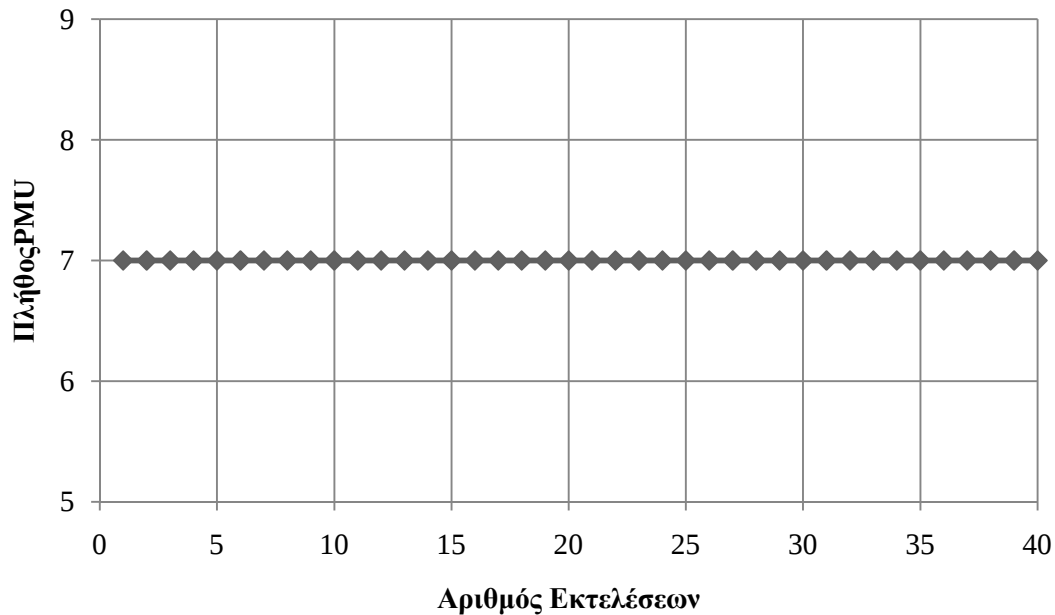
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	7	100	100	0,236
10	2	7	100	100	0,248
5	5	7	100	100	0,158
5	2	7	100	100	0,134
2	2	7	100	100	0,065
2	1	7	100	100	0,065

Από το Πίνακα 7.18, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 2 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 1, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.19 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.19 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, Σενάριο 3, TSI=2, TL=1 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	7
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (2 διαφορετικές λύσεις με 7 PMU)	2, 3, 10, 12, 18, 24, 27
	2, 3, 10, 12, 19, 24, 27
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,065
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.10 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (7 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.10 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 3, TSI=2 και TL=1.

7.3.5 Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.13. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.20, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.20, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.20 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 4 για το δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	7*	100	100	0,282
10	2	7*	100	100	0,263
5	5	7*	35	35	0,164
5	2	7*	42,5	42,5	0,173
2	2	8	17,5	0	0,075
2	1	7*	2,5	2,5	0,066

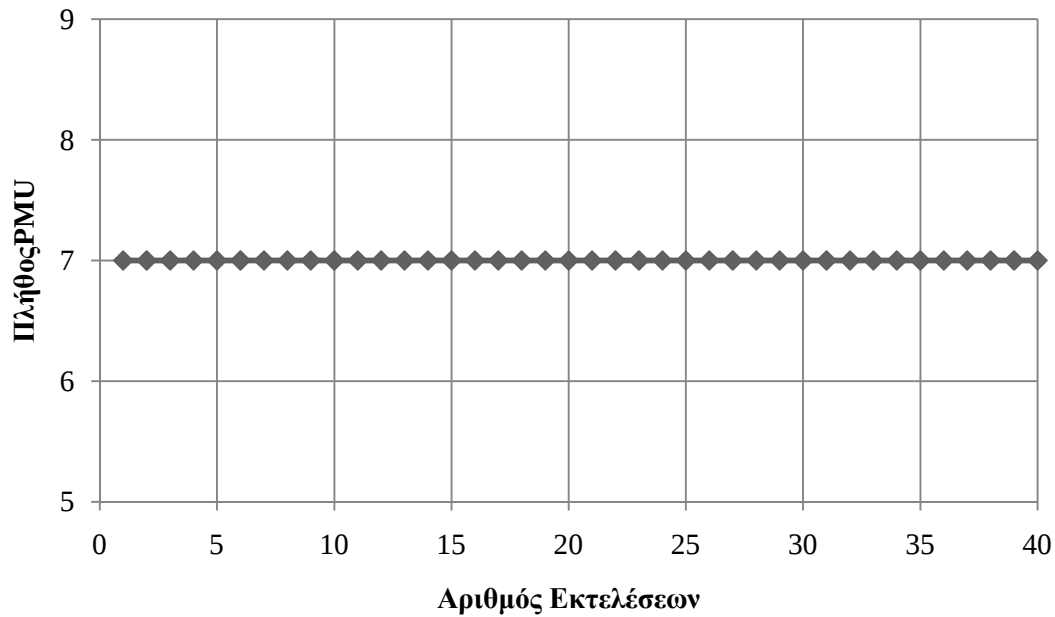
*βέλτιστο πλήθος PMU

Από το Πίνακα 7.20, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.21 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.21 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, Σενάριο 4, TSI=10, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	7
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (8 διαφορετικές λύσεις με 7 PMU)	1, 2, 10, 12,18, 23, 27
	2, 4, 10, 12, 19, 24,27
	2, 4, 10, 12, 18, 24,27
	2, 3, 10, 12, 18, 24,27
	1, 5, 10, 12,18, 23, 27
	3, 5, 10, 12,18, 23, 27
	3, 5, 10, 12,19, 23, 27
	1, 2, 10, 12,19, 24, 27
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,263
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.11 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (7 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.11 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 4, TSI=10 και TL=2.

7.3.6 Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.13 και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.22, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.22, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.22 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 5 για το δίκτυο 30 ζυγών του IEEE..

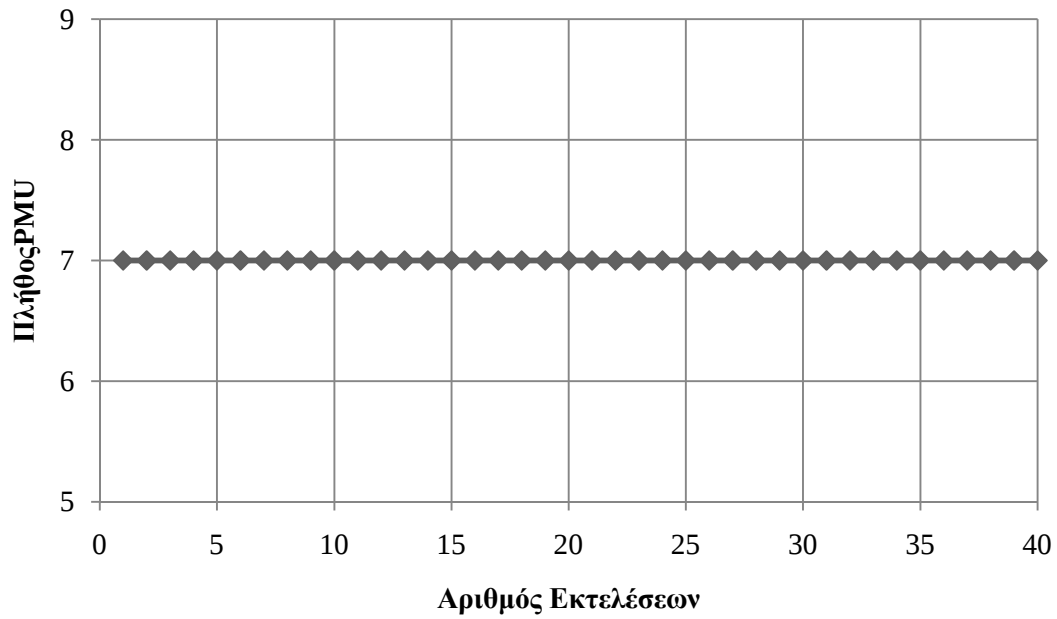
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
10	5	7	97,5	97,5	0,250
10	2	7	100	100	0,260
5	5	7	97,5	97,5	0,142
5	2	7	97,5	97,5	0,176
2	2	7	90	90	0,060
2	1	7	97,5	97,5	0,055

Από το Πίνακα 7.22, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 2, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.23 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.23 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, Σενάριο 5, TSI=10, TL=2 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	7
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 4, 10, 12, 19, 24, 27
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,260
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.12 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (7 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.12 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 5, TSI=10 και TL=2.

7.3.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.3.2 έως 7.3.6 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.24.

Πίνακας 7.24: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 30 ζυγών του IEEE.

Σενάριο	Περιγραφή	Ελάχιστο πλήθος PMU	Ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου (%)	Μέσος χρόνος εκτέλεσης (sec)
1	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Αρχική λύση με άπληστο αλγόριθμο.	10	100	0,270
2	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	10	100	0,049
3	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	7	100	0,064
4	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	7	100	0,263
5	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	7	100	0,167

Από τις εκτελέσεις του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE με τις διαφορετικές μεθόδους για τη δημιουργία αρχικής λύσης προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση και συμπεριφορά του αλγορίθμου ανάλογα με τις παραμέτρους και την αρχική λύση που του δίνεται. Από τα αποτελέσματα των ενοτήτων 7.3.2 έως 7.3.6 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όταν στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 1 και 2), με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 16 διαφορετικές λύσεις για την τοποθέτηση 10 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ενώ με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι μικρότερος, δίνει μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 10 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται η παρατηρησιμότητα. Αυτό οφείλεται στο

ότι όταν δίνεται σαν αρχική λύση στον αλγόριθμο μια πολύ καλή λύση, δηλαδή ένα πολύ μικρός αριθμός PMU, τότε «εγκλωβίζεται» εύκολα σε ένα ελάχιστο.

- Όταν στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 3, 4 και 5), τόσο με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης όσο και με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, δίνεται ότι ο ελάχιστος αριθμός PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα είναι 7. Όταν για την δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, χωρίς να επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εκτέλεση του, ο αλγόριθμος TS δίνει δυο διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 7 PMU, ενώ όταν στον άπληστο αλγόριθμο επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 8 διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 7 PMU. Αντίθετα με την εφαρμογή του επαναληπτικού TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι πιο μικρός, δίνεται μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 7 PMU. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι όταν εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος χωρίς να είναι επιτρεπτή η τοποθέτηση PMU κατά την εκτέλεση του, τα ποσοστά επιτυχίας του αλγορίθμου TS είναι πάντα 100% ανεξάρτητα από τον αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου TS και το μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η βέλτιστη λύση (7 PMU) επιτυγχάνεται από την εφαρμογή και μόνο του άπληστου αλγορίθμου.

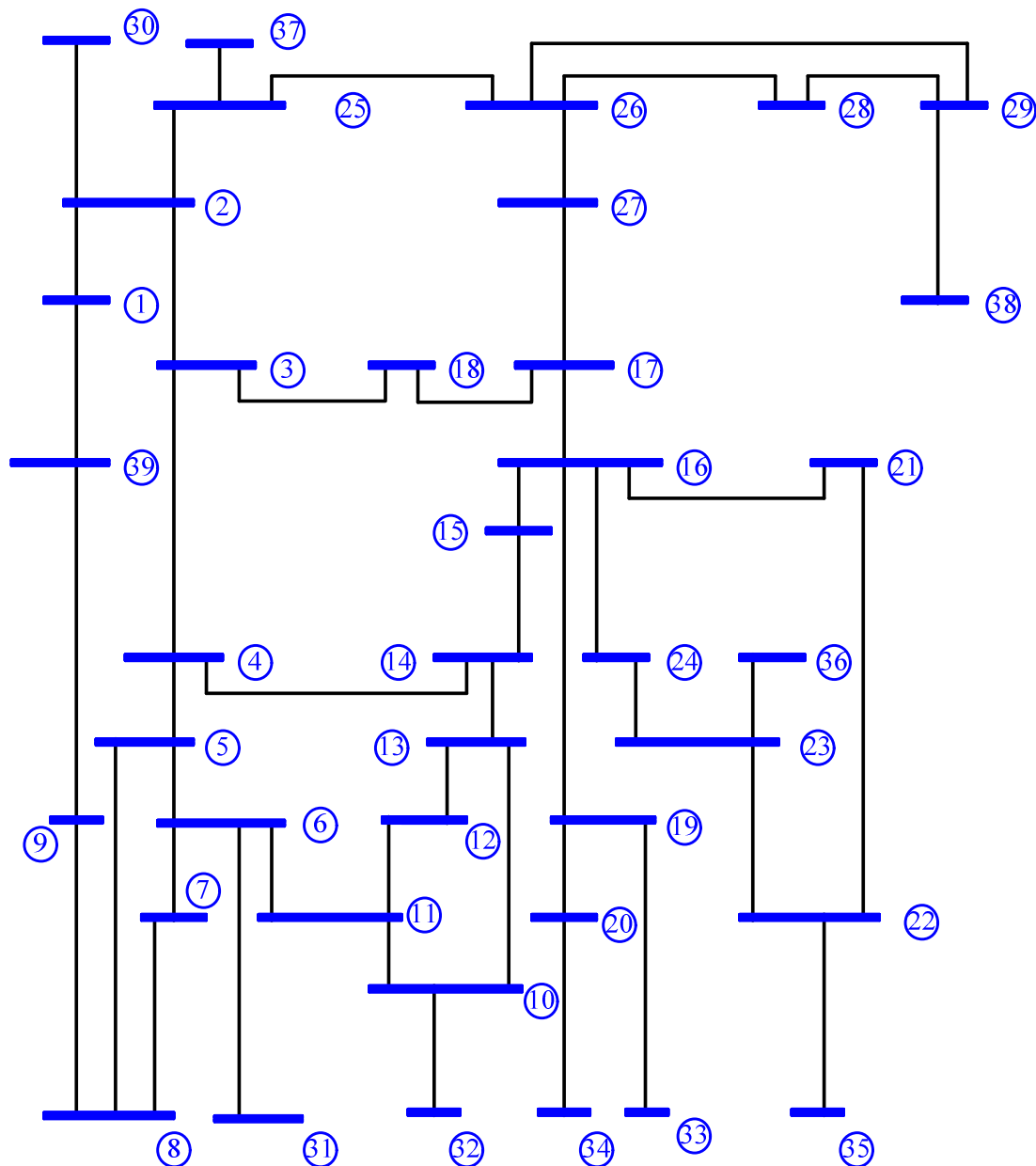
7.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 39 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ IEEE.

7.4.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE αποτελείται από 46 κλάδους και από 12 ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού εμφανίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.25 και το μονογραμμικό του σχέδιο στο Σχήμα 7.13.

Πίνακας 7.25: Στοιχεία δικτύου 39 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 39 ζυγών του IEEE	46	1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 17, 19, 22



Σχήμα 7.13 : Δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

7.4.2 Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο. Στον Πίνακα 7.26, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα

7.26, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.26 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 1 για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

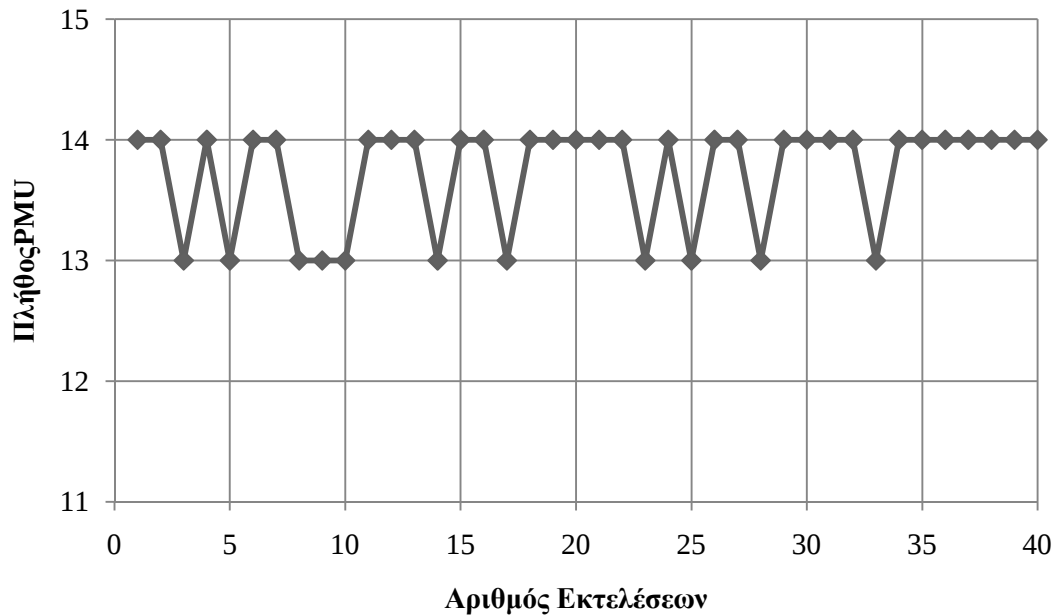
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
20	10	13*	17.5	17.5	0.884
20	5	13*	27.5	27.5	0.886
10	10	13*	7.5	7.5	0.485
10	5	13*	12.5	12.5	0.494
5	5	14	15	0	0.244
5	2	14	7.5	0	0.248

Από το Πίνακα 7.26, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με ? και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 13, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.27 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.27 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, Σενάριο 1, TSI=20, TL=5 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	13
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 9, 10, 11, 14, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 29.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,886
Ποσοστό επιτυχίας	27,5

Στο Σχήμα 7.14 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (13 PMU) βρέθηκε 11 από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{11}{40} * 100\% = 27,5\%$.



Σχήμα 7.14 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 1, TSI=20 και TL=5.

7.4.3 Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.28, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.28, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.28 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 2 για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
20	10	13*	95	95	0,851
20	5	13*	100	100	0,867
10	10	13*	95	95	0,429
10	5	13*	97,5	97,5	0,433
5	5	14	95	0	0,226
5	2	14	100	0	0,228

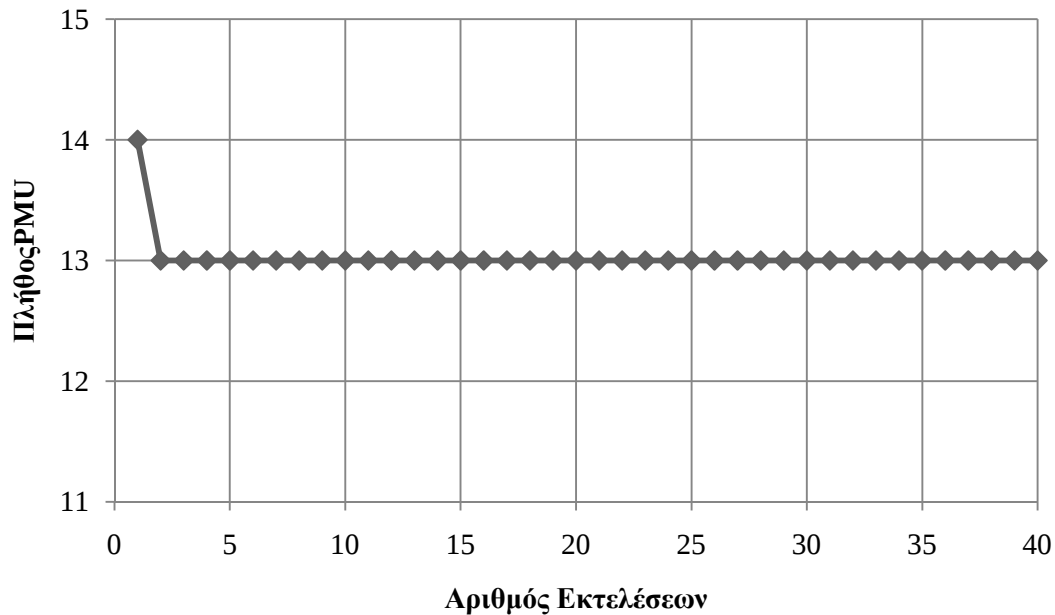
*βέλτιστο πλήθος PMU

Από το Πίνακα 7.28, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 5, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.29 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.29 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, Σενάριο 2, TSI=10, TL=5 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	13
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	2, 6, 9, 10, 11, 14, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 29.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,433
Ποσοστό επιτυχίας	100

Στο Σχήμα 7.15 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (13 PMU) βρέθηκε 39 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{39}{40} * 100\% = 97,5\%$.



Σχήμα 7.15 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 2, TSI=10 και TL=5.

7.4.4 Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.25. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να μην είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.30, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.30, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.30 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 3 για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

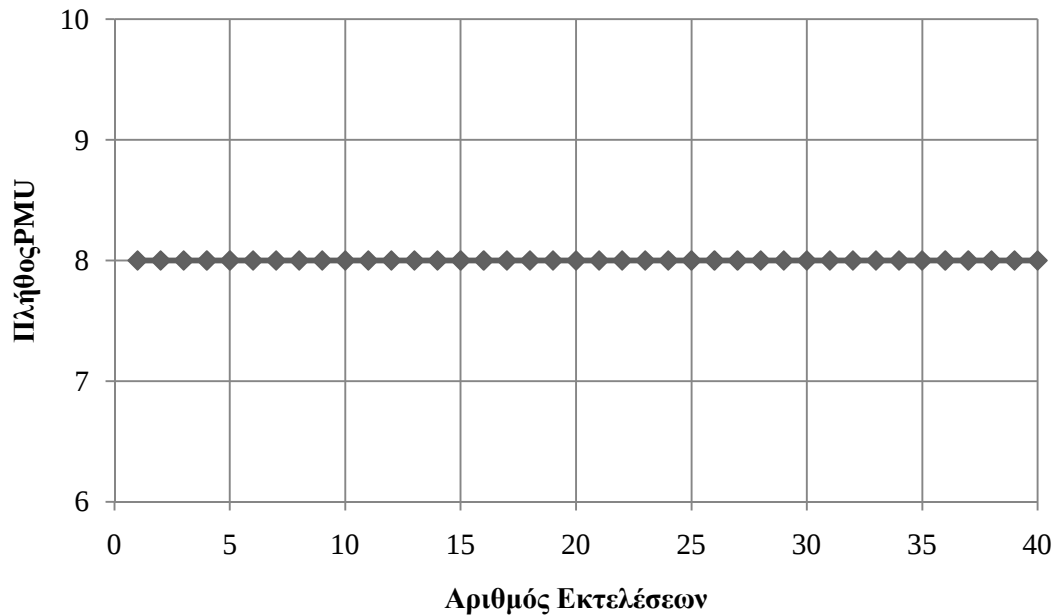
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
20	10	8	100	100	1,756
20	5	8	100	100	1,745
10	10	8	100	100	0,950
10	5	8	100	100	0,983
5	5	8	75	75	0,530
5	2	8	77,5	77,5	0,518

Από το Πίνακα 7.30, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 10, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.31 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.31 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, Σενάριο 3, TSI=10, TL=10 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	8
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (4 διαφορετικές λύσεις με 8 PMU)	3, 8, 12, 16, 20, 23, 25, 29
	3, 8, 13, 16, 20, 23, 25, 29
	3, 8, 10, 16, 20, 23, 25, 29
	3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,950
Ποσοστό επιτυχίας	100

Στο Σχήμα 7.16 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (8 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.16 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 3, TSI=10 και TL=10.

7.4.5 Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.25. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.32, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.32, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.32 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 4 για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

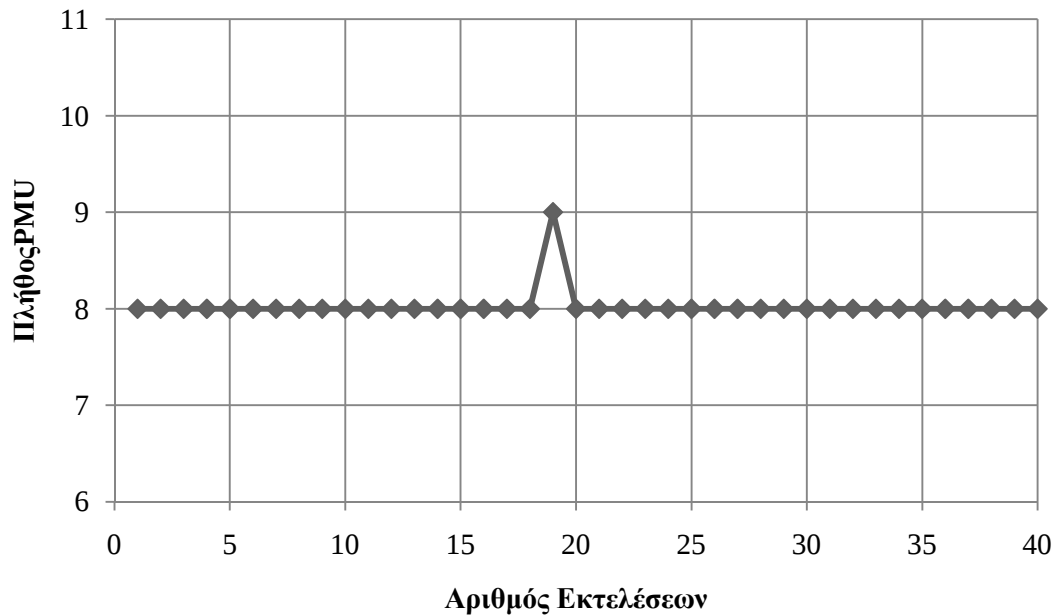
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
20	10	8	97,5	97,5	1,839
20	5	8	55	55	1,857
10	10	8	7,5	7,5	1,051
10	5	8	10	10	1,009
5	5	8	2,5	2,5	0,506
5	2	8	2,5	2,5	0,514

Από το Πίνακα 7.32, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 20 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 10, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.33 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.33 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, Σενάριο 4, TSI=20, TL=10 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	8
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (5 διαφορετικές λύσεις με 8 PMU)	3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29
	3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 34
	3, 8, 12, 16, 20, 23, 25, 34
	3, 8, 10, 16, 20, 23, 25, 34
	3, 8, 10, 16, 20, 23, 25, 29
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	1,839
Ποσοστό επιτυχίας	97,5

Στο Σχήμα 7.17 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (8 PMU) βρέθηκε και 39 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{39}{40} * 100 = 97.5\%$.



Σχήμα 7.17 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 4, TSI=20 και TL=10.

7.4.6 Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.25 και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.34, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.34, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.34 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 5 για το δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
20	10	8*	100	100	1,799
20	5	8*	100	100	1,775
10	10	9	100	100	0,995
10	5	8*	100	100	0,888
5	5	9	100	100	0,531
5	2	9	100	100	0,510

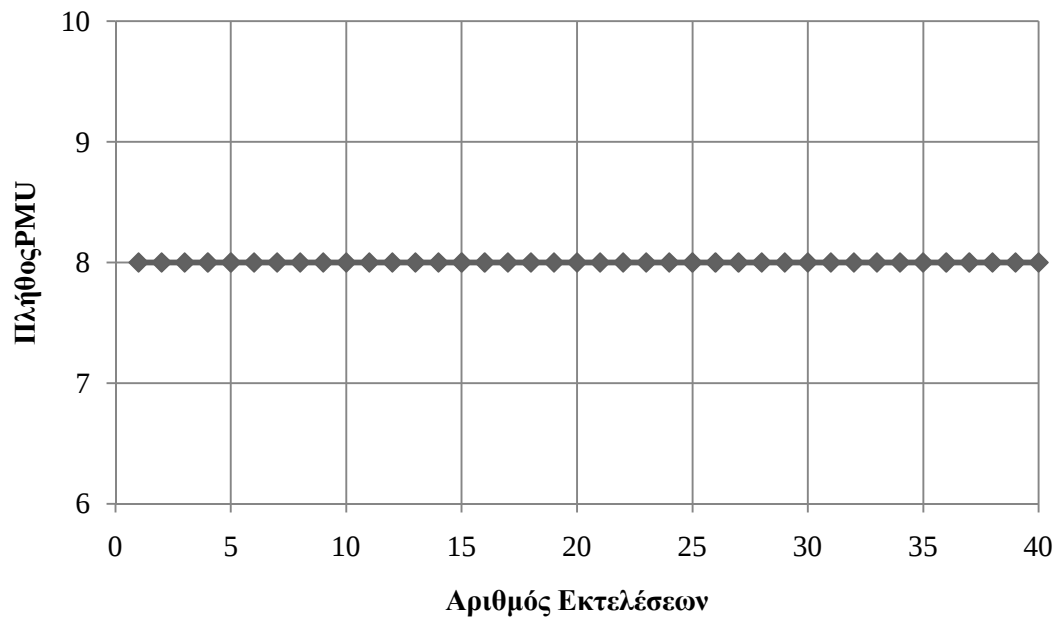
*βέλτιστο πλήθος PMU

Από το Πίνακα 7.34, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 5, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.35 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.35 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, Σενάριο 5, TSI=10, TL=5 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	8
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	3, 8, 11, 16, 20, 23, 25, 29
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	0,888
Ποσοστό επιτυχίας	100

Στο Σχήμα 7.18 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (8 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.18 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 5, TSI=10 και TL=5.

7.4.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.4.2 έως 7.4.6 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.36.

Πίνακας 7.36: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 39 ζυγών του IEEE.

Σενάριο	Περιγραφή	Ελάχιστο πλήθος PMU	Ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου (%)	Μέσος χρόνος εκτέλεσης (sec)
1	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Αρχική λύση με άπληστο αλγόριθμο.	13	27,5	0,836
2	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	13	100	0,447
3	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	8	100	0,950
4	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	8	97,5	1,839
5	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	8	100	0,888

Από τις εκτελέσεις του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU στο δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE με τις διαφορετικές μεθόδους για τη δημιουργία αρχικής λύσης προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση και συμπεριφορά του αλγορίθμου ανάλογα με τις παραμέτρους και την αρχική λύση που του δίνεται. Από τα αποτελέσματα των ενοτήτων 7.4.2 έως 7.4.6 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όταν στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 1 και 2), με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, ο αλγόριθμος TS δίνει μόνο μια λύση για την τοποθέτηση 13 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ενώ και με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS δίνεται μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 13 PMU σε ζυγούς του δικτύου, έτσι ώστε αυτό να είναι παρατηρήσιμο,

με το μέσο χρόνο εκτέλεσης να είναι πιο μικρός και το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου πολύ υψηλό.

- Όταν στο δίκτυο των 39 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 3, 4 και 5), τόσο με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης όσο και με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, δίνεται ότι ο ελάχιστος αριθμός PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα είναι 8. Όταν για την δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, χωρίς να επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εκτέλεση του, ο αλγόριθμος TS δίνει 4 διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 8 PMU, ενώ όταν στον άπληστο αλγόριθμο επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 5 διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 8 PMU. Αντίθετα με την εφαρμογή του επαναληπτικού TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι πιο μικρός, δίνεται μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 8 PMU. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι όταν εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος χωρίς να είναι επιτρεπτή η τοποθέτηση PMU κατά την εκτέλεση του, τα ποσοστά επιτυχίας του αλγορίθμου TS είναι υψηλότερα από όταν εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος με επιτρεπόμενη την τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.

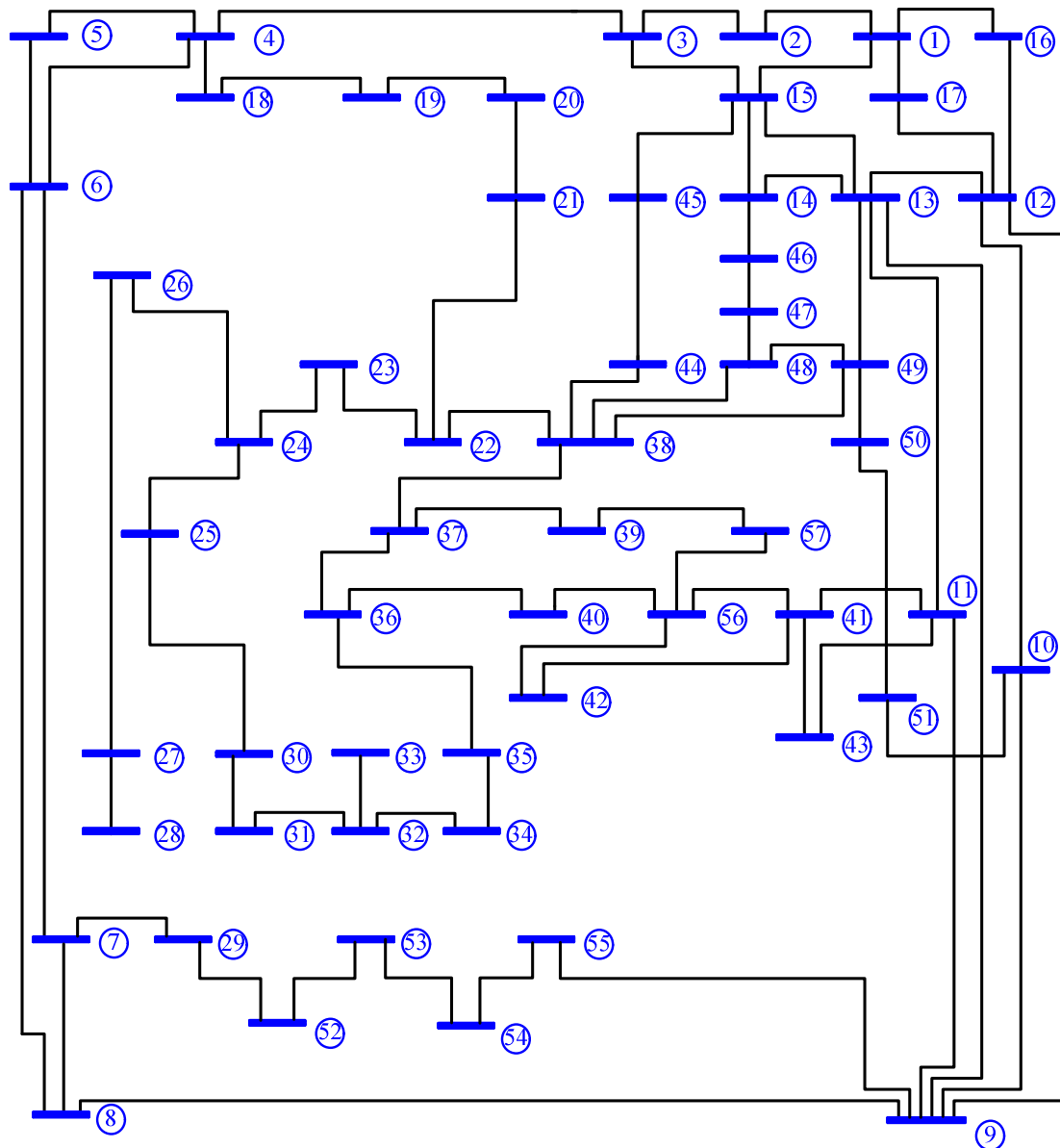
7.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 57 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ IEEE

7.5.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE αποτελείται από 78 κλάδους και από 15 ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού εμφανίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.37 και το μονογραμμικό του σχέδιο στο Σχήμα 7.19.

Πίνακας 7.37: Στοιχεία δικτύου 57 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 57 ζυγών του IEEE	78	4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48.



Σχήμα 7.19 : Δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

7.5.2 Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο. Στον Πίνακα 7.38, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.38, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.38 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 1 για το δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

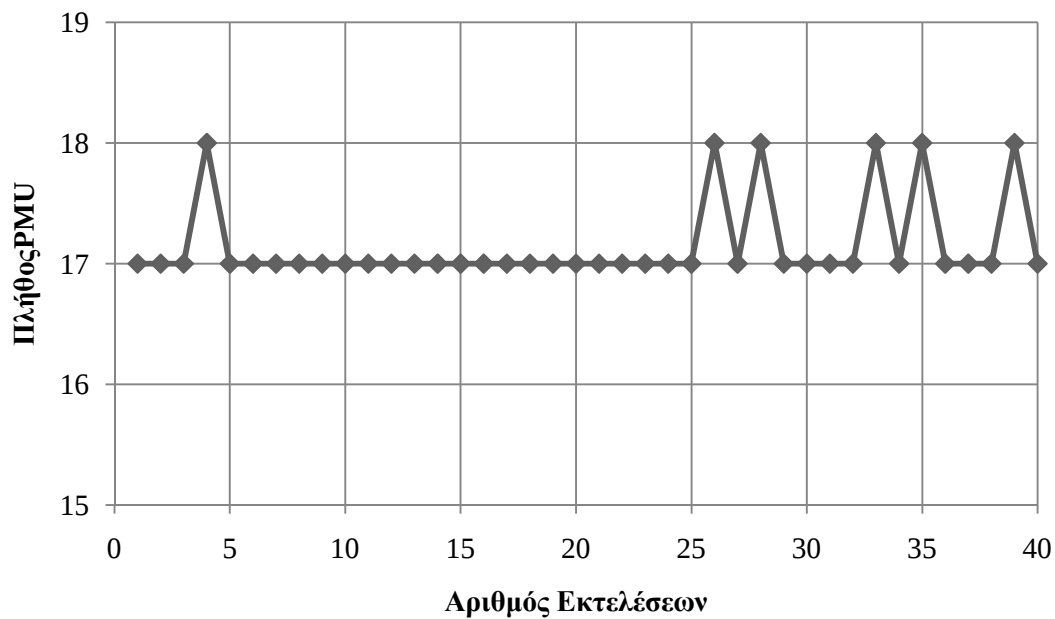
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
100	20	17	77,5	77,5	12,36
100	10	17	70	70	12,30
100	5	17	70	70	12,30
50	20	17	85	85	6,27
50	10	17	80	80	6,30
50	5	17	67,5	67,5	6,73
10	10	17	72,5	72,5	1,39
10	5	17	67,5	67,5	1,38

Από το Πίνακα 7.38, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 50 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 20, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.39 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.39 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, Σενάριο 1, TSI=50, TL=20 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	17
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (33 διαφορετικές λύσεις με 17 PMU)	1, 6, 9, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54.
	1, 6, 9, 15, 18, 21, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 53, 57.
	1, 4, 8, 9, 20, 24, 25, 28, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 51, 53.
	1, 3, 6, 13, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54.
	1, 4, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 54.
	1, 4, 6, 9, 20, 24, 25, 28, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 53.
	1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53.
	1, 6, 9, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 53.
	1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 54.
	1, 4, 9, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 54.
	1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 27, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 54, 57.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 54.
	1, 4, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 53.
	1, 4, 9, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 53.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 54.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 53, 57.
	1, 4, 9, 15, 20, 22, 25, 26, 29, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 54, 57.
	1, 4, 9, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 54, 57.
	1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 27, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57.
	1, 6, 13, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54.
	1, 6, 9, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 53.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 50, 54, 57.
	1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 31, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 53.
	2, 6, 12, 15, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54.
	1, 4, 9, 15, 20, 24, 25, 28, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54.
	1, 4, 6, 9, 15, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 53, 57.
	1, 4, 9, 20, 24, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 54.
	1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 25, 27, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 50, 53.
	1, 4, 9, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 45, 46, 50, 53, 57.
	1, 4, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 54.
	1, 4, 9, 20, 24, 26, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 54.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	6,27
Ποσοστό επιτυχίας	85%

Στο Σχήμα 7.20 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (17 PMU) βρέθηκε 34 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{34}{40} * 100\% = 85\%$.



Σχήμα 7.20 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 1, TSI=50 και TL=20.

7.5.3 Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.40, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.40, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.40 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 2 για το δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

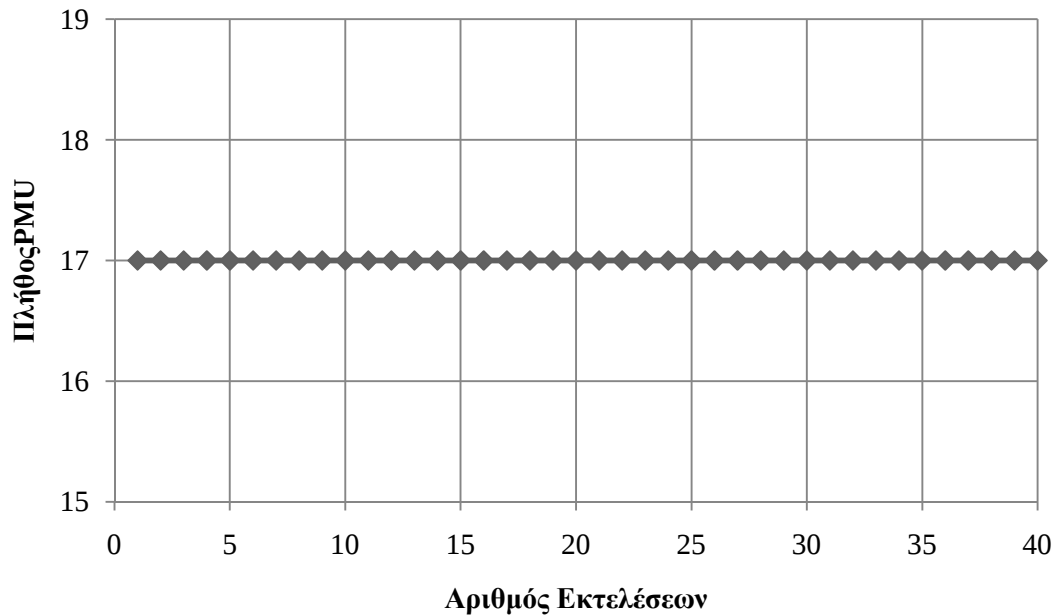
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
100	20	17	92.5	92.5	11.59
100	10	17	100	100	7.03
100	5	17	100	100	12.08
50	20	17	90	90	6.10
50	10	17	95	95	6.06
50	5	17	90	90	6.04
10	10	17	100	100	1.27
10	5	17	100	100	1.27

Από το Πίνακα 7.40, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 0, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.41 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.41 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, Σενάριο 2, TSI=10, TL=0 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	17
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	1, 6, 9, 15, 18, 20, 24, 28, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	1.27
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.21 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (17 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.21 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 2, TSI=10 και TL=0.

7.5.4 Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.37. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να μην είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.42, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.42, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.42 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 3 για το δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

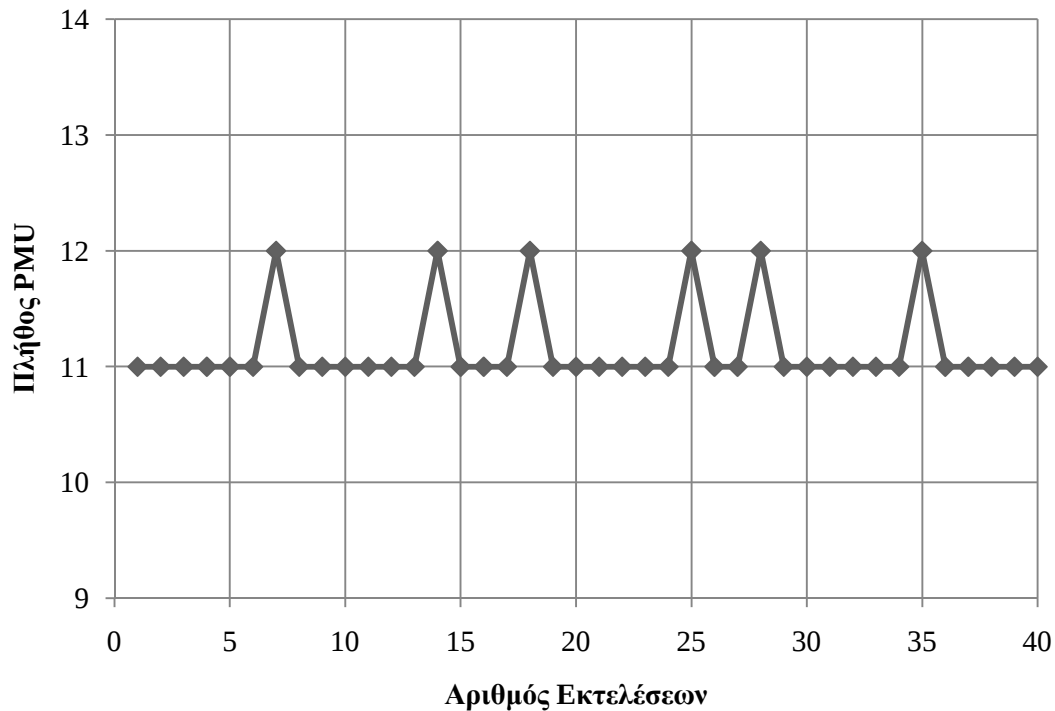
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
100	20	11	85	85	51.43
100	10	11	67.5	67.5	25.87
100	5	11	27.5	27.5	25.19
50	20	11	70	70	13.37
50	10	11	60	60	13.73
50	5	11	37.5	37.5	13.85
10	10	11	27.5	27.5	2.92
10	5	11	27.5	27.5	2.87

Από το Πίνακα 7.42, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 100 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 20, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.43 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.43 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, Σενάριο 3, TSI=100, TL=20 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	11
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (4 διαφορετικές λύσεις με 11 PMU)	1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
	1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56.
	1, 4, 13, 20, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	51.43
Ποσοστό επιτυχίας	85%

Στο Σχήμα 7.22 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (11 PMU) βρέθηκε 34 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{34}{40} * 100\% = 85\%$.



Σχήμα 7.22 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 3, TSI=100 και TL=20.

7.5.5 Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.37. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.44, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.44, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.44 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 4 για το δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

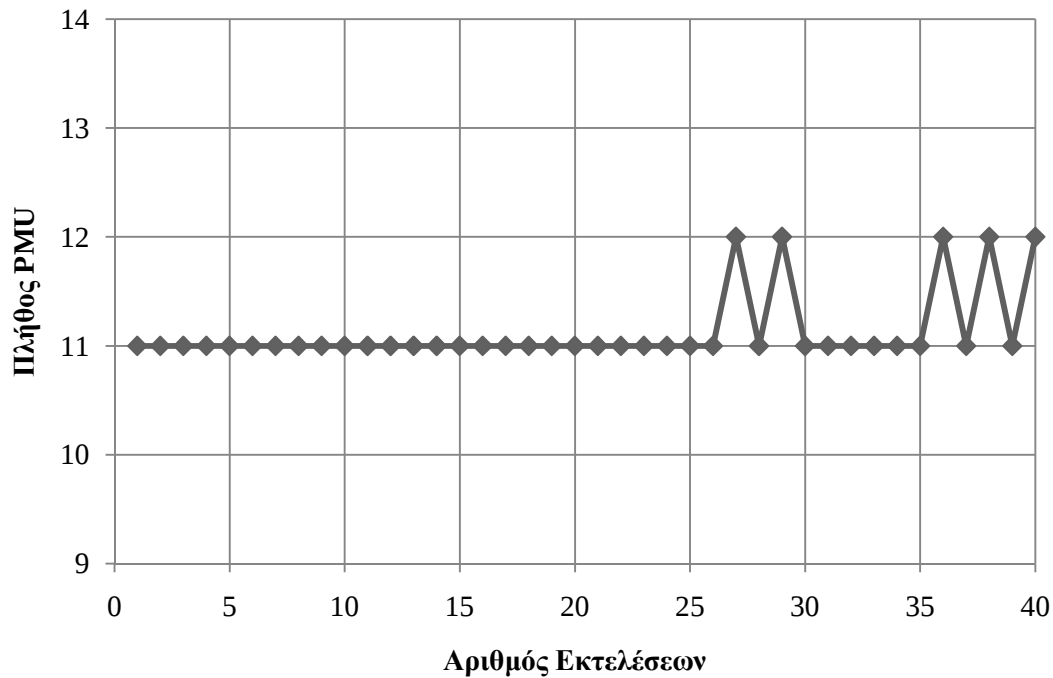
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
100	20	11	87.5	87.5	25.53
100	10	11	72.5	72.5	25.27
100	5	11	32.5	32.5	25.64
50	20	11	77.5	77.5	13.55
50	10	11	67.5	67.5	13.05
50	5	11	37.5	37.5	13.18
10	10	11	32.5	32.5	3.08
10	5	11	20	20	3.05

Από το Πίνακα 7.44, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 100 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 20, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.45 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.45 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, Σενάριο 4, TSI=100, TL=20 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	11
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (4 διαφορετικές λύσεις με 11 PMU)	1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
	1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 51, 54, 56.
	1, 4, 13, 20, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	25,53
Ποσοστό επιτυχίας	87.5%

Στο Σχήμα 7.23 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (11 PMU) βρέθηκε 35 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{35}{40} * 100\% = 87,5\%$.



Σχήμα 7.23 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 4, TSI=100 και TL=20.

7.5.6 Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.37 και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.46, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.46, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.46 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 5 για το δίκτυο 57 ζυγών του IEEE..

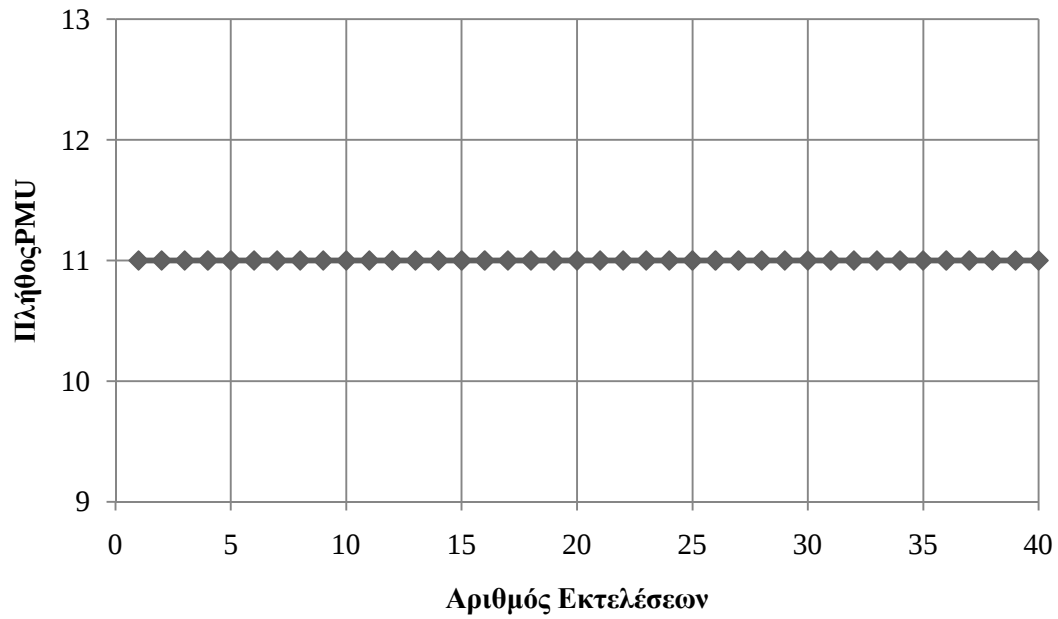
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
100	20	11	97,5	97,5	24,63
100	10	11	100	100	23,92
100	5	11	100	100	25,29
50	20	11	100	100	12,76
50	10	11	100	100	12,73
50	5	12	100	100	13,65
10	10	11	97,5	97,5	2,61
10	5	11	100	100	2,62

Από το Πίνακα 7.46 φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 10 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 5, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.47 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.47 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, Σενάριο 5, TSI=10, TL=5 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	11
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	1, 4, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	2,62
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.24 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (11 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.24 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 5, TSI=10 και TL=5.

7.5.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.5.2 έως 7.5.6 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.48.

Πίνακας 7.48: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 57 ζυγών του IEEE.

Σενάριο	Περιγραφή	Ελάχιστο πλήθος PMU	Ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου (%)	Μέσος χρόνος εκτέλεσης (sec)
1	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Αρχική λύση με άπληστο αλγόριθμο.	17	85	6,27
2	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	17	100	1,27
3	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	11	85	51,43
4	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	11	87,5	25,53
5	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	11	100	2,62

Από τις εκτελέσεις του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU στο δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE με τις διαφορετικές μεθόδους για τη δημιουργία αρχικής λύσης προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση και συμπεριφορά του αλγορίθμου ανάλογα με τις παραμέτρους και την αρχική λύση που του δίνεται. Από τα αποτελέσματα των ενοτήτων 7.5.2 έως 7.5.6 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όταν στο δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 1 και 2), με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, δίνει 33 διαφορετικές λύσεις για την τοποθέτηση 17 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ενώ με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι ελαφρώς μικρότερος, μας δίνει μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 17 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται η παρατηρησιμότητα. Αυτό οφείλεται στο ότι όταν

δίνεται σαν αρχική λύση στον αλγόριθμο μια πολύ καλή λύση, δηλαδή ένα πολύ μικρός αριθμός PMU, τότε «εγκλωβίζεται» εύκολα σε ένα ελάχιστο.

- Όταν στο δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 3, 4 και 5), με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, δίνει 4 διαφορετικές λύσεις για την τοποθέτηση 11 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Όταν κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ο αλγόριθμος TS παρουσιάζει ελαφρώς υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας και σχεδόν το μισό μέσο χρόνο εκτέλεσης από όταν στην εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Αντίθετα με την εφαρμογή του επαναληπτικού TS, η πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου επιτυγχάνεται με 11 PMU αλλά ο αλγόριθμος δίνει μόνο μία λύση για αυτό το πλήθος των PMU.

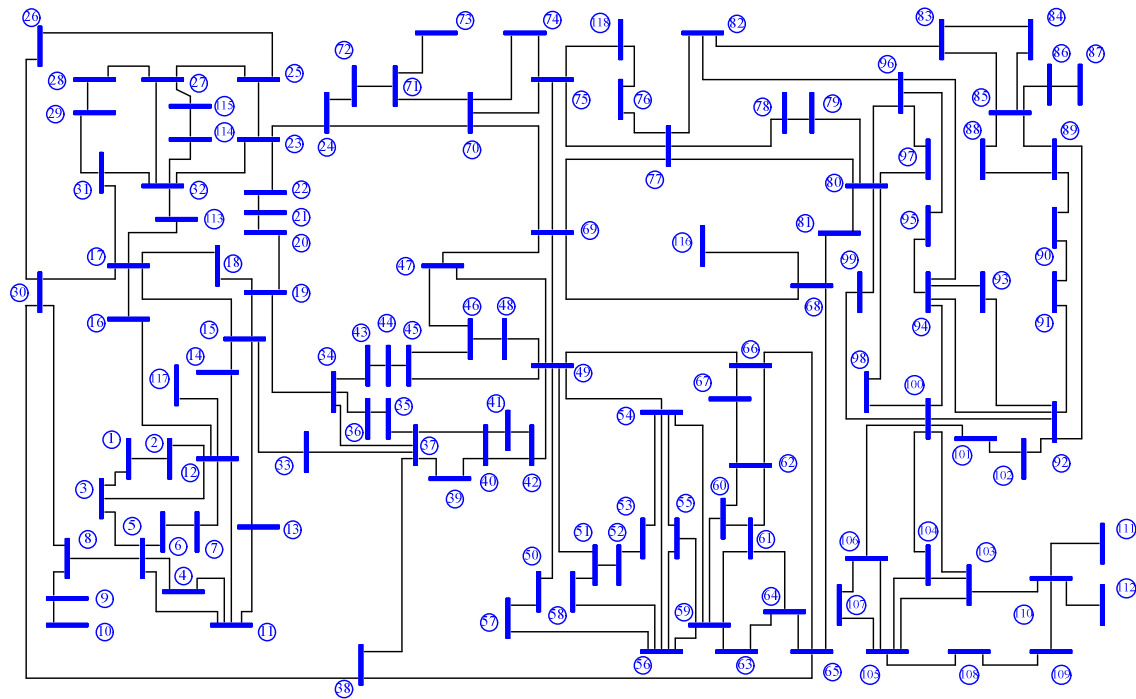
7.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 118 ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ IEEE

7.6.1 Δεδομένα του συστήματος

Το δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE αποτελείται από 179 κλάδους και από 10 ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού εμφανίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7.49 και το μονογραμμικό του σχέδιο στο Σχήμα 7.25.

Πίνακας 7.49: Στοιχεία δικτύου 118 ζυγών του IEEE.

Σύστημα	Αριθμός κλάδων	Μηδενικές εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς
Δίκτυο 118 ζυγών του IEEE	179	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81



Σχήμα 7.25 : Δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

7.6.2 Σενάριο 1: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο. Στον Πίνακα 7.50, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.50, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.50 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 1 για το δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
200	50	32*	7,5	7,5	273,36
200	25	32*	7,5	7,5	262,70
200	10	33	17,5	0	279,02
200	5	33	12,5	0	272,77
100	50	32*	2,5	2,5	138,58
100	25	32*	5	5	144,68
100	10	33	7,5	0	140,95
100	5	33	22,5	0	140,89
50	50	33	20	0	69,41
50	25	32*	5	5	71,01
50	10	33	12,5	0	70,21
50	5	32*	2,5	2,5	71,79

*βέλτιστο πλήθος PMU

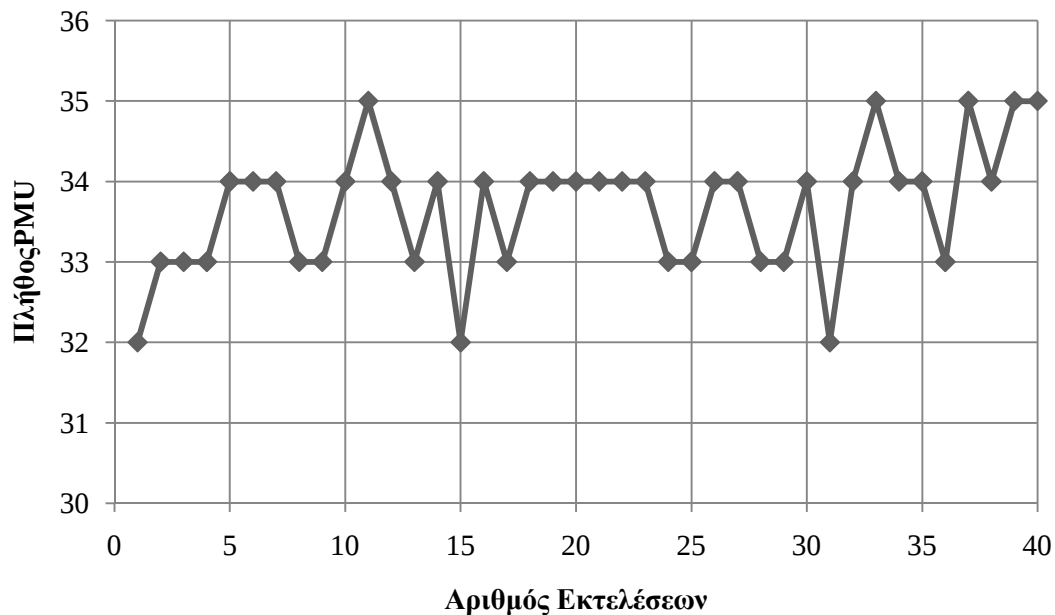
Από το Πίνακα 7.50, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 200 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 25, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.51 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.51 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, Σενάριο 1, TSI=200, TL=25 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	32
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (3 διαφορετικές λύσεις με 32 PMU)	3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110, 114.
	3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110, 114.
	3, 5, 10, 11, 12, 17, 21, 23, 29, 30, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 115.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	262,70
Ποσοστό επιτυχίας	7,5%

Στο Σχήμα 7.26 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (32 PMU) βρέθηκε 3 φορές από τις 40

φορές επιτυχίας του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{3}{40} * 100\% = 7,5\%$.



Σχήμα 7.20 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 1, TSI=200 και TL=25.

7.6.3 Σενάριο 2: Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, στο δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE, κανένας ζυγός του δικτύου δεν είναι μηδενικής έγχυσης ισχύος και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.52, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.52, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.52 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 2 για το δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
200	50	33*	100	100	272,40
200	25	34	100	0	260,85
200	10	34	100	0	265,99
200	5	33*	100	100	258,83
100	50	34	100	0	135,15
100	25	34	100	0	140,18
100	10	33*	92,5	92,5	142,66
100	5	34	100	0	141,79
50	50	34	97,5	0	68,85
50	25	33*	100	100	65,61
50	10	34	100	0	69,70
50	5	33*	72,5	72,5	66,58

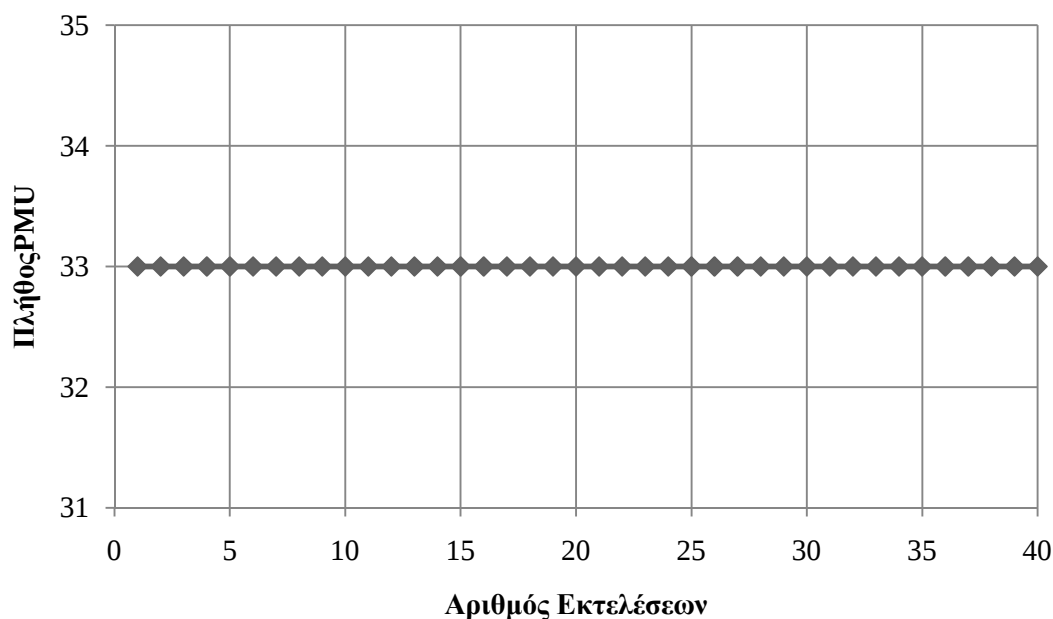
*βέλτιστο πλήθος PMU

Από το Πίνακα 7.52, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 50 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 25, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.53 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.53 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, Σενάριο 2, TSI=50, TL=25 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	33
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 27, 30, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 76, 78, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	65,61
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.27 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (33 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.27 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 2, TSI=50 και TL=25.

7.6.4 Σενάριο 3: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και μη τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 57 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.49. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του να μην είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.54, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.54, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.54 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 3 για το δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
200	50	28*	22,5	22,5	421,76
200	25	28*	17,5	17,5	425,60
200	10	28*	7,5	7,5	424,61
200	5	29	7,5	0	441,26
100	50	28*	20	20	214,13
100	25	28*	10	10	216,84
100	10	28*	5	5	229,82
100	5	29	7,5	0	229,22
50	50	28*	10	10	112,69
50	25	28*	10	10	113,91
50	10	28*	7,5	7,5	116,89
50	5	28*	2,5	2,5	122,18

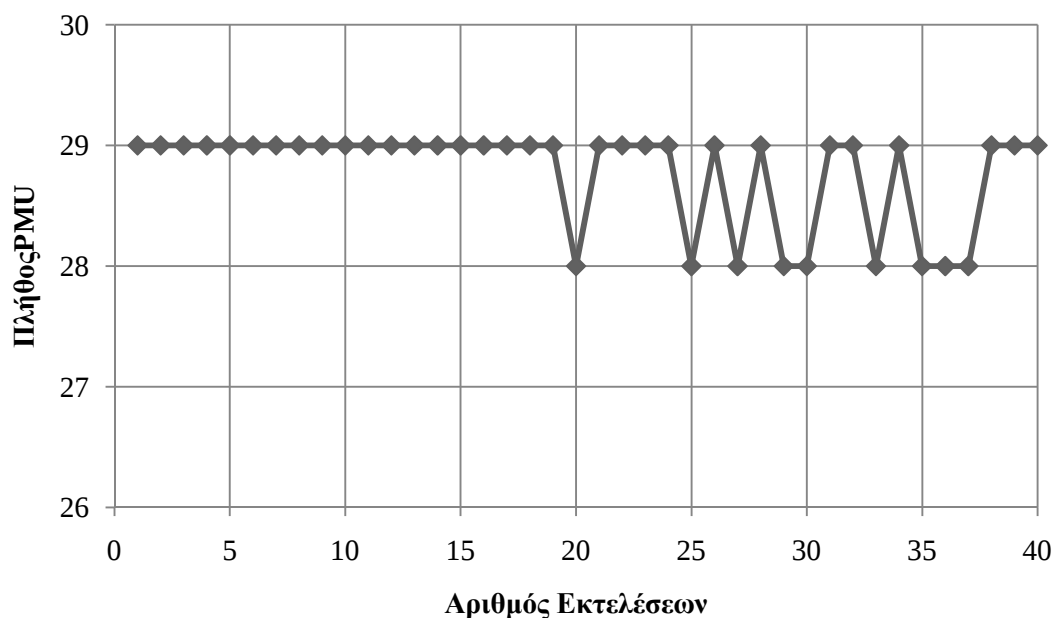
*βέλτιστο πλήθος PMU

Από το Πίνακα 7.54 φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 200 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 50, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.55 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.55 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, Σενάριο 3, TSI=200, TL=50 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	28
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (6 διαφορετικές λύσεις με 28 PMU)	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 17, 20, 23, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 23, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	421,76
Ποσοστό επιτυχίας	22,5%

Στο Σχήμα 7.27 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (28 PMU) βρέθηκε 9 φορές από τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{9}{40} * 100\% = 22,5\%$.



Σχήμα 7.27 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 3, TSI=200 και TL=50.

7.6.5 Σενάριο 4: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος και δυνατή τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για τη δημιουργία αρχικής λύσης

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.49. Για τη δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, με την τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εκτέλεση του να είναι επιτρεπτή. Στον Πίνακα 7.56, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.56, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.56 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 4 για το δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
200	50	28	15	15	422,08
200	25	28	20	20	421,81
200	10	28	17,5	17,5	424,92
200	5	28	5	5	436,28
100	50	28	17,5	17,5	210,38
100	25	28	12,5	12,5	214,47
100	10	28	7,5	7,5	231,33
100	5	28	2,5	2,5	240,86
50	50	28	5	5	115,92
50	25	28	12,5	12,5	111,72
50	10	28	10	10	114,11
50	5	28	2,5	2,5	113,25

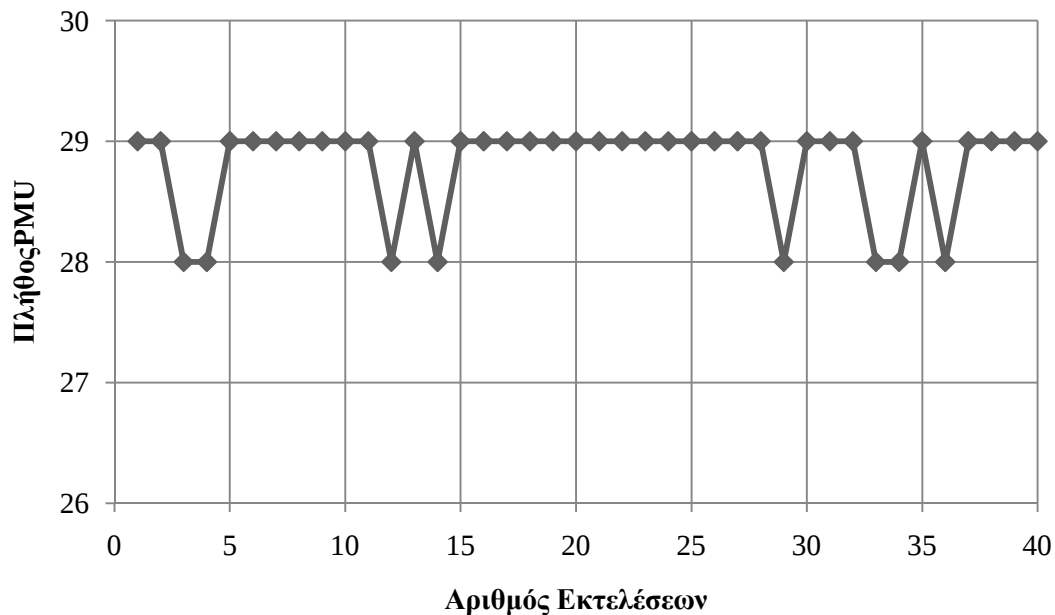
Από το Πίνακα 7.56, φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 200 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 25, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.57 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.57 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, Σενάριο 4, TSI=200, TL=25 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	28
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς : (4 διαφορετικές λύσεις με 28 PMU)	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 23, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110, 115.
	3, 8, 11, 12, 17, 21, 27, 31, 32, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110.
	3, 8, 11, 12, 19, 22, 27, 31, 32, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	421,81
Ποσοστό επιτυχίας	20%

Στο Σχήμα 7.29 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (28 PMU) βρέθηκε 8 φορές από τις 40

φορές επιτυχίας του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου είναι $\frac{8}{40} * 100\% = 20\%$.



Σχήμα 7.29 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 4, TSI=200 και TL=25.

7.6.6 Σενάριο 5: Δίκτυο με ζυγούς μηδενική έγχυσης ισχύος με εφαρμογή επαναληπτικού TS

Στην περίπτωση αυτή, το δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE περιλαμβάνει τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του Πίνακα 7.49 και εφαρμόζεται ο επαναληπτικός TS. Στον Πίνακα 7.58, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του TS, απεικονίζεται ο ελάχιστος αριθμός PMU που απαιτείται για να είναι πλήρως παρατηρήσιμο το δίκτυο, το ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου, δηλαδή το ποσοστό εύρεσης της βέλτιστης λύσης επί του συνολικού αριθμού των εκτελέσεων και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Οι παράμετροι του αλγορίθμου TS είναι ο αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου (TSI) και το μήκος λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων (TL). Για τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.58, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε 40 φορές για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που παρουσιάζονται.

Πίνακας 7.58 : Εύρεση βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου TS για Σενάριο 5 για το δίκτυο 118 ζυγών του IEEE..

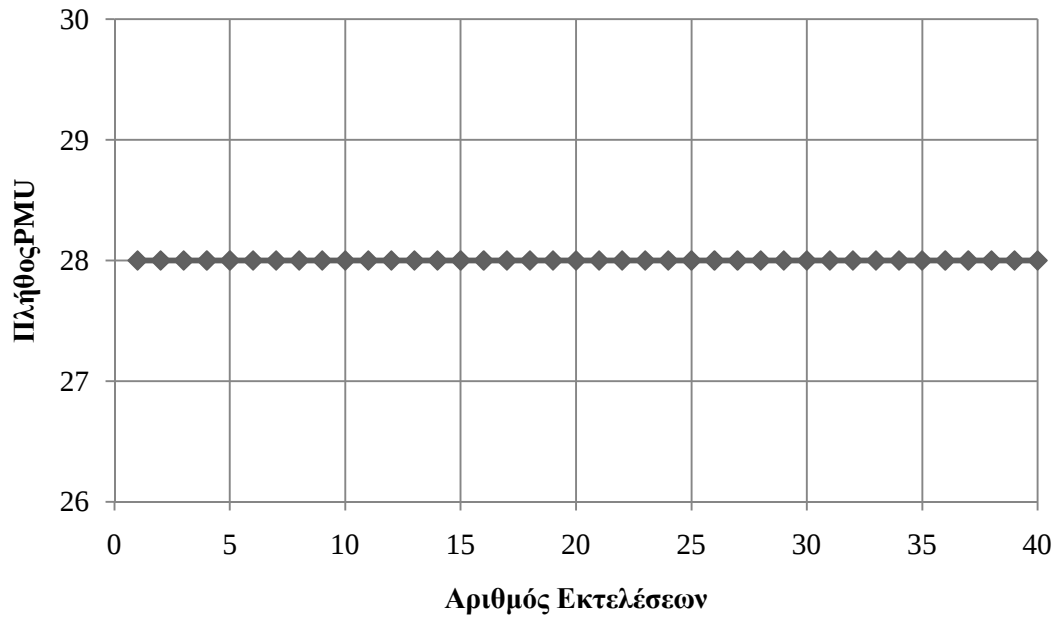
Παράμετροι του αλγορίθμου TS		Αποτελέσματα 40 εκτελέσεων του αλγορίθμου			
Αριθμός επαναλήψεων (TSI)	Μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων (TL)	Ελάχιστος αριθμός PMU	Ποσοστό εύρεσης εκάστοτε ελαχίστου αριθμού PMU(%)	Ποσοστό επιτυχούς εύρεσης βέλτιστης λύσης (%)	Μέσος χρόνος ανά εκτέλεση (sec)
200	50	28*	100	100	404,77
200	25	29	100	0	414,22
200	10	28*	100	100	408,60
200	5	30	100	0	436,29
100	50	29	100	0	215,43
100	25	29	100	0	214,39
100	10	29	82,5	0	219,11
100	5	30	90	0	229,70
50	50	29	100	0	109,23
50	25	29	100	0	108,16
50	10	29	100	0	108,78
50	5	29	100	0	109,05

Από το Πίνακα 7.58 φαίνεται για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 200 και για μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων ίσο με 50, ο αλγόριθμος TS έχει την μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, στον Πίνακα 7.59 καταγράφονται όλα τα διαφορετικά τελικά αποτελέσματα που δίνει ο αλγόριθμος για τον ελάχιστο αριθμό PMU.

Πίνακας 7.59 : Αποτελέσματα προσομοίωσης για δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, Σενάριο 5, TSI=200, TL=50 και 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS.

Ελάχιστο πλήθος PMU	28
Τοποθέτηση PMU στους ζυγούς :	3, 8, 11, 12, 19, 22, 27, 31, 32, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110.
Μέσος χρόνος εκτέλεσης (s)	404,77
Ποσοστό επιτυχίας	100%

Στο Σχήμα 7.30 απεικονίζεται ο αριθμός των PMU που βρέθηκαν σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου και φαίνεται ότι η βέλτιστη λύση (28 PMU) βρέθηκε και τις 40 φορές εκτέλεσης του αλγορίθμου, άρα το ποσοστό εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι 100%.



Σχήμα 7.30 : Ελάχιστος αριθμός PMU σε κάθε μία από τις 40 εκτελέσεις του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE, για Σενάριο 5, TSI=200 και TL=50.

7.6.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.6.2 έως 7.6.6 συνοψίζονται στον Πίνακα 7.60.

Πίνακας 7.60: Αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου TS στο δίκτυο 118 ζυγών του IEEE.

Σενάριο	Περιγραφή	Ελάχιστο πλήθος PMU	Ποσοστό επιτυχίας του αλγορίθμου (%)	Μέσος χρόνος εκτέλεσης (sec)
1	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Αρχική λύση με άπληστο αλγόριθμο.	32	7,5	262,70
2	- Δίκτυο χωρίς ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	33	100	65,61
3	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης δεν επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	28	22,5	421,76
4	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Κατά την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για δημιουργία αρχικής λύσης επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης.	28	20	421,81
5	- Δίκτυο με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. - Επαναληπτικός TS.	28	100	404,77

Από τις εκτελέσεις του αλγορίθμου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU στο δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE με τις διαφορετικές μεθόδους για τη δημιουργία αρχικής λύσης προκύπτουν αρκετά χρήσιμα συμπεράσματα για την απόδοση και συμπεριφορά του αλγορίθμου ανάλογα με τις παραμέτρους και την αρχική λύση που του δίνεται. Από τα αποτελέσματα των ενοτήτων 7.6.2 έως 7.6.6 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Όταν στο δίκτυο των 118 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 1 και 2), με την εφαρμογή του άπληστου αλγόριθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 3 διαφορετικές λύσεις για την τοποθέτηση 32 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Ενώ με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι μικρότερος και το ποσοστό επιτυχίας στο 100%, δίνει μόνο μία λύση

για την τοποθέτηση 33 PMU σε ζυγούς του δικτύου, ώστε να επιτυγχάνεται η παρατηρησιμότητα. Παρατηρείται ότι ο επαναληπτικός TS είναι λιγότερο αποδοτικός από τον αλγόριθμο TS, όπου η αρχική λύση δίνεται από τον άπληστο αλγόριθμο, αφού δίνει λύση με ένα παραπάνω PMU σε σχέση .

- Όταν στο δίκτυο των 30 ζυγών του IEEE, θεωρείται ότι υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης (Σενάριο 3, 4 και 5), τόσο με την εφαρμογή του άπληστου αλγορίθμου για την δημιουργία αρχικής λύσης όσο και με τον επαναληπτικό αλγόριθμο TS, δίνεται ότι ο ελάχιστος αριθμός PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα είναι 28. Όταν για την δημιουργία αρχικής λύσης εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος, χωρίς να επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος κατά την εκτέλεση του, ο αλγόριθμος TS δίνει 6 διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 28 PMU, ενώ όταν στον άπληστο αλγόριθμο επιτρέπεται η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης, ο αλγόριθμος TS δίνει 4 διαφορετικές λύσεις με τοποθέτηση 28 PMU. Αντίθετα με την εφαρμογή του επαναληπτικού TS, αν και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης είναι πιο μικρός, δίνεται μόνο μία λύση για την τοποθέτηση 28 PMU. Εν κατακλείδι, μπορεί να παρατηρηθεί ότι όταν εφαρμόζεται ο άπληστος αλγόριθμος χωρίς να είναι επιτρεπτή η τοποθέτηση PMU κατά την εκτέλεση του, ο αλγόριθμος είναι αποδοτικότερος, αφού δίνει τις περισσότερες διαφορετικές λύσεις και παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό επιτυχίας.

7.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στον Πίνακα 7.62 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 7.2 έως 7.6 με τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία για τα αντίστοιχα δίκτυα. Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι η εργασία αυτή βρίσκει το ελάχιστο πλήθος PMU, ενώ κάποιες άλλες εργασίες της βιβλιογραφίας βρίσκουν είτε το ίδιο ελάχιστο πλήθος PMU είτε μεγαλύτερο πλήθος PMU. Στον Πίνακα 7.61 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τα αποτελέσματα της εργασίας [7.17], εξέλιξη της οποίας αποτελεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.61, η παρούσα διπλωματική εργασία δίνει καλύτερες λύσεις σε σχέση με την [7.17], σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 7.61: Σύγκριση αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα αποτελέσματα της εργασίας [7.17].

Δίκτυο IEEE	Ζυγοί μηδενικής έγχυσης	Μέθοδος παρούσας διπλωματικής		Εργασία [7.17]	
		Αριθμός ζυγών μηδενικής έγχυσης	Ελάχιστα PMU	Αριθμός ζυγών μηδενικής έγχυσης	Ελάχιστα PMU
14 ζυγοί	OXI	-	4	-	-
	NAI	1	3	1	3
30 ζυγοί	OXI	-	10	-	-
	NAI	5	7	-	-
39 ζυγοί	OXI	-	13	-	-
	NAI	12	8	-	10
57 ζυγοί	OXI	-	17	-	-
	NAI	15	11	15	13
118 ζυγοί	OXI	-	32	-	-
	NAI	10	28	-	-

7.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [7.1] B. Xu, and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," in *2004 IEEE/PES Power Systems Conf.*, pp. 943 - 946.
- [7.2] R. Sodhi, S.C. Srivastava, and S.N. Singh, "Optimal PMU placement to ensure system observability under contingencies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no.2, pp. 1-6, Oct. 2009.
- [7.3] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Contingency-constrained PMU placement in power networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no.1, pp. 516–523, Feb. 2010.
- [7.4] B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, Aug. 2008.
- [7.5] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, Sep. 2008.
- [7.6] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, "Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, Oct. 2008.
- [7.7] R. Sodhi, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 80, no. 9, pp. 1154–1159, Sep. 2010.
- [7.8] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no.2, pp. 806–813, May 2009.
- [7.9] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, 2009.
- [7.10] M. Korkali and A. Abur, "Impact of network sparsity on strategic placement of phasor measurement units with fixed channel capacity," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Syst. (ISCAS)*, 2010, pp. 3445–3448.
- [7.11] R. Kavasseri and S. K. Srinivasan, "Joint optimal placement of PMU and conventional measurements in power systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Syst. (ISCAS)*, 2010, pp. 3449–3452.
- [7.12] S. Chakrabarti, D. Eliades, E. Kyriakides, and M. Albu, "Measurement Uncertainty Considerations in Optimal Sensor Deployment for State Estimation," in *Proc. IEEE Int. Symposium Intelligent Signal Processing*, 2007.
- [7.13] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, and D. G. Eliades, "Placement of synchronized measurements for power system observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 12–19, Jan. 2009.
- [7.14] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no.3, pp. 1433–1440, Aug. 2008.
- [7.15] B. Milosevic and M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, Feb. 2003.
- [7.16] X. Bian, and J. Qiu, "Adaptive clonal algorithm and its application for optimal PMU placement," in *Proc. Communications, Circuits and Syst. Int. Conf.*, 2006, pp. 2102–

- 2106.
- [7.17] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 223–231, May 2006.
 - [7.18] K.-S. Cho, J.-R. Shin, and S. Ho Hyun, "Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, 2001, pp. 258–262.
 - [7.19] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.
 - [7.20] H.-S. Zhao, Y. Li, Z.-Q. Mi, and L. Yu, "Sensitivity constrained PMU placement for complete observability of power systems," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf. Exhibition*, 2005.
 - [7.21] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and B. Mozafari, "Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 28–34, Jan. 2011.
 - [7.22] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, and M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 7263–7269, 2011.
 - [7.23] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1014–1020, Jul. 2009.
 - [7.24] M. Hurtgen and J.-C. Maun, "Optimal PMU placement using iterated local search," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 857–860, Oct. 2010.
 - [7.25] G. B. Denegri, M. Invernizzi, and F. Milano, "A security oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Systems Technology*, 2002, pp. 798–803.
 - [7.26] M. Zhou, V. A. Centeno, A. G. Phadke, Y. Hu, D. Novosel, and H. A. R. Volskis, "A preprocessing method for effective PMU placement studies," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electric Utility Deregulation Restructuring Power Technologies*, 2008, pp. 2862–2867.
 - [7.27] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," *PSERC Publication 05-20*, Oct. 2005.
 - [7.28] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: particle swarm optimization approach," in *2007 Int. Conf. on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, pp. 1-6.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Στη παρούσα διπλωματική μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (Phasor Measurement Unit – PMU), όπου σκοπός είναι η εγκατάσταση ενός ελαχίστου αριθμού PMU, έτσι ώστε ένα δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο, δηλαδή η τάση και η γωνία της σε όλους του ζυγούς του συστήματος να είναι γνωστή. Ο μετα-ευριστικός αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες καταστάσεις (Tabu Search – TS) εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος αυτού.

Τα τελευταία χρόνια τα PMUs χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τον έλεγχο και την εποπτεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που μπορούν να παρέχουν τα PMUs, όπως οι πραγματικού χρόνου συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών (τάσης, ρεύματος, ισχύος κτλ.) σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα SCADA. Εξαιτίας του μεγάλου κόστους των PMUs, καθώς και των τηλεπικοινωνιακών υποδομών που απαιτούνται να το συνοδεύουν, η εύρεση του ελαχίστου αριθμού PMU με τον οποίο ένα δίκτυο μπορεί να γίνει παρατηρήσιμο έχει γίνει επιτακτική ανάγκη στη σημερινή εποχή.

Στη συνέχεια αναλύεται μια τοπολογική μέθοδος για την εκτίμηση της κατάστασης της παρατηρησιμότητας δικτύων. Προτιμήθηκε μια τοπολογική μέθοδος παρατηρησιμότητας έναντι μια αριθμητικής μεθόδου, που θα ήταν υπολογιστικά πιο ακριβή και πιο δύσκολη στην υλοποίησή της. Η τοπολογική μέθοδος παρατηρησιμότητας δικτύου βασίζεται σε τέσσερις κανόνες παρατηρησιμότητας:

- Πρώτος κανόνας: Αν σε μια γραμμή είναι γνωστή η τάση και η γωνία της στον ένα ζυγό (αναχώρησης ή άφιξης), καθώς και το ρεύμα της γραμμής, τότε η τάση στο άλλο άκρο της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί.
- Δεύτερος κανόνας: αν στα άκρα μιας γραμμής και οι δύο τάσεις των ζυγών είναι γνωστές, τότε το ρεύμα της γραμμής μπορεί να υπολογιστεί.
- Τρίτος κανόνας: Αν σε ένα ζυγό μηδενικής έγχυσης είναι γνωστά όλα τα ρεύματα των συνδεδεμένων γραμμών εκτός από ένα, τότε το ρεύμα της γραμμής που είναι άγνωστο, καθώς και ο ζυγός στο άλλο άκρο της μπορούν να υπολογιστούν, μέσω του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff.
- Τέταρτος κανόνας: Αν οι τάσεις όλων των γειτονικών ζυγών ενός ζυγού μηδενικής έγχυσης είναι γνωστές τότε η τάση του ζυγού μηδενικής έγχυσης μπορεί να υπολογιστεί, μέσω του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff.

Στην εργασία γίνεται μια σύντομη ανάλυση του μετά-ευριστικού αλγορίθμου TS. Σύμφωνα με τον TS, ανάμεσα στις γειτονικές καταστάσεις μιας κατάστασης S σε κάθε βήμα επιλέγεται η καλύτερη S', ακόμα και αν αυτή αξιολογείται χειρότερη από την κατάσταση S.

Παράλληλα υπάρχει στη μνήμη μια λίστα με απαγορευμένες καταστάσεις τις οποίες ο αλγόριθμος TS έχει επισκεφθεί, που ονομάζεται λίστα απαγορευμένων καταστάσεων. Η λίστα αυτή λαμβάνεται υπό όψιν στην επιλογή της επόμενης κατάστασης, αφού ποτέ δεν επιλέγεται μια κατάσταση που είναι μέλος αυτής της λίστας. Η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων έχει συγκεκριμένο μέγεθος. Έτσι από κάποιο σημείο και μετά η εισαγωγή νέων καταστάσεων στη λίστα απαγορευμένων καταστάσεων έχει ως αποτέλεσμα τη διαγραφή κάποιων άλλων.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, ο αλγόριθμος TS υλοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης PMU. Αρχικά, ήταν η επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας αρχικής λύσης του προβλήματος. Για αυτό το σκοπό επιλέχθηκε ο άπληστος αλγόριθμος και υλοποιήθηκε με δυο παραλλαγές. Στον άπληστο αλγόριθμο σε κάθε βήμα τοποθετείται ένα PMU στο ζυγό με τους περισσότερους γειτονικούς μη παρατηρήσιμους ζυγούς μέχρι ολόκληρο το δίκτυο να γίνει παρατηρήσιμο. Στην πρώτη παραλλαγή η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης δεν επιτρέπεται, ενώ στη δεύτερη παραλλαγή επιτρέπεται. Με βάση την αρχική λύση ο αλγόριθμος TS δημιουργεί μια λίστα υποψήφιων λύσεων, που τις αξιολογεί με τη συνάρτηση κόστους που ορίστηκε και σε κάθε βήμα επιλέγει την καλύτερη και ενημερώνει τη λίστα των απαγορευμένων καταστάσεων. Η λίστα απαγορευμένων καταστάσεων αποτρέπει την παγίδευση της αναζήτησης σε ένα τοπικό ελάχιστο και το κριτήριο έμπνευσης που εισάγεται βοηθά στο να μην απορριφθούν κάποιες βέλτιστες λύσεις λόγω της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων. Επιπρόσθετα, ως μια παραλλαγή του TS, υλοποιήθηκε ο επαναληπτικός TS, όπου σε περίπτωση πολλαπλών εκτελέσεων του αλγορίθμου TS, η τελική λύση του αλγορίθμου συγκρίνεται με την αρχική της προηγούμενης εκτέλεσης και σε περίπτωση που είναι καλύτερη ορίζεται σαν αρχική λύση της επόμενης λύσης.

Όλα τα προηγούμενα υλοποιήθηκαν με το πρόγραμμα MATLAB και έγιναν προσομοιώσεις για τα δίκτυα 14, 40, 39, 57 και 118 ζυγών του IEEE για όλες τις παραλλαγές του αλγορίθμου TS. Για κάθε δίκτυο έγιναν πολλαπλές εκτελέσεις του αλγορίθμου για διαφορετικό αριθμό επαναλήψεων του TS και διαφορετικό μήκος λίστας απαγορευμένων καταστάσεων, ώστε να δειχθεί η συμπεριφορά του αλγορίθμου. Επειδή η βέλτιστη τοποθέτηση PMU είναι ένα πρόβλημα NP κλάσης, η εύρεση της βέλτιστης λύσης δεν είναι σίγουρη, για αυτό το λόγο απαιτείται η εκτέλεσή του αρκετές φορές. Η εξαγωγή του συνόλου των αποτελεσμάτων σε αρχείο excel δίνει τη δυνατότητα σε κάποιον να προβεί σε επιπλέον στατιστική και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Με βάση τα αποτελέσματα, η καλύτερη απόδοση του αλγορίθμου TS επιτυγχάνεται με την επιλογή του άπληστου αλγορίθμου χωρίς να είναι απαγορευμένη η τοποθέτηση PMU σε ζυγούς μηδενικής έγχυσης κατά την εκτέλεση του. Η εκδοχή αυτή, αν και είναι πιο αργή, δίνει πάντα τη βέλτιστη λύση και τις περισσότερες διαφορετικές τοποθετήσεις PMU για τον ελάχιστο αριθμό PMU. Παρατηρείται επίσης ότι τα ποσοστά επιτυχίας αυξάνονται όσο αυξάνεται ο αριθμός επαναλήψεων του TS αλλά επηρεάζονται περισσότερο από το μήκος της λίστας των απαγορευμένων καταστάσεων. Γενικά δεν μπορεί να ειπωθεί ότι υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος κανόνας για την επιλογή του αριθμού των επαναλήψεων και του μήκους της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων, αλλά αυτό που φαίνεται από τα αποτελέσματα είναι ότι ο αριθμός των επαναλήψεων πρέπει να αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του δικτύου και το μήκος της λίστας απαγορευμένων καταστάσεων να αυξάνεται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του δικτύου, π.χ. αριθμός ζυγών μηδενικής έγχυσης, πλήθος συνδέσεων κτλ. Σε κάθε περίπτωση, όμως, ο ασφαλέστερος τρόπος εύρεσης των κατάλληλων παραμέτρων

του TS για την εύρεση βέλτιστης λύσης είναι οι πολλαπλές εκτελέσεις για διαφορετικούς συνδυασμούς των δύο παραμέτρων του αλγορίθμου.

Τέλος, τα αποτελέσματα της μεθόδου TS για τη βέλτιστη τοποθέτηση PMU συγκρίνονται με άλλες έγκυρες μεθόδους που βρέθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία και συμπεραίνεται ότι η μέθοδος καταλήγει στα βέλτιστα αποτελέσματα. Αυτό επαληθεύει στο έπακρο την αποτελεσματικότητα και την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου TS στην επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU.

8.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Για την εξέλιξη και τον εμπλουτισμό αυτής της διπλωματικής εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες επεκτάσεις:

- Εφαρμογή των βασικών αρχών της μεθόδου TS για διαφορετικά θέματα τοποθέτησης εξοπλισμού σε συστήματα μεταφοράς ενέργειας.
- Διερεύνηση αποδοτικότητας του αλγορίθμου για την τοποθέτηση PMU σε δίκτυα διανομής.
- Διεξαγωγή περισσότερης έρευνας πάνω στα πλεονεκτήματα των PMU για τον έλεγχο και την εποπτεία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να γίνει ελκυστικότερη η επένδυσή τους.
- Ενσωμάτωση στο ήδη υπάρχον αλγόριθμο της πιθανότητας απώλειας PMU από ένα ζυγό που είναι τοποθετημένο.
- Εφαρμογή της μεθόδου σε δίκτυα, τα οποία περιέχουν συμβατικές μετρήσεις και όπου τα PMU χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μιας ροής κλάδου, ενός ρεύματος ή μιας τάσης.