



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

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΡΟΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ορέστης Ι. Μπλάνας

Επίβλεψη:

Πάυλος Σ. Γεωργιάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2018



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

**ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ
ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΡΟΗΣ
ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ορέστης Ι. Μπλάνας

Επίβλεψη:

Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2018

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Μαρτίου του 2018

.....

.....

.....

Πάυλος Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιωάννης Γκόνος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2018

.....
Ορέστης Ι. Μπλάνας

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

Copyright © Ορέστης Μπλάνας 2018

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

Τα τελευταία χρόνια έχουν υπάρξει ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις και παράλληλα έχει γίνει εμφανής η ανάγκη προστασίας του περιβάλλοντος. Οι καταναλωτές χρειάζονται περισσότερη διαθέσιμη ισχύ και συνεπώς, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία μπορούν να ικανοποιήσουν μεγαλύτερη ζήτηση. Ταυτόχρονα, πρέπει να διατηρείται πάντοτε το ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης, κάτι που γίνεται όλο και πιο δύσκολο, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κύριο ρόλο στην ανταπόκριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στις προκλήσεις θα παίξουν τα ηλεκτρονικά ισχύος, μέσω των οποίων μπορούν να κατασκευαστούν ευέλικτα συστήματα μεταφοράς. Αυτά τα συστήματα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη ευστάθεια και δυνατότητα ελέγχου και επιτρέπουν μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος. Από τα στοιχεία αυτών των συστημάτων, ο ενοποιημένος ελεγκτής ροής ισχύος προσφέρει τις περισσότερες δυνατότητες.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία μίας μεθοδολογίας και ενός λογισμικού που θα μπορεί 1) να επιλύει το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχουν ενοποιημένους ελεγκτές ροής ισχύος (EERI), 2) να καθορίζει τις ρυθμίσεις των EERI και τις θέσεις τοποθέτησής τους, για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εργασία προτείνει ένα νέο μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που περιέχουν EERI. Για την επιλογή των βέλτιστων θέσεων εγκατάστασης των EERI, χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος είναι η εξαντλητική αναζήτηση, δηλαδή ελέγχονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί τοποθετήσεων των EERI και επιλέγονται οι θέσεις τοποθέτησης που ελαχιστοποιούν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δεύτερη μέθοδος επιλύει το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Ακολουθεί σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και του υπολογιστικού χρόνου εκτέλεσής τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς, Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος, Βέλτιστες Ρυθμίσεις, Βέλτιστη Τοποθέτηση, Ελαχιστοποίηση Κόστους Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

ABSTRACT

In recent years, there have been many technological breakthroughs and the need to protect the environment has become apparent. The consumers need more available power and as such, the electric power systems must be capable of satisfying greater energy demand. Of course, power generation must always be equal to power demand, an increasingly difficult task due to the use of renewable energy sources. Power electronics will have a central role in the adaptation of the power systems to these new circumstances. By utilizing them, flexible AC transmission systems (FACTS) can be constructed. These systems are capable of increasing the stability and controllability of the power system, while also increasing its power transfer capability. Among the FACTS controllers, the unified power flow controller (UPFC) holds the greatest potential.

The goal of this thesis is the development of a methodology and a computer program that 1) can solve the optimal power flow problem of power systems containing multiple UPFCs, 2) can determine the optimal settings and the optimal location of each UPFC, in order to minimize the electric power generation cost. A new optimal power flow algorithm is proposed for power systems with multiple UPFCs. Two methods are developed for the computation of optimal location of multiple UPFCs. The first method is the exhaustive search, which examines all the possible UPFCs location combinations to determine the lowest generation cost. The second method uses particle swarm optimization algorithm to solve exactly the same optimization problem. The results of these two methods are discussed and compared.

KEY WORDS

Flexible AC Transmission Systems, Unified Power Flow Controller, Optimal Settings, Optimal Allocation, Minimization of Electric Power Generation Cost, Particle Swarm Optimization Algorithm

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του επίκουρου καθηγητή Ε.Μ.Π., κ. Παύλου Γεωργιλάκη. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα, που μου πρότεινε αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα και για τη βοήθειά του, την καθοδήγησή του και τον χρόνο που αφιέρωσε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, τον ευχαριστώ για την επιμονή του στη διατήρηση της άριστης ποιότητας της εργασίας και για τις γνώσεις που απέκτησα κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που μου προσέφερε τα απαραίτητα εφόδια και με στήριξε σε κάθε βήμα μου και τους φίλους μου, που ήταν κοντά μου κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς	2
1.3	Στόχος και Δομή της Εργασίας	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	5
2.1	Εισαγωγή	5
2.2	Πρόβλημα Ροής Ισχύος	5
2.2.1	Περιγραφή του Προβλήματος	5
2.2.2	Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς	7
2.2.3	Ζυγός Παραγωγής ή Ζυγός PV	7
2.2.4	Ζυγός Φορτίου ή Ζυγός PQ	7
2.2.5	Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος	7
2.2.6	Πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Ισχύος	9
2.3	Κατασκευή του ΕΕΠΙ	9
2.4	Εφαρμογές του ΕΕΠΙ στα ΣΗΕ	10
2.4.1	Έλεγχος της Ροής Ισχύος των Γραμμών Μεταφοράς	10
2.4.2	Αντιστάθμιση της Αέργου Ισχύος και Έλεγχος του Μέτρου της Τάσης των Ζυγών	10
2.4.3	Αύξηση της Φόρτισης	11
2.4.4	Μείωση του Κόστους Παραγωγής και των Απωλειών Ενεργού Ισχύος	11
2.4.5	Βελτίωση της Ποιότητας Ισχύος	11
2.4.6	Αύξηση της Μεταβατικής Ευστάθειας	11
2.5	Εγκατάσταση του ΕΕΠΙ στο Άκρο Γραμμής Μεταφοράς	11
2.6	Κυκλωματικό Μοντέλο Πηγών Τάσης του ΕΕΠΙ	12
2.7	Μοντέλο Ζυγού Παραγωγής και Ζυγού Φορτίου του ΕΕΠΙ για Προβλήματα Ροής Ισχύος	14
2.7.1	Μοντέλο Ροών Ισχύος για ΣΗΕ με έναν ΕΕΠΙ	14
2.7.2	Μοντέλο Ροών Ισχύος για ΣΗΕ με πολλούς ΕΕΠΙ	16
2.8	Μοντέλο Ζυγών Παραγωγής του ΕΕΠΙ για Προβλήματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ 21

3.1	Εισαγωγή	21
3.2	Περιγραφή του ΑΒΣΣ	22
3.3	Βήματα του ΑΒΣΣ	24
3.4	Χαρακτηριστικά του ΑΒΣΣ Σωματιδίων που Εξαρτώνται από τον Χρήστη	26
3.4.1	Αριθμός Επαναλήψεων	27
3.4.2	Αριθμός Σωματιδίων	27
3.4.3	Μέγιστη Τιμή Συνιστωσών Ταχύτητας	27
3.4.4	Συντελεστής Αδράνειας	27
3.4.5	Συντελεστές Επιτάχυνσης	28
3.5	ΑΒΣΣ με Χρονικά Μεταβαλλόμενες Παραμέτρους	28
3.6	Χειρισμός των Εκτός Ορίων Λύσεων του ΑΒΣΣ	29
3.7	Διαδοχικές Εκτελέσεις του ΑΒΣΣ	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 31

4.1	Εισαγωγή	31
4.2	Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος Βελτιστοποίησης	31
4.2.1	Περιγραφή του Προβλήματος	31
4.2.2	Μεταβλητές Σχεδίασης	31
4.2.3	Αντικειμενική Συνάρτηση	32
4.2.4	Περιορισμοί	33
4.3	Μεθοδολογία Επίλυσης του Προβλήματος με τον ΑΒΣΣ	34
4.4	Λογισμικό για την Επίλυση του Προβλήματος Βελτιστοποίησης	35
4.4.1	Matlab και Matpower	35
4.4.2	Συναρτήσεις για την Επίλυση του Προβλήματος	35
4.4.2.1	Συνάρτηση UseESAToFindOptimalUpfcLocations.m	36
4.4.2.2	Συνάρτηση FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem.m	36
4.4.2.3	Συνάρτηση UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m	37
4.4.2.4	Συνάρτηση InstallUpfc.m	37
4.4.2.5	Συνάρτηση FindOptimalUpfcSettings.m	37
4.4.2.6	Συνάρτηση CreateUpfcEquations.m	38
4.4.2.7	Συνάρτηση FindBranchNumberFromBranchBuses.m	38
4.4.2.8	Συνάρτηση FindSameBranches.m	38
4.4.2.9	Συνάρτηση ReplaceSameBranches.m	38
4.4.3	Εκτέλεση και Αποτελέσματα του Λογισμικού	38
4.4.4	Πιθανές Επεκτάσεις του Λογισμικού	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ **43**

5.1	Εισαγωγή	43
5.2	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 5 Ζυγών	44
5.2.1	Δεδομένα Συστήματος 5 Ζυγών	44
5.2.2	Αποτελέσματα για Έναν ΕΕΡΙ	46
5.2.2.1	Γενικά Αποτελέσματα	46
5.2.3	Αποτελέσματα για Δύο ΕΕΡΙ	49
5.2.3.1	Γενικά Αποτελέσματα	49
5.3	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 39 Ζυγών	52
5.3.1	Δεδομένα Συστήματος 39 Ζυγών	52
5.3.2	Αποτελέσματα	52
5.3.2.1	Γενικά Αποτελέσματα	52
5.3.2.2	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Αριθμό Επαναλήψεων	57
5.3.2.3	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Αριθμό Σωματιδίων	57
5.3.2.4	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Συντελεστή Επιτάχυνσης c_1	58
5.3.2.5	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Συντελεστή Επιτάχυνσης c_2	59
5.3.2.6	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς την Αρχική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	60
5.3.2.7	Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς την Τελική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	61
5.3.2.8	Βέλτιστες Τιμές των Παραμέτρων του ΑΒΣΣ	62
5.4	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας 118 Ζυγών	63
5.4.1	Δεδομένα Συστήματος 118 Ζυγών	63
5.4.2	Αποτελέσματα	63
5.4.2.1	Γενικά Αποτελέσματα	63
5.4.2.2	Διαδοχικές Δοκιμές του ΑΒΣΣ	67
5.5	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ **73**

6.1	Σύνοψη της Εργασίας και Συμπεράσματα	73
6.2	Μελλοντική Έρευνα	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **77**

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαθεσιμότητα επαρκούς, αδιάλειπτης, ποιοτικής και φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας, τόσο για το επίπεδο διαβίωσης των πολιτών, όσο και για την εθνική οικονομία και την εθνική ασφάλεια κάθε χώρας. Για την εξασφάλιση των παραπάνω βασικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται συντονισμένες και συνθέτες δράσεις, που θα πρέπει να καθορίζονται στην ενεργειακή στρατηγική κάθε χώρας. Όλες οι χώρες θα πρέπει στην ενεργειακή στρατηγική τους, να λαμβάνουν υπόψη τις εκάστοτε συνθήκες και περιορισμούς, αλλά και τις προκλήσεις για καθαρή ενέργεια και για εξοικονόμηση ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχουν αλλαγές στον τομέα της ενέργειας, που οφείλονται στην απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τους αυστηρούς περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Οι αλλαγές αυτές, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής, καθώς και στη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Για αυτό τον λόγο, έχει δημιουργηθεί ένα νέο θεσμικό πλαίσιο για τα ΣΗΕ, μέσα από το οποίο θα πρέπει να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η ασφάλεια των ΣΗΕ με βάση τα οικονομικά στοιχεία σε περιβάλλον ανταγωνισμού.

Τα παραπάνω καθιστούν την προγραμματισμένη ανάπτυξη των δικτύων μία σύνθετη διαδικασία, διότι οι θέσεις των μονάδων παραγωγής και τα μεγέθη της παραγωγής και της ζήτησης δεν είναι δεδομένα. Στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν τα μεγέθη αυτά ήταν γνωστά. Επομένως, στο παρελθόν μπορούσε να προσδιοριστεί με ευκολότερο τρόπο το απαραίτητο σύστημα μεταφοράς, που βασιζόταν στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής συμπεριλαμβανομένου και του κόστους των απωλειών. Επιπρόσθετα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται μέρα με τη μέρα και συνεπώς, αναζητούνται τρόποι να αξιοποιηθεί πιο αποδοτικά το ήδη υπάρχον ΣΗΕ, αλλά και να βελτιωθούν τα επιμέρους κομμάτια του και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του. Η αύξηση της ζήτησης, σε συνδυασμό με την απόσταση της θέσης της παραγωγής από τους τόπους ζήτησης, συχνά δημιουργεί προβλήματα συμφόρησης (υπερφορτίσεων) σε ορισμένες γραμμές μεταφοράς, αλλά και αδυναμία ικανοποίησης των λειτουργικών ορίων του ΣΗΕ. Όλες αυτές οι υπερβάσεις, όταν εντοπίζονται έγκαιρα αντιμετωπίζονται με βάση τους κανόνες της αγοράς με ανακατανομή της παραγωγής ή και ένταξη άλλων, ακριβότερων μονάδων. Το επιπλέον κόστος που προκύπτει από αυτές τις ενέργειες μεταφέρεται στους καταναλωτές. Οι υπερβάσεις αυτές θα μπορούσαν να επιλυθούν, είτε με την ενίσχυση υφιστάμενων γραμμών μεταφοράς, είτε με την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς. Η ενίσχυση υφιστάμενων γραμμών είναι δύσκολη, λόγω της αδυναμίας διακοπής τροφοδότησης των καταναλωτών για μεγάλο χρονικό διάστημα και καινούργιες γραμμές μεταφοράς είναι ορισμένες φορές δύσκολο, χρονοβόρο και οικονομικά ασύμφορο να εγκατασταθούν, λόγω των ισχυρών περιβαλλοντικών περιορισμών και των αντιδράσεων των τοπικών κοινωνιών. Έτσι, είναι απαραίτητη η εξεύρεση τεχνικών ελέγχου των υπερβάσεων φόρτισης των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Για την ικανοποίηση των προηγούμενων αναγκών και με την εισαγωγή των νέων στοιχείων εξοπλισμού και ελέγχου, τα παραδοσιακά συστήματα μεταφοράς μετασχηματίζονται σε Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ) και συμβάλλουν στη σημαντική πρόοδο που υπάρχει στον τομέα της μεταφοράς και διανομής της τόσο της AC, όσο και της DC, ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία αυτά, επηρεάζουν όλο το φάσμα, από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έως την κατανάλωσή της. Επιπρόσθετα, όλες οι κλασσικές μεθοδολογίες βελτιστοποίησης και ελέγχου αναπροσαρμόζονται, ώστε να ικανοποιήσουν τις νέες ανάγκες, αξιοποιώντας πλέον και τις τεχνολογίες που βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος.

Η αξιοποίηση των νέων στοιχείων εξοπλισμού, που θα βελτιστοποιούν τα χαρακτηριστικά και την ασφάλεια των ΣΗΕ, αποτελούν μεγάλη πρόκληση για τους κατασκευαστές, τους διαχειριστές και τους μηχανικούς των ΣΗΕ.

1.2. ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ) είναι σχετικά πρόσφατη εξέλιξη στον χώρο των ΣΗΕ. Η ύπαρξή τους οφείλεται στην πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ΕΣΜ χρησιμοποιούν διάφορες συσκευές, που βασίζονται σε ηλεκτρονικά ισχύος, όπως τα θυρίστορ και τα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης. Τέτοιες συσκευές, μπορούν να ελεγχθούν πολύ γρήγορα σε σχέση με παλαιότερες τεχνολογίες. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί αποτελεσματικοί αλγόριθμοι για τη βέλτιστη αξιοποίησή τους σε μεγάλο αριθμό συνθηκών. Μέσω των ΕΣΜ, οι παράμετροι και τα ηλεκτρικά μεγέθη των γραμμών μεταφοράς μπορούν να ελεγχθούν και λόγω αυτού, τα ΕΣΜ σε ένα δίκτυο [1]:

- αυξάνουν το χρονικό περιθώριο διόρθωσης σφαλμάτων
- βελτιώνουν την ποιότητα της ισχύος
- επιτρέπουν τον έλεγχο των ροών μιγαδικής ισχύος
- επιτρέπουν την αύξηση της φόρτισης του ΣΗΕ
- καθιστούν το ΣΗΕ πιο ευσταθές και ελέγξιμο
- μπορούν να ελέγχουν τις τάσεις των ζυγών
- παρέχουν ή απορροφούν άεργο ισχύ, όπου απαιτείται

Ο Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (ΕΕΡΠ) είναι το πληρέστερο από τα ΕΣΜ, καθώς αποτελείται από δύο άλλα ΕΣΜ και κατά συνέπεια συνδυάζει τις δυνατότητές τους, Μπορεί να παρέχει ή να καταναλώνει άεργο ισχύ στο άκρο της γραμμής μεταφοράς εγκατάστασής του και μέσω αυτής της δυνατότητας να ελέγχει το μέτρο της τάσης στο άκρο της γραμμής μεταφοράς. Παράλληλα, επιτρέπει τη δυνατότητα ελέγχου της ροής μιγαδικής ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, στην οποία εγκαθίσταται. Λόγω των παραπάνω, η εγκατάσταση ενός ή περισσότερων ΕΕΡΠ επιτρέπει στο διαχειριστή να μειώσει τα κόστη παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και προσδίδει στο ΣΗΕ καλύτερα χαρακτηριστικά, όπως η μεγαλύτερη ευστάθεια και η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος. Για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του ΕΕΡΠ θα πρέπει αυτός να ενταχθεί σε προγράμματα που επιλύουν προβλήματα ροών ισχύος. Φαινομενικά, κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολο σαν εγχείρημα, διότι για προβλήματα βέλτιστων ροών ισχύος χρειάζεται τροποποίηση των εξισώσεων του ΣΗΕ και αλλαγή του αλγορίθμου εύρεσης των ρυθμίσεων που εξασφαλίζουν βέλτιστη λειτουργία του ΣΗΕ ως προς κάποιο κριτήριο. Μάλιστα πολλές εργασίες έχουν αφιερωθεί στο πώς θα πρέπει να

τροποποιηθούν οι υπάρχοντες αλγόριθμοι. Όμως, οι αλλαγές στα ήδη υπάρχοντα λογισμικά μπορούν να μειωθούν δραστικά αν ο ΕΕΡΠ μοντελοποιηθεί κατάλληλα, όπως θα φανεί στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας, το οποίο αποτελεί πιθανότατα και το πιο σημαντικό κομμάτι της.

1.3. ΣΤΟΧΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο πρώτος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ενσωμάτωση του Ενοποιημένου Ελεγκτή Ροής Ισχύος στο λογισμικό MATPOWER, ώστε τα μοντέλα των ροών ισχύος και των βέλτιστων ροών ισχύος να υποστηρίζουν πλέον και τον ΕΕΡΠ.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία εξετάζεται η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης και της βέλτιστης ρύθμισης των Ενοποιημένων Ελεγκτών Ροής Ισχύος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ΣΗΕ. Παράλληλα, πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί λειτουργίας του ΣΗΕ. Η επίλυση του προβλήματος θα γίνει αρχικά με τον Αλγόριθμο Εξαντλητικής Αναζήτησης, δηλαδή εξετάζοντας κάθε πιθανή λύση, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Στην συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, που έχει φανεί ιδιαίτερα χρήσιμος σε παρόμοια προβλήματα. Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων και των χρόνων εκτέλεσής τους. Επομένως, δεύτερος στόχος της εργασίας είναι η χρήση, η βελτιστοποίηση παραμέτρων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης και της βέλτιστης ρύθμισης των Ενοποιημένων Ελεγκτών Ροών Ισχύος.

Η παρούσα εργασία, οργανώνεται σε επτά κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται σύντομη εισαγωγή στις γενικές απαιτήσεις των σύγχρονων συστημάτων μεταφοράς και αναδεικνύονται οι ανάγκες μετασχηματισμού τους σε ευέλικτα και έξυπνα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 2** θεμελιώνεται το πρόβλημα της ροής ισχύος, αναλύεται η εσωτερική δομή και τα ισοδύναμα κυκλώματα του ΕΕΡΠ, και θεμελιώνεται η μεθοδολογία ανάλυσης ροών ισχύος σε ΣΗΕ που περιέχουν ΕΕΡΠ.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και οι διάφορες παράμετροι που εμπλέκονται στην εκτέλεσή του.

Στο **Κεφάλαιο 4** διατυπώνεται το πρόβλημα προς επίλυση, παρουσιάζεται η μέθοδος επίλυσής του, και αναλύεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής για τη βέλτιστη τοποθέτηση και τη βέλτιστη ρύθμιση των ΕΕΡΠ με τον αλγόριθμο εξαντλητικής αναζήτησης και με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του Αλγορίθμου Εξαντλητικής Αναζήτησης και του Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων σε ΣΗΕ 5, 39 και 118 ζυγών.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, αντλούνται συμπεράσματα από τα αποτελέσματα και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασης της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Ενοποιημένος Ελεγκτής Ροής Ισχύος (ΕΕΠΙ ή Unified Power Flow Controller – UPFC) είναι μια από τις πιο ενδιαφέρουσες συσκευές που χρησιμοποιούνται στα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς. Μπορεί να εκτελέσει τις ακόλουθες λειτουργίες, ανεξάρτητα τη μια από την άλλη, αλλά και όλες μαζί [1]:

- έλεγχο της ροής ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται
- έλεγχο της ροής αέργου ισχύος στη γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται
- έλεγχο του μέτρου της τάσης στον ζυγό που εγκαθίσταται

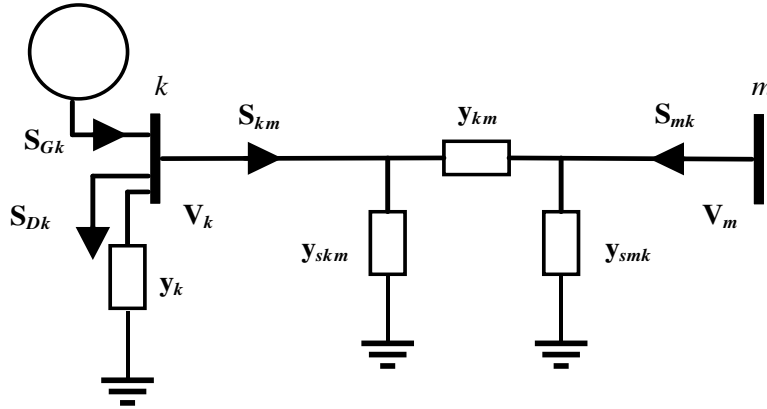
Λόγω των παραπάνω, ανάλογα με την τοποθέτηση του ΕΕΠΙ, μπορούν να επιτευχθούν διάφοροι στόχοι από τον διαχειριστή του δικτύου και ταυτόχρονα, να εξασφαλίζεται ο πιο εύκολος έλεγχος του ΣΗΕ. Για τη βέλτιστη αξιοποίηση του ΕΕΠΙ είναι απαραίτητη η ένταξή του, μέσω ενός κατάλληλου μοντέλου, στο Πρόβλημα Ροής Ισχύος. Στις εξισώσεις και τα σχήματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου, τα έντονα, μη πλάγια γράμματα παριστάνουν μιγαδικούς αριθμούς και τα μη έντονα, πλάγια γράμματα παριστάνουν πραγματικούς αριθμούς. Υπενθυμίζεται ότι κάθε μιγαδικός αριθμός \mathbf{c} , μπορεί να γραφτεί στην καρτεσιανή μορφή $\mathbf{c} = a + j \cdot b$ ή στην πολική μορφή $\mathbf{c} = c \cdot e^{j\delta_c} = c\angle\delta_c$, όπου τα a, b, c, δ_c είναι πραγματικοί αριθμοί. Ο συζυγής μιγαδικός αριθμός του \mathbf{c} ορίζεται ως $\mathbf{c}^* = a - j \cdot b = c\angle-\delta_c$. Σαν \mathbf{I}_{km} , ορίζεται το ρεύμα στον ζυγό k , με κατεύθυνση από τον ζυγό k προς τον ζυγό m .

2.2. ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.2.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Το πρόβλημα προσδιορισμού του μέτρου V και της γωνίας δ της μιγαδικής τάσης κάθε ζυγού ονομάζεται Πρόβλημα Ροής Ισχύος. Μετά την εύρεση των μιγαδικών τάσεων των ζυγών, μπορεί να βρεθεί οποιοδήποτε άλλο μέγεθος του ΣΗΕ. Σε κάθε χρονική στιγμή θα πρέπει να είναι διαθέσιμο ένα στιγμιότυπο του δικτύου, με όλα τα στιγμιαία ηλεκτρικά μεγέθη. Η γνώση του

στιγμιότυπου ενός δικτύου, μέσω της επίλυσης του Προβλήματος Ροής Ισχύος, επιτρέπει την εξέταση της λειτουργίας του συστήματος και την ανίχνευση υπερβάσεων στα λειτουργικά όρια του εξοπλισμού.



Σχήμα 2.1: Γενικευμένος ζυγός k ενός ΣΗΕ.

Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται ένας γενικευμένος ζυγός k ενός ΣΗΕ.

Στον ζυγό έχει συνδεθεί:

- μια γεννήτρια που παράγει μιγαδική ισχύ S_{Gk}
- ένα φορτίο σταθερής ισχύος που καταναλώνει μιγαδική ισχύ S_{Dk}
- ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας y_k

Ο ζυγός k συνδέεται με έναν ζυγό m , μέσω μιας γραμμής μεταφοράς, που παριστάνεται από το ισοδύναμο κύκλωμα Π των γραμμών μεταφοράς. Ο ζυγός k μπορεί να συνδέεται και με άλλους ζυγούς, εκτός από τον ζυγό m .

Στο Σχήμα 2.1 εμφανίζονται τα παρακάτω ανά μονάδα μεγέθη: η σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς y_{km} , η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_{skm} της γραμμής μεταφοράς στην πλευρά του ζυγού k , η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_{smk} της γραμμής μεταφοράς στην πλευρά του ζυγού m (αν δύο ζυγοί k και m του ΣΗΕ δεν συνδέονται άμεσα μεταξύ τους με γραμμή μεταφοράς, τότε $y_{km} = y_{skm} = y_{smk} = 0$), η μιγαδική ισχύς S_{Gk} που παράγει η γεννήτρια του ζυγού k , η μιγαδική ισχύς S_{Dk} που καταναλώνει το φορτίο σταθερής ισχύος του ζυγού k , το φορτίο σταθερής αγωγιμότητας y_k του ζυγού k , η μιγαδική τάση V_k του ζυγού k , η μιγαδική τάση V_m του ζυγού m , η μιγαδική ισχύς S_{km} στον ζυγό k , με κατεύθυνση από τον ζυγό k προς τον ζυγό m , και η μιγαδική ισχύς S_{mk} στον ζυγό m , με κατεύθυνση από τον ζυγό m προς τον ζυγό k .

Για τα ανά μονάδα μεγέθη του Σχήματος 2.1 ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$y_{km} = g_{km} + j \cdot b_{km} \quad (2.1)$$

$$y_{skm} = g_{skm} + j \cdot b_{skm} \quad (2.2)$$

$$y_{smk} = g_{smk} + j \cdot b_{smk} \quad (2.3)$$

$$S_{Gk} = P_{Gk} + j \cdot Q_{Gk} \quad (2.4)$$

$$S_{Dk} = P_{Dk} + j \cdot Q_{Dk} \quad (2.5)$$

$$y_k = g_k + j \cdot b_k \quad (2.6)$$

$$\mathbf{V}_k = V_k \angle \delta_k \quad (2.7)$$

$$\mathbf{V}_m = V_m \angle \delta_m \quad (2.8)$$

$$\mathbf{S}_{km} = \mathbf{V}_k \cdot \mathbf{I}_{km}^* = P_{km} + j \cdot Q_{km} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{S}_{mk} = \mathbf{V}_m \cdot \mathbf{I}_{mk}^* = P_{mk} + j \cdot Q_{mk} \quad (2.10)$$

Για κάθε ζυγό του ΣΗΕ, πρέπει να προσδιοριστεί το μέτρο και η γωνία της μιγαδικής τάσης του, τα οποία αποτελούν τους αγνώστους του προβλήματος ροών ισχύος. Οι ζυγοί του ΣΗΕ, ανάλογα με τα δεδομένα που δίνονται για αυτούς, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [2]:

- Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς
- Ζυγός Παραγωγής ή Ζυγός PV
- Ζυγός Φορτίου ή Ζυγός PQ

2.2.2. Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς

Σε κάθε ΣΗΕ υπάρχει ένας μόνο ζυγός ταλάντωσης, ο οποίος έχει γνωστό μέτρο τάσης V και γνωστή γωνία τάσης δ . Επειδή είναι γνωστή η μιγαδική τάση του, στον ζυγό ταλάντωσης δεν υπάρχει κανένας άγνωστος για το πρόβλημα ροών ισχύος.

2.2.3. Ζυγός Παραγωγής ή Ζυγός PV

Οι ζυγοί αυτοί έχουν γνωστό μέτρο τάσης V και γνωστή έγχυση ενεργού ισχύος $P_G - P_D$. Σε κάθε τέτοιο ζυγό, για το πρόβλημα ροής ισχύος, υπάρχει ένας άγνωστος, η γωνία δ της μιγαδικής τάσης του ζυγού παραγωγής. Σε ζυγούς τέτοιου τύπου μπορεί να υπάρχουν και φορτία.

2.2.4. Ζυγός Φορτίου ή Ζυγός PQ

Οι ζυγοί αυτοί έχουν γνωστή έγχυση ενεργού ισχύος $P_G - P_D$ και γνωστή έγχυση αέργου ισχύος $Q_G - Q_D$. Σε κάθε τέτοιο ζυγό, για το πρόβλημα ροής ισχύος, υπάρχουν δύο άγνωστοι, το μέτρο της τάσης του, V και η γωνία της τάσης του, δ . Σε ζυγούς τέτοιου τύπου μπορεί να μην υπάρχουν φορτία.

2.2.5 Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος

Αν ένα ΣΗΕ έχει:

- 1 ζυγό ταλάντωσης
- κ ζυγούς παραγωγής
- μ ζυγούς φορτίου

τότε υπάρχουν $\kappa+2\cdot\mu$ άγνωστοι που πρέπει να βρεθούν, για να επιλυθεί το πρόβλημα ροών ισχύος και να μπορούν να προσδιοριστούν όλα τα μεγέθη (τάση, ρεύμα, ισχύς) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Δηλαδή, το διάλυμα αγνώστων περιέχει κ γωνίες τάσεων ζυγών παραγωγής, μ μέτρα τάσεων ζυγών φορτίου και μ γωνίες τάσεων ζυγών φορτίου. Αφού οι άγνωστοι είναι $\kappa+2\cdot\mu$, χρειάζονται $\kappa+2\cdot\mu$ ανεξάρτητες εξισώσεις, με την επίλυση των οποίων θα βρεθεί το διάλυμα αγνώστων.

Οι εξισώσεις (2.11) και (2.12) εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος, αντίστοιχα, σε έναν ζυγό k . Οι ζητούμενες $\kappa+2\cdot\mu$ εξισώσεις είναι οι ακόλουθες:

- $\kappa+\mu$ εξισώσεις του ισοζυγίου ενεργού ισχύος της εξίσωσης (2.11), μία για κάθε ζυγό παραγωγής και μία για κάθε ζυγό φορτίου
- μ εξισώσεις του ισοζυγίου αέργου ισχύος της εξίσωσης (2.12), μία για κάθε ζυγό φορτίου.

Οι παραπάνω $\kappa+2\cdot\mu$ εξισώσεις αποτελούν ένα σύστημα $\kappa+2\cdot\mu$ ανεξάρτητων εξισώσεων, που περιέχουν σαν αγνώστους τα μέτρα των μιγαδικών τάσεων των ζυγών φορτίου και τις γωνίες των μιγαδικών τάσεων των ζυγών παραγωγής και των ζυγών φορτίου.

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 \cdot \left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] \quad (2.11)$$

$$-V_k \cdot \sum_{m \neq k} V_m \cdot [g_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m)]$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 \cdot \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] \quad (2.12)$$

$$-V_k \cdot \sum_{m \neq k} V_m \cdot [g_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)]$$

Το σύστημα που προέκυψε, έχει αποκλειστικά μη γραμμικές εξισώσεις που δεν μπορούν να λυθούν αναλυτικά και απαιτούν τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων για την επίλυσή τους. Μια μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά, είναι η μέθοδος Newton-Raphson [2].

Αφού υπολογιστούν οι μιγαδικές τάσεις των ζυγών, κατά μέτρο και γωνία, μπορούν να υπολογιστούν η παραγωγή μιγαδικής ισχύος κάθε γεννήτριας και οι ροές μιγαδικής ισχύος στα δύο άκρα κάθε γραμμής μεταφοράς. Έχοντας υπολογίσει τις ροές μιγαδικής ισχύος και στα δύο άκρα κάθε γραμμής μεταφοράς, εύκολα υπολογίζονται οι απώλειες μιγαδικής ισχύος για κάθε γραμμή μεταφοράς, προσθέτοντας τις οποίες, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες μιγαδικής ισχύος του ΣΗΕ.

2.2.6. Πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Ισχύος

Εκτός από την απαίτηση να ισχύουν τα ισοζύγια ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό, μπορεί να απαιτηθεί και η ελαχιστοποίηση κάποιας συνάρτησης, που εξαρτάται από τους αγνώστους του προβλήματος, όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση του κόστους καυσίμου για την παραγωγή της ενεργού ισχύος. Μια άλλη πιθανή απαίτηση είναι, οι άγνωστοι προς εύρεση, να πληρούν συγκεκριμένους περιορισμούς, όπως για παράδειγμα το μέτρο της μιγαδικής τάσης σε κάθε ζυγό να βρίσκεται μέσα σε κάποια όρια. Σε αυτή την περίπτωση, ζητείται η επίλυση ενός Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος, κάτι που μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολο ή και αδύνατο να λυθεί με αναλυτικές μεθόδους. Αν $f(x)$ είναι η συνάρτηση κόστους και $h_i(x)$ ο περιορισμός με αριθμό i , τότε η διατύπωση ενός τέτοιου προβλήματος είναι:

$$\min_x f(x)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$A \leq h(x) \leq B$$

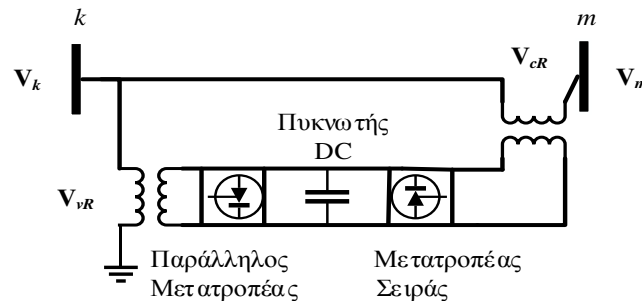
όπου x είναι το διάνυσμα αγνώστων, $f(x)$ είναι η προς ελαχιστοποίηση συνάρτηση, και $h(x)$ είναι ο πίνακας που περιέχει τους περιορισμούς, τόσο τις ανισότητες όσο και τις ισότητες, δεδομένου ότι μια ισότητα μπορεί να γραφτεί σαν μια ανισότητα με ίδιες τιμές στο δεξί και το αριστερό μέρος της ανισότητας.

Μόνο τα φορτία του συστήματος θεωρούνται δεδομένα και αμετάβλητα στο Πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Ισχύος. Όλα τα υπόλοιπα μεγέθη του ΣΗΕ, όπως το μέτρο και η γωνία της μιγαδικής τάσης του ζυγού αναφοράς ή το μέτρο της μιγαδικής τάσης και η έγχυση ενεργού ισχύος κάθε ζυγού παραγωγής, θεωρούνται μεταβλητά. Αυτό οδηγεί σε υπερβολικά μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων. Για να λυθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος γίνεται συχνά χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού, αλλά για πιο γρήγορη επίλυση του προβλήματος, μελετώνται και προσεγγιστικές τεχνικές, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.

2.3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΕΕΠΙ

Το εσωτερικό κύκλωμα του ΕΕΠΙ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Ως στοιχείο ΕΣΜ, ο ΕΕΠΙ αποτελείται εσωτερικά από ηλεκτρονικά ισχύος. Είναι ο συνδυασμός δύο άλλων στοιχείων ΕΣΜ, του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή (STATCOM) και του ελεγχόμενου σύγχρονου αντισταθμιστή σειράς (SSSC). Αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγών τάσης που χρησιμοποιούν διακόπτες, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους με έναν πυκνωτή DC.

Η κύρια λειτουργία του ΕΕΠΙ εκτελείται από τον μετατροπέα σειράς, ο οποίος δημιουργεί μια τάση με ελεγχόμενο μέτρο και γωνία. Η τάση αυτή, παριστάνεται από μια ελεγχόμενη πηγή μιγαδικής τάσης V_{cr} . Μέσω της ελεγχόμενης πηγής μιγαδικής τάσης, μπορεί να ελέγχεται η ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος στη γραμμή [1].



Σχήμα 2.2: Δομή του ΕΕΠΙ.

Ο εγκάρσιος μετατροπέας δημιουργεί και αυτός μια τάση με ελεγχόμενο μέτρο και γωνία στον εγκάρσιο κλάδο, που παριστάνεται από μια ελεγχόμενη πηγή μιγαδικής τάσης V_{vr} . Ο εγκάρσιος μετατροπέας έχει δύο λειτουργίες. Παράγει ή καταναλώνει την ενεργό ισχύ που καταναλώνεται ή παράγεται από τον μετατροπέα σειράς. Έτσι, η ενεργός ισχύς που παράγεται

από τον ΕΕΡΙ, καταναλώνεται πάλι από τον ΕΕΡΙ και αν αγνοηθούν οι απώλειες των μετατροπέων, ο ΕΕΡΙ και το ΣΗΕ δεν ανταλλάσσουν ενεργό ισχύ, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την ανάλυση της λειτουργίας του ΕΕΡΙ.

Ο εγκάρσιος μετατροπέας διαθέτει και τη δυνατότητα παροχής ή απορρόφησης αέργου ισχύος και μπορεί να λειτουργήσει με συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα, να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ, τελείως ανεξάρτητα από τον μετατροπέα σειράς. Αντίθετα, η ενεργός ισχύς πάντα θα έχει αντίθετο πρόσημο στον εγκάρσιο μετατροπέα σε σχέση με τον μετατροπέα σειράς. Μέσω της παροχής αέργου ισχύος, ο εγκάρσιος μετατροπέας μπορεί να ελέγχει το μέτρο της τάσης του ζυγού, με τον οποίο συνδέεται [1].

Σε κάθε περίπτωση, η λειτουργία του ΕΕΡΙ καθορίζεται πλήρως από τις τιμές των μέτρων και των γωνιών των εσωτερικών του μιγαδικών τάσεων, δηλαδή της ελεγχόμενης πηγής μιγαδικής τάσης σειράς και της ελεγχόμενης εγκάρσιας πηγής μιγαδικής τάσης.

2.4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΕΕΡΙ ΣΤΑ ΣΗΕ

Ο ΕΕΡΙ αποτελεί αντικείμενο έρευνας, λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρει. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες από αυτές τις δυνατότητες.

2.4.1. Έλεγχος της Ροής Ισχύος των Γραμμών Μεταφοράς

Ο έλεγχος ισχύος των γραμμών μεταφοράς, που παρέχει ο ΕΕΡΙ, είναι ιδιαίτερα σημαντικός, αφού είναι απαραίτητος για τη βέλτιστη αξιοποίηση των γραμμών μεταφοράς. Λόγω αυξημένης κατανάλωσης, μπορεί η ισχύς που ρέει σε μια γραμμή μεταφοράς να ξεπεράσει τα επιτρεπτά όρια, γεγονός που επηρεάζει τα μέτρα των τάσεων των ζυγών και μειώνει την ευστάθεια και την ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος. Παράλληλα, άλλες γραμμές μεταφοράς μπορεί να μεταφέρουν ισχύ πολύ μικρότερη της ονομαστικής τους, οπότε δεν γίνεται βέλτιστη χρήση του διαθέσιμου εξοπλισμού. Μέσω της χρήσης του ΕΕΡΙ επιτυγχάνεται αποφυγή της συμφόρησης στο ΣΗΕ, αλλά και επαρκής μεταφορά ισχύος από κάθε γραμμή μεταφοράς.

2.4.2. Αντιστάθμιση της Αέργου Ισχύος και Έλεγχος του Μέτρου της Τάσης των Ζυγών

Με τη βοήθεια του ΕΕΡΙ μπορεί να εξασφαλίζεται ότι σε κάθε ζυγό φορτίου, τηρείται το ισοζύγιο αέργου ισχύος, μέσω της παροχής ή απορρόφησης αέργου ισχύος από τον εγκάρσιο μετατροπέα του ΕΕΡΙ. Η χρήση αυτή είναι όμοια με τη σύνδεση πυκνωτών στον ζυγό και βοηθάει στην αποφυγή του φαινομένου της κατάρρευσης τάσης, αφού με τον έλεγχο της αέργου ισχύος, ο ΕΕΡΙ επιτυγχάνει έλεγχο των μέτρων των μιγαδικών τάσεων των ζυγών. Μπορεί με αυτόν τον τρόπο να εξασφαλιστεί ότι το μέτρο των μιγαδικών τάσεων σε κάθε ζυγό είναι πάντοτε κοντά στο ονομαστικό και δεν μειώνεται ανεξέλεγκτα, εξασφαλίζοντας τη συνεχή διατήρηση της ευστάθειας τάσης [3].

2.4.3. Αύξηση της Φόρτισης

Ο ΕΕΠΙ μπορεί να επιτρέψει την εγκατάσταση γεννητριών μεγαλύτερης παραγωγής και φορτίων μεγαλύτερης κατανάλωσης, χωρίς την αντικατάσταση των γραμμών μεταφοράς του ΣΗΕ. Επίσης, ο ΕΕΠΙ μπορεί να αυξήσει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος ενός ΣΗΕ, καθώς και την ικανότητα μεταφοράς ισχύος μεταξύ δύο ή περισσότερων διασυνδεδεμένων ΣΗΕ, βοηθώντας έτσι κάθε διαχειριστή ΣΗΕ [4].

2.4.4. Μείωση του Κόστους Παραγωγής και των Απωλειών Ενεργού Ισχύος

Μέσω της δυνατότητας του ΕΕΠΙ να ελέγχει τη ροή ενεργού ισχύος μπορεί να επιτευχθεί μείωση του κόστους που οφείλεται σε απώλειες ενεργού ισχύος στις γραμμές [5]. Διαισθητικά, η καλύτερη θέση για την τοποθέτηση του ΕΕΠΙ μπορεί να είναι οι γραμμές μεταφοράς με τη μεγαλύτερη ροή ενεργού ισχύος ή οι γραμμές μεταφοράς με τη μεγαλύτερη αντίσταση, ώστε να επιτευχθεί η μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος και της συμφόρησης στο ΣΗΕ, αν και αυτό δεν ισχύει πάντα, οπότε και είναι απαραίτητες διεξοδικές μελέτες για τη εύρεση της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης των ΕΕΠΙ, που είναι το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

2.4.5. Βελτίωση της Ποιότητας Ισχύος

Η παρουσία ευαίσθητου και ακριβού εξοπλισμού και η τροφοδότηση μη γραμμικών φορτίων έχει αυξήσει την προσοχή που δίνεται στην ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Μέσω των μετατροπέων πηγών τάσης του ΕΕΠΙ, μπορεί να μειωθεί το πλάτος των παρασιτικών αρμονικών της τάσης [6].

2.4.6. Αύξηση της Μεταβατικής Ευστάθειας

Ο ΕΕΠΙ έχει αποδειχθεί ότι βοηθάει στη διατήρηση της μεταβατικής ευστάθειας του ΣΗΕ [7]. Η μεταβατική ευστάθεια είναι η δυνατότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από μεγάλες διαταραχές, όπως για παράδειγμα ένα βραχυκύκλωμα. Σε ΣΗΕ, στα οποία οι γωνίες των δρομέων των γεννητριών θα αυξάνονταν ανεξέλεγκτα, όταν προστεθεί ένας ΕΕΠΙ οι γωνίες μειώνονται για κάποιο διάστημα και στη συνέχεια αποκτούν μια σταθερή τιμή, ενώ οι τάσεις των ζυγών αποκτούν την τιμή μόνιμης κατάστασής τους και η συχνότητα την ονομαστική τιμή της σε μικρότερο χρόνο.

2.5. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΕΠΙ ΣΤΟ ΑΚΡΟ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Έστω ένας ΕΕΠΙ που τοποθετείται στον ζυγό k της γραμμής μεταφοράς $k-l$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, όπου m είναι ο βοηθητικός ζυγός του ΕΕΠΙ. Ο ζυγός m είναι χρήσιμος στην κυκλωματική αναπαράσταση του ΕΕΠΙ, καθώς και στη διατύπωση του προβλήματος ροών ισχύος σε ΣΗΕ με ΕΕΠΙ. Στην παρούσα εργασία οι ΕΕΠΙ θα μπορούν να εγκατασταθούν μόνο στα άκρα γραμμών μεταφοράς, άρα οι ΕΕΠΙ θα έχουν πάντα στο ένα άκρο τους το άκρο

εγκατάστασης (εδώ ο ζυγός k) και στο άλλο άκρο τους θα έχουν έναν βοηθητικό ζυγό (εδώ ο ζυγός m). Από το ισοζύγιο μιγαδικής ισχύος στον ζυγό m , προκύπτει:

$$P_{mk} = -P_{ml} \quad (2.13)$$

$$Q_{mk} = -Q_{ml} \quad (2.14)$$

Ο ΕΕΡΙ του Σχήματος 2.3 έχει τη δυνατότητα να:

- Ελέγχει το μέτρο της μιγαδικής τάσης του ζυγού k . Αυτό σημαίνει ότι στο πρόβλημα ροών ισχύος, το μέτρο (V_k) της μιγαδικής τάσης του ζυγού k λαμβάνει μία δεδομένη, ρυθμιζόμενη (ελεγχόμενη) τιμή V_{k_reg} , δηλαδή:

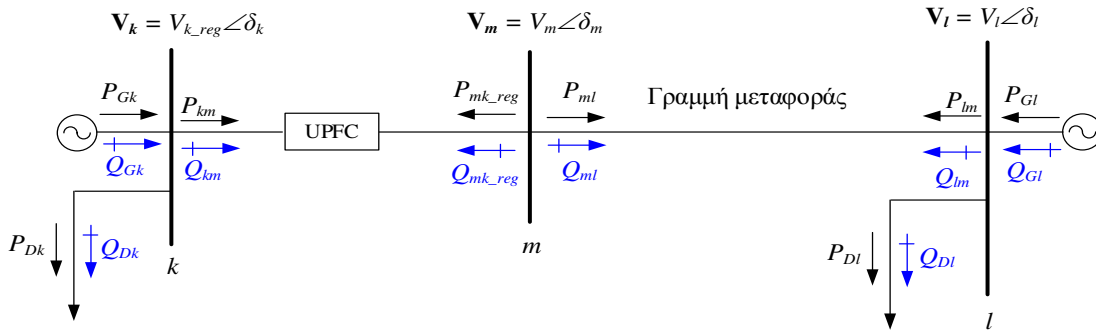
$$V_k = V_{k_reg} \quad (2.15)$$

- Ελέγχει τη ροή ενεργού ισχύος της γραμμής μεταφοράς $k-l$, ή ακριβέστερα, της γραμμής μεταφοράς $m-l$, όπου m είναι ο βοηθητικός ζυγός του ΕΕΡΙ. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2.13), αυτό σημαίνει ότι στο πρόβλημα ροών ισχύος, η ροή ενεργού ισχύος P_{mk} στον ζυγό m με κατεύθυνση από τον ζυγό m προς τον ζυγό k λαμβάνει μία δεδομένη, ρυθμιζόμενη (ελεγχόμενη) τιμή P_{mk_reg} , δηλαδή:

$$P_{mk} = P_{mk_reg} \quad (2.16)$$

- Ελέγχει τη ροή αέργου ισχύος της γραμμής μεταφοράς $k-l$, ή ακριβέστερα, της γραμμής μεταφοράς $m-l$, όπου m είναι ο βοηθητικός ζυγός του ΕΕΡΙ. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2.14), αυτό σημαίνει ότι στο πρόβλημα ροών ισχύος, η ροή αέργου ισχύος Q_{mk} στον ζυγό m με κατεύθυνση από τον ζυγό m προς τον ζυγό k λαμβάνει μία δεδομένη, ρυθμιζόμενη (ελεγχόμενη) τιμή Q_{mk_reg} , δηλαδή:

$$Q_{mk} = Q_{mk_reg} \quad (2.17)$$



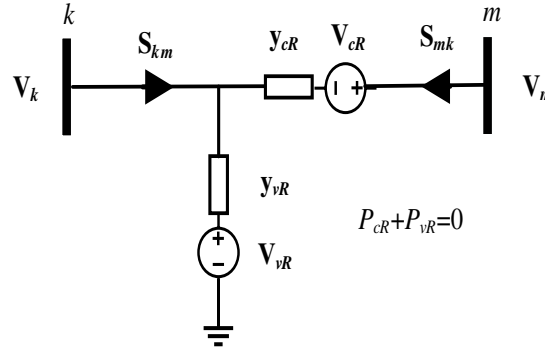
Σχήμα 2.3: ΕΕΡΙ εγκατεστημένος στο άκρο k της γραμμής μεταφοράς $k-l$.

2.6. ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΗΓΩΝ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΕΡΙ

Στο Σχήμα 2.3 ο ΕΕΡΙ αναπαράσταθηκε σαν μαύρο κουτί. Στο μαύρο κουτί του Σχήματος 2.3 περιέχεται το μοντέλο πηγών τάσης του ΕΕΡΙ. Το μοντέλο πηγών τάσης είναι το

πληρέστερο μοντέλο του ΕΕΡΙ. Το ισοδύναμο κύκλωμα πηγών τάσης του ΕΕΡΙ, φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Αποτελείται από δύο ελεγχόμενες πηγές μιγαδικής τάσης, μια στον κλάδο σειράς που συμβολίζεται με \mathbf{V}_{cR} και μια στον εγκάρσιο κλάδο που συμβολίζεται με \mathbf{V}_{vR} . Οι πηγές βρίσκονται σε σειρά με σύνθετες αγωγιμότητες, που οφείλονται στην ύπαρξη των μετατροπών. Η σύνθετη αγωγιμότητα σειράς συμβολίζεται με \mathbf{y}_{cR} , ενώ η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα συμβολίζεται με \mathbf{y}_{vR} [1], [8]. Το μοντέλο προκύπτει από τον τρόπο κατασκευής του ΕΕΡΙ.

Στο Σχήμα 2.4 εμφανίζονται τα παρακάτω ανά μονάδα μεγέθη του ΕΕΡΙ: η σταθερή σύνθετη αγωγιμότητα σειράς \mathbf{y}_{cR} , η σταθερή εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα \mathbf{y}_{vR} , η ελεγχόμενη εσωτερική πηγή μιγαδικής τάσης σειράς \mathbf{V}_{cR} , η ενεργός ισχύς P_{cR} που παράγεται από την ελεγχόμενη εσωτερική πηγή μιγαδικής τάσης σειράς, η ελεγχόμενη εσωτερική εγκάρσια πηγή μιγαδικής τάσης \mathbf{V}_{vR} , η ενεργός ισχύς P_{vR} που παράγεται από την ελεγχόμενη εσωτερική εγκάρσια πηγή μιγαδικής τάσης, η μιγαδική τάση \mathbf{V}_k του ζυγού k (η \mathbf{V}_k έχει ελεγχόμενο μέτρο $V_{k,reg}$), η μιγαδική τάση \mathbf{V}_m του ζυγού m , η μη ελεγχόμενη μιγαδική ισχύς \mathbf{S}_{km} στον ζυγό k , με κατεύθυνση από τον ζυγό k προς τον ζυγό m , και η ελεγχόμενη μιγαδική ισχύς \mathbf{S}_{mk} στον ζυγό m , με κατεύθυνση από τον ζυγό m προς τον ζυγό k .



Σχήμα 2.4: Κυκλωματικό μοντέλο πηγών τάσης του ΕΕΡΙ που είναι εγκατεστημένος στο άκρο k της γραμμής μεταφοράς $k-l$, όπου το άκρο l δεν φαίνεται για λόγους απλότητας.

Για τα ανά μονάδα μεγέθη του Σχήματος 2.4 ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\mathbf{y}_{cR} = g_{cR} + j \cdot b_{cR} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{y}_{vR} = g_{vR} + j \cdot b_{vR} \quad (2.19)$$

$$\mathbf{V}_{cR} = V_{cR} \angle \delta_{cR} \quad (2.20)$$

$$V_{cR}^{min} \leq V_{cR} \leq V_{cR}^{max} \quad (2.21)$$

$$\delta_{cR}^{min} \leq \delta_{cR} \leq \delta_{cR}^{max} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{V}_{vR} = V_{vR} \angle \delta_{vR} \quad (2.23)$$

$$V_{vR}^{min} \leq V_{vR} \leq V_{vR}^{max} \quad (2.24)$$

$$\delta_{vR}^{min} \leq \delta_{vR} \leq \delta_{vR}^{max} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{V}_k = V_k \angle \delta_k \quad (2.26)$$

$$\mathbf{V}_m = V_m \angle \delta_m \quad (2.27)$$

$$\mathbf{S}_{km} = \mathbf{V}_k \cdot \mathbf{I}_{km}^* = P_{km} + j \cdot Q_{km} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{S}_{mk} = \mathbf{V}_m \cdot \mathbf{I}_{mk}^* = P_{mk} + j \cdot Q_{mk} \quad (2.29)$$

Θεωρώντας ότι ο ΕΕΡΙ δεν έχει απώλειες, προκύπτει:

$$P_{CR} + P_{vR} = 0 \quad (2.30)$$

Μέσω ανάλυσης του κυκλώματος του Σχήματος 2.4, προκύπτουν οι εξισώσεις [1]:

$$\begin{aligned} P_{CR} = & g_{CR} \cdot V_{CR}^2 + V_{CR} \cdot V_k \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_{CR} - \delta_k) \\ & + V_{CR} \cdot V_k \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_{CR} - \delta_k) - V_{CR} \cdot V_m \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_{CR} - \delta_m) \\ & - V_{CR} \cdot V_m \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_{CR} - \delta_m) \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$P_{vR} = -g_{vR} \cdot V_{vR}^2 + V_{vR} \cdot V_k \cdot g_{vR} \cdot \cos(\delta_{vR} - \delta_k) - V_{vR} \cdot V_k \cdot b_{vR} \cdot \sin(\delta_{vR} - \delta_k) \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} P_{km} = & (g_{vR} + g_{CR}) \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) \\ & - V_k \cdot V_m \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \\ & + V_k \cdot V_{CR} \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_{CR}) + V_k \cdot V_{CR} \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_{CR}) \\ & - V_k \cdot V_{vR} \cdot g_{vR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_{vR}) - V_k \cdot V_{vR} \cdot b_{vR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_{vR}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\begin{aligned} Q_{km} = & -(b_{CR} + b_{vR}) \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot g_{CR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) \\ & + V_k \cdot V_m \cdot b_{CR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + V_k \cdot V_{CR} \cdot g_{CR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_{CR}) \\ & - V_k \cdot V_{CR} \cdot b_{CR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_{CR}) - V_k \cdot V_{vR} \cdot g_{vR} \cdot \sin(\delta_k - \delta_{vR}) \\ & + V_k \cdot V_{vR} \cdot b_{vR} \cdot \cos(\delta_k - \delta_{vR}) \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} P_{mk} = & g_{CR} \cdot V_m^2 - V_m \cdot V_k \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_m - \delta_k) \\ & - V_m \cdot V_k \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_m - \delta_k) - V_m \cdot V_{CR} \cdot g_{CR} \cdot \cos(\delta_m - \delta_{CR}) \\ & - V_m \cdot V_{CR} \cdot b_{CR} \cdot \sin(\delta_m - \delta_{CR}) \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} Q_{mk} = & -b_{CR} \cdot V_m^2 - V_m \cdot V_k \cdot g_{CR} \cdot \sin(\delta_m - \delta_k) \\ & + V_m \cdot V_k \cdot b_{CR} \cdot \cos(\delta_m - \delta_k) - V_m \cdot V_{CR} \cdot g_{CR} \cdot \sin(\delta_m - \delta_{CR}) \\ & + V_m \cdot V_{CR} \cdot b_{CR} \cdot \cos(\delta_m - \delta_{CR}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

2.7. ΜΟΝΤΕΛΟ ΖΥΓΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΖΥΓΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΕΡΙ ΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

2.7.1. Μοντέλο Ροών Ισχύος για ΣΗΕ με έναν ΕΕΡΙ

Έστω ότι ένας ΕΕΡΙ είναι εγκατεστημένος στο άκρο k της γραμμής μεταφοράς $k-l$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πρόβλημα ροών ισχύος το μοντέλο ζυγού παραγωγής και ζυγού φορτίου, ο ΕΕΡΙ του Σχήματος 2.3 θα πρέπει να ελέγχει: 1) το μέτρο V_k της μιγαδικής τάσης του ζυγού k , 2) τη ροή ενεργού της γραμμής μεταφοράς $k-l$, και 3) τη ροή αέργου της γραμμής μεταφοράς $k-l$ [9]. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού αν ο διαχειριστής του δικτύου επιθυμεί να ελέγξει μόνο ένα ή δύο από τα τρία αυτά μεγέθη, μπορούν να καθοριστούν οι τιμές για αυτά που δεν επιθυμεί να ελέγξει, αυθαίρετα ή με βάση ένα

κριτήριο, όπως η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους. Στόχος της επίλυσης του προβλήματος ροών ισχύος ενός ΣΗΕ με ΕΕΠΙ είναι και η εύρεση των εσωτερικών μιγαδικών τάσεων για κάθε ΕΕΠΙ, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ρυθμίσεις.

Έστω ένας ΕΕΠΙ συνδεδεμένος στη γραμμή μεταφοράς $k-l$, με άκρα τον ζυγό k και τον ζυγό m , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Όλα τα μεγέθη είναι στο ανά μονάδα σύστημα. Ο ζυγός k του Σχήματος 2.3 θεωρείται ζυγός φορτίου, με παραγωγή ενεργού ισχύος P_{Gk} , κατανάλωση ενεργού ισχύος P_{Dk} , παραγωγή αέργου ισχύος Q_{Gk} , και κατανάλωση αέργου ισχύος Q_{Dk} . Αυτό σημαίνει ότι η έγχυση ενεργού ισχύος (P_k) και η έγχυση αέργου ισχύος (Q_k) του ζυγού k υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (2.37)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk} \quad (2.38)$$

Όμως, ο ΕΕΠΙ του Σχήματος 2.3 ελέγχει τις παραμέτρους V_{k_reg} , P_{mk_reg} και Q_{mk_reg} . Συνεπώς, οι τιμές των παραμέτρων αυτών είναι δεδομένες για το Πρόβλημα Ροών Ισχύος.

Θεωρώντας ότι ο ΕΕΠΙ δεν ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το ΣΗΕ, ισχύει:

$$P_{km} = -P_{mk} = -P_{mk_reg} \quad (2.39)$$

Όταν ελέγχονται και οι τρεις παράμετροι από τον ΕΕΠΙ και θεωρώντας ότι ο ΕΕΠΙ δεν ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το ΣΗΕ, προκύπτει το κύκλωμα του Σχήματος 2.5.

Ο ζυγός k μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ζυγός PV, διότι είναι γνωστά το μέτρο της τάσης του και η έγχυση ενεργού ισχύος του:

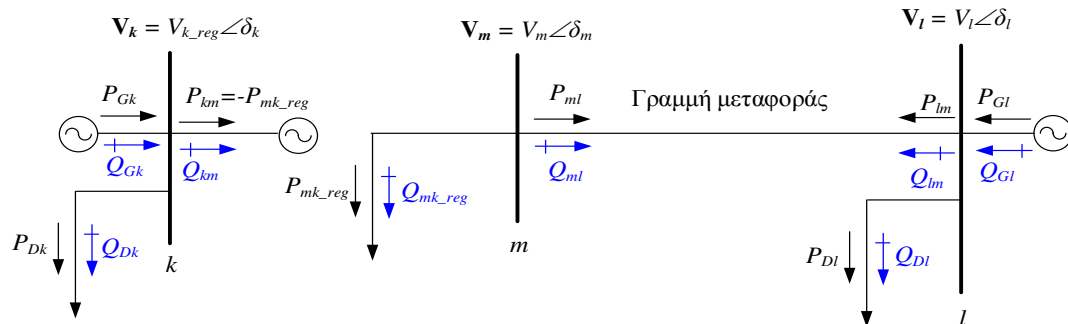
$$V_k = V_{k_reg} \quad (2.40)$$

$$P_k = P_{mk_reg} + P_{Gk} - P_{Dk} \quad (2.41)$$

Ο ζυγός m μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ζυγός PQ, διότι είναι γνωστές η έγχυση ενεργού ισχύος του και η έγχυση αέργου ισχύος του:

$$P_m = 0 - P_{mk} = -P_{mk_reg} \quad (2.42)$$

$$Q_m = 0 - Q_{mk} = -Q_{mk_reg} \quad (2.43)$$



Σχήμα 2.5: Μοντέλο ζυγού παραγωγής και ζυγού φορτίου του ΕΕΠΙ.

Λόγω των παραπάνω, ο ΕΕΠΙ του Σχήματος 2.3 ισοδυναμεί με το κύκλωμα στο Σχήμα 2.5. Αν ο ζυγός k είναι ζυγός ταλάντωσης, τότε μετά την εγκατάσταση του ΕΕΠΙ θα παραμείνει

ζυγός ταλάντωσης και δεν θα μετατραπεί σε ζυγό PV. Αν ο ζυγός k είναι ήδη ζυγός PV, τότε μετά την εγκατάσταση του EEPI θα παραμείνει ζυγός PV.

2.7.2. Μοντέλο Ροών Ισχύος για ΣΗΕ με πολλούς EEPI

Η μεθοδολογία της Ενότητας 2.7.1 εφαρμόζεται για οποιοδήποτε αριθμό EEPI. Έστω ένα ΣΗΕ με:

- 1 ζυγό ταλάντωσης
- κ ζυγούς παραγωγής
- μ ζυγούς φορτίου

Στο ΣΗΕ υπάρχουν $\kappa+2\cdot\mu$ άγνωστοι, όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 2.2.5.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία της Ενότητας 2.7.1. για κάθε EEPI, προκύπτει πως αν εγκατασταθούν στο ΣΗΕ:

- χ EEPI στον ζυγό ταλάντωσης ($\chi=0$ ή $\chi=1$)
- α EEPI σε ζυγούς PV
- β EEPI σε ζυγούς PQ

θα προκύψει ένα ΣΗΕ που δεν περιέχει EEPI, αλλά έχει $\chi+\alpha+\beta$ περισσότερους ζυγούς, όπου κάθε ένας από αυτούς τους επιπλέον $\chi+\alpha+\beta$ ζυγούς έχει τον ρόλο του βοηθητικού ζυγού m του Σχήματος 2.3. Με βάση την ανάλυση της Ενότητας 2.7.1, οι νέοι $\chi+\alpha+\beta$ ζυγοί θα είναι όλοι ζυγοί PQ. Από τους αρχικούς ζυγούς PQ του ΣΗΕ, β θα έχουν μετατραπεί σε ζυγούς PV.

Με αυτές τις αλλαγές, το ΣΗΕ μπορεί να επιλυθεί σαν ένα ΣΗΕ που δεν περιέχει EEPI, αλλά περιέχει β περισσότερους ζυγούς PV και $\chi+\alpha$ περισσότερους ζυγούς PQ. Κάθε νέος ζυγός PV προσθέτει έναν άγνωστο (μια γωνία τάσης) και κάθε νέος ζυγός PQ προσθέτει δύο αγνώστους (ένα μέτρο και μια γωνία τάσης) στο πρόβλημα. Έτσι, υπάρχουν $\beta+2\cdot(\chi+\alpha)$ περισσότεροι άγνωστοι σε σχέση με το αρχικό ΣΗΕ. Σε αυτούς τους αγνώστους πρέπει να προστεθούν και 4 ρυθμίσεις (2 μέτρα και 2 γωνίες εσωτερικών μιγαδικών τάσεων) για κάθε EEPI, οπότε υπάρχουν $\beta+2\cdot(\chi+\alpha)+4\cdot(\chi+\alpha+\beta)$ επιπλέον άγνωστοι στο πρόβλημα. Προσθέτοντας και τους αρχικούς αγνώστους, υπάρχουν συνολικά $\kappa+2\cdot\mu+\beta+2\cdot(\chi+\alpha)+4\cdot(\chi+\alpha+\beta)$ άγνωστοι στο ΣΗΕ, αλλά δεν υπάρχουν EEPI.

Στο ΣΗΕ υπάρχουν τώρα:

- 1 ζυγός ταλάντωσης
- $\kappa+\beta$ ζυγοί PV ($\kappa+\beta$ άγνωστες γωνίες τάσεων)
- $\mu+\chi+\alpha$ ζυγοί PQ ($\mu+\chi+\alpha$ άγνωστα μέτρα τάσεων και $\mu+\chi+\alpha$ άγνωστες γωνίες τάσεων)

Στο ΣΗΕ που προέκυψε, μπορούν να βρεθούν οι μιγαδικές τάσεις των ζυγών του, η έγχυση μιγαδικής ισχύος κάθε ζυγού PV και οποιαδήποτε ροή ισχύος, σύμφωνα με τη μέθοδο της Ενότητας 2.2.5 και με τη χρήση των εξισώσεων (2.44) και (2.45), που είναι ίδιες με τις εξισώσεις (2.11) και (2.12). Το k στις εξισώσεις (2.11) και (2.12) μετατράπηκε σε u στις εξισώσεις (2.44) και (2.45) διότι παριστάνει οποιονδήποτε ζυγό, όχι μόνο το άκρο ενός EEPI.

$$P_{Gu} - P_{Du} = V_u^2 \cdot \left[g_u + \sum_{m \neq u} (g_{sum} + g_{um}) \right] \quad (2.44)$$

$$-V_u \cdot \sum_{m \neq u} V_m \cdot [g_{um} \cdot \cos(\delta_u - \delta_m) + b_{um} \cdot \sin(\delta_u - \delta_m)]$$

$$Q_{Gu} - Q_{Du} = -V_u^2 \cdot \left[b_u + \sum_{m \neq u} (b_{sum} + b_{um}) \right] \quad (2.45)$$

$$-V_u \cdot \sum_{m \neq u} V_m \cdot [g_{um} \cdot \sin(\delta_u - \delta_m) - b_{um} \cdot \cos(\delta_u - \delta_m)]$$

Οι ζητούμενες $\kappa+\beta+2\cdot(\mu+\chi+\alpha)$ εξισώσεις είναι οι ακόλουθες:

- $\kappa+\beta$ εξισώσεις του ισοζυγίου ενεργού ισχύος της εξίσωσης (2.44), μία για κάθε ζυγό PV
- $\mu+\chi+\alpha$ εξισώσεις του ισοζυγίου ενεργού ισχύος της εξίσωσης (2.44), μία για κάθε ζυγό PQ
- $\mu+\chi+\alpha$ εξισώσεις του ισοζυγίου αέργου ισχύος της εξίσωσης (2.45), μία για κάθε ζυγό PQ.

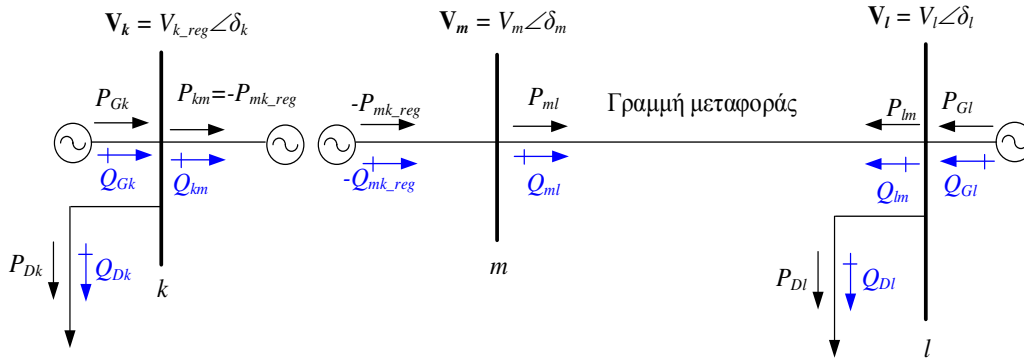
Λύνοντας το σύστημα των $\kappa+\beta+2\cdot(\mu+\chi+\alpha)$ εξισώσεων, επιλύεται το πρόβλημα ροών ισχύος ενός ΣΗΕ με $\chi+\alpha+\beta$ ΕΕΠΙ.

Μετά την επίλυση του ΣΗΕ, για κάθε ΕΕΠΙ, με άκρα έναν ζυγό k και έναν ζυγό m στο ΣΗΕ, είναι γνωστές η μιγαδική τάση \mathbf{V}_m και η γωνία της μιγαδικής τάσης \mathbf{V}_k . Είναι επίσης γνωστές, αφού είναι οι ρυθμίσεις του ΕΕΠΙ που καθορίζονται από τον διαχειριστή, το μέτρο της μιγαδικής τάσης \mathbf{V}_k και οι ροές ισχύος P_{mk} και Q_{mk} . Οι ρυθμίσεις δίνονται από τις εξισώσεις (2.15), (2.16), και (2.17). Μέσω της επίλυσης του Προβλήματος Ροών Ισχύος, έχει προσδιοριστεί η ροή Q_{km} και επιπλέον, ισχύει η εξίσωση (2.39). Στην συνέχεια, προσδιορίζονται τα μέτρα και οι γωνίες των εσωτερικών τάσεων (4 συνολικά άγνωστοι ανά ΕΕΠΙ) για κάθε ΕΕΠΙ, λύνοντας για κάθε ΕΕΠΙ το σύστημα από τις μη γραμμικές εξισώσεις (2.33), (2.34), (2.35), (2.36). Το σύστημα μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση της μεθόδου Newton-Raphson.

Η αναπαράσταση του ΕΕΠΙ στο Σχήμα 2.5 είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός ΕΕΠΙ. Είναι εύκολη η επίλυση της ροής ισχύος, διότι το ΣΗΕ με ΕΕΠΙ ανάγεται σε ένα ΣΗΕ χωρίς ΕΕΠΙ, και διατηρείται η ακρίβεια του μοντέλου πηγών τάσης.

2.8. ΜΟΝΤΕΛΟ ΖΥΓΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΕΕΠΙ ΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Το μοντέλο προκύπτει άμεσα από το μοντέλο ζυγού παραγωγής και ζυγού φορτίου του ΕΕΠΙ και θα είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην συγκεκριμένη εργασία. Η χρήση του είναι βολική σε Προβλήματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο ζυγών παραγωγής του EEPI.

Σε ένα Πρόβλημα Βέλτιστης Ροής Ισχύος κάθε EEPI θα πρέπει να ελέγχει το μέτρο της μιγαδικής τάσης του ζυγού εγκατάστασής του και τις ροές ενεργού και αέργου της γραμμής μεταφοράς εγκατάστασής του, ώστε να εξασφαλιστεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Κατά συνέπεια, σε όλα τα Προβλήματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος μπορεί να γίνει χρήση του μοντέλου ζυγού παραγωγής και ζυγού φορτίου του EEPI, που φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Το κύκλωμα στο Σχήμα 2.6 είναι ισοδύναμο με το κύκλωμα στο Σχήμα 2.5, διότι ένα φορτίο ισοδυναμεί με μια γεννήτρια σταθερής παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος, όταν η ενεργός και η άεργος ισχύς που παράγει η γεννήτρια έχουν αντίθετο πρόσημο σε σχέση με αυτές που απορροφά το φορτίο.

Ο λόγος για την μετατροπή του κυκλώματος του Σχήματος 2.5 στο κύκλωμα του Σχήματος 2.6, είναι ότι οι υπάρχοντες αλγόριθμοι βέλτιστης ροής ισχύος δεν είναι προγραμματισμένοι να μπορούν να μεταβάλλουν φορτία, διότι τα φορτία θεωρούνται σταθερά σε Προβλήματα Βέλτιστης Ροής Ισχύος. Μετατρέποντας τον ζυγό φορτίου σε ζυγό παραγωγής, η παραγωγή μιγαδικής ισχύος του οποίου, μπορεί να μεταβληθεί από τον αλγόριθμο βέλτιστης ροής ισχύος, μπορεί να αξιοποιηθεί στο μέγιστο βαθμό ο έτοιμος και ιδιαίτερα αποδοτικός κώδικας των προγραμμάτων ανάλυσης ΣΗΕ. Μέσω της επίλυσης της βέλτιστης ροής ισχύος, θα προσδιοριστούν για κάθε EEPI οι βέλτιστες τιμές για το μέτρο της τάσης $V_{k,reg}$ του ζυγού k , και για τις ροές ισχύος $P_{mk,reg}$ και $Q_{mk,reg}$.

Με την επίλυση της βέλτιστης ροής ισχύος, επιτυγχάνεται η εύρεση όλων των μεγεθών του ΣΗΕ, πλην των ελεγχόμενων εσωτερικών τάσεων των EEPI. Οι εσωτερικές τάσεις κάθε EEPI μπορούν να βρεθούν λύνοντας το σύστημα εξισώσεων (2.25), (2.26), (2.27), και (2.28). Οι εσωτερικές μιγαδικές τάσεις κάθε EEPI προσαρμόζουν τις τιμές τους, ώστε τα μεγέθη που ελέγχει ο EEPI να έχουν τις βέλτιστες τιμές τους. Στην ουσία, η βέλτιστη ρύθμιση των εσωτερικών τάσεων αυτής της αναπαράστασης του EEPI γίνεται αυτόματα από τους ήδη υπάρχοντες αλγόριθμους επίλυσης του Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος.

Τα παραπάνω, οδήγησαν στη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου για την παρούσα εργασία. Συχνά, σε ερευνητικές εργασίες που αφορούν την προσεγγιστική επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με EEPI, η θέση και οι 4 ρυθμίσεις (2 μέτρα και 2 γωνίες εσωτερικών τάσεων) κάθε EEPI, θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές από τον προσεγγιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Όμως στην πραγματικότητα, βέλτιστες θέσεις και βέλτιστες ρυθμίσεις των EEPI είναι άρρηκτα συνδεδεμένες ως προς τις τιμές τους.

Επομένως, για την επίλυση κανονικών ροών ισχύος με ΕΕΡΙ, στους οποίους ελέγχονται και οι 3 παράμετροι, συμφέρει η χρήση του κυκλώματος του Σχήματος 2.5, ενώ για την επίλυση βέλτιστων ροών ισχύος συμφέρει η χρήση του κυκλώματος του Σχήματος 2.6.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

3.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πολλές διαδικασίες στη φύση γίνονται με τον βέλτιστο τρόπο. Για παράδειγμα, το φως κατά τη μετάβασή του από ένα σημείο σε ένα άλλο ταξιδεύει πάντοτε μέσω του μονοπατιού, το οποίο μπορεί να διασχιστεί σε ελάχιστο χρόνο (αρχή του Fermat). Επιπλέον, μέσω της φυσικής επιλογής εξασφαλίζεται ότι σε κάθε γενιά ενός είδους επιβιώνουν τα όντα με τον βέλτιστο συνδυασμό χαρακτηριστικών.

Γενικότερα η φύση έχει μια έμφυτη τάση να εκτελεί τις λειτουργίες της με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αυτό οδήγησε τους ερευνητές να χρησιμοποιήσουν τη φύση σαν πηγή έμπνευσης για τη δημιουργία προσεγγιστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, που μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να οδηγήσουν σε αποτελέσματα πολύ κοντά στα βέλτιστα.

Η σωστή τοποθέτηση και ρύθμιση των στοιχείων ΕΣΜ εξασφαλίζει ότι θα επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό όφελος από την εγκατάστασή τους. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν τα ΣΗΕ και ειδικά αυτά που είναι μεγάλου μεγέθους, αποτελεί ένα πεδίο συνεχούς έρευνας. Πολλές προσεγγίσεις έχουν δοκιμαστεί, με στόχο την εξοικονόμηση χρόνου και την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία των λύσεων. Η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως στη βελτίωση και τη χρήση των παρακάτω αλγορίθμων:

- Αναζήτηση με Περιορισμένο Αριθμό Καταστάσεων (Tabu Search)
- Γενετικοί Αλγόριθμοι
- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Η Αναζήτηση με Περιορισμένο Αριθμό Καταστάσεων είναι ένας αλγόριθμος που έχει ως κύριο πλεονέκτημα ότι δεν παγιδεύεται σε τοπικά ελάχιστα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης των προηγούμενων λύσεων που έχουν βρεθεί. Οι προηγούμενες λύσεις χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία περιορισμών, ώστε να αποφεύγονται τα τοπικά ελάχιστα [10]. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, εμπνευσμένοι από τη διαδικασία της φυσικής επιλογής, δημιουργούν έναν πληθυσμό λύσεων, τον οποίο ανανεώνουν, με στόχο κάθε γενιά από λύσεις να είναι καλύτερη από την προηγούμενη. Η ποιότητα των λύσεων εξασφαλίζεται επιτρέποντας μόνο στις καλύτερες λύσεις μιας γενιάς να περάσουν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη [11]. Ο Αλγόριθμος

Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΒΣΣ ή Particle Swarm Optimization Algorithm – PSO), στον οποίο επικεντρώνεται η εργασία, είναι εμπνευσμένος από την κίνηση ενός σμήνους ζωντανών οργανισμών που αναζητούν τροφή. Χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε προβλήματα τοποθέτησης στοιχείων ΕΣΜ [12], [13].

3.2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΒΣΣ

Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΒΣΣ) είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης που προτάθηκε από τους Dr. Eberhart και Dr. Kennedy το 1995 [14], [15].

Η πηγή έμπνευσής τους ήταν η συμπεριφορά ενός σμήνους ζωντανών οργανισμών, όπως τα πτηνά. Ο αλγόριθμος αυτός είναι εύκολος στην εφαρμογή του σε σχέση με άλλες τεχνικές παρόμοιου σκοπού, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, όπως η βελτιστοποίηση συναρτήσεων, ο έλεγχος ασαφών συστημάτων και η εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Ένα πολύ βασικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου αυτού και ο κύριος λόγος που εφαρμόζεται σε τόσους, ανεξάρτητους μεταξύ τους, τομείς είναι ότι δεν κάνει καμία υπόθεση για το πρόβλημα προς επίλυση. Μάλιστα, λόγω του αριθμού και του τρόπου κίνησης των σωματιδίων του σμήνους μπορούν να καλυφθούν μεγάλοι χώροι λύσεων.

Για να γίνει κατανοητός ο αλγόριθμος, μπορεί κάποιος να φανταστεί ένα σμήνος από περιστέρια, τα οποία μπορούν να κινούνται μέσα σε ένα τετράγωνο πλευράς a και ψάχνουν για τροφή. Ο συνολικός χώρος αναζήτησης είναι ίσος με το εμβαδόν του τετραγώνου, δηλαδή a^2 . Υπάρχει μόνο ένα κομμάτι τροφής μέσα στο τετράγωνο, το οποίο, από πλευράς βελτιστοποίησης, είναι το σημείο μεγίστου ή ελαχίστου που αναζητείται. Κάθε περιστέρι μπορεί να θυμάται τη δική του πρόοδο και παράλληλα να έχει επίβλεψη του τι κάνουν τα υπόλοιπα περιστέρια. Συνεπώς ξέρει τι πρόοδο έχουν κάνει τα άλλα περιστέρια στην αναζήτηση τροφής. Με τον όρο πρόοδο αναφέρεται το πόσο κοντά βρίσκεται το κάθε περιστέρι στην τροφή, δηλαδή πόσο μικρή είναι η καρτεσιανή του απόσταση από την τροφή. Διαισθητικά, μια καλή στρατηγική για κάθε περιστέρι είναι να ακολουθήσει το περιστέρι που έχει κάνει τη μεγαλύτερη πρόοδο, δηλαδή είναι πιο κοντά στην τροφή. Μια εναλλακτική στρατηγική είναι κάθε περιστέρι να εξερευνήσει πιο σχολαστικά τις περιοχές, στις οποίες η απόστασή του από την τροφή ήταν πιο μικρή σε σχέση με άλλες περιοχές που επισκέφθηκε. Η θεμελιώδης μονάδα της μέτρησης του χρόνου, το δευτερόλεπτο, θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε μια επανάληψη του αλγορίθμου.

Στην αρχή του ΑΒΣΣ δημιουργείται ένας αριθμός σωματιδίων, τα οποία είναι πιθανές λύσεις στο πρόβλημα προς βελτιστοποίηση. Στο παραπάνω παράδειγμα, τα περιστέρια συμβολίζουν τα σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να πάρουν την αρχική τους τιμή τυχαία ή να τους δοθούν αρχικές τιμές με βάση κάποια εκτίμηση για μια βέλτιστη λύση ή με βάση τη χρήση κάποιου άλλου αλγορίθμου. Σε κάθε επανάληψη (δηλαδή σε κάθε δευτερόλεπτο), κάθε σωματίδιο έχει μια θέση, η οποία είναι η πιθανή λύση που διαθέτει το σωματίδιο, και μια ταχύτητα. Η λύση που διαθέτει το σωματίδιο αξιολογείται σε κάθε επανάληψη με βάση μια

αντικειμενική συνάρτηση, κάτι το οποίο επιτρέπει την ποσοτικοποίηση και κατά συνέπεια τη σύγκριση της ποιότητας των λύσεων.

Κάθε σωματίδιο είναι ικανό να θυμάται τη βέλτιστη λύση που έχει βρει το ίδιο, καθώς και τη βέλτιστη λύση που έχει βρεθεί από όλο το σμήνος. Κάθε στιγμή, ανανεώνεται η θέση του σωματιδίου με βάση την ταχύτητά του, την προηγούμενη θέση του, τη βέλτιστη θέση του και τη βέλτιστη θέση του σμήνους.

Η ταχύτητα του σωματιδίου έχει σε κάθε επανάληψη τρεις συνιστώσες:

1. τη συνιστώσα αδράνειας
2. τη γνωσιακή συνιστώσα
3. την κοινωνική συνιστώσα

Η συνιστώσα αδράνειας εκφράζει τον βαθμό διατήρησης της ταχύτητας του σωματιδίου, αφού το σωματίδιο, όπως κάθε σώμα σε κίνηση, αντιστέκεται σε ένα βαθμό στην αλλαγή του διανύσματος της ταχύτητάς του.

Η γνωσιακή συνιστώσα τείνει να φέρει το σωματίδιο στη θέση, στην οποία έχει βρει το ίδιο την καλύτερη ποιοτικά λύση του. Είναι η δυνατότητα του σωματιδίου να σκεφτεί για τον εαυτό του, ανεξάρτητα από το υπόλοιπο σμήνος, και να αξιοποιήσει τη μνήμη του.

Η κοινωνική συνιστώσα εκφράζει την έμφυτη τάση που έχει κάθε ον να ακολουθήσει το υπόλοιπο σμήνος και κατευθύνει το σωματίδιο στην καλύτερη ποιοτικά λύση που έχει βρεθεί από το σύνολο των σωματιδίων.

Οι συντελεστές της κοινωνικής και της γνωσιακής συνιστώσας περιέχουν τυχαίους αριθμούς, οι τιμές των οποίων ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 1]$. Η ύπαρξή τους, μαζί με την τυχαία αρχικοποίηση των τιμών των σωματιδίων, παρέχει ένα στοχαστικό χαρακτήρα στον ΑΒΣΣ.

Ο αλγόριθμος σταματά όταν ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο, το οποίο είναι ο συνήθως να γίνει ένας προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων ή η πολύ μικρή μεταβολή των λύσεων όλων των σωματιδίων από κάποια επανάληψη και μετά. Στη δεύτερη περίπτωση, υπάρχει σύγκλιση του αλγορίθμου, δηλαδή τα σωματίδια μαζεύονται σε ομάδες γύρω από κάποια σημεία ελαχίστου. Στη συγκεκριμένη εργασία, κριτήριο τερματισμού θα είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, οι οποίες θα καθορίζονται από τον χρήστη.

Ο ΑΒΣΣ είναι ένας προσεγγιστικός αλγόριθμος και για αυτό τον λόγο δεν βρίσκει πάντα την βέλτιστη λύση, δηλαδή το ολικό ελάχιστο. Μπορεί να βρει ένα τοπικό ελάχιστο ή να μην συγκλίνει και καθόλου. Για αυτό τον λόγο είναι ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη της απόδοσης και της αξιοπιστίας του αλγορίθμου.

3.3. ΒΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΑΒΣΣ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα βήματα του ΑΒΣΣ. Ο ποιοτικός ρόλος κάθε παραμέτρου που υπεισέρχεται στην εκτέλεση του αλγορίθμου θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα. Τα βήματα του αλγορίθμου για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, όπως αυτό που μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία, είναι τα ακόλουθα:

1. Δημιουργία των σωματιδίων και αρχικοποίηση της θέσης και της ταχύτητάς τους με τυχαίες τιμές.
2. Δίνεται στο t η τιμή 1.
3. Δίνεται στο i η τιμή 1.
4. Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τη θέση (λύση) του σωματιδίου i .
5. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη από την ελάχιστη που έχει δει το σωματίδιο i μέχρι στιγμής, τότε τίθεται η τωρινή τιμή σαν ελάχιστη τιμή του σωματιδίου και αποθηκεύεται η τωρινή θέση του σωματιδίου.
6. Αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη από την ελάχιστη που έχει δει όλο το σμήνος μέχρι στιγμής, τότε τίθεται η τωρινή τιμή σαν ελάχιστη τιμή όλου του σμήνους και αποθηκεύεται η τωρινή θέση του σωματιδίου.
7. Υπολογισμός της νέα ταχύτητας του σωματιδίου από τη σχέση:

$$v_i(t+1) = w(t) \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [pbest_i(t) - x_i(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [gbest(t) - x_i(t)] \quad (3.1)$$

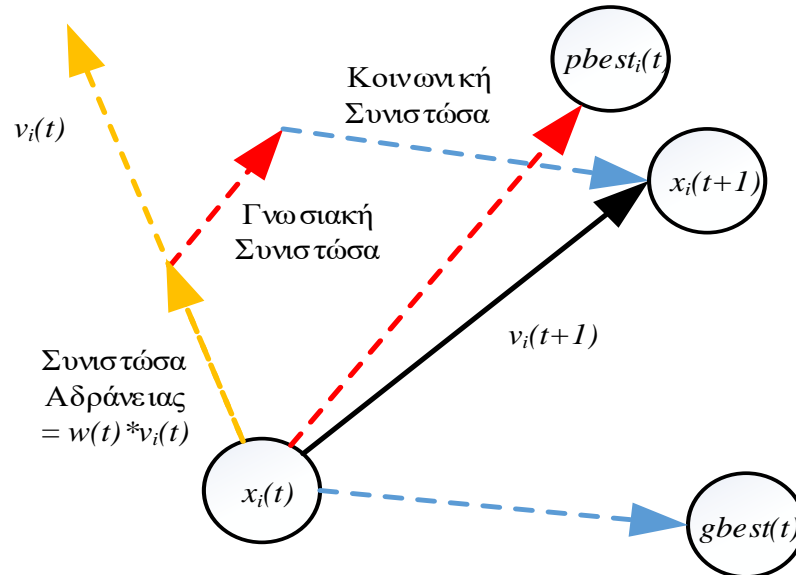
όπου t είναι ο αριθμός της επανάληψης, i είναι ο δείκτης του σωματιδίου, v_i είναι η ταχύτητα του σωματιδίου i , x_i είναι η θέση του σωματιδίου i , $pbest_i$ είναι η θέση της βέλτιστης τιμής του σωματιδίου i , $gbest$ είναι η θέση της βέλτιστης τιμής όλου του σμήνους, c_1, c_2 είναι οι συντελεστές επιτάχυνσης που έχουν σταθερή τιμή 2, r_1, r_2 είναι ομοιόμορφα κατανομημένοι τυχαίοι αριθμοί που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και υπολογίζονται μια φορά σε κάθε επανάληψη, και w είναι ο συντελεστής αδράνειας, που είναι συνάρτηση του αριθμού επανάληψης t , μειώνεται γραμμικά, και δίνεται από τη σχέση:

$$w(t) = w_{initial} + (w_{final} - w_{initial}) \cdot \frac{(t-1)}{(t_{max}-1)} \quad (3.2)$$

όπου $w_{initial} = 0,9$ είναι η αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας (για $t = 1$) και $w_{final} = 0,4$ είναι η τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας (για $t = t_{max}$).

8. Υπολογισμός της νέα θέσης του σωματιδίου από τη σχέση:

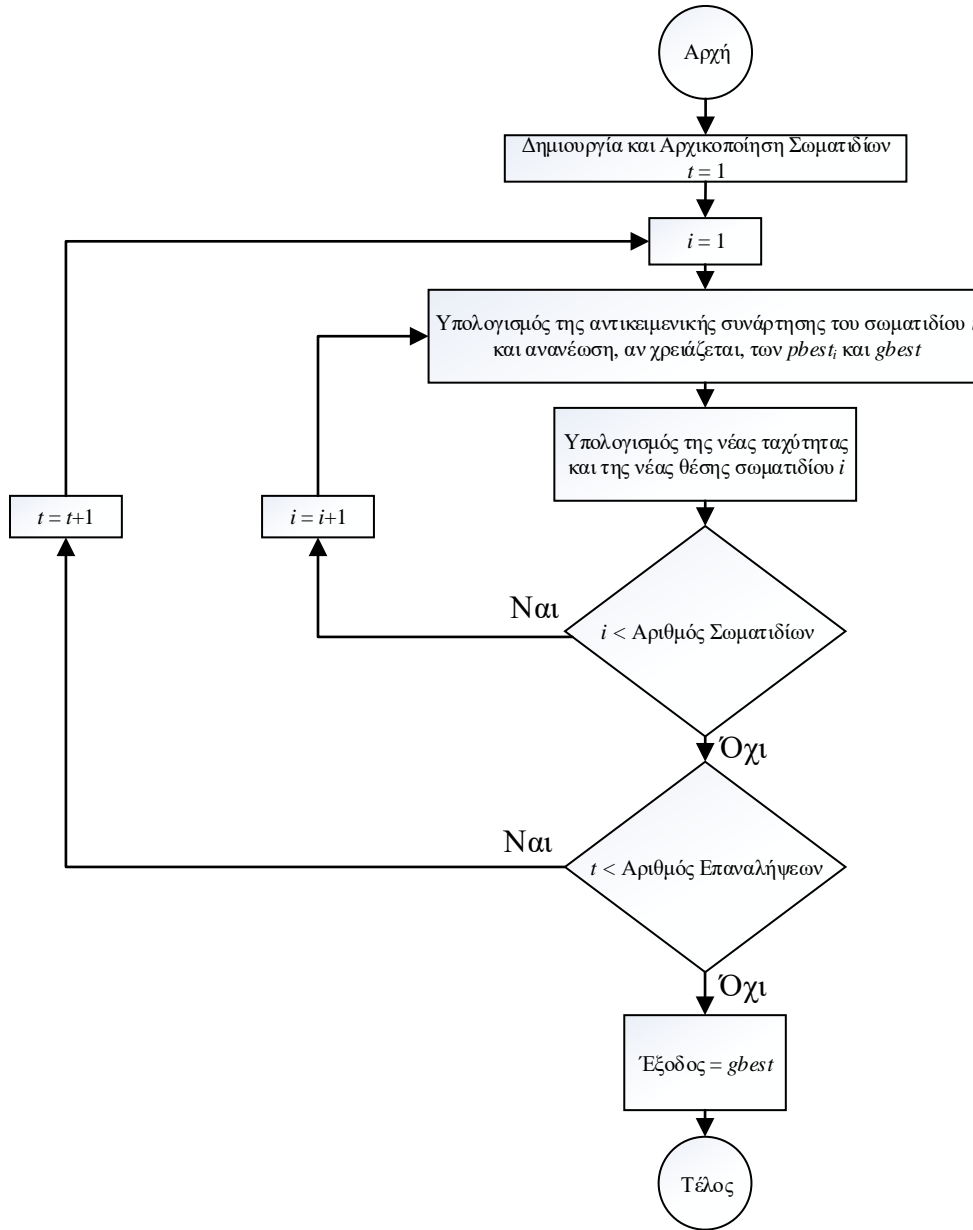
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.1: Συνιστώσες της ταχύτητας ενός σωματιδίου i την χρονική στιγμή $t+1$.

9. Αν το i είναι μικρότερο του συνολικού αριθμού των σωματιδίων, τότε αυξάνεται το i κατά 1 και επιστροφή στο βήμα 4.
10. Αν το t είναι μικρότερο του συνολικού αριθμού επαναλήψεων, τότε αυξάνεται το t κατά 1 και επιστροφή στο βήμα 3. Αν όχι, τότε τίθεται σαν έξοδος του ΑΒΣΣ η ελάχιστη τιμή που βρήκε το σμήνος, και η θέση στην οποία βρέθηκε.

Η ανανέωση της θέσης ενός σωματιδίου φαίνεται στο Σχήμα 3.1 και το διάγραμμα ροής του ΑΒΣΣ φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής του ΑΒΣΣ.

3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΑΒΣΣ ΠΟΥ ΕΞΑΡΤΩΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ

Τα βήματα εκτέλεσης του αλγορίθμου μένουν τα ίδια σε κάθε εκτέλεσή του. Όμως, ο χρήστης κάθε φορά που τον χρησιμοποιεί έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τις παραμέτρους του. Οι παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του αλγορίθμου και για αυτό

θα πρέπει να αναλυθεί ο ποιοτικός ρόλος που έχει κάθε παράμετρος στην εκτέλεση του αλγορίθμου. Οι βασικές παράμετροι του ΑΒΣΣ είναι οι παρακάτω:

- Αριθμός επαναλήψεων
- Αριθμός σωματιδίων
- Μέγιστη τιμή συνιστωσών ταχύτητας
- Συντελεστής αδράνειας
- Συντελεστές επιτάχυνσης

Οι παράμετροι αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

3.4.1. Αριθμός Επαναλήψεων

Η εύρεση του σωστού αριθμού επαναλήψεων απαιτεί δοκιμές και γενικά ποικίλει, ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Θα πρέπει πάντως, να είναι επαρκής ο αριθμός των επαναλήψεων, ώστε να αλγόριθμος να εξερευνήσει μεγάλη έκταση του χώρου των λύσεων, αλλά όχι πολύ μεγάλος ώστε να μην γίνεται σπατάλη χρόνου και υπολογιστικής δύναμης.

3.4.2. Αριθμός Σωματιδίων

Η κύρια συνεισφορά του μεγέθους του πλήθους των σωματιδίων εντοπίζεται στην πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου, αφού υπάρχει μια επιπλέον αρχική τιμή για κάθε επιπλέον αρχικό σωματίδιο. Δίνεται επομένως στον ΑΒΣΣ μια επιπλέον ευκαιρία να βρει μια καλή, από άποψη ποιότητας, τιμή. Σε επόμενες επαναλήψεις, λόγω της τάσης των σωματιδίων να συσσωρεύονται σε σημεία βέλτιστου, η συνεισφορά των επιπλέον σωματιδίων από άποψη ακρίβειας αρχίζει και φθίνει. Συνήθως ο αριθμός των σωματιδίων εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, ώστε να μην αυξάνεται χωρίς λόγο ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου [16].

3.4.3. Μέγιστη Τιμή Συνιστωσών Ταχύτητας

Ο χρήστης μπορεί να επιβάλλει άνω και κάτω όρια στην τιμή των συνιστωσών της ταχύτητας των σωματιδίων και κατά συνέπεια, στη δυνατότητα των συνιστωσών αυτών να μεταβάλλουν την θέση των σωματιδίων. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να επιθυμεί η ταχύτητα ενός σωματιδίου να οφείλεται περισσότερο στην αναζήτησή του για τη βέλτιστη λύση όλου του σμήνους και λιγότερο στην αναζήτησή του για τη βέλτιστη λύση του ίδιου του σωματιδίου. Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να μπουν πιο αυστηρά όρια στη γνωσιακή συνιστώσα ταχύτητας. Στη συγκεκριμένη εργασία δεν δόθηκαν περιορισμοί για καμία συνιστώσα της ταχύτητας, ώστε να εξασφαλιστεί η επαρκής εξερεύνηση του χώρου λύσεων.

3.4.4. Συντελεστής Αδράνειας

Με τον συντελεστή αδράνειας ο χρήστης επιλέγει το ποσοστό της ταχύτητας του σωματιδίου, που θα διατηρηθεί στην επόμενη επανάληψη του ΑΒΣΣ.

Για μικρές τιμές του συντελεστή αδράνειας, τα σωματίδια διατηρούν μικρό ποσοστό της προηγούμενης ταχύτητάς τους και επομένως μπορούν να αλλάξουν πιο εύκολα την κατεύθυνσή τους. Δηλαδή, προσαρμόζουν πιο εύκολα τη συμπεριφορά τους σε πιο καλές λύσεις που προκύπτουν από τις διαδοχικές επαναλήψεις. Μπορεί όμως να μην εξερευνηθεί επαρκής έκταση του χώρου των λύσεων και η αναζήτηση να δώσει σαν αποτέλεσμα ένα τοπικό και όχι το ολικό ελάχιστο.

Για μεγάλες τιμές του συντελεστή αδράνειας, τα σωματίδια δεν μπορούν να αλλάξουν ακαριαία την κατεύθυνση της κίνησής τους και συνεπώς επηρεάζονται περισσότερο από λύσεις που έχουν ήδη βρεθεί. Σε αυτή την περίπτωση, τα σωματίδια εξερευνούν μεγαλύτερο εύρος λύσεων, αλλά έχουν μεγαλύτερη δυσκολία να αλλάξουν την πορεία τους και να ψάξουν για καλές λύσεις, που ανακαλύφθηκαν πρόσφατα. Οπότε και σε αυτή την περίπτωση, το ολικό ελάχιστο μπορεί να προσπεραστεί. Άρα και για αυτόν τον συντελεστή χρειάζεται μια μέση λύση, η οποία να εξισορροπεί τον τρόπο κίνησης του σωματιδίου.

3.4.5. Συντελεστές Επιτάχυνσης

Οι συντελεστές επιτάχυνσης καθορίζουν αν το σωματίδιο θα ενδιαφέρεται περισσότερο για την παρελθοντική συμπεριφορά του σμήνους ή για τη δική του παρελθοντική συμπεριφορά. Αν για παράδειγμα, ο συντελεστής που αφορά το ολικό μέγιστο είναι μεγαλύτερος, τα σωματίδια θα έλκονται πιο πολύ από την καλύτερη λύση όλου του σμήνους, παρά από την καλύτερη λύση που έχουν βρει τα ίδια.

3.5. ΑΒΣΣ ΜΕ ΧΡΟΝΙΚΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ

Είναι σημαντικό τα σωματίδια να έχουν τα βέλτιστα δυνατά χαρακτηριστικά που τους προσδίδονται από τις τιμές των συντελεστών του ΑΒΣΣ. Αν η τιμή ενός συντελεστή είναι σταθερή σε κάθε επανάληψη, δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου και συνεπώς τα χαρακτηριστικά του τρόπου κίνησης κάθε σωματιδίου θα παραμένουν αμετάβλητα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, μπορούν να δοθούν στους συντελεστές τιμές, οι οποίες μεταβάλλονται γραμμικά με τον χρόνο από μια μέγιστη σε μια ελάχιστη τιμή [17].

Στη συγκεκριμένη εργασία, μόνο ο συντελεστής αδράνειας θα μεταβάλλεται σε κάθε επανάληψη. Ο συντελεστής αδράνειας θα μειώνεται γραμμικά, καθώς εκτελούνται περισσότερες επαναλήψεις. Με αυτόν τον τρόπο, στις αρχικές επαναλήψεις θα ενθαρρύνεται η εξερεύνηση του χώρου των λύσεων από τα σωματίδια. Καθώς περνάει ο χρόνος, ο συντελεστής αδράνειας θα μειώνεται παρέχοντας στα σωματίδια μεγαλύτερη ευελιξία στον τρόπο κίνησης και στην αλλαγή κατεύθυνσης. Παράλληλα, με μικρές τιμές του συντελεστή αδράνειας ενθαρρύνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου. Σε κάποιες εργασίες, οι συντελεστές επιτάχυνσης μειώνονται και αυτοί γραμμικά με τον χρόνο. Μετά από δοκιμές προέκυψε ότι η σταθερή τιμή τους σαν συνάρτηση του χρόνου οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για το πρόβλημα που μελετάται και για αυτό δεν προτιμήθηκε η χρονική μεταβολή τους.

3.6 ΧΕΙΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΚΤΟΣ ΟΡΙΩΝ ΛΥΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΒΣΣ

Πολλές φορές κάποιο στοιχείο της λύσης που περιέχεται σε ένα σωματίδιο ξεπερνάει τα αποδεκτά όρια, μέσα στα οποία κυμαίνεται η τιμή της λύσης. Είναι φανερή η ανάγκη για έναν τρόπο διόρθωσης τέτοιων καταστάσεων, χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση του χρήστη.

Η εργασία αυτή καθορίζει τις τιμές των ρυθμίσεων των ΕΕΡΠ και τις τιμές διαφόρων παραμέτρων του ΣΗΕ μέσα από τη βέλτιστη ροή ισχύος. Τα όρια τιμών για τις ροές ισχύος και τις τάσεις των ζυγών των ΕΕΡΠ, αλλά και για κάθε παράμετρο του ΣΗΕ, δίνονται μαζί με τα υπόλοιπα στοιχεία του ΣΗΕ τη στιγμή της κλήσης του αλγορίθμου και τηρούνται αυτόματα μέσω του αλγορίθμου βέλτιστης ροής ισχύος που τα λαμβάνει υπόψη κατά την εκτέλεσή του.

Τα μόνα όρια, για την εφαρμογή των οποίων θα πρέπει να υπάρξει ειδική μέριμνα κατά τη διαδικασία της δημιουργίας του αλγορίθμου, είναι τα στοιχεία των σωματιδίων να μην περιέχουν κλάδους με αριθμό μικρότερο του 1 ή με αριθμό μεγαλύτερο από τον αρχικό αριθμό κλάδων του δοσμένου ΣΗΕ. Αν ένα στοιχείο του σωματιδίου πάρει μια μη επιτρεπτή τιμή κλάδου, τότε σε αναλογία με άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης, του δίνεται η τιμή του ορίου που παραβιάστηκε, που είναι και η πιο κοντινή στην παρούσα μη επιτρεπτή τιμή του.

Μια εναλλακτική προσέγγιση θα ήταν να προστεθεί στη συνάρτηση κόστους μια συνιστώσα που παίρνει μηδενικές τιμές για επιτρεπτούς αριθμούς κλάδων και πολύ μεγάλες τιμές (ιδανικά άπειρες, πρακτικά πολύ μεγάλες σε σχέση με τις τιμές της συνάρτησης κόστους) για μη επιτρεπτούς αριθμούς κλάδων, οπότε τα σωματίδια θα οδηγούνται από μόνα τους, μέσω της ανανέωσης των θέσεών τους, στην περιοχή επιτρεπτών λύσεων και θα απωθούνται από τις μη επιτρεπτές περιοχές [12], [13]. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται για λόγους πληρότητας και δεν θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία αυτή, διότι δεν είναι απαραίτητη.

3.7. ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΕΚΤΕΛΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΒΣΣ

Φαινομενικά, το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό ενός αλγορίθμου που βρίσκει προσεγγιστικές λύσεις είναι το πόσο κοντά φτάνει στην πραγματική λύση σε μια εκτέλεσή του. Στην πραγματικότητα, όταν οι αρχικές τιμές που δίνονται στον αλγόριθμο είναι τυχαίες ή δίνονται με εκτιμήσεις του χρήστη, τότε μια εκτέλεση του αλγορίθμου δεν δίνει αρκετά στοιχεία για τον τρόπο λειτουργίας του. Είναι λογικό, να μελετηθεί η απόδοση του αλγορίθμου με καλές αρχικές τιμές, δηλαδή τιμές που είναι σχετικά κοντά στην πραγματική λύση. Για να επιτευχθεί η παραγωγή πιο ποιοτικών αρχικών τιμών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν βάση η διαπίστωση ότι η έξοδος του αλγορίθμου σε κάθε εκτέλεσή του θα επιτυγχάνει μικρότερο ή ίσο κόστος σε σχέση με τις αρχικές τιμές των σωματιδίων. Ακολουθώντας αυτή τη συλλογιστική πορεία, η τιμή, μέσω της οποίας επιτεύχθηκε ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους σε μια εκτέλεση του ΑΒΣΣ, χρησιμοποιείται σαν αρχική τιμή κάποιου πλήθους σωματιδίων στην επόμενη εκτέλεση του ΑΒΣΣ.

Αν επιλεγθεί μικρός αριθμός σωματιδίων με αυτή την αρχική τιμή, τότε είναι εγγυημένη η εύρεση μιας λύσης που είναι τουλάχιστον όσο καλή όσο η αρχική τιμή των σωματιδίων. Στα

υπόλοιπα σωματίδια δίνονται κανονικά τυχαίες αρχικές τιμές με στόχο να βρεθούν άλλα σημεία ελαχίστου.

Αν η τιμή που προέκυψε από την προηγούμενη εκτέλεση του αλγορίθμου δοθεί σαν αρχική τιμή σε μεγάλο αριθμό σωματιδίων, τότε είναι πιο πιθανή η εύρεση ενός ελαχίστου με πιο μικρή τιμή από το προηγούμενο, που όμως βρίσκεται σε μια μικρή περιοχή γύρω από το προηγούμενο. Συνεπώς το νέο ελάχιστο που βρέθηκε δεν θα είναι, κατά κανόνα, πολύ μικρότερο σε σχέση με το κοντινό του ελάχιστο. Σε αυτή την περίπτωση τα περισσότερα σωματίδια θα παραμείνουν και θα εξερευνήσουν σχολαστικά την περιοχή της αρχικής τιμής του και δεν θα υπάρξει επαρκής εξερεύνηση άλλων περιοχών.

Επομένως, είναι προτιμότερο η αρχικοποίηση με την τιμή που προέκυψε από την τελευταία εκτέλεση του αλγορίθμου να γίνεται για λίγα σωματίδια, διότι ένα σημαντικό μειονέκτημα του ΑΒΣΣ είναι η τάση του να παραμένει σε ένα τοπικό ελάχιστο που έχει ήδη βρεθεί και να μη βρεθεί το ολικό ελάχιστο.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΕΛΕΓΚΤΩΝ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένας βασικός στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία μίας μεθοδολογίας και ενός συνόλου προγραμμάτων που να εφαρμόζουν τον ΑΒΣΣ για την εύρεση των θέσεων και των ρυθμίσεων των ΕΕΡΙ που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται περιγραφή του προβλήματος και της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυσή του. Στην συνέχεια, εξηγείται η λειτουργία κάθε συνάρτησης που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Τέλος, παρουσιάζεται η απλότητα χρήσης του λογισμικού και ο τρόπος με τον οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα στον χρήστη, ενώ αναφέρονται και κάποιες πιθανές επεκτάσεις του λογισμικού.

4.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.2.1. Περιγραφή του Προβλήματος

Μια από τις δυνατότητες του ΕΕΡΙ είναι η μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το ποσοστό μείωσης του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τον αριθμό των εγκατεστημένων ΕΕΡΙ, την τοποθεσία τους και τις ρυθμίσεις του κάθε ΕΕΡΙ. Στην παρούσα εργασία αναζητούνται οι βέλτιστες θέσεις και οι βέλτιστες ρυθμίσεις των ΕΕΡΙ που ελαχιστοποιούν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια μεγιστοποιούν το οικονομικό όφελος από την εγκατάστασή τους.

4.2.2. Μεταβλητές Σχεδίασης

Δίνεται ένα ΣΗΕ και ένας αριθμός $N_{urfc_{max}}$.

Για το ΣΗΕ ορίζονται τα παρακάτω:

- N_b είναι ο αριθμός των ζυγών του ΣΗΕ

$-N_g$ είναι ο αριθμός των γεννητριών του ΣΗΕ

$-N_{br}$ είναι ο αριθμός των κλάδων του ΣΗΕ

Ζητείται η εύρεση ενός πίνακα x που αποτελείται από:

- τον πίνακα x_1 με διαστάσεις $N_{br} f c_{max} \times 6$, κάθε γραμμή του οποίου αντιπροσωπεύει έναν ΕΕΡΙ. Κάθε γραμμή του x_1 , περιέχει στην 1^η στήλη τον κλάδο και στη 2^η στήλη το άκρο (1 ή 2) του κλάδου εγκατάστασης του ΕΕΡΙ της γραμμής. Οι 4 στήλες της γραμμής που απομένουν, περιέχουν το μέτρο και την γωνία των 2 εσωτερικών μιγαδικών τάσεων του ΕΕΡΙ της γραμμής:

- Η 3^η στήλη το V_{cR} σε ανά μονάδα (pu)
- Η 4^η στήλη το δ_{cR} σε μοίρες (deg)
- Η 5^η στήλη το V_{vR} σε ανά μονάδα (pu)
- Η 6^η στήλη το δ_{vR} σε μοίρες (deg)

Από κάποια γραμμή και μετά ο πίνακας μπορεί να είναι μηδενικός, που σημαίνει πως εγκατάσταση πιο πολλών ΕΕΡΙ δεν προσφέρει επιπλέον μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

- τον πίνακα x_2 με διαστάσεις $2 \cdot (N_b + N_g) \times 1$, που περιέχει τα μέτρα (σε pu) και τις γωνίες (σε μοίρες) των τάσεων των N_b ζυγών ($2 \cdot N_b$ στοιχεία) και την παραγωγή ενεργού (σε pu) και αέργου ισχύος (σε pu) των N_g γεννητριών ($2 \cdot N_g$ στοιχεία).

4.2.3. Αντικειμενική Συνάρτηση

Ο πίνακας x της Ενότητας 4.2.2 πρέπει να ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f(x)$, όπου $f(x)$ είναι η συνάρτηση του κόστους παραγωγής, ενώ παράλληλα ικανοποιούνται κάποιες ανισότητες και ισότητες από τους αγνώστους. Κάθε ισότητα και ανισότητα είναι μια γραμμή του πίνακα $h(x)$. Δηλαδή:

$$\begin{aligned} & \min_x f(x) \\ & \text{υπό τους περιορισμούς:} \\ & A \leq h(x) \leq B \end{aligned}$$

Η $f(x)$ είναι το άθροισμα των συναρτήσεων κόστους καυσίμου για όλες τις γεννήτριες του ΣΗΕ:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_g} (a_{g_i} + b_{g_i} \cdot P_{g_i} + c_{g_i} \cdot P_{g_i}^2) \quad (4.1)$$

Σε οποιοδήποτε πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους παίζει ρόλο και το κόστος της λύσης που προτείνεται, γιατί δεν έχει νόημα να επιτευχθεί μείωση του κόστους λειτουργίας κατά ένα ποσό, αν πρέπει να ξοδευθούν περισσότερα χρήματα μακροπρόθεσμα, για την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης.

Η συνολική αξία του ΕΕΡΙ, για όλα τα χρόνια εγκατάστασής του (έστω n), θα βρεθεί σε € και για να γίνει μετατροπή των μονάδων σε €/h πρέπει το κόστος να διαιρεθεί με το $8760 \cdot n$, δηλαδή τις συνολικές ώρες λειτουργίας (8760 h/έτος). Λόγω της μεγάλης τιμής του παρονομαστή

προκύπτει, πως το κόστος του ΕΕΡΠ δεν αλλάζει σημαντικά το ωριαίο κόστος, οπότε σε αυτή την εργασία θα αγνοηθεί το συγκεκριμένο κριτήριο. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να αναφερθεί αυτό για λόγους πληρότητας.

4.2.4. Περιορισμοί

Σε ότι αφορά τα στοιχεία του πίνακα x_1 :

Τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα x_1 (δηλαδή η γραμμή μεταφοράς που θα εγκατασταθεί ο ΕΕΡΠ) θα πρέπει να είναι ακέραιοι αριθμοί στο διάστημα $[1, N_{br}]$. Κάθε στοιχείο της πρώτης στήλης του πίνακα x_1 θα πρέπει να εμφανίζεται μόνο μια φορά.

Τα στοιχεία της δεύτερης στήλης του πίνακα x_1 (δηλαδή η γραμμή μεταφοράς που θα εγκατασταθεί ο ΕΕΡΠ) θα πρέπει να έχουν τιμή 1 ή 2, όπου 1 σημαίνει ζυγός αναχώρησης, ενώ 2 σημαίνει ζυγός άφιξης της γραμμής μεταφοράς.

Οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε ΕΕΡΠ στο ΣΗΕ και κατά συνέπεια για τις 4 τελευταίες στήλες του x_1 είναι:

$$0,001 pu \leq V_{CR} \leq 0,6 pu \quad (4.2)$$

$$-180^\circ \leq \delta_{CR} \leq 180^\circ \quad (4.3)$$

$$0,9 pu \leq V_{vR} \leq 1,1 pu \quad (4.4)$$

$$-180^\circ \leq \delta_{vR} \leq 180^\circ \quad (4.5)$$

Σε ότι αφορά τα στοιχεία του πίνακα x_2 :

Οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε γεννήτρια g_i στο ΣΗΕ είναι η τήρηση των ορίων της παραγωγής ενεργού και άεργου ισχύος των γεννητριών:

$$P_{g_i}^{min} \leq P_{g_i} \leq P_{g_i}^{max} \quad (4.6)$$

$$Q_{g_i}^{min} \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^{max} \quad (4.7)$$

Οι ανισότητες που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε ζυγό i στο ΣΗΕ είναι η τήρηση των ορίων του μέτρου και της γωνίας των τάσεων των ζυγών:

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (4.8)$$

$$\varphi_i^{min} \leq \varphi_i \leq \varphi_i^{max} \quad (4.9)$$

Η ανισότητα που πρέπει να ικανοποιείται για κάθε γραμμή μεταφοράς $i - j$ στο ΣΗΕ είναι η τήρηση των ορίων της ροής ισχύος των γραμμών μεταφοράς:

$$-S_{ij}^{max} \leq S_{ij} \leq S_{ij}^{max} \quad (4.10)$$

Τα όρια για κάθε ηλεκτρικό μέγεθος που περιέχει ο πίνακας x_2 διαφέρουν σε κάθε ΣΗΕ.

Τέλος, πρέπει να τηρείται το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό k :

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 \cdot \left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] \quad (4.11)$$

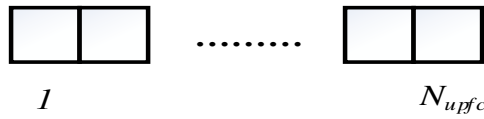
$$-V_k \cdot \sum_{m \neq k} V_m \cdot [g_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m)]$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 \cdot \left[b_k + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \right] - V_k \cdot \sum_{m \neq k} V_m \cdot [g_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (4.12)$$

4.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΒΣΣ

Για την επίλυση του προβλήματος θα γίνει εγκατάσταση N_{upfc} ΕΕΠΙ, όπου το N_{upfc} μπορεί να είναι οποιοσδήποτε ακέραιος στο διάστημα $[1, N_{upfc_{max}}]$. Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης θα εφαρμοστεί ο ΑΒΣΣ για κάθε δυνατή τιμή του N_{upfc} . Κάθε σωματίδιο (λύση) του ΑΒΣΣ θα είναι ένα διάνυσμα με N_{upfc} στοιχεία. Η δομή ενός σωματιδίου φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

Σωματίδιο



Σχήμα 4.1: Δομή σωματιδίου του ΑΒΣΣ για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης N_{upfc} ΕΕΠΙ.

Κάθε στοιχείο του σωματιδίου είναι πραγματικός αριθμός στο διάστημα $[1, N_{br} + 1)$. Το ακέραιο μέρος του στοιχείου με αριθμό m θα είναι ο κλάδος που θα τοποθετηθεί ο ΕΕΠΙ με αριθμό m . Αν το δεκαδικό μέρος του στοιχείου με αριθμό m είναι στο διάστημα $[0, 0.5)$, τότε ο ΕΕΠΙ με αριθμό m θα τοποθετείται στο άκρο 1 του κλάδου. Αν το δεκαδικό μέρος του στοιχείου με αριθμό m είναι στο διάστημα $[0.5, 1)$, τότε ο ΕΕΠΙ με αριθμό m θα τοποθετείται στο άκρο 2 του κλάδου. Κάθε στοιχείο του διανύσματος που χαρακτηρίζει το σωματίδιο, πρέπει να έχει διαφορετικό ακέραιο μέρος από τα υπόλοιπα, αφού το να εγκατασταθεί πάνω από ένας ΕΕΠΙ σε μια γραμμή μεταφοράς δεν θα οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε σωματίδιο του ΑΒΣΣ μπορεί να αποκτήσει τη μορφή του x_1 . Από τα παραπάνω προκύπτουν οι περιορισμοί που αφορούν το x_1 και παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2.4.

Πολλές δημοσιεύσεις χρησιμοποιούν τον ΑΒΣΣ για την εύρεση όχι μόνο των θέσεων των ΕΕΠΙ, αλλά και των ρυθμίσεών τους. Η καινοτομία της παρούσας εργασίας είναι ότι με τον τρόπο που αναπαριστά τον ΕΕΠΙ μπορεί να υπολογίζει τις ρυθμίσεις των ΕΕΠΙ που οδηγούν σε βέλτιστο αποτέλεσμα με τον κλασικό αλγόριθμο βέλτιστης ροής ισχύος που υπάρχει στο λογισμικό MATPOWER.

4.4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

4.4.1. Matlab και Matpower

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή είναι το Matlab [18] και η βιβλιοθήκη αρχείων που ονομάζεται Matpower [19], [20].

Το Matlab είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον, το οποίο μπορεί να εκτελέσει διάφορες εργασίες όπως οι πράξεις πινάκων, η ανάλυση και παράσταση δεδομένων και η εφαρμογή αλγορίθμων. Μπορεί να κάνει χρήση προγραμμάτων γραμμένων σε παρεμφερείς γλώσσες προγραμματισμού, όπως η C. Οι δυνατότητές του, καθώς και η πληθώρα των πιο εξειδικευμένων επιστημονικών πακέτων του, το κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμο για κάθε μηχανικό και επιστήμονα.

Ένα τέτοιο πακέτο, που αφορά την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, είναι το MATPOWER, το οποίο αποτελεί μια βιβλιοθήκη από συναρτήσεις, ειδικά φτιαγμένη ώστε να λύνει τα προβλήματα της ροής ισχύος και της βέλτιστης ροής ισχύος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Περιέχει προγράμματα ικανά να λύσουν προβλήματα ροών ισχύος πολλών ζυγών σε μικρό χρόνο και επιπλέον μπορεί να λύνει προβλήματα βέλτιστων ροών ισχύος με τη χρήση τετραγωνικού προγραμματισμού. Το MATPOWER αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez και άλλους καθηγητές του Πανεπιστημίου Cornell με στόχο να αποτελέσει ένα εργαλείο που να είναι χρήσιμο για τους μηχανικούς στην επίλυση των προβλημάτων της ροής ισχύος και της βέλτιστης ροής ισχύος, καθώς και για την εκπαίδευση των φοιτητών στα θέματα της ροής ισχύος και της βέλτιστης ροής ισχύος.

Η βιβλιοθήκη αυτή παίζει κομβικό ρόλο στην παρούσα εργασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στοιχεία (εξοπλισμός, τύπος ζυγών, κλπ) ενός ΣΗΕ δίνονται στο MATPOWER ως μια δομή δεδομένων που ονομάζεται case. Στην συνέχεια, όταν θα αναφέρεται πως μια είσοδος ή έξοδος ενός προγράμματος είναι ένα ΣΗΕ θα πρόκειται για μια δομή δεδομένων που περιέχει τα στοιχεία του ΣΗΕ.

4.4.2. Συναρτήσεις για την Επίλυση του Προβλήματος

Κύριο ρόλο στην εργασία παίζει η συνάρτηση **runopf.m** του Matpower που δέχεται σαν είσοδο ένα ΣΗΕ και βρίσκει τις μιγαδικές τάσεις των ζυγών και τις παραγωγές μιγαδικής ισχύος των γεννητριών, που εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συνάρτηση **runopf.m** επιστρέφει το ΣΗΕ με το ελάχιστο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και το ελάχιστο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε €/h.

Βοηθητικό ρόλο στην εργασία παίζει η συνάρτηση **fsolve.m** του Matlab, που δέχεται σαν είσοδο ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων και επιστρέφει τη λύση του.

Από τις συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν, ο χρήστης αλληλοεπιδρά άμεσα μόνο με δύο. Οι συναρτήσεις που αναπτύχθηκαν κατά την διάρκεια της εργασίας και δεν υπήρχαν ήδη στο Matpower είναι εννέα:

- Συνάρτηση **UseESAToFindOptimalUpfcLocations.m**

- Συνάρτηση **FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem.m**
- Συνάρτηση **UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m**
- Συνάρτηση **InstallUpfc.m**
- Συνάρτηση **FindOptimalUpfcSettings.m**
- Συνάρτηση **CreateUpfcEquations.m**
- Συνάρτηση **FindBranchNumberFromBranchBuses.m**
- Συνάρτηση **FindSameBranches.m**
- Συνάρτηση **ReplaceSameBranches.m**

4.4.2.1. Συνάρτηση **UseESAToFindOptimalUpfcLocations.m**

Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί την πρώτη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης των ΕΕΠΙ, δηλαδή υλοποιεί τον αλγόριθμο της εξαντλητικής αναζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση αυτή ελέγχει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς κλάδων και άκρων τοποθέτησης για τους ΕΕΠΙ σε ένα ΣΗΕ. Οι επαναλήψεις είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγονται οι συνδυασμοί που περιέχουν ίδιους κλάδους, αλλά και οι συνδυασμοί που δεν είναι ταξινομημένοι σε αύξουσα σειρά. Η συνάρτηση επιστρέφει το ΣΗΕ, με εγκατεστημένους τους ΕΕΠΙ και την ελάχιστη δυνατή τιμή του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρέθηκε. Η συνάρτηση βρίσκει πάντα το σωστό αποτέλεσμα και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της δεύτερης μεθόδου επίλυσης του ίδιου προβλήματος, δηλαδή του ΑΒΣΣ.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **UseESAToFindOptimalUpfcLocations.m**:

- **runopf.m**
- **FindBranchNumberFromBranchBuses.m**

4.4.2.2. Συνάρτηση **FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem.m**

Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί τη δεύτερη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης των ΕΕΠΙ, με τον ΑΒΣΣ. Η συνάρτηση αυτή είναι η πρώτη, από τις δύο συνολικά συναρτήσεις, που καλεί άμεσα ο χρήστης. Η συνάρτηση βρίσκει τις θέσεις των ΕΕΠΙ που ελαχιστοποιούν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καλώντας τη συνάρτηση **UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m**. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το ΣΗΕ, τον μέγιστο αριθμό ΕΕΠΙ και τον αριθμό των επαναλήψεων και των σωματιδίων του ΑΒΣΣ που θα χρησιμοποιηθούν. Στην ουσία, η συνάρτηση απλά εκτελεί έναν επαναληπτικό βρόχο που καλεί την συνάρτηση **UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m** για κάθε $Nupfc$ στο διάστημα $[1, Nupfc_{max}]$. Έξοδος της συνάρτησης είναι το ΣΗΕ με τους ΕΕΠΙ εγκατεστημένους και το ελάχιστο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που επιτεύχθηκε, σε €/h. Επιπλέον εμφανίζεται στην οθόνη ένας πίνακας με διαστάσεις $Nupfc \times 2$ που περιέχει τον κλάδο και το άκρο του κλάδου που πρέπει να εγκατασταθεί ο κάθε ΕΕΠΙ στο αρχικό ΣΗΕ. Τέλος, παρουσιάζονται στον χρήστη το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε €/h, πριν και μετά την εγκατάσταση των ΕΕΠΙ.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem.m**:

- **UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m**

4.4.2.3. Συνάρτηση UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιεί τον ΑΒΣΣ, με το όριο επαναλήψεων που δόθηκε από τον χρήστη και τον αριθμό σωματιδίων που δόθηκε από τον χρήστη, για να βρει τις θέσεις των *Nupfc* ΕΕΠΙ που ελαχιστοποιούν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα σωματίδια είναι διανύσματα μήκους *Nupfc*. Η συνάρτηση ακολουθεί πιστά τα βήματα που περιγράφονται στην Ενότητα 3.3.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **UsePSOAToFindOptimalUpfcLocations.m**:

- **runopf.m,**
- **FindBranchNumberFromBranchBuses.m,**
- **FindSameBranches.m, ReplaceSameBranches.m,**
- **InstallUpfc.m**

4.4.2.4. Συνάρτηση InstallUpfc.m

Η συνάρτηση αυτή εγκαθιστά τον ΕΕΠΙ, προσθέτοντας έναν επιπλέον βοηθητικό ζυγό στο ΣΗΕ, που είναι το δεύτερο άκρο (ζυγός *m* του Σχήματος 2.3) του εγκατεστημένου ΕΕΠΙ. Μετατρέπει τα δύο άκρα του ΕΕΠΙ σε ζυγούς παραγωγής, ώστε να γίνει αξιοποίηση του έτοιμου κώδικα για την επίλυση του Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Ισχύος του MATPOWER. Η συνάρτηση τοποθετεί τους νέους ζυγούς παραγωγής στις σωστές θέσεις του πίνακα γεννητριών του ΣΗΕ και προσθέτει την ισότητα ενεργού ισχύος στα άκρα του ΕΕΠΙ στον πίνακα με τις δεσμεύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **InstallUpfc.m**:

- **FindBranchNumberFromBranchBuses.m**

4.4.2.5. Συνάρτηση FindOptimalUpfcSettings.m

Η συνάρτηση αυτή είναι η δεύτερη και τελευταία από τις δύο συνολικά συναρτήσεις που καλεί άμεσα ο χρήστης. Μετά τη χρήση της συνάρτησης **FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem.m**, οι θέσεις εγκατάστασης των ΕΕΠΙ δίνονται στον χρήστη. Η συνάρτηση αυτή δίνει στον χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει τη γραμμή στην οποία βρίσκεται ο ΕΕΠΙ που τον ενδιαφέρει. Η συνάρτηση βρίσκει τις ρυθμίσεις του ΕΕΠΙ, του οποίου η γραμμή επιλέχθηκε, δηλαδή τα μέτρα και τις γωνίες των εσωτερικών μιγαδικών τάσεών του. Οι ρυθμίσεις αυτές θα εξαρτώνται και από τις σύνθετες αγωγιμότητες του εκάστοτε ΕΕΠΙ. Κάθε φορά, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει διαφορετικές τιμές για τις σύνθετες αγωγιμότητες του ΕΕΠΙ, αφού ανάλογα με το ποιο μοντέλο ΕΕΠΙ επιλέξει να αγοράσει και να εγκαταστήσει, αλλάζουν και οι σύνθετες αγωγιμότητες. Η εύρεση των παραμέτρων γίνεται λύνοντας τις 4 εξισώσεις, που δημιουργήθηκαν από τη συνάρτηση **CreateUpfcEquations.m**, μέσω της συνάρτησης **fsolve.m**.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **FindOptimalUpfcSettings.m**:

- **fsolve.m**
- **CreateUpfcEquations.m**

4.4.2.6. Συνάρτηση **CreateUpfcEquations.m**

Η συνάρτηση αυτή δέχεται σαν είσοδο τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών του ΕΕΠΙ, καθώς και τις 4 ροές ισχύος του. Έτσι δημιουργεί τις εξισώσεις (2.33), (2.34), (2.35), και (2.36), ώστε να βρεθούν οι ρυθμίσεις του ΕΕΠΙ από τη συνάρτηση **FindOptimalUpfcSettings.m**, μέσω της **fsolve.m**.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **CreateUpfcEquations.m**:

- καμία

4.4.2.7. Συνάρτηση **FindBranchNumberFromBranchBuses.m**

Η συνάρτηση αυτή δέχεται σαν είσοδο δύο ζυγούς και βρίσκει τον αριθμό του κλάδου, που έχει αυτούς τους ζυγούς σαν άκρα του. Μέσω των στοιχείων του σωματιδίου επιλέγονται οι κλάδοι εγκατάστασης του ΕΕΠΙ. Μετά από κάθε εγκατάσταση ΕΕΠΙ, γίνεται προσθήκη δύο νέων κλάδων και η αρίθμηση των κλάδων στις περισσότερες περιπτώσεις αλλάζει, ώστε να διατηρείται η σωστή σειρά τους. Για αυτό τον λόγο, αποθηκεύονται οι ζυγοί ανάμεσα στους οποίους θα εγκατασταθεί ο ΕΕΠΙ και στη συνέχεια βρίσκεται ο σωστός κλάδος μέσω αυτής της συνάρτησης. Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **FindBranchNumberFromBranchBuses.m**:

- καμία

4.4.2.8. Συνάρτηση **FindSameBranches.m**

Η συνάρτηση αυτή έχει στόχο την εύρεση ίδιων κλάδων, δηλαδή ίδιων ακέραιων μερών στοιχείων, μέσα στα *Nupfc* στοιχεία ενός σωματιδίου. Στην συνέχεια, αν βρέθηκαν δύο στοιχεία με ίδια ακέραια μέρη, εκτελείται η συνάρτηση **ReplaceSameBranches.m**.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **FindSameBranches.m**:

- καμία

4.4.2.9. Συνάρτηση **ReplaceSameBranches.m**

Η συνάρτηση αυτή αντικαθιστά τους ίδιους κλάδους που έχουν βρεθεί στο σωματίδιο, με τους πιο κοντινούς τους.

Συναρτήσεις που καλούνται από τη συνάρτηση **ReplaceSameBranches.m**:

- καμία

4.4.3. Εκτέλεση και Αποτελέσματα του Λογισμικού

Ο χρήστης εκτελεί την πρώτη συνάρτηση με την εντολή **FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem(Case_{noupfc}, N_{upfcmax}, N_{iterationmax}, N_{particlemax})** όπου:

- $Case_{\text{powerfc}}$ είναι το όνομα του case που περιέχει το επιθυμητό ΣΗΕ
- $N_{\text{iterationmax}}$ είναι ο επιθυμητός αριθμός των επαναλήψεων του ΑΒΣΣ
- $N_{\text{particlemax}}$ είναι ο επιθυμητός αριθμός των σωματιδίων του ΑΒΣΣ
- N_{upfcmax} είναι ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός των ΕΕΠΙ

```
>> a=aFindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem('case39',30,30,2);
```

Σχήμα 4.2: Εντολή για την εύρεση βέλτιστων θέσεων 2 ΕΕΠΙ στο ΣΗΕ 39 ζυγών χρησιμοποιώντας τον ΑΒΣΣ με 30 επαναλήψεις και 30 σωματίδια.

```
Minimum Generation Cost Before UPFC Installation In €/h
ans =
    3.3491e+04
Minimum Generation Cost After UPFC Installation In €/h
ans =
    3.3479e+04
UPFC Locations
Branch Number And Side
ans =
     4     1
     6     2
Elapsed time is 73.378490 seconds.
```

Σχήμα 4.3: Έξοδος της συνάρτησης εύρεσης βέλτιστων θέσεων των ΕΕΠΙ.

Για παράδειγμα, για την εύρεση των βέλτιστων θέσεων 2 ΕΕΠΙ με τον ΑΒΣΣ με 30 επαναλήψεις και 30 σωματίδια στο ΣΗΕ 39 ζυγών του MATPOWER, ο χρήστης δίνει την εντολή του Σχήματος 4.2. Η συνάρτηση εμφανίζει στην οθόνη το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε €/h, πριν και μετά την εγκατάσταση των ΕΕΠΙ και τις θέσεις των ΕΕΠΙ, δηλαδή τον

κλάδο εγκατάστασης και το άκρο του κλάδου (1 ή 2) εγκατάστασης του κάθε EEPI. Η συνάρτηση επιστρέφει σαν αποτέλεσμα το ΣΗΕ που περιέχει εγκατεστημένους τους EEPI. Επίσης, δείχνει στον χρήστη τον χρόνο εκτέλεσης. Η έξοδος του προγράμματος φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο 1^{ος} EEPI τοποθετήθηκε στο άκρο 1 του κλάδου 4 και ο 2^{ος} EEPI τοποθετήθηκε στο άκρο 2 του κλάδου 6.

Στην συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να καλέσει τη συνάρτηση `FindOptimalUpfcSettings(Casewithupfc, Nupfc, Branchupfc, Sideupfc, bcR, bvR)` όπου:

- `Casewithupfc` είναι το ΣΗΕ με εγκατεστημένους τους EEPI (η έξοδος της συνάρτησης `FindOptimalUpfcLocationsInPowerSystem`)
- `Nupfc` είναι ο αριθμός του EEPI, του οποίου επιθυμεί να μάθει τις ρυθμίσεις
- `Branchupfc` είναι ο κλάδος εγκατάστασης του EEPI
- `Sideupfc` είναι η πλευρά του κλάδου εγκατάστασης του EEPI
- `bcR, bvR` οι τιμές των φανταστικών μερών των σύνθετων αγωγιμοτήτων του EEPI

Καλώντας αυτή τη συνάρτηση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4, παρουσιάζονται στον χρήστη οι ζυγοί εγκατάστασης και τα μέτρα και οι γωνίες των εσωτερικών μιγαδικών τάσεων του επιλεγμένου EEPI (τα μέτρα των τάσεων δίνονται σε ανά μονάδα και οι γωνίες των τάσεων σε μοίρες), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

```
>> aFindOptimalUpfcSettings('case39',1,4,1,a,-10,-10);
```

Σχήμα 4.4: Εντολή για την εύρεση βέλτιστων ρυθμίσεων του EEPI που βρίσκεται στην πλευρά 1 του κλάδου 4 του ΣΗΕ 39 ζυγών.


```

For UPFC
ans =
    1
UPFC Old Branch k-m
ans =
    2    25
UPFC New Branch k-m
ans =
    2    40
Vc (pu) δc (deg) Vv (pu) δv (deg)
ans =
    0.0411 -123.8390    0.9784    -6.1224

```

Σχήμα 4.5: Έξοδος του προγράμματος εύρεσης βέλτιστων ρυθμίσεων για τον ΕΕΡΙ που βρίσκεται στην πλευρά 1 του κλάδου 4 του ΣΗΕ 39 ζυγών.

4.4.4. Πιθανές Επεκτάσεις του Λογισμικού

Οι συναρτήσεις που παρουσιάστηκαν αποτελούν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση ΣΗΕ με ΕΕΡΙ. Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται πιθανές βελτιώσεις σε αυτές.

Αρχικά θεωρήθηκε ότι οι απώλειες του ΕΕΡΙ είναι μηδενικές, που δεν ισχύει πάντα. Αν η αγωγιμότητα του ΕΕΡΙ έχει και πραγματικό μέρος, τότε υπάρχουν και ωμικές απώλειες. Το πρόβλημα που προκύπτει, αν θεωρηθεί ότι υπάρχουν ωμικές απώλειες, οφείλεται στο ότι ο ΕΕΡΙ πλέον ανταλλάσσει ενεργό ισχύ με το ΣΗΕ. Σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται τροποποίηση και του αλγορίθμου βέλτιστης ροής ισχύος, εσωτερικά ή εξωτερικά, του MATPOWER. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι για τυπικές τιμές του πραγματικού μέρους της αγωγιμότητας του ΕΕΡΙ, το αποτέλεσμα αλλάζει μόνο από το 3^ο δεκαδικό ψηφίο και μετά. Μια άλλη λύση, που δεν απαιτεί καμία τροποποίηση στο λογισμικό, είναι να θεωρηθεί πως οι απώλειες ενεργού ισχύος, που οφείλονται στα πραγματικά μέρη των σύνθετων αντιστάσεων του ΕΕΡΙ, καλύπτονται από τις εσωτερικές πηγές τάσης του ΕΕΡΙ και όχι από τις γεννήτριες του ΣΗΕ.

Μπορούν ακόμα να προστεθούν επιπλέον συναρτήσεις κόστους μέσω του MATPOWER. Η πιο λογική συνέχεια του προγράμματος είναι να περιλαμβάνεται στην αντικειμενική συνάρτηση κόστους και η συνάρτηση κόστους του ΕΕΡΙ. Το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό, είτε ληφθεί υπόψη το κόστος των ΕΕΡΙ είτε όχι, αλλά αν απαιτείται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια, τότε είναι μια λογική προσθήκη. Άλλες αντικειμενικές συναρτήσεις κόστους που θα μπορούσαν να προστεθούν είναι:

- το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των μέτρων των τάσεων από το ένα ανά μονάδα, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια τάσης στους ζυγούς
- το άθροισμα των λόγων ροής ενεργού ισχύος κάθε γραμμής, προς τη μέγιστη ροή ενεργού ισχύος που επιτρέπει η γραμμή, που επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της συμφόρησης στις γραμμές μεταφοράς.

Αλλαγές θα μπορούσαν να γίνουν και στον τρόπο εφαρμογής του ΑΒΣΣ. Μια τροποποίηση είναι η αλλαγή όλων των συντελεστών (αδράνειας και επιτάχυνσης) σε κάθε επανάληψη, όχι μόνο του συντελεστή αδράνειας. Σε ορισμένες δημοσιεύσεις [13] και ο αριθμός N_{upfc} είναι μέρος του σωματιδίου, το οποίο μειώνει ελαφρώς την αξιοπιστία του ΑΒΣΣ, αλλά μειώνει δραστικά τον χρόνο εκτέλεσης του, ειδικά για ΣΗΕ μεγάλης κλίμακας με πολλούς ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

5.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα ΣΗΕ που χρησιμοποιήθηκαν για τις απαιτούμενες δοκιμές και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές. Αρχικά, εφαρμόστηκαν ο Αλγόριθμος Εξαντλητικής Αναζήτησης (ΑΕΑ) και ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΒΣΣ) σε ΣΗΕ 5, 39 και 118 ζυγών. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο προσεγγίσεων. Μελετήθηκαν 3 διαφορετικά ΣΗΕ και συνολικά 4 περιπτώσεις:

- ΣΗΕ 5 ζυγών και εγκατάσταση ενός ΕΕΡΠ
- ΣΗΕ 5 ζυγών και εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ
- ΣΗΕ 39 ζυγών και εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ
- ΣΗΕ 118 ζυγών και εγκατάσταση τριών ΕΕΡΠ

Για κάθε μια περίπτωση, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ΑΕΑ, καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών του ΑΒΣΣ και η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων του ΑΒΣΣ. Για όλους τους ΕΕΡΠ και σε όλες τις περιπτώσεις, έχει θεωρηθεί ότι:

- $y_{cR} = y_{vR} = -j \cdot 10 \text{ pu}$

Στη συγκεκριμένη εργασία ως ποσοστό επιτυχίας του ΑΒΣΣ ορίζεται το πλήθος των δοκιμών, στις οποίες ο ΑΒΣΣ βρήκε τη βέλτιστη λύση (ίδια με τη λύση του ΑΕΑ) δια τις συνολικές δοκιμές του ΑΒΣΣ που έγιναν.

Εκτός των δοκιμών που είναι κοινές και έγιναν για κάθε μια από τις παραπάνω 4 περιπτώσεις, επιπλέον έγιναν και οι παρακάτω δοκιμές για τα ΣΗΕ 39 και 118 ζυγών:

-Για το ΣΗΕ των 39 ζυγών μελετήθηκε η ευαισθησία του αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς:

- τον αριθμό των επαναλήψεων
- τον αριθμό των σωματιδίων
- τον συντελεστή επιτάχυνσης c_1
- τον συντελεστή επιτάχυνσης c_2
- την αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$
- την τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final}

Στη συγκεκριμένη εργασία, ως ευαισθησία ενός μεγέθους $g(x)$ ως προς ένα μέγεθος x θα θεωρηθεί η τιμή του μεγέθους $g(x)$ όταν μεταβληθεί το μέγεθος x κατά Δx . Δηλαδή, θα θεωρηθεί ως ευαισθησία του μεγέθους $g(x)$ ως προς ένα μέγεθος x το $g(x+\Delta x)$.

-Για το ΣΗΕ των 118 ζυγών υπολογίστηκε το ποσοστό επιτυχίας όταν σαν αρχική τιμή ενός σωματιδίου του ΑΒΣΣ δόθηκε η καλύτερη λύση που υπολογίστηκε κατά την προηγούμενη εκτέλεση του ΑΒΣΣ, σύμφωνα με την Ενότητα 3.7.

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν σε Η/Υ με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel(R) Core(TM) i7-6500U 2.50 GHz
- Μνήμη RAM 16 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10 Pro 64 bit

5.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 5 ΖΥΓΩΝ

5.2.1. Δεδομένα Συστήματος 5 Ζυγών

Η βασική ισχύς του ΣΗΕ είναι 100 MVA. Η βασική τάση του ΣΗΕ είναι 100 kV. Το ΣΗΕ 5 ζυγών περιέχει δύο όμοιες γεννήτριες που έχουν την ακόλουθη συνάρτηση ωριαίου κόστους καυσίμου:

$$C = 48 + 2,72 \cdot P + 0,0032 \cdot P^2$$

όπου P σε MW και C σε €/h.

- Η ελάχιστη ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας είναι 10 MW.
- Η μέγιστη ενεργός παραγωγή κάθε γεννήτριας είναι 200 MW.
- Η ελάχιστη άεργος παραγωγή κάθε γεννήτριας είναι -300 MVAR.
- Η μέγιστη άεργος παραγωγή κάθε γεννήτριας είναι 300 MVAR.

Στον ζυγό αναφοράς και σε όλους τους ζυγούς παραγωγής και φορτίου, τα μέτρα των τάσεων δεν λαμβάνουν σταθερές τιμές, αλλά είναι μεταβλητά, έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση, δηλαδή να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό ωριαίο κόστος καυσίμου. Τα μέτρα των τάσεων μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή, ανάμεσα σε μία ελάχιστη και σε μία μέγιστη τιμή που φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα δεδομένα των ζυγών. Στον Πίνακα 5.3 φαίνονται τα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ 5 ζυγών.

Πίνακας 5.1: Όρια των μέτρων μιγαδικής τάσης των ζυγών για το ΣΗΕ 5 ζυγών.

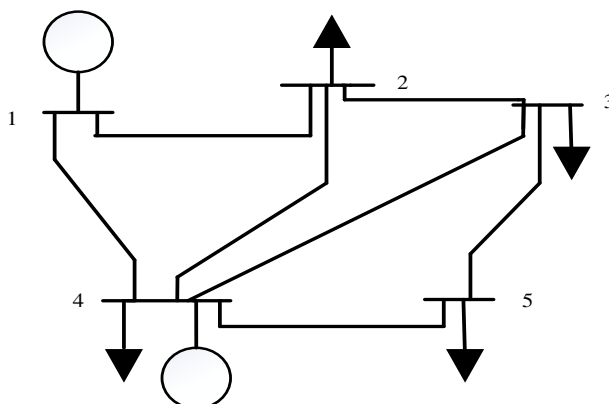
Ζυγός	Ελάχιστο Μέτρο Τάσης V_{min} (pu)	Μέγιστο Μέτρο Τάσης V_{max} (pu)
1	0,9	1,5
2	0,9	1,1
3	0,9	1,1
4	0,9	1,1
5	0,9	1,1

Πίνακας 5.2: Δεδομένα των ζυγών για το ΣΗΕ 5 ζυγών.

Ζυγός	Είδος	Ενεργός Ισχύς Φορτίου P_D (pu)	Αεργός Ισχύς Φορτίου Q_D (pu)
1	Αναφοράς	0,00	0,00
2	Φορτίου	0,45	0,15
3	Φορτίου	0,40	0,05
4	Παραγωγής	0,20	0,10
5	Φορτίου	0,60	0,10

Πίνακας 5.3: Δεδομένα των γραμμών μεταφοράς για το ΣΗΕ 5 ζυγών.

Γραμμή	Από τον Ζυγό	Προς τον Ζυγό	R (pu)	X (pu)	B (pu)
L1	1	2	0,08	0,24	0,05
L2	1	4	0,02	0,06	0,06
L3	2	3	0,01	0,03	0,02
L4	2	4	0,06	0,18	0,04
L5	3	4	0,06	0,18	0,04
L6	3	5	0,08	0,24	0,05
L7	4	5	0,04	0,12	0,03

**Σχήμα 5.1:** Μονογραμμικό διάγραμμα ΣΗΕ 5 ζυγών.

5.2.2. Αποτελέσματα για Έναν ΕΕΠΙ

Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός ΕΕΠΙ ($N_{urfc_{max}}$): 1

5.2.2.1. Γενικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όταν στο ΣΗΕ 5 ζυγών πρόκειται να εγκατασταθεί ένας ΕΕΠΙ.

Με τη βοήθεια της συνάρτησης βέλτιστης ροής ισχύος του λογισμικού MATPOWER υπολογίστηκε ότι, πριν την εγκατάσταση του ΕΕΠΙ, το ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 598,381 €/h.

Στον Πίνακα 5.4 φαίνονται τα αποτελέσματα του ΑΕΑ, όταν εγκατασταθεί ένας ΕΕΠΙ. Από τον Πίνακα 5.4 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την εγκατάσταση ενός ΕΕΠΙ, το ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έγινε 598,260 €/h και συνεπώς μειώθηκε κατά 0,121 €/h, δηλαδή κατά 0,02 %, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος πριν την εγκατάσταση του ΕΕΠΙ.
- Για να βρει το παραπάνω αποτέλεσμα ο ΑΕΑ χρειάστηκε 0,52 s.
- Για να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα (μείωση του ωριαίου κόστους κατά 0,02 %), ο ΕΕΠΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 2 της γραμμής μεταφοράς 1–2.

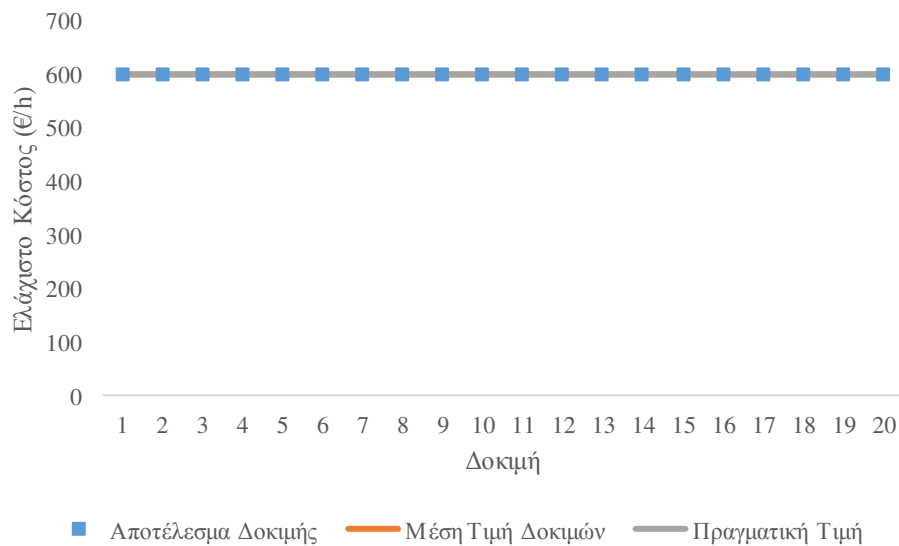
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα του ΑΕΑ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση ενός ΕΕΠΙ.

Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο ΕΕΠΙ	1–2
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο ΕΕΠΙ	2 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο ΕΕΠΙ	2
Ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (€/h)	598,260
Χρόνος εκτέλεσης (s)	0,52

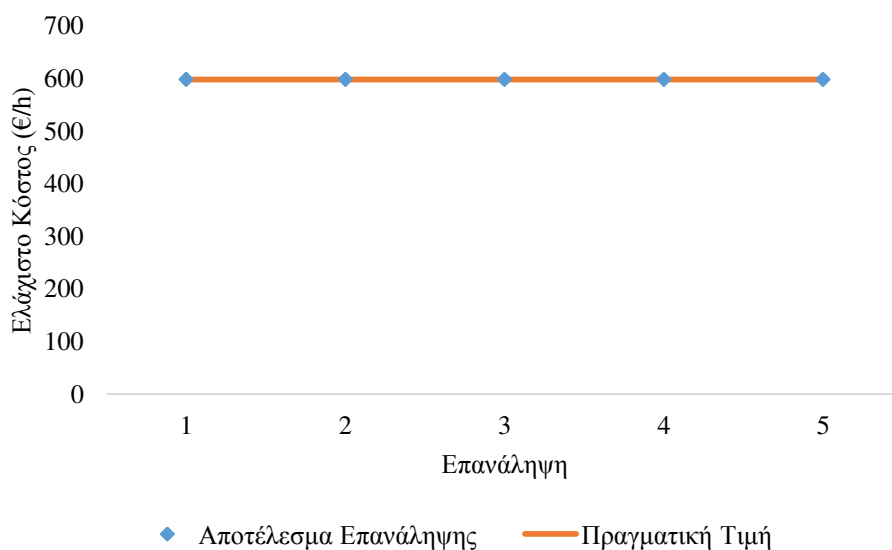
Στον Πίνακα 5.5 και στο Σχήμα 5.2 φαίνονται τα αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ, όταν εγκατασταθεί ένας ΕΕΠΙ. Από τον Πίνακα 5.5 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλες οι δοκιμές έγιναν με τις ίδιες τιμές παραμέτρων του ΑΒΣΣ, δηλαδή:
 - Αριθμός των επαναλήψεων: 5
 - Αριθμός των σωματιδίων: 5
 - Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
 - Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
 - Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
 - Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4
- Η μέση τιμή των δοκιμών του ΑΒΣΣ είναι 598,260 €/h και το σχετικό σφάλμα σε σχέση με τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 598,260 €/h) που βρέθηκε από τον ΑΕΑ είναι 0,000 %.

- Στις 20 από τις 20 συνολικά δοκιμές, ο ΑΒΣΣ βρήκε την ίδια βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 598,260 €/h), σε σχέση με τη βέλτιστη λύση που βρήκε ο ΑΕΑ. Συνεπώς, ο ΑΒΣΣ βρήκε τη βέλτιστη λύση με ποσοστό επιτυχίας 100 %.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι 2,02 s ανά δοκιμή και συνεπώς ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι κατά 1,50 s μεγαλύτερος, δηλαδή κατά 288,462 % μεγαλύτερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης του ΑΕΑ.



Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση ενός ΕΕΡΠ.



Σχήμα 5.3: Σύγκλιση μιας επιτυχημένης δοκιμής του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση ενός ΕΕΡΠ.

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ και στατιστική ανάλυσή τους για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση ενός ΕΕΡΙ.

Αριθμός Επαναλήψεων	5
Αριθμός Σωματιδίων	5
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_1	2
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_2	2
Αρχική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	0,9
Τελική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	0,4
Δοκιμή 1	598,260 €/h
Δοκιμή 2	598,260 €/h
Δοκιμή 3	598,260 €/h
Δοκιμή 4	598,260 €/h
Δοκιμή 5	598,260 €/h
Δοκιμή 6	598,260 €/h
Δοκιμή 7	598,260 €/h
Δοκιμή 8	598,260 €/h
Δοκιμή 9	598,260 €/h
Δοκιμή 10	598,260 €/h
Δοκιμή 11	598,260 €/h
Δοκιμή 12	598,260 €/h
Δοκιμή 13	598,260 €/h
Δοκιμή 14	598,260 €/h
Δοκιμή 15	598,260 €/h
Δοκιμή 16	598,260 €/h
Δοκιμή 17	598,260 €/h
Δοκιμή 18	598,260 €/h
Δοκιμή 19	598,260 €/h
Δοκιμή 20	598,260 €/h
Μέση Τιμή Δοκιμών	598,260 €/h
Τυπική Απόκλιση Δοκιμών	0,000 €/h
Μέγιστη Τιμή Δοκιμών	598,260 €/h
Ελάχιστη Τιμή Δοκιμών	598,260 €/h
Χρόνος Εκτέλεσης κάθε Δοκιμής	2,02 s
Ποσοστό Επιτυχίας	100 %

Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η σύγκλιση μίας δοκιμής του ΑΒΣΣ που εντόπισε τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 598,260 €/h). Από το Σχήμα 5.3 προκύπτει ότι ο ΑΒΣΣ κατάφερε να βρει τη βέλτιστη λύση στην 1^η επανάληψη.

Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται οι ρυθμίσεις του ΕΕΡΙ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 598,260 €/h).

Πίνακας 5.6: Ρυθμίσεις του ΕΕΡΙ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση ενός ΕΕΡΙ.

ΕΕΡΙ	Κλάδος	Άκρο	Ζυγός	$V_{CR}(pu)$	$\delta_{CR}(deg)$	$V_{VR}(pu)$	$\delta_{VR}(deg)$
1	1-2	2	2	0,0296	-89,9933	1,0989	-3,7345

5.2.3. Αποτελέσματα για Δύο ΕΕΡΙ

Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός ΕΕΡΙ ($N_{upfc_{max}}$): 2

5.2.3.1. Γενικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όταν στο ΣΗΕ των 5 ζυγών πρόκειται να εγκατασταθούν δύο ΕΕΡΙ.

Με τη βοήθεια της συνάρτησης βέλτιστης ροής ισχύος του λογισμικού MATPOWER υπολογίστηκε ότι, πριν την εγκατάσταση των ΕΕΡΙ, το ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 598,381 €/h.

Στον Πίνακα 5.7 φαίνονται τα αποτελέσματα του ΑΕΑ, όταν εγκατασταθούν δύο ΕΕΡΙ. Από τον Πίνακα 5.7 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ, το ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έγινε 598,2024 €/h και συνεπώς μειώθηκε κατά 0,1786 €/h, δηλαδή κατά 0,03 %, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος πριν την εγκατάσταση των ΕΕΡΙ.
- Για να βρει το παραπάνω αποτέλεσμα ο ΑΕΑ χρειάστηκε 4,00 s.
- Για να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα (μείωση του ωριαίου κόστους κατά 0,03 %), ένας ΕΕΡΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 2 της γραμμής μεταφοράς 1–2 και ένας ΕΕΡΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 5 της γραμμής μεταφοράς 4–5.

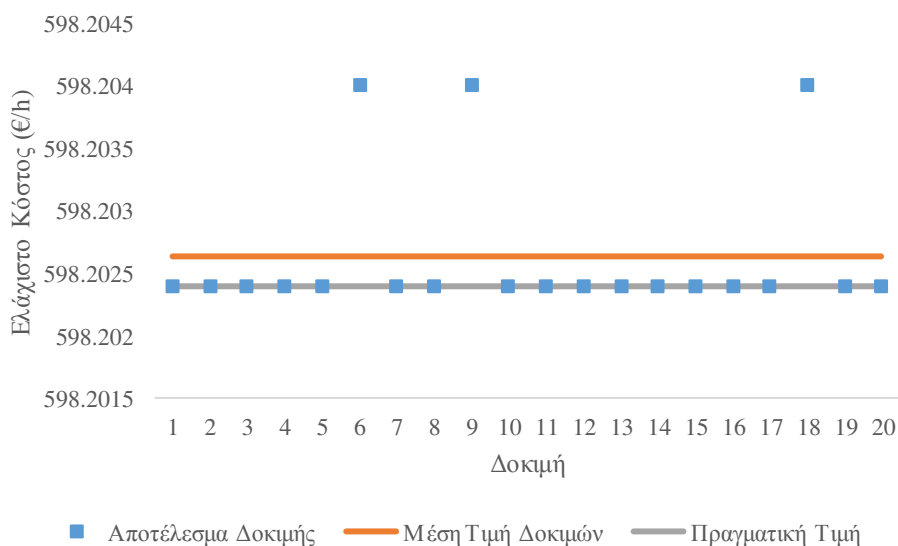
Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα του ΑΕΑ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	1–2
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	2 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	2
Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	4–5
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	2 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	5
Ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (€/h)	598,2024
Χρόνος εκτέλεσης (s)	4,00

Στον Πίνακα 5.8 και στο Σχήμα 5.4 φαίνονται τα αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ, όταν εγκατασταθούν δύο ΕΕΡΙ. Από τον Πίνακα 5.8 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλες οι δοκιμές έγιναν με τις ίδιες τιμές παραμέτρων του ΑΒΣΣ, δηλαδή:
 - Αριθμός των επαναλήψεων: 9
 - Αριθμός των σωματιδίων: 9
 - Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
 - Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
 - Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
 - Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4
- Η μέση τιμή των δοκιμών του ΑΒΣΣ είναι 598,2026 €/h και το σχετικό σφάλμα σε σχέση με τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 598,2024 €/h) που βρέθηκε από τον ΑΕΑ είναι 0,000 %.
- Στις 17 από τις 20 συνολικά δοκιμές ο ΑΒΣΣ βρήκε την ίδια βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 598,2024 €/h), σε σχέση με τη βέλτιστη λύση που βρήκε ο ΑΕΑ. Συνεπώς, ο ΑΒΣΣ βρήκε τη βέλτιστη λύση με ποσοστό επιτυχίας 85 %.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι 3,88 s ανά δοκιμή και συνεπώς ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι κατά 0,12 s μικρότερος, δηλαδή κατά 3,000 % μικρότερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης του ΑΕΑ.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται η σύγκλιση μίας δοκιμής του ΑΒΣΣ που εντόπισε τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 598,2024 €/h). Από το Σχήμα 5.5 προκύπτει ότι ο ΑΒΣΣ κατάφερε να βρει τη βέλτιστη λύση στην 2^η επανάληψη.

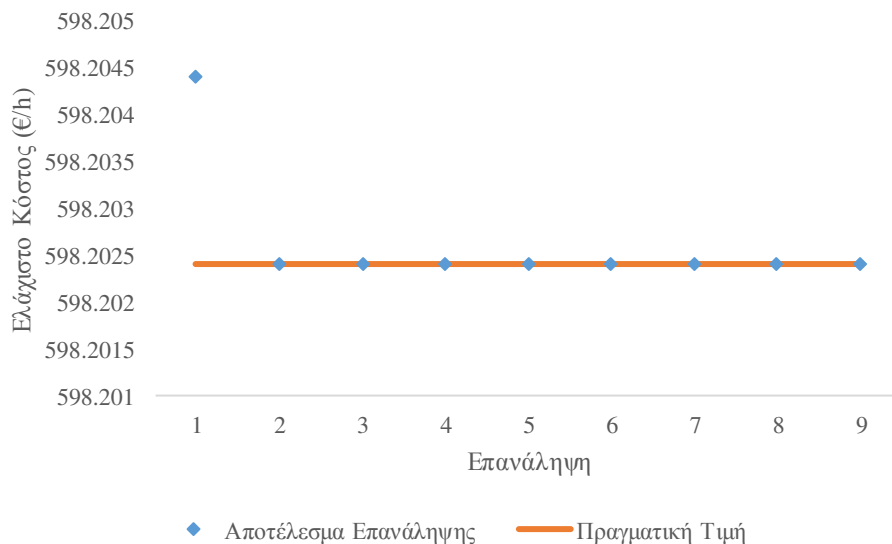


Σχήμα 5.4: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ και στατιστική ανάλυσή τους για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

Αριθμός Επαναλήψεων	9
Αριθμός Σωματιδίων	9
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_1	2
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_2	2
Αρχική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	0,9
Τελική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	0,4
Δοκιμή 1	598,2024 €/h
Δοκιμή 2	598,2024 €/h
Δοκιμή 3	598,2024 €/h
Δοκιμή 4	598,2024 €/h
Δοκιμή 5	598,2024 €/h
Δοκιμή 6	598,2040 €/h
Δοκιμή 7	598,2024 €/h
Δοκιμή 8	598,2024 €/h
Δοκιμή 9	598,2040 €/h
Δοκιμή 10	598,2024 €/h
Δοκιμή 11	598,2024 €/h
Δοκιμή 12	598,2024 €/h
Δοκιμή 13	598,2024 €/h
Δοκιμή 14	598,2024 €/h
Δοκιμή 15	598,2024 €/h
Δοκιμή 16	598,2024 €/h
Δοκιμή 17	598,2024 €/h
Δοκιμή 18	598,2040 €/h
Δοκιμή 19	598,2024 €/h
Δοκιμή 20	598,2024 €/h
Μέση Τιμή Δοκιμών	598,2026 €/h
Μέγιστη Τιμή Δοκιμών	598,2040 €/h
Ελάχιστη Τιμή Δοκιμών	598,2024 €/h
Χρόνος Εκτέλεσης κάθε Δοκιμής	3,88 s
Ποσοστό Επιτυχίας	85 %

Στον Πίνακα 5.9 φαίνονται οι ρυθμίσεις του ΕΕΡΠ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 598,2024 €/h).



Σχήμα 5.5: Σύγκλιση μιας επιτυχημένης δοκιμής του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

Πίνακας 5.9: Ρυθμίσεις του ΕΕΡΠ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση για το ΣΗΕ 5 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

ΕΕΡΠ	Κλάδος	Άκρο	Ζυγός	$V_{CR}(pu)$	$\delta_{CR}(deg)$	$V_{vR}(pu)$	$\delta_{vR}(deg)$
1	1-2	2	2	0,0295	-89,6758	1,0967	-3,7336
2	4-5	2	5	0,0508	-92,4910	1,0886	-4,5434

5.3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 39 ΖΥΓΩΝ

5.3.1. Δεδομένα Συστήματος 39 Ζυγών

Το ΣΗΕ είναι το ΣΗΕ 39 ζυγών του IEEE [21].

Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ 39 ζυγών.

5.3.2. Αποτελέσματα

Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός ΕΕΡΠ ($N_{upfc_{max}}$): 2

5.3.2.1. Γενικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όταν στο ΣΗΕ 39 ζυγών πρόκειται να εγκατασταθούν δύο ΕΕΡΠ.

Με τη βοήθεια της συνάρτησης βέλτιστης ροής ισχύος του λογισμικού MATPOWER υπολογίστηκε ότι, πριν την εγκατάσταση των ΕΕΡΠ, το ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 33.491,2 €/h.

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα του ΑΕΑ για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	2–25
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	1 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	2
Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	4–5
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	1 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	4
Ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (€/h)	33.479,2
Χρόνος εκτέλεσης (s)	390,82

Στον Πίνακα 5.11 και στο Σχήμα 5.7 φαίνονται τα αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ, όταν εγκατασταθούν δύο ΕΕΡΙ. Από τον Πίνακα 5.11 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

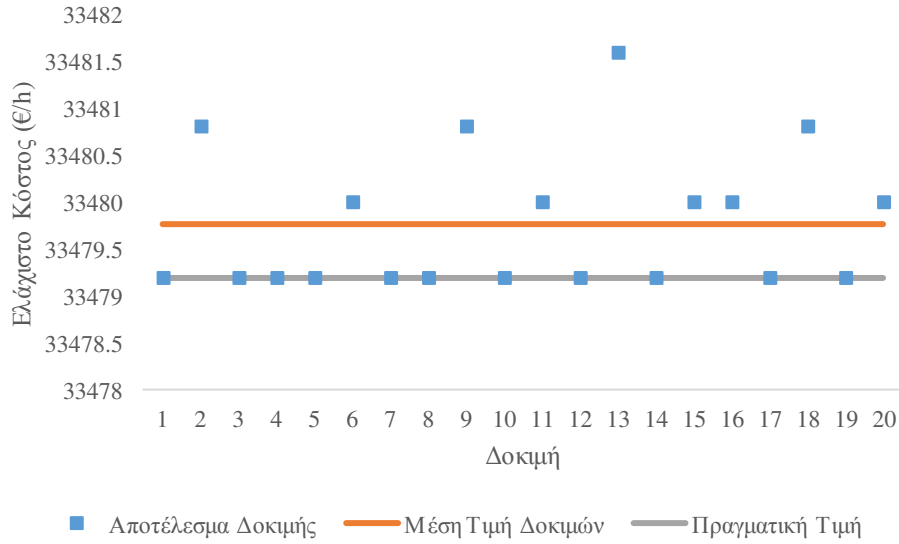
- Όλες οι δοκιμές έγιναν με τις ίδιες τιμές παραμέτρων του ΑΒΣΣ, δηλαδή:
 - ο Αριθμός των επαναλήψεων: 30
 - ο Αριθμός των σωματιδίων: 30
 - ο Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
 - ο Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
 - ο Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
 - ο Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4
- Η μέση τιμή των δοκιμών του ΑΒΣΣ είναι 33.479,76 €/h και το σχετικό σφάλμα σε σχέση με τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 33.479,2 €/h) που βρέθηκε από τον ΑΕΑ είναι 0,002 %.
- Στις 11 από τις 20 συνολικά δοκιμές ο ΑΒΣΣ βρήκε την ίδια βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 33.479,2 €/h), σε σχέση με τη βέλτιστη λύση που βρήκε ο ΑΕΑ. Συνεπώς, ο ΑΒΣΣ βρήκε τη βέλτιστη λύση με ποσοστό επιτυχίας 55 %.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι 84,78 s ανά δοκιμή και συνεπώς ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι κατά 306,04 s μικρότερος, δηλαδή κατά 78,307 % μικρότερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης του ΑΕΑ.

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ και στατιστική ανάλυσή τους για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

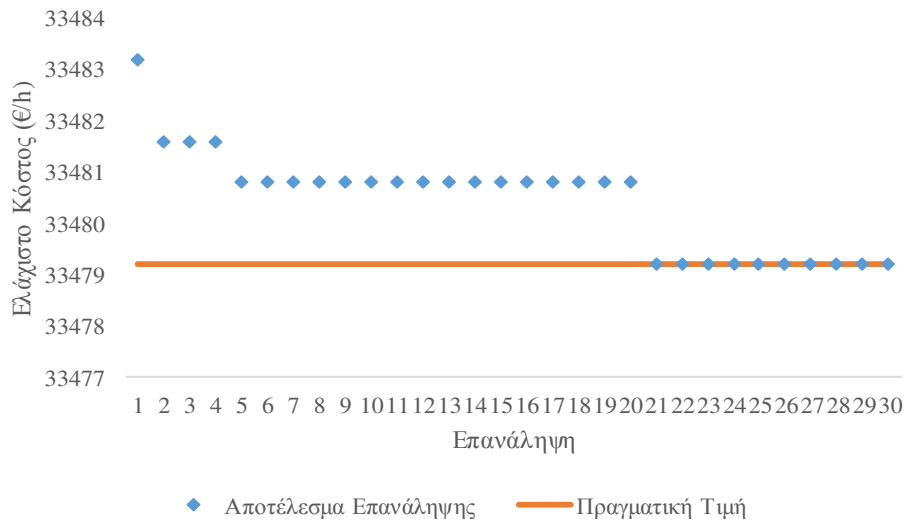
Αριθμός Επανάληψεων	30
Αριθμός Σωματιδίων	30
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_1	2
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_2	2
Αρχική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	0,9
Τελική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	0,4
Δοκιμή 1	33.479,2 €/h
Δοκιμή 2	33.480,8 €/h
Δοκιμή 3	33.479,2 €/h
Δοκιμή 4	33.479,2 €/h
Δοκιμή 5	33.479,2 €/h
Δοκιμή 6	33.480,0 €/h
Δοκιμή 7	33.479,2 €/h
Δοκιμή 8	33.479,2 €/h
Δοκιμή 9	33.480,8 €/h
Δοκιμή 10	33.479,2 €/h
Δοκιμή 11	33.480,0 €/h
Δοκιμή 12	33.479,2 €/h
Δοκιμή 13	33.481,6 €/h
Δοκιμή 14	33.479,2 €/h
Δοκιμή 15	33.480,0 €/h
Δοκιμή 16	33.480,0 €/h
Δοκιμή 17	33.479,2 €/h
Δοκιμή 18	33.480,8 €/h
Δοκιμή 19	33.479,2 €/h
Δοκιμή 20	33.480,0 €/h
Μέση Τιμή Δοκιμών	33.479,76 €/h
Μέγιστη Τιμή Δοκιμών	33.480,8 €/h
Ελάχιστη Τιμή Δοκιμών	33.479,2 €/h
Χρόνος Εκτέλεσης κάθε Δοκιμής	84,78 s
Ποσοστό Επιτυχίας	55 %

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η σύγκλιση μίας δοκιμής του ΑΒΣΣ που εντόπισε τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 33.479,2 €/h). Από το Σχήμα 5.8 προκύπτει ότι ο ΑΒΣΣ κατάφερε να βρει τη βέλτιστη λύση στην 21^η επανάληψη.

Στον Πίνακα 5.12 φαίνονται οι ρυθμίσεις του ΕΕΡΠ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 33.479,2 €/h).



Σχήμα 5.7: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.



Σχήμα 5.8: Σύγκλιση μιας επιτυχημένης δοκιμής του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Πίνακας 5.12: Ρυθμίσεις του ΕΕΡΙ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

ΕΕΡΙ	Κλάδος	Άκρο	Ζυγός	$V_{cR}(pu)$	$\delta_{cR}(deg)$	$V_{vR}(pu)$	$\delta_{vR}(deg)$
1	2–25	1	2	0,0422	-123,1988	0,9732	-6,0342
2	4–5	1	4	0,0811	-85,0588	1,0265	-10,4483

5.3.2.2. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Αριθμό των Επαναλήψεων

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις ακόλουθες σταθερές τιμές:

- Αριθμός των σωματιδίων: 30
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Ο αριθμός των επαναλήψεων πήρε τιμές από 20 έως 80 με βήμα 10. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.13. Από τον Πίνακα 5.13 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για 60 επαναλήψεις προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 80 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (185,06 s).

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα 140 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενο αριθμό επαναλήψεων για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Αριθμός Επαναλήψεων	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
20	33.479,81	33.479,20	33.481,60	50	60,34
30	33.479,76	33.479,20	33.481,60	55	84,78
40	33.479,74	33.479,20	33.480,80	60	121,52
50	33.479,40	33.479,20	33.480,00	75	152,73
60	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	185,06
70	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	215,29
80	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	249,91

5.3.2.3. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Αριθμό Σωματιδίων

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις τιμές:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Ο αριθμός των σωματιδίων πήρε τιμές από 10 έως 70 με βήμα 10. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.14. Από τον Πίνακα 5.14 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για 40 σωματίδια προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 85 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (248,94 s).

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα 140 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενο αριθμό σωματιδίων για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ.

Αριθμός Σωματιδίων	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
10	33.480,11	33.479,20	33.481,60	45	61,79
20	33.479,78	33.479,20	33.481,60	70	124,51
30	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	185,06
40	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
50	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	311,43
60	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	375,14
70	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	437,75

5.4.2.4. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Συντελεστή Επιτάχυνσης c_1

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις τιμές:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Αριθμός των σωματιδίων: 40 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.14)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Ο συντελεστής επιτάχυνσης c_1 πήρε τιμές από 1,7 έως 2,3 με βήμα 0,1. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.15. Από τον Πίνακα 5.15 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για συντελεστή επιτάχυνσης c_1 ίσο με 2 προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 85 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (248,94 s).

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα 140 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενο συντελεστή επιτάχυνσης c_1 για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

Συντελεστής Επιτάχυνσης c_1	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
1,7	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94
1,8	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
1,9	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,0	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,1	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,2	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,3	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94

5.3.2.5. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς τον Συντελεστή Επιτάχυνσης c_2

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις τιμές:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Αριθμός των σωματιδίων: 40 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.14)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.15)
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Ο συντελεστής επιτάχυνσης c_2 πήρε τιμές από 1,7 έως 2,3 με βήμα 0,1. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.16. Από τον Πίνακα 5.16 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για συντελεστή επιτάχυνσης c_2 ίσο με 2 προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 85 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (248,94 s).

Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα 140 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενο συντελεστή επιτάχυνσης c_2 για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡ1.

Συντελεστής Επιτάχυνσης c_2	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
1,7	33.479,40	33.479,20	33.480,00	75	248,94
1,8	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94
1,9	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,0	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,1	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
2,2	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94
2,3	33.479,40	33.479,20	33.480,00	75	248,94

5.3.2.6. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς την Αρχική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις τιμές:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Αριθμός των σωματιδίων: 40 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.14)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.15)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.16)
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Η αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$ πήρε τιμές από 0,6 έως 1,2 με βήμα 0,1. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.17. Από τον Πίνακα 5.17 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$ ίση με 0,9 προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 85 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (248,94 s).

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενη αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$ για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΠΙ.

Αρχική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
0,6	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,7	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,8	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,9	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
1,0	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
1,1	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
1,2	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94

5.3.2.7. Ευαισθησία του Αποτελέσματος του ΑΒΣΣ ως προς την Τελική Τιμή του Συντελεστή Αδράνειας w_{final}

Σε αυτή την ενότητα, για όλες τις δοκιμές, οι 5 από τις 6 παραμέτρους του ΑΒΣΣ είχαν τις τιμές:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Αριθμός των σωματιδίων: 40 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.14)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.15)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.16)
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.17)

Η τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} πήρε τιμές από 0,1 έως 0,7 με βήμα 0,1. Κάθε τιμή χρησιμοποιήθηκε για 20 δοκιμές, οπότε έγιναν συνολικά 140 δοκιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.18. Από τον Πίνακα 5.18 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} ίση με 0,4 προκύπτει το καλύτερο αποτέλεσμα (ποσοστό επιτυχίας 85 %) στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης (248,94 s).

Πίνακας 5.18: Αποτελέσματα 140 δοκιμών του ΑΒΣΣ με μεταβαλλόμενη τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} για το ΣΗΕ 39 ζυγών και για εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ.

Τελική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	Ελάχιστο Κόστος Παραγωγής (€/h)			Ποσοστό Επιτυχίας (%)	Χρόνος Εκτέλεσης (s)
	Μέση Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή		
0,1	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94
0,2	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,3	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,4	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,5	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,6	33.479,32	33.479,20	33.480,00	85	248,94
0,7	33.479,36	33.479,20	33.480,00	80	248,94

5.3.2.8. Βέλτιστες Τιμές των Παραμέτρων του ΑΒΣΣ

Από τις Ενότητες 5.3.2.2 έως 5.3.2.7 προκύπτει ότι για την περίπτωση του ΣΗΕ των 39 ζυγών και την εγκατάσταση δύο ΕΕΡΠ, οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων του ΑΒΣΣ είναι οι ακόλουθες:

- Αριθμός επαναλήψεων: 60 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.13)
- Αριθμός σωματιδίων: 40 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.14)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.15)
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.16)
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.17)
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4 (βέλτιστη τιμή Πίνακα 5.18)

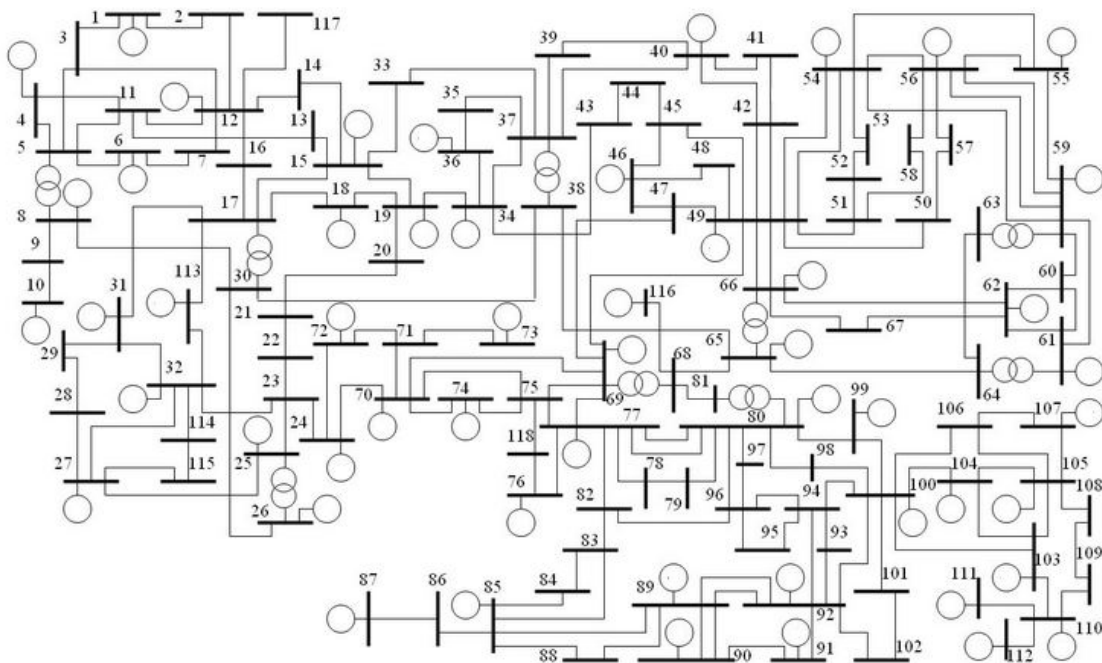
Με τον όρο βέλτιστες, χαρακτηρίζονται οι παράμετροι που πέτυχαν το καλύτερο ποσοστό επιτυχίας στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Για τις παραπάνω τιμές των παραμέτρων, ο ΑΒΣΣ επιτυγχάνει τα ακόλουθα αποτελέσματα, όταν εκτελεστεί 20 φορές (20 δοκιμές):

- Ποσοστό επιτυχίας = 85 %
- Χρόνος εκτέλεσης ανά δοκιμή = 248,94 s

5.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 118 ΖΥΓΩΝ

5.4.1. Δεδομένα Συστήματος 118 Ζυγών

Το ΣΗΕ είναι το ΣΗΕ 118 ζυγών του ΙΕΕΕ [21]. Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ 118 ζυγών.



Σχήμα 5.9: ΣΗΕ 118 ζυγών του ΙΕΕΕ.

5.4.2. Αποτελέσματα

Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός ΕΕΠΙ ($N_{upfc_{max}}$): 3

5.4.2.1. Γενικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όταν στο ΣΗΕ 118 ζυγών πρόκειται να εγκατασταθούν τρεις ΕΕΠΙ.

Με τη βοήθεια της συνάρτησης βέλτιστης ροής ισχύος του λογισμικού MATPOWER υπολογίστηκε ότι, πριν την εγκατάσταση των ΕΕΠΙ, το ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι 103.728 €/h.

Στον Πίνακα 5.19 φαίνονται τα αποτελέσματα του ΑΕΑ, όταν εγκατασταθούν τρεις ΕΕΠΙ. Από τον Πίνακα 5.19 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Με την εγκατάσταση τριών ΕΕΠΙ, το ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έγινε 103.544 €/h και συνεπώς μειώθηκε κατά 184 €/h, δηλαδή κατά 0,18 %, σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος πριν την εγκατάσταση των ΕΕΠΙ.
- Για να βρει το παραπάνω αποτέλεσμα ο ΑΕΑ χρειάστηκε 1.083.811,55 s.

- Για να επιτευχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα (μείωση του ωριαίου κόστους κατά 0,18 %), ένας ΕΕΡΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 26 της γραμμής μεταφοράς 26-30, ένας ΕΕΡΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 65 της γραμμής μεταφοράς 38-65 και ένας ΕΕΡΙ θα πρέπει να εγκατασταθεί στον ζυγό 64 της γραμμής μεταφοράς 63-64.

Πίνακας 5.19: Αποτελέσματα του ΑΕΑ για το ΣΗΕ 118 ζυγών και για εγκατάσταση τριών ΕΕΡΙ.

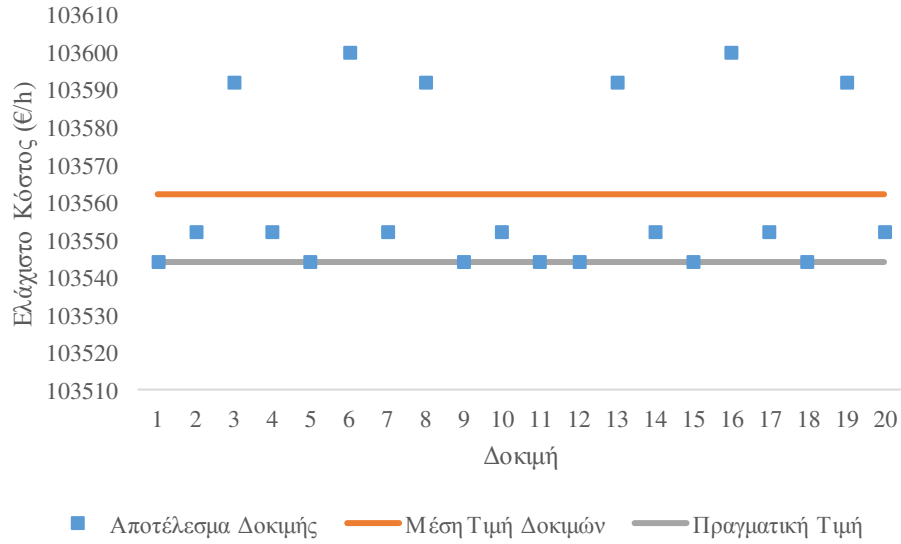
Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	26-30
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	1 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 1 ^{ος} ΕΕΡΙ	26
Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	38-65
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	2 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 2 ^{ος} ΕΕΡΙ	65
Γραμμή μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 3 ^{ος} ΕΕΡΙ	63-64
Άκρο της γραμμής μεταφοράς που εγκαθίσταται ο 3 ^{ος} ΕΕΡΙ	2 ^ο
Ζυγός που εγκαθίσταται ο 3 ^{ος} ΕΕΡΙ	64
Ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (€/h)	103.544
Χρόνος εκτέλεσης (s)	1.083.811,55

Στον Πίνακα 5.20 και στο Σχήμα 5.10 φαίνονται τα αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ, όταν εγκατασταθούν τρεις ΕΕΡΙ. Από τον Πίνακα 5.20 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όλες οι δοκιμές έγιναν με τις ίδιες τιμές παραμέτρων του ΑΒΣΣ, δηλαδή:
 - ο Αριθμός των επαναλήψεων: 70
 - ο Αριθμός των σωματιδίων: 140
 - ο Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
 - ο Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
 - ο Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
 - ο Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4
- Η μέση τιμή των δοκιμών του ΑΒΣΣ είναι 103.562,0 €/h και το σχετικό σφάλμα σε σχέση με τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 103.544 €/h) που βρέθηκε από τον ΑΕΑ είναι 0,017 %.
- Στις 7 από τις 20 συνολικά δοκιμές ο ΑΒΣΣ βρήκε την ίδια βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 103.544 €/h), σε σχέση με τη βέλτιστη λύση που βρήκε ο ΑΕΑ. Συνεπώς, ο ΑΒΣΣ βρήκε τη βέλτιστη λύση με ποσοστό επιτυχίας 35 %.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι 1252,15 s ανά δοκιμή και συνεπώς ο χρόνος εκτέλεσης του ΑΒΣΣ είναι κατά 1.082.559,40 s μικρότερος, δηλαδή κατά 99,884 % μικρότερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης του ΑΕΑ.

Πίνακας 5.20: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ και στατιστική ανάλυσή τους για το ΣΗΕ 118 ζυγών και για εγκατάσταση τριών ΕΕΡΠ.

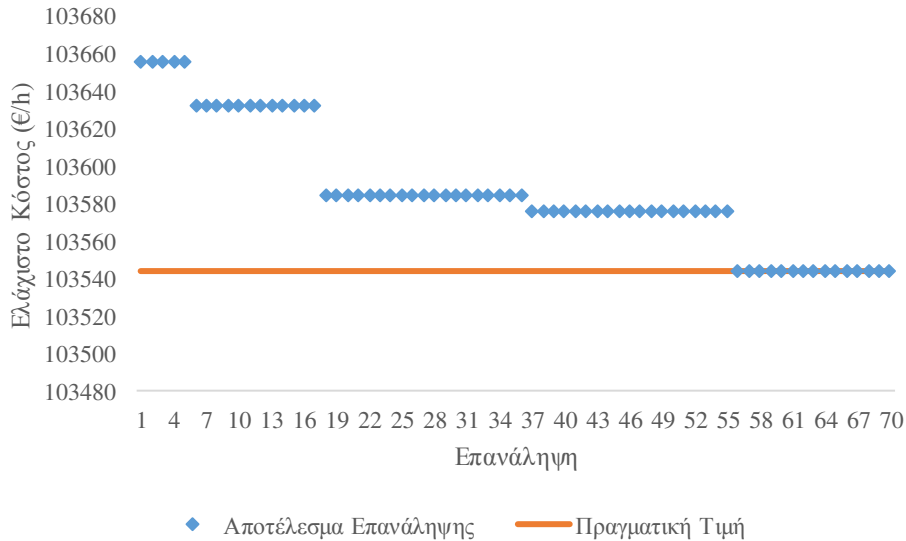
Αριθμός Επαναλήψεων	70
Αριθμός Σωματιδίων	140
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_1	2
Συντελεστής Επιτάχυνσης c_2	2
Αρχική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας $w_{initial}$	0,9
Τελική Τιμή Συντελεστή Αδράνειας w_{final}	0,4
Δοκιμή 1	103.544 €/h
Δοκιμή 2	103.552 €/h
Δοκιμή 3	103.592 €/h
Δοκιμή 4	103.552 €/h
Δοκιμή 5	103.544 €/h
Δοκιμή 6	103.600 €/h
Δοκιμή 7	103.552 €/h
Δοκιμή 8	103.592 €/h
Δοκιμή 9	103.544 €/h
Δοκιμή 10	103.552 €/h
Δοκιμή 11	103.544 €/h
Δοκιμή 12	103.544 €/h
Δοκιμή 13	103.592 €/h
Δοκιμή 14	103.552 €/h
Δοκιμή 15	103.544 €/h
Δοκιμή 16	103.600 €/h
Δοκιμή 17	103.552 €/h
Δοκιμή 18	103.544 €/h
Δοκιμή 19	103.592 €/h
Δοκιμή 20	103.552 €/h
Μέση Τιμή Δοκιμών	103.562,0 €/h
Μέγιστη Τιμή Δοκιμών	103.600 €/h
Ελάχιστη Τιμή Δοκιμών	103.544 €/h
Χρόνος Εκτέλεσης κάθε Δοκιμής	1252,15 s
Ποσοστό Επιτυχίας	35 %



Σχήμα 5.10: Αποτελέσματα 20 δοκιμών του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 118 ζυγών και για εγκατάσταση τριών ΕΕΡΙ.

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η σύγκλιση μίας δοκιμής του ΑΒΣΣ που εντόπισε τη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 103.544 €/h). Από το Σχήμα 5.11 προκύπτει ότι ο ΑΒΣΣ κατάφερε να βρει τη βέλτιστη λύση στην 55^η επανάληψη.

Στον Πίνακα 5.21 φαίνονται οι ρυθμίσεις του ΕΕΡΙ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση (με ελάχιστο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 103.544 €/h).



Σχήμα 5.11: Σύγκλιση μιας επιτυχημένης δοκιμής του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 118 ζυγών και για εγκατάσταση τριών ΕΕΡΙ.

Πίνακας 5.21: Ρυθμίσεις των ΕΕΡΙ που αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση για το ΣΗΕ 118 ζυγών και για εγκατάσταση τριών ΕΕΡΙ.

ΕΕΡΙ	Κλάδος	Άκρο	Ζυγός	$V_{cR}(pu)$	$\delta_{cR}(deg)$	$V_{vR}(pu)$	$\delta_{vR}(deg)$
1	26-30	1	26	0,4048	118,4217	0,9463	30,3547
2	38-65	2	65	0,4226	121,4441	0,9074	26,3485
3	63-64	2	64	0,4107	113,8522	0,9435	23,6594

5.4.2.2. Διαδοχικές Δοκιμές του ΑΒΣΣ

Στο ΣΗΕ των 118 ζυγών ελέγχθηκε η συμπεριφορά του ΑΒΣΣ σε διαδοχικές δοκιμές του, όπου σε κάθε δοκιμή του ΑΒΣΣ χρησιμοποιείται σαν αρχική τιμή ενός σωματιδίου η τιμή που βρέθηκε από την προηγούμενη δοκιμή του ΑΒΣΣ. Για κάθε αρχική τιμή σωματιδίου έγιναν 20 δοκιμές του ΑΒΣΣ. Επιπρόσθετα, έγιναν και 20 δοκιμές στις οποίες 3 σωματίδια είχαν αρχικές τιμές 103.600, 103.592 και 103.552. Δεν υπήρξε μεγάλη βελτίωση, διότι τα σωματίδια παρέμεναν στις περιοχές του ελαχίστου που είχαν ήδη βρει, οπότε για να βρεθεί ακόμα πιο μικρό κόστος έπρεπε κάποιο από τα σωματίδια με τυχαία αρχική τιμή να βρει το ολικό ελάχιστο πριν παρασυρθεί από το τοπικό ελάχιστο. Το ποσοστό επιτυχίας, δηλαδή η εύρεση του πραγματικού ελαχίστου κόστους, παρέμεινε ίσο με 35 %. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22: Αποτελέσματα του ΑΒΣΣ για 20 δοκιμές με διαφορετικές αρχικές τιμές, που βρίσκονταν σχετικά κοντά στην λύση, για κάποιο σωματίδιο.

Αρχική Τιμή Αντικειμενικής Συνάρτησης ενός Σωματιδίου του ΑΒΣΣ (€/h)	Μέσος Όρος των Αποτελεσμάτων του ΑΒΣΣ (€/h)	Ποσοστό Επιτυχίας του ΑΒΣΣ (%)
103.600	103.555,7	35
103.592	103.552,5	35
103.552	103.548,4	35
103.600, 103.552, 103.592 Ταυτόχρονα	103.548,5	35

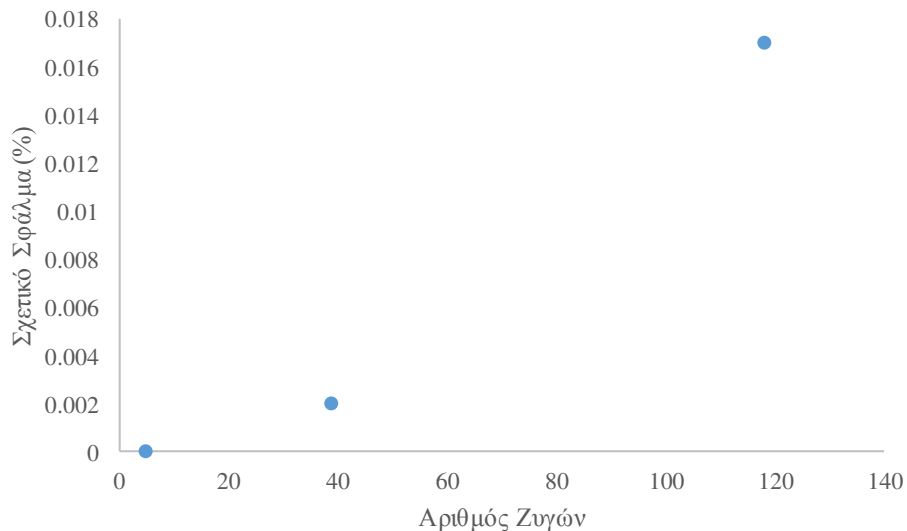
5.5. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Κεφάλαιο 5 ο ΑΕΑ και ο ΑΒΣΣ δοκιμάστηκαν και συγκρίθηκαν σε 4 περιπτώσεις:

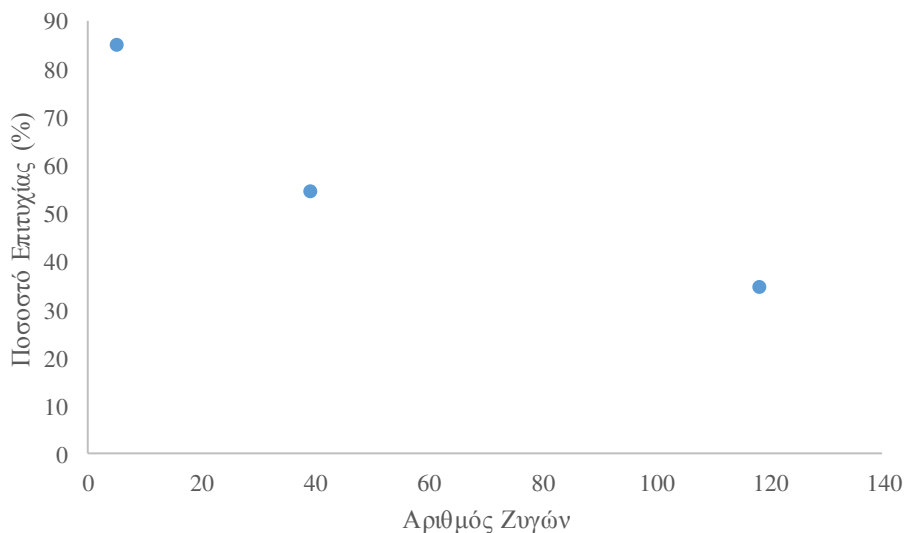
- ΣΗΕ 5 ζυγών και εγκατάσταση ενός ΕΕΡΙ
- ΣΗΕ 5 ζυγών και εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ
- ΣΗΕ 39 ζυγών και εγκατάσταση δύο ΕΕΡΙ
- ΣΗΕ 118 ζυγών και εγκατάσταση τριών ΕΕΡΙ

Φυσικά, τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων περιπτώσεων έχουν αρκετά μεγαλύτερη σημασία σε σχέση με τα αποτελέσματα των δύο πρώτων περιπτώσεων. Υπενθυμίζεται ότι ο ΑΕΑ βρίσκει πάντοτε τη σωστή λύση σε κάθε ΣΗΕ, αφού ελέγχει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς. Το σχετικό σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων του ΑΕΑ και του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση, το ΣΗΕ 39 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση και το ΣΗΕ 118 ζυγών με τρεις ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Το ποσοστό επιτυχίας του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση, το ΣΗΕ 39 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση και το ΣΗΕ 118 ζυγών με τρεις ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 5.13. Η διαφορά χρόνου εκτέλεσης μεταξύ του ΑΕΑ και του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ 5 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση, το ΣΗΕ 39 ζυγών με δύο ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση και το ΣΗΕ 118 ζυγών με τρεις ΕΕΡΙ προς εγκατάσταση φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Παρατηρείται ότι, καθώς το μέγεθος του υπό μελέτη ΣΗΕ αυξάνεται:

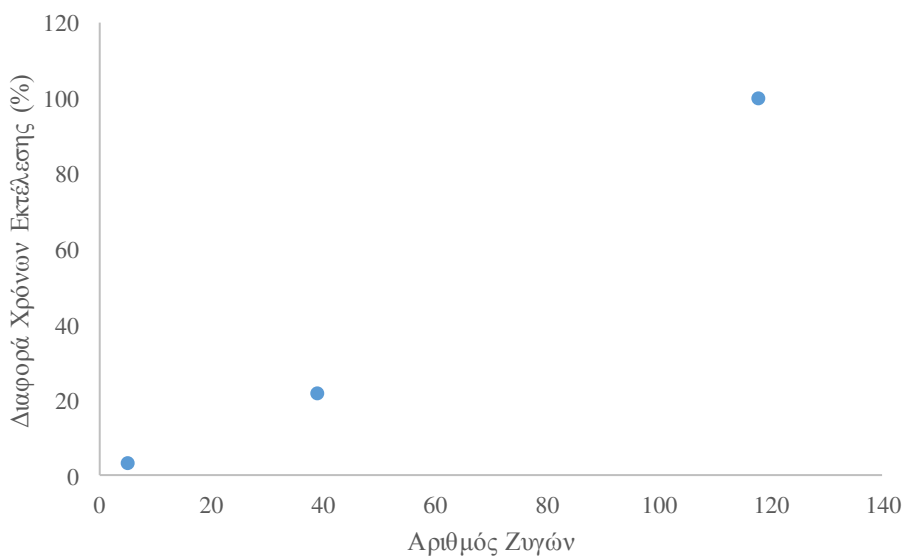
- το σχετικό σφάλμα μεταξύ ΑΕΑ και ΑΒΣΣ αυξάνεται, αλλά έχει πολύ χαμηλές τιμές
- το ποσοστό εύρεσης του πραγματικού ελαχίστου κόστους μειώνεται
- ο εξοικονομούμενος χρόνος από τη χρήση του ΑΒΣΣ αυξάνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό



Σχήμα 5.12: Σχετικό σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων του ΑΕΑ και του ΑΒΣΣ σαν συνάρτηση του αριθμού των ζυγών.



Σχήμα 5.13: Ποσοστό επιτυχίας του ΑΒΣΣ σαν συνάρτηση του αριθμού ζυγών.



Σχήμα 5.14: Γραφική παράσταση της διαφοράς χρόνου εκτέλεσης του ΑΕΑ και του ΑΒΣΣ σαν συνάρτηση του αριθμού ζυγών.

Όταν ένα ΣΗΕ έχει πολλούς ζυγούς το πλήθος των πιθανών λύσεων και ο χώρος αναζήτησης αυξάνονται εκθετικά και είναι λογικό το ποσοστό επιτυχίας του ΑΒΣΣ να μειώνεται.

Παράλληλα, με περισσότερες πιθανές λύσεις, η εξαντλητική αναζήτηση όλων των λύσεων απαιτεί περισσότερο χρόνο για να εξερευνήσει κάθε νέα πιθανή λύση. Αντίθετα, η αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του ΑΒΣΣ σαν συνάρτηση του πλήθους των ζυγών είναι πολύ μικρότερη, κάτι που αιτιολογεί την ιδιαίτερα μεγάλη εξοικονόμηση

χρόνου για το ΣΗΕ των 118 ζυγών. Η εξοικονόμηση χρόνου έχει εξίσου μεγάλη σημασία με τα ποσοστά επιτυχίας του ΑΒΣΣ, αφού για το ΣΗΕ 118 ζυγών ακόμα και αν ο ΑΒΣΣ δεν βρίσκει το σωστό αποτέλεσμα με μεγάλη συχνότητα, μπορεί να εκτελεστεί πολλές φορές μέσα στον χρόνο που θα έπαιρνε στον ΑΕΑ να βρει τη λύση. Αυτό το γεγονός κάνει τη χρήση του ΑΒΣΣ συμφέρουσα σε σχέση με τη χρήση του ΑΕΑ, αν η εξοικονόμηση χρόνου από τη χρήση του ΑΒΣΣ έχει μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από το ρυθμό μείωσης του ποσοστού επιτυχίας καθώς αυξάνονται οι ζυγοί.

Το σχετικό σφάλμα μεταξύ των αποτελεσμάτων ΑΕΑ και ΑΒΣΣ είχε σε όλες τις περιπτώσεις πολύ μικρή τιμή, που σημαίνει ότι ο ΑΒΣΣ μπορεί να αντικαταστήσει τον ΑΕΑ και να εντοπίσει λύσεις πολύ κοντά στη βέλτιστη.

Κατά τη μελέτη της ευαισθησίας του αποτελέσματος του ΑΒΣΣ για το ΣΗΕ των 39 ζυγών, προέκυψε ότι η αλλαγή του αριθμού των επαναλήψεων και των σωματιδίων επηρεάζει το αποτέλεσμα περισσότερο από την αλλαγή των παραμέτρων που αφορούν την ταχύτητα. Από τις παραμέτρους που αφορούν την ταχύτητα των σωματιδίων, ο συντελεστής επιτάχυνσης c_2 , που ενθαρρύνει το σωματίδιο να αναζητήσει τη βέλτιστη λύση όλου του σμήνους, επηρέασε περισσότερο το αποτέλεσμα του ΑΒΣΣ, ενώ ο ΑΒΣΣ παρουσίασε χαμηλή ευαισθησία ως προς τις υπόλοιπες παραμέτρους που αφορούν την ταχύτητα. Ο συνδυασμός παραμέτρων του ΑΒΣΣ που πέτυχε το βέλτιστο αποτέλεσμα (δηλαδή είχε το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό επιτυχίας και το χαμηλότερο δυνατό μέσο όρο) για το ΣΗΕ 39 ζυγών ήταν:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60
- Αριθμός των σωματιδίων: 40
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Όταν στον παραπάνω συνδυασμό υπήρξε αλλαγή σε κάποια παράμετρο (για παράδειγμα αύξηση των επαναλήψεων ή των σωματιδίων) το αποτέλεσμα δεν παρουσίασε βελτίωση ή χειροτέρευσε.

Σε ότι αφορά τις παραμέτρους που εμπλέκονται στον υπολογισμό της ταχύτητας, η μικρή μεταβολή της κάθε μιας ξεχωριστά, πλην του Συντελεστή Επιτάχυνσης c_2 , δεν έδειξε να επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα. Για μεγαλύτερες μεταβολές τους, η διαφορά στο αποτέλεσμα ήταν υπαρκτή, αλλά πολύ μικρή. Για τον Συντελεστή Επιτάχυνσης c_2 , η τιμή 2 οδήγησε στα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα και η μεταβολή του προκαλούσε αισθητές μεταβολές στα αποτελέσματα του ΑΒΣΣ.

Τέλος, για το ΣΗΕ των 118 ζυγών έγιναν δοκιμές του ΑΒΣΣ με τιμές που προέκυψαν από προηγούμενες δοκιμές του ΑΒΣΣ σαν αρχικές τιμές ενός σωματιδίου. Η μέση τιμή των αποτελεσμάτων αυτών των δοκιμών δεν βοηθά στην άντληση συμπερασμάτων, αφού ουσιαστικά τίθεται ένα κάτω φράγμα στο πόσο ποιοτικές μπορεί να είναι οι λύσεις που θα προκύψουν. Το φράγμα αυτό, οφείλεται στο ότι η έξοδος του ΑΒΣΣ είναι μικρότερη ή ίση από τις αρχικές τιμές

των σωματιδίων του. Όμως, η μη αύξηση του ποσοστού επιτυχίας του ΑΒΣΣ με καλές αρχικές τιμές, δείχνει ότι τα σωματίδια, επηρεασμένα από τις καλές αρχικές τιμές τους, δεν εξερεύνησαν επαρκή έκταση του χώρου των λύσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και της βέλτιστης ρύθμισης των Ενοποιημένων Ελεγκτών Ροής Ισχύος (ΕΕΡΙ ή Unified Power Flow Controller – UPFC) σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού ωριαίου κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ΕΕΡΙ είναι το πλέον πλήρες από τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς (ΕΣΜ). Λόγω των δυνατοτήτων του ΕΕΡΙ, έχουν μελετηθεί πολλές αναπαραστάσεις του, που είτε απαιτούν πολλές τροποποιήσεις στο ήδη υπάρχον λογισμικό είτε απαιτούν αλγορίθμους που προσδιορίζουν τόσο τις ρυθμίσεις όσο και τις τοποθεσίες των ΕΕΡΙ προσεγγιστικά, κάτι που μειώνει την αξιοπιστία των λύσεων. Για να βρεθούν οι βέλτιστες τοποθεσίες και ρυθμίσεις για τους ΕΕΡΙ έπρεπε να ενσωματωθούν βέλτιστες ροές ισχύος σε ΣΗΕ με ΕΕΡΙ στο λογισμικό MATPOWER, που είναι και ο πρώτος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Το καινοτόμο και άρα πιο σημαντικό τμήμα της εργασίας είναι το Κεφάλαιο 2, όπου προτείνεται μια ισοδύναμη αναπαράσταση για τον ΕΕΡΙ, η οποία αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη στην επίλυση προβλημάτων βέλτιστης ροής ισχύος με ΕΕΡΙ. Το κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης αναπαράστασης είναι ότι οι βέλτιστες ρυθμίσεις ενός ΕΕΡΙ προκύπτουν άμεσα από τη θέση εγκατάστασής του και ότι χρειάζονται πολύ μικρές αλλαγές στον διαθέσιμο κώδικα του λογισμικού MATPOWER.

Ο δεύτερος στόχος της εργασίας είναι η δημιουργία μιας μεθοδολογίας, για την τοποθέτηση και τη ρύθμιση πολλών ΕΕΡΙ, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού ωριαίου κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθοδολογία βασίζεται στον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (ΑΒΣΣ ή Particle Swarm Optimization Algorithm – PSO) που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του ΑΒΣΣ χρησιμοποιήθηκε ο Αλγόριθμος Εξαντλητικής Αναζήτησης (ΑΕΑ), που ελέγχει κάθε πιθανή λύση. Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάστηκε το λογισμικό με το οποίο μπορούν να αναλυθούν ΣΗΕ με ΕΕΡΙ στο πρόγραμμα MATLAB, με την βοήθεια του λογισμικού MATPOWER. Στο Κεφάλαιο 5, λύθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και της βέλτιστης ρύθμισης πολλών ΕΕΡΙ για 4 περιπτώσεις, πρώτα με τη χρήση του ΑΕΑ και στη συνέχεια με τη χρήση του ΑΒΣΣ, ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων και των χρόνων εκτέλεσης των δύο προσεγγίσεων.

Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι ο ΑΒΣΣ πλησιάζει πολύ κοντά στο βέλτιστο αποτέλεσμα και στις 4 περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Μάλιστα ο ΑΒΣΣ επιτυγχάνει αυτή την

ακρίβεια σε πολύ λιγότερο χρόνο στις τελευταίες περιπτώσεις. Η εξοικονόμηση χρόνου, όπως αναμενόταν, γίνεται μεγαλύτερη καθώς το μέγεθος του ΣΗΕ αυξάνεται. Μάλιστα, η εξοικονόμηση χρόνου έχει πολύ μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από τον ρυθμό μείωσης του ποσοστού επιτυχίας του ΑΒΣΣ. Επομένως, ο ΑΒΣΣ κρίνεται κατάλληλος για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης των ΕΕΠΙ, τουλάχιστον για ΣΗΕ της κλίμακας αυτών που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επιρροή που έχει κάθε παράμετρος του ΑΒΣΣ στα αποτελέσματά του. Ο αριθμός επαναλήψεων και ο αριθμός σωματιδίων ήταν οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επιρροή. Σε ότι αφορά τους συντελεστές επιτάχυνσης και την αρχική και τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας, ο συντελεστής επιτάχυνσης που εμπλέκεται στον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας επηρέαζε περισσότερο τα αποτελέσματα του ΑΒΣΣ σε σχέση με τις άλλες παραμέτρους. Κύρια λειτουργία του συντελεστή αυτού είναι να ενθαρρύνει το σωματίδιο να βρει τη βέλτιστη λύση, θυσιάζοντας λιγότερο καλές λύσεις που έχουν ήδη βρεθεί. Επομένως, η μικρή αύξησή του πιθανώς να οδήγησε τα σωματίδια του ΑΒΣΣ πιο συχνά σε ανεξερεύνητες περιοχές. Παράλληλα, έκανε το φαινόμενο παγίδευσης των σωματιδίων σε τοπικά ελάχιστα πιο σπάνιο. Όταν όμως υπήρχε μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή επιτάχυνσης της κοινωνικής συνιστώσας, τα σωματίδια δυσκολευόντουσαν να βρουν καλύτερες λύσεις, διότι ήταν πιο δύσκολο να αλλάξουν την κατεύθυνσή τους. Επιπρόσθετα, μπορεί να αγνοούσαν τη σχολαστική εξερεύνηση περιοχών που είχαν ποιοτικές λύσεις, στην προσπάθειά τους να βρουν ακόμα καλύτερες λύσεις. Ο συνδυασμός παραμέτρων του ΑΒΣΣ που πέτυχε το βέλτιστο αποτέλεσμα (δηλαδή είχε το μεγαλύτερο δυνατό ποσοστό επιτυχίας και τον χαμηλότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης) για το ΣΗΕ 39 ζυγών ήταν:

- Αριθμός των επαναλήψεων: 60
- Αριθμός των σωματιδίων: 40
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_1 : 2
- Συντελεστής επιτάχυνσης c_2 : 2
- Αρχική τιμή του συντελεστή αδράνειας $w_{initial}$: 0,9
- Τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας w_{final} : 0,4

Όταν στον παραπάνω συνδυασμό υπήρξε αλλαγή σε κάποια παράμετρο (για παράδειγμα αύξηση των επαναλήψεων ή των σωματιδίων) το αποτέλεσμα δεν παρουσίασε βελτίωση ή χειροτέρευσε.

Τέλος, μελετήθηκε η συμπεριφορά του ΑΒΣΣ όταν κάποια σωματίδιά του δεν παίρνουν αρχικές τιμές τυχαία, αλλά χρησιμοποιούν σαν αρχικές τιμές αποτελέσματα προηγούμενων δοκιμών του ΑΒΣΣ. Ο μέσος όρος των δοκιμών ήταν καλύτερος, αλλά το ποσοστό επιτυχίας παρέμεινε ίδιο. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο ότι τα σωματίδια με καλές αρχικές τιμές έλκυαν εκείνα με λιγότερο καλές κοντά τους. Αυτό έκανε τα σωματίδια 'οκνηρά' και είχε σαν αποτέλεσμα τη μη επαρκή εξερεύνηση του χώρου των λύσεων. Συνεπώς, θα ήταν σκόπιμη η τροποποίηση του ΑΒΣΣ, ώστε να μπορεί να φεύγει κάποιος αριθμός σωματιδίων από ήδη εξερευνημένες περιοχές, προς αναζήτηση μιας καλύτερης λύσης.

Η μείωση του συνολικού ωριαίου κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την εγκατάσταση των ΕΕΠΙ δεν ήταν πολύ μεγάλη. Εύκολα γεννάται η απορία, αν αξίζει η εγκατάσταση ΕΕΠΙ σε ένα δίκτυο με αποκλειστικό στόχο τη μείωση του συνολικού ωριαίου

κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, ανεξάρτητα από τη συμβολή των ΕΕΠΙ στη μείωση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δεν πρέπει να αγνοείται η συμβολή που έχουν οι ΕΕΠΙ σε μια πληθώρα λειτουργιών των μοντέρνων ΣΗΕ. Η συμβολή αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά στο Κεφάλαιο 2. Αν ληφθεί υπόψη το σύνολο των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι ΕΕΠΙ, η εγκατάστασή τους γίνεται πολύ πιο ελκυστική για τους διαχειριστές δικτύων.

6.2. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η έρευνα πάνω σε τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης σαν τον ΑΒΣΣ βρίσκεται σε σχετικά πρώιμο στάδιο και πιθανότατα θα συνεχίσει να παράγει νέες μεθόδους εμπνευσμένες από φυσικές διαδικασίες. Ιδιαίτερα σημαντική θα είναι η προσπάθεια τροποποίησης και συνδυασμού του ΑΒΣΣ και των άλλων αλγορίθμων που παρουσιάζονται στην αρχή του Κεφαλαίου 3. Συνδυάζοντας τους αλγορίθμους κατάλληλα, μπορεί να μειωθεί δραστικά ο χρόνος εκτέλεσης και να αυξηθεί σημαντικά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παράγει ο συνδυαστικός αλγόριθμος. Μπορεί επίσης να γίνει χρήση διαφόρων αλγορίθμων διαδοχικά αντί για διαδοχικές δοκιμές μόνο του ΑΒΣΣ. Τέλος, στην παρούσα εργασία, για το ΣΗΕ 39 ζυγών επιλέχθηκε ένας συνδυασμός παραμέτρων που οδηγούσε σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και κάθε φορά μεταβαλλόταν μόνο μια παράμετρος, ενώ οι άλλες έμεναν σταθερές. Θα ήταν ενδιαφέρουσες δοκιμές, στις οποίες πολλές παράμετροι μεταβάλλονται ταυτόχρονα, ώστε να εντοπιστεί σε ποιο βαθμό προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά του ΑΒΣΣ κάθε παράμετρος και η μελέτη των αποτελεσμάτων του ΑΒΣΣ, αν αυξηθεί ο συντελεστής επιτάχυνσης της κοινωνικής συνιστώσας και ταυτόχρονα χρησιμοποιηθούν και διαδοχικές επαναλήψεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Π. Σ. Γεωργιλιάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα : <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [2] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [3] H. Chen, Y. Wang, and R. Zhou, “Transient and voltage stability enhancement via co-ordinated excitation and UPFC control,” *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 148, no. 3, pp. 201–208, May 2001.
- [4] Y. Morioka et al., “Implementation of unified power flow controller and verification for transmission capability improvement,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 575–581, May 1999.
- [5] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1497, Apr. 1989.
- [6] Y. H. Song and A. T. Johns, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. IET, London, 2008.
- [7] A. Mohanty, S. Patra, and P. K. Ray, “Robust fuzzy-sliding mode based UPFC controller for transient stability analysis in autonomous wind-diesel-PV hybrid system,” *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 1248–1257, Apr. 2016.
- [8] H. Ambriz-Perez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, and A. De la Torre, “Incorporation of a UPFC model in an optimal power flow using Newton's method,” *IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 3, pp. 336–344, May 1998.
- [9] S. Singh, “The Unified Power Flow Controller Optimal Power Flow Model,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 2, no. 8, pp. 184–186, Aug. 2012.
- [10] H. Mori and Y. Maeda, “Application of Two- Layered Tabu Search to Optimal Allocation of UPFC for Maximizing Transmission Capability,” *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2006.
- [11] L. H. Hasaan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, and O. Steinmayer, “Application of genetic algorithm in optimization of unified power flow controller parameters and its location in the power system network,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 46, pp. 89–97, Mar. 2013.

- [12] Φ. Χ. Παλαιογιάννης, *Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων Για Την Εύρεση Της Βέλτιστης Θέσης Και Των Βέλτιστων Ρυθμίσεων Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς*. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2010.
- [13] S. Hajforoosh, S. M. H. Nabavi, and M. A. S. Masoum, “Coordinated aggregated-based particle swarm optimisation algorithm for congestion management in restructured power market by placement and sizing of unified power flow controller,” *IET Science Measurement and Technology*, vol. 6, no. 4, pp. 267–278, July 2012.
- [14] J. Kennedy and R. C. Eberhart, “Particle Swarm Optimization,” *IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942–1948, 1995.
- [15] R. C. Eberhart and J. Kennedy, “A New Optimizer using Particle Swarm Theory,” *International Symposium on Micromachine and Human Science*, pp. 39–43, 1995.
- [16] F. van den Bergh and A. P. Engelbrecht, “Effects of Swarm Size on Cooperative Particle Swarm Optimizers,” *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 892–899, 2001.
- [17] A. Ratnaweera, S. K. Halgamuge, and H. C. Watson, “Self-Organizing Hierarchical Particle Swarm Optimizer with Time-Varying Acceleration Coefficients,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 240–255, June 2004.
- [18] “Mathworks- Matlab and Simulink for Technical Computing” [Online] Διαθέσιμο: <http://www.mathworks.com/>
- [19] “Matpower- A Matlab Power System Simulation Package” [Online] Διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>
- [20] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, “MATPOWER: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.
- [21] Power System Test Case Archive, University of Washington, College of Engineering [Online] Διαθέσιμο: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>