



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ
ΜΕΛΙΣΣΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτης – Βασίλειος Ε. Καζάρας

Επιβλέπων : Πάυλος Σ. Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ
ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ
ΜΕΛΙΣΣΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταμάτης – Βασίλειος Ε. Καζάρας

Επιβλέπων : Παύλος Σ. Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Δεκεμβρίου 2013.

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

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

.....
Παύλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....

Σταμάτης – Βασίλειος Ε. Καζάρας

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

Copyright © Σταμάτης – Βασίλειος Καζάρας, 2013-2014.

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

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς και οι εξελίξεις στις τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν συντελέσει στην αυξανόμενη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) στα δίκτυα διανομής. Η σωστή τοποθέτηση των ΜΔΠ συνδυάζει λειτουργικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα, επιτυγχάνοντας ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος, ανύψωση της τάσης, αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου, μείωση της συχνότητας αναβάθμισης του δικτύου και της ανάγκης εγκατάστασης νέων κεντρικών σταθμών. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός της βέλτιστης θέσης, του βέλτιστου μεγέθους και του βέλτιστου συντελεστή ισχύος (ΣΙ) των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής, μέσω της χρήσης του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, με κριτήριο είτε την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο είτε τη μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου. Ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών είναι ένας νέος μεθευρετικός αλγόριθμος, βασισμένος στην ευφυή συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μέλισσες σε μια κυψέλη κατά την αναζήτηση τροφής. Είναι απλός και ευέλικτος, καθώς έχει μόνο τρεις παραμέτρους ελέγχου που προκαθορίζονται από το χρήστη, παράγει πληθυσμό λύσεων προς αναζήτηση της βέλτιστης λύσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στο πλαίσιο της εργασίας υλοποιήθηκε αλγόριθμος σε περιβάλλον MATLAB για τον υπολογισμό της βέλτιστης τοποθέτησης και μεγέθους μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον (GUI) για καλύτερη και ευκολότερη εφαρμογή του προγράμματος από το χρήστη. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε δίκτυα διανομής 4, 15, 33 και 69 ζυγών για διάφορες περιπτώσεις, λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά συγκεκριμένους περιορισμούς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη παραγωγή, Αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών, Ανάλυση ροών φορτίου, Αλγόριθμος βελτιστοποίησης, Μείωση απωλειών ισχύος, Μεγιστοποίηση οικονομικού κινήτρου, Δίκτυα διανομής.

ABSTRACT

Liberalization of electricity markets, the shortage of transmission capacity and the development of renewable energy technologies contribute to the increasing penetration of distributed generation units (DG-units) in distribution networks. The proper DG-unit application combines functional, economic and environmental advantages, achieving reduction of total system real power loss, voltage improvement, increased reliability, deferral of network's upgrades and new central generator units' establishments. The scope of this thesis is the calculation of the optimal placement, sizing and power factor of distributed generation in radial distribution systems, by the utilization of artificial bee colony (ABC) algorithm. The aim of the optimization problem can be either the minimization of total system real power loss or the maximization of the financial incentive. The artificial bee colony algorithm is a new metaheuristic, population-based optimization algorithm, inspired by the intelligent foraging behavior of honeybee swarm. The artificial bee colony algorithm is simple and flexible, as it has only three control parameters to be tuned, and can be used for solving nonlinear optimization problems. In this thesis, an algorithm was implemented using the MATLAB environment for calculating the optimal size, power factor and location of distributed generation. There was also a graphical user interface (GUI) developed in order to make the program user-friendly. The algorithm was applied to 4, 15, 33, 69-bus radial distribution systems, for different test cases, assuming various restrictions in each case. The obtained results are presented in this thesis and the corresponding conclusions are drawn.

INDEX TERMS

Distributed generation, Artificial bee colony algorithm, Power flow analysis, Optimization algorithm, Power loss reduction, Financial incentive maximization, Distribution networks.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013, στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της εργασίας ήταν ο Λέκτορας κ. Παύλος Γεωργιλάκης, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και επισημάνσεις. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, στους οποίους και αφιερώνω την εργασία, για τη σημαντική στήριξη και βοήθειά τους σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Η Διεσπαρμένη Παραγωγή σε Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	2
1.3 Δομή της εργασίας	3
1.4 Βιβλιογραφία.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ..	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Η συμπεριφορά του σμήνους των μελισσών.....	7
2.3 Οι συνιστώσες του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών	8
2.4 Βιβλιογραφία.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	13
3.1 Εισαγωγή.....	13
3.2 Διατύπωση του προβλήματος ροών φορτίου	14
3.3 Επίλυση του προβλήματος	17
3.3.1 Μέθοδος Newton-Raphson	18
3.4 Βιβλιογραφία.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ	23
4.1 Εισαγωγή.....	23
4.2 Διατύπωση και επίλυση του προβλήματος.....	23

4.2.1	Ρυθμιστικό πλαίσιο	26
4.2.2	Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	26
4.2.3	Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης	28
4.3	Βιβλιογραφία.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ 31

5.1	Εισαγωγή.....	31
5.2	Περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογής.....	31
5.2.1	Το περιβάλλον της MATLAB.....	32
5.2.2	Προγραμματισμός στη MATLAB.....	33
5.2.3	Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)	34
5.3	Λογισμικό εύρεσης βέλτιστης θέσης και μεγέθους διεσπαρμένης παραγωγής σε ακτινικά δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	38
5.3.1	Απαιτήσεις συστήματος	39
5.3.2	Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής.....	39
5.3.3	Εισαγωγή δεδομένων	41
5.3.4	Επεξεργασία δεδομένων.....	44
5.3.5	Αποθήκευση αποτελεσμάτων και έξοδος.....	50
5.3.6	Ανάλυση m-files και δομή της εφαρμογής.....	52
5.4	Βιβλιογραφία.....	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΟΚΙΜΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ 59

6.1	Εισαγωγή.....	59
6.2	Αριθμητικό παράδειγμα	59
6.2.1	Μαθηματικά σύμβολα.....	59

6.2.2	Δεδομένα συστήματος και διατύπωση προβλήματος.....	60
6.2.3	Δεδομένα αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών.....	62
6.2.4	Επίλυση ροής φορτίου αρχικού συστήματος	62
6.2.5	Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	64
6.2.6	Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών	75
6.2.7	Αρχικοποίηση πληθυσμού.....	75
6.2.8	Φάση μέλισσας εργάτριας	76
6.2.9	Φάση μέλισσας θεατή	77
6.2.10	Φάση μέλισσας ανιχνευτή.....	77
6.2.11	Τελική λύση προβλήματος.....	78
6.2.12	Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής και πυκνωτή.....	78
6.2.13	Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση δύο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.....	79
6.3	Δίκτυο 15 ζυγών.....	81
6.3.1	Δεδομένα δικτύου 15 ζυγών.....	81
6.3.2	Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 15 ζυγών	82
6.3.3	Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 15 ζυγών	93
6.3.4	Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 15 ζυγών	94
6.3.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 15 ζυγών	96
6.4	Δίκτυο 33 ζυγών.....	100
6.4.1	Δεδομένα δικτύου 33 ζυγών.....	100
6.4.2	Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 33 ζυγών	101

6.4.3	Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 33 ζυγών	113
6.4.4	Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 33 ζυγών	115
6.4.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 33 ζυγών	117
6.5	Εφαρμογή σε δίκτυο 69 ζυγών	121
6.5.1	Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών.....	121
6.5.2	Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 69 ζυγών	123
6.5.3	Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 69 ζυγών	134
6.5.4	Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 69 ζυγών	136
6.5.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών	138
6.6	Βιβλιογραφία.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		145
7.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων της.....	145
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας.....	146

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Ένα ΣΗΕ αποτελείται από μονάδες παραγωγής, από συσκευές που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, και από το δίκτυο που τις συνδέει. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος, τόσο για τους παραγωγούς όσο και για τους καταναλωτές, και με τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1.1].

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του ΣΗΕ : την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί βρίσκεται σε μια συνεχή ροή και επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευθεί σε μεγάλες ποσότητες με οικονομικό τρόπο, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που χρειάζεται η κατανάλωσή της.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Κύριοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι θερμικοί και οι υδροηλεκτρικοί. Τελευταία γίνεται μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) κυρίως με την εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης που διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές δια μέσου των υποσταθμών διανομής και των γραμμών χαμηλής τάσης.

Η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ώρου και από τη χωροταξική της κατανομή. Τα ΣΗΕ ποικίλλουν σε μέγεθος και δομή, ωστόσο όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz, χρησιμοποιούνται όμως και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η τάση λειτουργίας πρέπει να παραμένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό. Γραμμές διανομής υπάρχουν και μονοφασικές, δύο αγωγών.

Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης. Οι μονοφασικές καταναλώσεις κατανέμονται ισομερώς στις τρεις φάσεις για την ισορροπημένη λειτουργία του τριφασικού συστήματος [1.2], [1.3].

1.2 Η ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελεί μια σχετικά νέα έννοια στη βιομηχανία του ηλεκτρισμού, αλλά στην πραγματικότητα ως ιδέα είναι κάθε άλλο παρά καινούργια. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα ΣΗΕ ήταν συνεχές (ΣΡ), χαμηλής τάσης. Οι πρώτοι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας παρείχαν ηλεκτρισμό σε πελάτες-φορτία που βρίσκονταν σε μικρή απόσταση από αυτούς. Η εξισορρόπηση ζήτησης και προμήθειας υλοποιούνταν μερικώς με τη χρήση τοπικής αποθήκευσης ενέργειας, όπως για παράδειγμα με τη χρήση συσσωρευτών οι οποίοι είχαν τη δυνατότητα άμεσης ηλεκτρικής σύνδεσης με το DC δίκτυο ισχύος [1.4].

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να δημιουργείται και πάλι ενδιαφέρον για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορα σημεία του δικτύου, στο σύστημα διανομής. Ως διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ), ορίζεται συνήθως η μικρής κλίμακας παραγωγή ενέργειας κοντά στο φορτίο. Με την μέχρι τώρα βιβλιογραφική έρευνα, τα συμπεράσματα που βγαίνουν γύρω από το θέμα της ΔΠ είναι ότι δεν υπάρχει ένας σαφής ορισμός, είτε στην βιβλιογραφία είτε στις νομοθεσίες των διαφόρων κρατών. Για έναν ενιαίο ορισμό υπάρχουν διάφορα αντικείμενα συζήτησης που πρέπει περαιτέρω να αναλυθούν, όπως ο σκοπός για τον οποίο γίνεται η παραγωγή, η τοποθεσία, η ισχύς λειτουργίας, η περιοχή διανομής, η τεχνολογία που χρησιμοποιείται, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον, ο τρόπος λειτουργίας, το ιδιοκτησιακό καθεστώς και το ποσοστό διεξόδου της ΔΠ [1.5]. Για την υλοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες και γενικά μπορούν να οριστούν τρεις βασικές κατηγορίες ΔΠ:

- ΔΠ από συνεργασία συμβατικών πηγών με ΑΠΕ, όπως συνδυασμοί μικρών υδροηλεκτρικών, φωτοβολταϊκών, ανεμογεννητριών, μηχανών diesel, ηλιοθερμικών συστημάτων, κυψελών καυσίμου και μπαταριών.
- ΔΠ από μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.
- ΔΠ από ΑΠΕ, όπως ήλιος, άνεμος, βιομάζα, υδατοπτώσεις, ωκεανική και γεωθερμική ενέργεια.

Η εισαγωγή της ΔΠ αποτελεί μέρος μιας σειράς από αλλαγές που λαμβάνουν χώρα αυτήν την περίοδο στα ΣΗΕ. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα αντικαθίσταται από την παραγωγή από ΑΠΕ, ενώ οι μεγάλες μονάδες παραγωγής συνδεδεμένες στο σύστημα μεταφοράς, αντικαθίστανται από μικρές μονάδες παραγωγής, συνδεδεμένες στο σύστημα διανομής [1.6].

Οι λόγοι ανάπτυξης των εφαρμογών ΔΠ είναι κυρίως οικονομικοί, λειτουργικοί και περιβαλλοντικοί. Η εισαγωγή της ΔΠ θα οδηγήσει σε αύξηση του ανταγωνισμού στην αγορά του ηλεκτρισμού, επομένως και σε καλύτερη ποιότητα προϊόντος (ηλεκτρικής ισχύος) σε χαμηλότερη τιμή. Επιπλέον, η παραγωγή ρεύματος κοντά στην τοποθεσία κατανάλωσης έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος, μειώνοντας αντίστοιχα το κόστος μεταφοράς και διανομής της ενέργειας [1.7]. Η εγκατάσταση ΔΠ οδηγεί γενικά σε ανύψωση της τάσης, επομένως σε απομακρυσμένες περιοχές μπορεί να συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όταν αναφέρεται ο όρος ΔΠ, αυτός συμπεριλαμβάνει και τη συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, ανεβάζοντας έτσι τη συνολική απόδοση των μηχανών [1.8]. Ακόμα, η ΔΠ μπορεί να προσφέρει σημαντικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένης και της μείωσης της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και της μείωσης των εκπομπών σε CO₂ και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου (GHG) [1.9], [1.10].

Η σωστή τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) κατάλληλου μεγέθους σε ένα δίκτυο διανομής συνεισφέρει στην καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η εγκατάσταση ΜΔΠ, μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση της ανάγκης του δικτύου για αναβάθμιση, καθώς επίσης μπορεί να αποφευχθεί η ανάγκη για τη δημιουργία νέων κεντρικών σταθμών [1.11].

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ σε δίκτυα διανομής, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών (Artificial Bee Colony-ABC algorithm), με σκοπό τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος ή τη μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου διανομής. Η δομή της εργασίας οργανώνεται σε επτά κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών και τα κύρια χαρακτηριστικά που τον διέπουν.

Στο **Κεφάλαιο 3** διατυπώνεται και επιλύεται το πρόβλημα των ροών φορτίου. Παρουσιάζεται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την επίλυση των ροών φορτίου που απαιτεί ο αλγόριθμος που θα υλοποιηθεί στο Κεφάλαιο 4.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους ΔΠ με τη χρήση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και της ανάλυσης ροών φορτίου.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται αναλυτικά το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους ΔΠ με τη χρήση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και της ανάλυσης ροών φορτίου. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB και επιπλέον δημιουργήθηκε γραφικό περιβάλλον για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται αρχικά ένα αριθμητικό παράδειγμα για ένα δίκτυο 4 ζυγών, στο οποίο αναλύεται βήμα-βήμα η μέθοδος υπολογισμού της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους της ΔΠ με τη χρήση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και της ανάλυσης ροών φορτίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από το λογισμικό του Κεφαλαίου 5 για τρία δίκτυα με 15, 33 και 69 ζυγούς αντίστοιχα, για διάφορες περιπτώσεις.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτείνονται ενδεχόμενες επεκτάσεις.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Β. Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας”, *Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*, 1985.
- [1.2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, *Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*, 2001.
- [1.3] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, *New York: McGraw-Hill*, pp. 3-10, 1993.
- [1.4] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D’haeseleer, “Distributed Generation: definition, benefits and issues”, *Energy Policy*, vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [1.5] T. Ackermann, G. Andersson, L.Söder, “Distributed Generation: a definition”, *Electric Power System Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [1.6] M. Bollen, F. Hassan, “Integration of Distributed Generation in the Power System”, *Wiley-IEEE Press*, 2011.
- [1.7] IEA, “Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets”, *Paris: IEA Publications*, pp.7-16, 25-51, 2002.
- [1.8] R. A. Laurie, “Distributed Generation: Reaching the Market Just in Time”, *The Electricity Journal*, pp. 87-94, March 2001.
- [1.9] N. Strachan ,H. Dowlatabadi, “Distributed generation and distribution utilities”, *Energy Policy* vol. 30, pp. 649-661, 2002.
- [1.10] E. S. Karapidakis, Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, E. Thalassinakis, “Generation expansion planning of Crete power system for high penetration of renewable energy sources”, *Materials Science Forum* Vol. 670, pp. 407-414, 2011.
- [1.11] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziaargyriou, “Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, issue 3, pp. 3420-3428, Aug. 2013.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για την επίλυση σύνθετων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπου οι ακριβείς-αναλυτικές μέθοδοι οδηγούν σε μη πρακτικούς υπολογιστικούς χρόνους, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι, στις οποίες «θυσιάζεται» η εγγύηση για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων, προκειμένου να υπολογιστούν οι κοντινές στις βέλτιστες λύσεις σε λογικούς και πρακτικούς υπολογιστικούς χρόνους. Οι αλγόριθμοι αυτοί ονομάζονται ευρετικοί. Η εξέλιξή τους αποτελεί ένα νέο τύπο αλγόριθμων, τους μεθευρετικούς αλγόριθμους, οι οποίοι συνδυάζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των ευρετικών αλγόριθμων σε συνδυασμό με μια αποδοτική και αποτελεσματική εξερεύνηση στο χώρο των λύσεων, με αποτέλεσμα τον μη εγκλωβισμό σε τοπικά βέλτιστες λύσεις.

Ιδιαίτερη θέση στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγόριθμων έχουν αυτοί που βασίζονται στην ευφυή συμπεριφορά ορισμένων ζώων και εντόμων, τα οποία αλληλεπιδρούν ατομικά και συλλογικά μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους. Η συμπεριφορά αυτή είναι γνωστή ως ευφυΐα του σμήνους (swarm intelligence) [2.1]. Γνωστοί αλγόριθμοι βασισμένοι στην ευφυή συμπεριφορά του σμήνους είναι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO) [2.2].

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών, ο οποίος βασίζεται στην ευφυή συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μέλισσες σε μια κυψέλη κατά την αναζήτηση τροφής. Ο αλγόριθμος αυτός εισήχθη από τον Karaboga το 2005 και χρησιμοποιήθηκε για αριθμητικά προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Αργότερα, τροποποιήθηκε ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίησή του σε προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, όπως είναι το πρόβλημα υπολογισμού της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους της διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής.

2.2 Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΣΜΗΝΟΥΣ ΤΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ

Ο όρος σμήνος αναφέρεται σε οποιαδήποτε ομάδα ατόμων, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το κλασικό παράδειγμα σμήνους αποτελούν οι μέλισσες γύρω από την κυψέλη, ωστόσο ο ορισμός μπορεί να επεκταθεί και σε ομάδες που παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όπως η αποικία των μυρμηγκιών, το σμήνος των πουλιών κλπ. [2.3]. Δύο βασικές έννοιες, η αυτοοργάνωση και ο καταμερισμός της εργασίας, είναι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για την απόκτηση της συμπεριφοράς νοημοσύνης σμήνους [2.4].

Η αυτοοργάνωση μπορεί να οριστεί σαν ένα σύνολο από δυναμικούς μηχανισμούς, οι οποίοι καθιερώνουν κανόνες για την αλληλεπίδραση μεταξύ των συνιστωσών ενός συστήματος, εξασφαλίζοντας ότι οι αλληλεπιδράσεις αυτές λαμβάνουν μέρος στο τοπικό επίπεδο, χωρίς να επηρεάζουν το συνολικό μοτίβο του συστήματος. Οι αλληλεπιδράσεις μπορεί να βασίζονται σε θετικές ή αρνητικές αναδράσεις, σε διακυμάνσεις ή τυχαίες εναλλαγές εργασιών, καθώς και σε πολλαπλές αλληλεπιδράσεις. Η συμπεριφορά των πουλιών που προσαρμόζουν δυναμικά τις θέσεις τους σε σχέση με το υπόλοιπο σμήνος ώστε να καταβάλλεται η λιγότερη προσπάθεια κατά τη διάσχιση του αέρα αποτελεί παράδειγμα αυτοοργάνωσης.

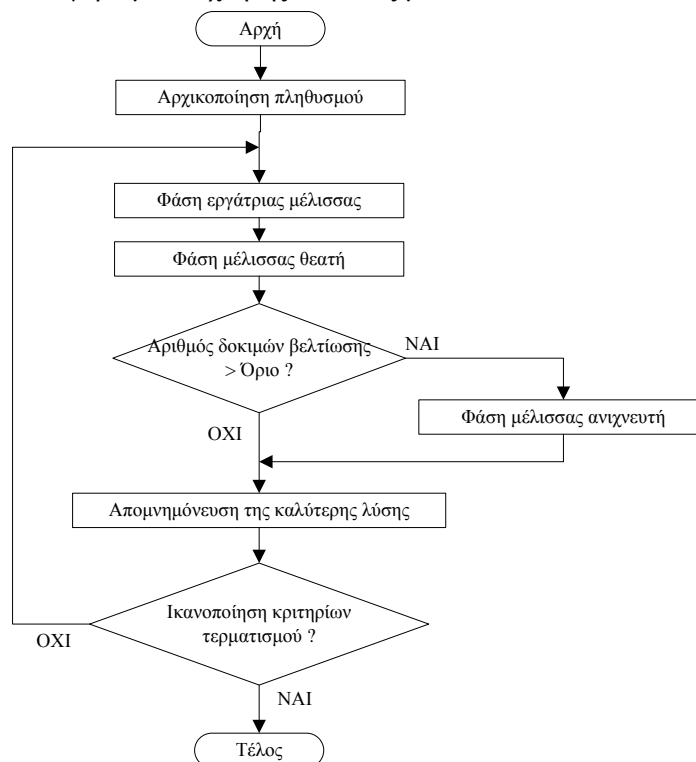
Μέσα σε ένα σμήνος υπάρχουν διαφορετικές εργασίες που εκτελούνται ταυτόχρονα από εξειδικευμένα άτομα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται καταμερισμός της εργασίας. Με τον παραλληλισμό των διεργασιών αποφεύγεται η εναλλαγή των διεργασιών, η οποία κοστίζει ενέργεια και χρόνο. Το βασικό χαρακτηριστικό του καταμερισμού της εργασίας είναι η ελαστικότητά του, μέσω της οποίας διατηρείται η βιωσιμότητα της αποικίας και η αναπαραγωγική επιτυχία.

Η αποικία των μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες μελισσών: τις εργάτριες (employed), τις μέλισσες θεατές (onlookers) και τις μέλισσες ανιχνευτές (scout). Οι μέλισσες εργάτριες είναι αυτές που αναζητούν τις θέσεις πηγής τροφής (food-source positions) και μεταφέρουν πληροφορίες για αυτές τις πηγές, όπως π.χ. τις ποσότητες νέκταρ (δηλαδή την ποιότητα της λύσης), τις οποίες μοιράζονται με συγκεκριμένη πιθανότητα. Οι μέλισσες θεατές βρίσκονται στην κυψέλη και επιλέγουν μια πηγή τροφής μέσω των πληροφοριών που μεταφέρουν οι εργάτριες. Η ανταλλαγή των πληροφοριών σχετικά με την πηγή τροφής γίνεται μέσω του χορού των εργατριών (waggle dance). Οι μέλισσες θεατές παρακολουθούν διάφορους χορούς προτού επιλέξουν μια θέση πηγής τροφής, ανάλογα με την πιθανότητα που αντιστοιχεί στην ποιότητα αυτής της θέσης. Όπως είναι λογικό, μια καλή θέση πηγής τροφής (λύση) προσελκύει περισσότερες μέλισσες από μια χειρότερη. Οι μέλισσες ανιχνευτές είναι αυτές που αναζητούν τυχαίες πηγές τροφής. Οι μέλισσες θεατές και οι ανιχνευτές, όταν εντοπίσουν μια νέα θέση πηγής τροφής, μπορούν να γίνουν εργάτριες και να μεταφέρουν την πληροφορία για τη νέα θέση στις υπόλοιπες. Αντίστροφα, όταν μια θέση πηγής τροφής έχει εκμεταλλευτεί πλήρως, τότε η εργάτρια μέλισσα που απασχολείται σε αυτή την εγκαταλείπει και μπορεί να γίνει θεατής ή ανιχνευτής [2.5].

2.3 ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ

Ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών είναι βασισμένος στην ευφυή συμπεριφορά του σμήνους των μελισσών και χρησιμοποιείται για την επίλυση πολυδιάστατων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η αποικία των μελισσών αποτελείται από τις μέλισσες εργάτριες, τις θεατές και τις ανιχνευτές. Οι μέλισσες εργάτριες αποτελούν το πρώτο μισό του πληθυσμού της αποικίας, ενώ το άλλο μισό είναι ο πληθυσμός των μελισσών θεατών. Για κάθε μια μέλισσα εργάτρια αντιστοιχεί μια θέση πηγής τροφής. Όταν μια θέση πηγής τροφής έχει εξαντληθεί από την εργάτρια που απασχολείται σε αυτή, τότε η μέλισσα γίνεται ανιχνευτής, αναζητώντας νέα τυχαία θέση πηγής τροφής [2.6].

Το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών είναι:



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών.

Κατά τη φάση αρχικοποίησης δημιουργούνται τυχαίες λύσεις (θέσεις πηγών τροφής), ίσες με τον αριθμό των εργατριών μελισσών ($m=1..SN$, SN ο αριθμός του πληθυσμού των εργατριών). Κάθε λύση είναι ένα διάνυσμα D -διαστάσεων (x_{mi} , $i=1..D$), όπου D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Η αρχικοποίηση των λύσεων γίνεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$x_{mi} = l_i + r(u_i - l_i) \quad (2.1)$$

όπου

- u_i ανώτατο όριο που μπορεί να πάρει η τιμή της παραμέτρου i
- l_i κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει η τιμή της παραμέτρου i
- r τυχαίος αριθμός μεταξύ $[0,1]$

Για κάθε λύση ορίζεται και η ποιότητα (καταλληλότητα) της λύσης, η οποία αντιστοιχεί στην ποσότητα του νέκταρ της πηγής τροφής. Η τιμή της καταλληλότητας (fitness) δίνεται από τη σχέση (2.2):

$$\text{fitness}_i = \frac{1}{1 + \text{ObjFun}_i} \quad (2.2)$$

όπου ObjFun_i η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της λύσης x_i .

Μετά την αρχικοποίηση, ο πληθυσμός των λύσεων υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους από διαδικασίες αναζήτησης για τις μέλισσες εργάτριες, τις θεατές και τις μέλισσες ανιχνευτές.

Το επόμενο στάδιο μετά την αρχικοποίηση είναι αυτό της μέλισσας εργάτριας. Στο στάδιο αυτό της αναζήτησης, κάθε εργάτρια μέλισσα τροποποιεί τη θέση (λύση) που έχει στη μνήμη της από το προηγούμενο στάδιο, με τοπικές αναζητήσεις στη γειτονιά των λύσεων. Δημιουργείται δηλαδή μια νέα γειτονική θέση πηγής τροφής (λύση) με τη βοήθεια μίας τυχαία επιλεγμένης θέσης (λύσης) από μία μέλισσα εργάτρια και στη συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα του νέκταρ (καταλληλότητα) της νέας θέσης (λύσης). Κάθε φορά μεταβάλλεται μια παράμετρος του διανύσματος, ενώ οι υπόλοιπες παραμένουν αμετάβλητες. Έστω δηλαδή ότι x_{ij} είναι η j -παράμετρος μιας λύσης i , η οποία επιλέχτηκε για τροποποίηση. Η γειτονική θέση πηγής τροφής δημιουργείται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$x_{ij}^{\text{new}} = x_{ij}^{\text{old}} + u(x_{ij}^{\text{old}} - x_{kj}) \quad (2.3)$$

όπου:

$k \neq i$, $k, i \in \{1, \dots, SN\}$, SN το πλήθος των εργατριών μελισσών
 $j \in \{1, \dots, D\}$ η παράμετρος που μεταβάλλεται
 u τυχαίος αριθμός μεταξύ $[-1, 1]$

Αν η ποσότητα του νέκταρ είναι μεγαλύτερη από αυτήν της προηγούμενης θέσης, τότε η μέλισσα σβήνει την προηγούμενη από τη μνήμη της και απομνημονεύει τη νέα θέση. Διαφορετικά, συγκρατεί στη μνήμη της τη θέση της προηγούμενης πηγής τροφής.

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία αναζήτησης, οι εργάτριες μέλισσες μοιράζονται τις πληροφορίες για τις νέες πηγές τροφής (θέση, ποσότητα νέκταρ) με τις μέλισσες θεατές. Μια μέλισσα θεατής αξιολογεί τις πληροφορίες από όλες τις μέλισσες εργάτριες και επιλέγει μία θέση με βάση μία πιθανότητα ανάλογη της ποσότητας νέκταρ. Η πιθανότητα να επιλεγεί μια πηγή τροφής από τις μέλισσες θεατές δίνεται από τη σχέση (2.4):

$$p_i = \frac{\text{fitness}_i}{\sum_1^{SN} \text{fitness}_i} \quad (2.4)$$

όπου fitness_i η καταλληλότητα της λύσης i , και SN ο συνολικός αριθμός των θέσεων πηγών τροφής (λύσεων). Είναι ξεκάθαρο ότι μια καλή λύση θα προσελκύσει περισσότερες μέλισσες θεατές από μια χειρότερη. Στη συνέχεια τροποποιεί τη θέση πηγής τροφής με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιήθηκε στο στάδιο της εργάτριας, όπως φαίνεται στη σχέση (2.3). Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να κατανεμηθούν όλες οι μέλισσες θεατές.

Αν μια λύση δε βελτιώνεται για ένα συγκεκριμένο αριθμό δοκιμών, τότε η μέλισσα που ασχολείται με αυτήν, την εγκαταλείπει, γίνεται ανιχνευτής και αναζητά μια νέα τυχαία θέση πηγής-τροφής. Ο αριθμός των δοκιμών, μετά το πέρας των οποίων η πηγή χαρακτηρίζεται ως εξαντλημένη, ονομάζεται όριο εξάντλησης ή απλά όριο. Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών, καθώς από την τιμή που θα λάβει εξαρτάται το αν ο αλγόριθμος θα «παγιδευτεί» σε τοπική βέλτιστη λύση (τοπικό μέγιστο ή ελάχιστο).

Η προτεινόμενη τιμή του ορίου είναι ίση με ή τουλάχιστον $0.5 \times CS \times D$, όπου CS το μέγεθος της αποικίας και D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση.

Η νέα θέση πηγής τροφής για τη μέλισσα ανιχνευτή i παράγεται σύμφωνα με τη σχέση (2.5):

$$x_i^{\text{new}} = \min(x_i^j) + u(\max(x_i^j) - \min(x_i^j)) \quad (2.5)$$

όπου η (2.5) ισχύει για όλες τις j-παραμέτρους και u τυχαίος αριθμός μεταξύ [0,1].

Στη φάση της μέλισσας ανιχνευτή υφίσταται μια αναλογία εγκατάλειψης της εξαντλημένης πηγής τροφής στη διαδικασία ανίχνευσης τροφής. Έτσι, λύσεις που δεν είναι προσοδοφόρες πλέον για αναζήτηση, εγκαταλείπονται για να διερευνηθούν νέες λύσεις στο χώρο αναζήτησης. Ο αλγόριθμος έτσι αποκτά τη διττή ικανότητα της εξερεύνησης και εκμετάλλευσης που λειτουργούν σε αρμονία μεταξύ τους [2.7].

Μετά τον καθορισμό της νέας θέσης πηγής τροφής, ξεκινά ακόμη ένας κύκλος του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, στον οποίο επαναλαμβάνονται οι ίδιες διαδικασίες (εργάτριας – θεατή – ανιχνευτή) μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού.

Στις σχέσεις (2.3), (2.5) εάν κατά τη δημιουργία της νέας λύσης κάποια παράμετρος λάβει μη αποδεκτή τιμή, τότε αυτή μπορεί να ρυθμιστεί εντός των προκαθορισμένων ορίων. Συγκεκριμένα σε αυτήν την εργασία η παράμετρος θα λάβει την κοντινότερη στο όριο τιμή, δηλαδή τη μέγιστη ή την ελάχιστη.

Συγκεντρωτικά, ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά των μελισσών κατά την αναζήτηση τροφής και ανήκει στους αλγόριθμους που παράγουν πληθυσμό λύσεων προς αναζήτηση (population based search). Στη διαδικασία αυτή οι θέσεις πηγής τροφής τροποποιούνται από τις τεχνητές μέλισσες, τελικός σκοπός των οποίων είναι η εύρεση της πηγής με τη μεγαλύτερη ποσότητα νέκταρ. Στο σύστημα της τεχνητής αποικίας μελισσών, ορισμένες από τις τεχνητές μέλισσες, οι εργάτριες και οι θεατές, επιλέγουν πηγές τροφής ανάλογα με την εμπειρία αυτών και των συναδέλφων τους, και προσαρμόζουν τις θέσεις τους. Αν η ποσότητα νέκταρ μιας νέας πηγής είναι υψηλότερη από αυτή που έχει προηγουμένως συγκρατήσει μια μέλισσα, τότε απομνημονεύει αυτή και ξεχνά την προηγούμενη. Επίσης υπάρχουν και οι μέλισσες ανιχνευτές, οι οποίες πετούν και επιλέγουν πηγές τροφών τυχαία χωρίς κάποια εμπειρία. Έτσι το σύστημα αυτό συνδυάζει μεθόδους τοπικών αναζητήσεων, οι οποίες εκτελούνται από τις μέλισσες εργάτριες και τις θεατές, καθώς και μεθόδους καθολικών αναζητήσεων, οι οποίες διαχειρίζονται από τις μέλισσες θεατές και τις μέλισσες ανιχνευτές, προσπαθώντας να ισορροπήσει τη διαδικασία εξερεύνησης και εκμετάλλευσης. Επιπλέον ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών έχει μόνο τρεις παραμέτρους ελέγχου που προκαθορίζονται από το χρήστη: (α) το μέγεθος της αποικίας (CS - colony size), (β) το όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης ή απλώς όριο (limit) και (γ) το μέγιστο αριθμό ανακυκλώσεων (MCN - maximum cycle number), επομένως είναι αρκετά απλός και ευέλικτος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση γενικά προβλημάτων βελτιστοποίησης, με και χωρίς περιορισμούς.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] D. Karaboga, B. Akay, “A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm”, *Applied Mathematics and Computation vol. 214*, pp. 108–132, 2009.
- [2.2] B.K. Panigrahi, Y. Shi, and M.-H. Lim (Eds.), “Handbook of Swarm Intelligence”, *ALO vol. 8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011.
- [2.3] D. Karaboga, B. Basturk, “A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm”, *Journal of Global Optimization vol. 39*, pp. 459-471, 2007.
- [2.4] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, “Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems”, *New York, NY: Oxford University Press*, 1999.
- [2.5] D. Karaboga, B. Basturk, “On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm”, *Applied Soft. Computing, vol. 8*, pp. 687–697, 2008.
- [2.6] D. Karaboga, “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization”, *Technical Report-TR06, Kayseri, Turkey: Dept. Comput. Eng., Erciyes Univ.*, 2005.
- [2.7] Artificial Bee Colony Homepage, [Online], Διαθέσιμο: <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/> προσπελάστηκε το Σεπτέμβριο 2012.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κύριος προορισμός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι να προμηθεύει την πραγματική και άεργο ισχύ στα διάφορα φορτία που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα. Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, διακρίνεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ή κανονική λειτουργία και στη μεταβατική και ασύμμετρη κατάσταση λειτουργίας ή γενικότερα μη κανονική ή ανώμαλη λειτουργία. Η ροή της ισχύος ή του φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησης αποτελεί τη χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα σύστημα. Ταυτόχρονα, η συχνότητα και η τάση στους ζυγούς πρέπει να διατηρούνται σε προδιαγεγραμμένα όρια, παρά το γεγονός ότι τα φορτία μεταβάλλονται μερικές φορές απρόβλεπτα. Η ανάλυση των ροών φορτίου γίνεται μόνο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και όχι σε τυχόν μεταβατικά φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται είτε κατά τη σύνδεση/αποσύνδεση στοιχείων του δικτύου είτε κατά τη διάρκεια τριφασικών βραχυκυκλωμάτων [3.1].

Η μελέτη ροών φορτίου είναι αναγκαία τόσο κατά την καθημερινή λειτουργία ενός δικτύου, όσο και για τις μελέτες επέκτασης και ανάπτυξης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση των ροών φορτίου σε ένα δίκτυο χρειάζεται επίσης για τον έλεγχο των τάσεων και των ροών ώστε αυτές να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων λειτουργίας και για τον προσδιορισμό των επιπτώσεων από ενδεχόμενες διαταραχές (απώλεια γραμμής, γεννήτριας, κλπ.), από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, από την εισαγωγή νέων φορτίων, από την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, από την εγκατάσταση πυκνωτών αντιστάθμισης, από την κατασκευή νέων γραμμών κλπ.

Η ανάλυση ροών φορτίου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τάσεων κατά μέτρο και γωνία σε όλους τους ζυγούς, καθώς και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος σε όλες τις γραμμές ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο ορίζεται από τις καταναλώσεις των φορτίων, την παραγωγή ενεργού ισχύος και τις τάσεις των γεννητριών [3.2].

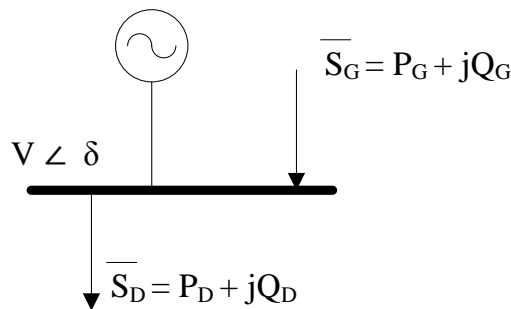
Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η ανάλυση ροών φορτίου είναι το σημείο εκκίνησης για όλες τις επιμέρους μελέτες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θεμελιώνεται το πρόβλημα ροών φορτίου και αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των ροών ισχύος και των τάσεων σε ένα σύστημα σύμφωνα με τη μέθοδο Newton-Raphson.

3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ

Κατά την ανάλυση ροών φορτίου στα δίκτυα διανομής (ΔΔ) γίνονται συνήθως ορισμένες παραδοχές. Οι γραμμές θεωρούνται συμμετρικές, δηλαδή κάθε φάση έχει την ίδια σύνθετη αντίσταση. Επίσης συμμετρικά θεωρούνται και τα φορτία, δηλαδή τα διανύσματα των εντάσεων των φορτίων σε κάθε φάση έχουν το ίδιο μέτρο με διαφορά στη γωνία τους κατά 120° [3.3]. Το σύστημα δηλαδή θεωρείται ισορροπημένο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη μονοφασική αναπαράσταση του συστήματος.

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται ως ισχείς, διακρίνουμε τα ακόλουθα έξι (6) μεγέθη, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.1, δηλαδή:

1. Την παραγόμενη ενεργό ισχύ, P_G
2. Την παραγόμενη άεργο ισχύ, Q_G
3. Την ενεργό ισχύ του φορτίου, P_D
4. Την άεργο ισχύ του φορτίου, Q_D
5. Το μέτρο της τάσης του ζυγού, V
6. Τη γωνία της τάσης του ζυγού, δ



Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη ζυγού

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι 6 ανά ζυγό. Σε ένα σύστημα με N ζυγούς, υπάρχουν συνολικά $6N$ μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις ομάδες. Τα φορτία, ή μεταβλητές ζήτησης (P_D , Q_D) χαρακτηρίζονται και σαν μεταβλητές διαταραχής και μπορούν να αποτελέσουν τα στοιχεία ενός διανύσματος διάστασης $2N$. Είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος και ο χαρακτηρισμός «διαταραχή» είναι προφανής. Οι ισχείς παραγωγής (P_G , Q_G) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και μπορούν επίσης να θεωρηθούν σαν στοιχεία ενός άλλου διανύσματος, διάστασης $2N$. Ο όρος δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι μονάδες παραγωγής αποτελούν τα κύρια μέσα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος. Τέλος, οι τάσεις και οι γωνίες των ζυγών (V , δ) είναι εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες κατά συνέπεια προς τα προηγούμενα, μπορούν να ονομαστούν μεταβλητές κατάστασης και το αντίστοιχο διάνυσμα, διάστασης $2N$, διάνυσμα κατάστασης συστήματος. Στην πιο γενική μορφή, οι γραμμές παριστάνονται με το ισοδύναμο π-κύκλωμά τους. Ορίζονται για κάθε γραμμή τα παρακάτω στοιχεία:

y_{km}	αγωγιμότητα σειράς γραμμής μεταξύ του ζυγού k και του ζυγού m
y_{skm}	εγκάρσια αγωγιμότητα γραμμής μεταξύ του ζυγού k και του ζυγού m

y_{smk}	εγκάρσια αγωγιμότητα γραμμής μεταξύ του ζυγού m και του ζυγού k
y_k	εγκάρσια σταθερή σύνθετη αγωγιμότητα που συνδέεται στο ζυγό k
$A(k)$	το σύνολο A(k) περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς που συνδέονται στο ζυγό k

Η συνισταμένη ισχύς του ζυγού, η οποία μπορεί να οριστεί σαν ισχύς ζυγού, είναι από το Σχήμα 3.1:

$$\bar{S} = \bar{S}_G - \bar{S}_D = P_G - P_D + j(Q_G - Q_D) = P + jQ \quad (3.1)$$

και μπορεί να έχει χαρακτήρα παραγωγής, ή φορτίου (εισερχόμενης στο δίκτυο, ή εξερχόμενης από το δίκτυο). Δεδομένου ότι το ρεύμα ζυγού είναι

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{V}^*} = \frac{\bar{S}_G^* - \bar{S}_D^*}{\bar{V}^*} = \bar{I}_G - \bar{I}_D = \frac{P_G - P_D + j(Q_G - Q_D)}{\bar{V}^*} = \frac{P - jQ}{\bar{V}^*} \quad (3.2)$$

με την εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff στο ζυγό k έχουμε:

$$\bar{I}_{Gk} - \bar{I}_{Dk} = y_k \bar{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \bar{I}_{km} \quad (3.3)$$

όπου \bar{I}_{km} είναι το ρεύμα που ρέει στη γραμμή από το ζυγό k στο ζυγό m και ισούται με:

$$\bar{I}_{km} = (y_{km} + y_{skm}) \bar{V}_k - y_{km} \bar{V}_m \quad (3.4)$$

Για ένα σύστημα n ζυγών, υπάρχουν n εξισώσεις ρευμάτων-τάσεων, οι οποίες μπορούν να διατυπωθούν με τη βοήθεια του πίνακα αγωγιμοτήτων ως εξής [3.4]:

$$[\bar{I}] = [Y] \cdot [\bar{V}] \Rightarrow \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

όπου :

Y_{kk} : διαγώνιο στοιχείο του πίνακα αγωγιμοτήτων και ισούται με το άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων που καταλήγουν στο ζυγό k, $Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km})$.

Y_{km} : μη διαγώνιο στοιχείο του πίνακα αγωγιμοτήτων και ισούται με την αντίθετη τιμή του αθροίσματος όλων των αγωγιμοτήτων μεταξύ του ζυγού k και του ζυγού m, $Y_{km} = -y_{km}$.

\bar{V}_k : τάση του ζυγού k.

\bar{I}_k : ρεύμα που εγχέεται στο ζυγό k.

Επομένως η σχέση (3.3) γράφεται ως εξής:

$$\bar{I}_{Gk} - \bar{I}_{Dk} = Y_{kk} \bar{V}_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \bar{V}_m \quad (3.6)$$

Εφαρμόζοντας τη σχέση (3.6) για όλους τους ζυγούς n του συστήματος και χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν 2n εξισώσεις ροών φορτίου σε πραγματική μορφή:

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.7)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.8)$$

όπου

G_{km} πραγματικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων

B_{km} φανταστικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων

Κατά την ανάλυση ροών φορτίου οι ζυγοί ενός ΣΗΕ ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

1. Ζυγός Ταλάντωσης ή Ζυγός Αναφοράς: Ο ζυγός του συστήματος, για τον οποίο η πραγματική και η άεργος ισχύς αφήνονται ελεύθερες και στον οποίο το μέτρο τάσης και η φασική γωνία θεωρούνται γνωστά.
2. Ζυγός φορτίου (PQ): Ζυγός στον οποίον είναι γνωστή η έγχυση πραγματικής (P) και αέργου (Q) ισχύος, ενώ προσδιορίζεται η τάση κατά μέτρο και γωνία.
3. Ζυγός παραγωγής (PV): Ζυγός στον οποίον είναι γνωστή η ενεργός ισχύς (P) και το μέτρο της τάσης (V), ενώ προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσης.

Έστω ότι είναι m ο αριθμός των ζυγών φορτίου (PQ). Έστω ότι ο ζυγός με αριθμό 1 είναι ο ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως $n - m$ οι ζυγοί παραγωγής (PV) και οι υπόλοιποι $n - m + 1$ έως n είναι οι ζυγοί φορτίου.

Ο ελάχιστος αριθμός μεταβλητών που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος είναι:

- Οι φασικές γωνίες τάσεων όλων των ζυγών εκτός από το ζυγό ταλάντωσης, δ_2 έως δ_n .
- Τα μέτρα τάσεων όλων των ζυγών φορτίου, V_{n-m+1} έως V_n .

Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} , που έχει διάσταση $n - 1 + m$ και απαιτούνται $n - 1 + m$ ανεξάρτητες εξισώσεις, οι οποίες είναι:

- $n - 1$ εξισώσεις πραγματικής ισχύος (3.7), μία για κάθε ζυγό εκτός από το ζυγό ταλάντωσης. Οι εξισώσεις αυτές είναι της μορφής:

$$\mathbf{b}_P = \mathbf{f}_P(\mathbf{x}) \quad (3.9)$$

όπου \mathbf{b}_P , \mathbf{f}_P είναι διανύσματα διαστάσεως $n - 1$, με το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό k να ορίζεται ως εξής:

$$b_{Pk} = P_{Gk} - P_{Dk} \quad (3.10)$$

$$f_{Pk} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.11)$$

- m εξισώσεις αέργου ισχύος (3.8), μία για κάθε ζυγό φορτίου. Οι εξισώσεις αυτές είναι της μορφής:

$$\mathbf{b}_Q = \mathbf{f}_Q(\mathbf{x}) \quad (3.12)$$

όπου \mathbf{b}_Q , \mathbf{f}_Q είναι διανύσματα διαστάσεως m , με το στοιχείο που αντιστοιχεί στο ζυγό k να ορίζεται ως εξής:

$$b_{Qk} = Q_{Gk} - Q_{Dk} \quad (3.13)$$

$$f_{Qk} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.14)$$

και τα G_{km} , B_{km} είναι όπως έχουν οριστεί στις σχέσεις (3.7) και (3.8).

Οι παραπάνω $n - 1 + m$ εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις του προβλήματος ροών φορτίου σε πραγματική μορφή και μπορούν να γραφούν σε ενιαία μορφή πινάκων ως εξής:

$$\mathbf{b} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3.15)$$

όπου:

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_P \\ \mathbf{b}_Q \end{bmatrix} \text{ και } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_P \\ \mathbf{f}_Q \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

και το διάνυσμα κατάστασης

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

όπου:

$$\boldsymbol{\delta} = [\delta_2, \dots, \delta_n]^T \text{ και } \mathbf{V} = [V_{n-m+1}, \dots, V_n]^T$$

Μετά τον υπολογισμό όλων των τάσεων, υπολογίζονται και οι ροές των γραμμών από τις εξισώσεις [3.6]:

$$P_{km} = V_k^2 (g_{km} + g_{skm}) - V_k V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.18)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{skm}) + V_k V_m [g_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.19)$$

όπου g_{km} , b_{km} κλπ. είναι τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη της αγωγιμότητας σειράς της αντίστοιχης γραμμής k-m και όχι του στοιχείου του πίνακα αγωγιμοτήτων $Y_{km} = -y_{km}$. Είναι δηλαδή

$$\begin{aligned} y_{km} &= g_{km} + jb_{km} \\ y_{skm} &= g_{skm} + jb_{skm} \end{aligned} \quad (3.20)$$

3.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα ροών φορτίου συνίσταται στη λύση ενός συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες μπορούν να γραφτούν στη γενική μορφή:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

Για την επίλυση του παραπάνω συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιούνται επαναληπτικές μέθοδοι και μια συνοπτική διαδικασία επίλυσής του είναι:

1. Θεώρηση μιας αρχικής τιμής του διανύσματος κατάστασης $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(0)}$. Μηδενισμός του μετρητή ανακυκλώσεων $i = 0$.
2. Αντικατάσταση της $\mathbf{x}^{(i)}$ στην εξίσωση για τον υπολογισμό των $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(i)})$ και έλεγχος αν ικανοποιούνται οι εξισώσεις (3.21).

3. Αν οι εξισώσεις δεν ικανοποιούνται, με χρήση των $\mathbf{x}^{(i)}$ και $\mathbf{g}(\mathbf{x}^{(i)})$ δημιουργείται μια καινούρια προσέγγιση $\mathbf{x}^{(i+1)}$.
Ενημέρωση του ανακυκλωτή $i = i + 1$.
4. Αντικατάσταση της $\mathbf{x}^{(i+1)}$ στις εξισώσεις (3.21) και επανάληψη των βημάτων 2 και 3 έως ότου οι εξισώσεις ικανοποιηθούν.

Οι πιο γνωστές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ροών φορτίου είναι η Gauss, η βελτιωμένη μορφή της Gauss-Seidel, και η μέθοδος Newton-Raphson.

3.3.1 Μέθοδος Newton-Raphson

Η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson είναι πιο σύνθετη, αλλά και πιο ασφαλής. Συνήθως δεν έχει πρόβλημα σύγκλισης και κατά κανόνα συγκλίνει ταχύτερα από την Gauss-Seidel. Η μέθοδος αυτή μετατρέπει το αρχικό μη-γραμμικό πρόβλημα σε μια ακολουθία από γραμμικά προβλήματα, των οποίων οι λύσεις προσεγγίζουν τη λύση του αρχικού προβλήματος. Η γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από το αρχικό διάνυσμα κατάστασης γίνεται με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor, από το οποίο αμελούνται όλοι οι όροι δεύτερης και μεγαλύτερης τάξης.

Για ένα ζυγό k , από τις σχέσεις (3.1), (3.7) και (3.8) προκύπτει ότι:

$$P_k = P_{Gk} - P_{Dk} = V_k \sum_{m=1}^n V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.22)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Dk} = V_k \sum_{m=1}^n V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (3.23)$$

Με βάση τη σχέση

$$\bar{Y}_{km} = Y_{km} (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) = G_{km} + jB_{km}$$

οι σχέσεις (3.22) και (3.23) γράφονται ως εξής:

$$P_k = \sum_{m=1}^n V_k V_m Y_{km} \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.24)$$

$$Q_k = - \sum_{m=1}^n V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.25)$$

Οι εξισώσεις (3.24) και (3.25) συνιστούν ένα σύστημα από μη γραμμικές εξισώσεις. Με τη βοήθεια του αναπτύγματος Taylor και αγνοώντας τους όρους δεύτερης τάξης και άνω, προκύπτει το ακόλουθο σύστημα:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(i)} \\ \Delta Q_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(i)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(i)}}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(i)}}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(i)}}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(i)} \\ \Delta V_2^{(i)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(i)} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

όπου $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix}$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας.

Για τους ζυγούς παραγωγής είναι γνωστά τα μέτρα των τάσεων. Επομένως, σε ένα δίκτυο n ζυγών όπου οι ζυγοί παραγωγής είναι m , οι εξισώσεις που συνδέουν τη μεταβολή της τάσης και τη μεταβολή της αέργου ισχύος θα μειωθούν από $n - 1$ σε $n - 1 - m$. Οι διαστάσεις των πινάκων θα είναι δηλαδή

$$\mathbf{J} : (2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$$

$$\mathbf{J}_1 : (n - 1) \times (n - 1)$$

$$\mathbf{J}_2 : (n - 1) \times (n - 1 - m)$$

$$\mathbf{J}_3 : (n - 1 - m) \times (n - 1)$$

$$\mathbf{J}_4 : (n - 1 - m) \times (n - 1 - m)$$

Τα διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία των υποπινάκων του Ιακωβιανού πίνακα υπολογίζονται ως εξής:

$$J_{1kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{m \neq k} V_k V_m Y_{km} \cdot \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.28)$$

$$J_{1km} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} = -V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m), \quad k \neq m \quad (3.29)$$

$$J_{2kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = 2V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{m \neq k} V_m Y_{km} \cdot \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.30)$$

$$J_{2km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k Y_{km} \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m), \quad k \neq m \quad (3.31)$$

$$J_{3kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = \sum_{m \neq k} V_k V_m Y_{km} \cdot \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.32)$$

$$J_{3km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} = -V_k V_m Y_{km} \cos(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m), \quad k \neq m \quad (3.33)$$

$$J_{4kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -2V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} - \sum_{m \neq k} V_m Y_{km} \cdot \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m) \quad (3.34)$$

$$J_{4km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = -V_k Y_{km} \sin(\theta_{km} - \delta_k + \delta_m), \quad k \neq m \quad (3.35)$$

Οι όροι $\Delta P_k^{(i)}$ και $\Delta Q_k^{(i)}$ ορίζονται ως η διαφορά μεταξύ των προδιαγεγραμμένων P_k^{sch} , Q_k^{sch} και των υπολογισμένων τιμών $P_k^{(i)}$, $Q_k^{(i)}$, είναι δηλαδή:

$$\Delta P_k^{(i)} = P_k^{\text{sch}} - P_k^{(i)} \quad (3.36)$$

$$\Delta Q_k^{(i)} = Q_k^{\text{sch}} - Q_k^{(i)} \quad (3.37)$$

Οι νέες τιμές για τις τάσεις των ζυγών είναι:

$$\delta_k^{(i+1)} = \delta_k^{(i)} + \Delta \delta_k^{(i)} \quad (3.38)$$

$$V_k^{(i+1)} = V_k^{(i)} + \Delta V_k^{(i)} \quad (3.39)$$

Η διαδικασία που ακολουθείται για την ανάλυση ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson είναι ως εξής [3.2], [3.5]:

1. Για ζυγούς φορτίου, όπου οι P_k^{sch} , Q_k^{sch} είναι προσδιορισμένες, οι τάσεις κατά μέτρο και γωνία τίθενται ίσες με την τάση του ζυγού ταλάντωσης ($1 \angle 0$ α.μ.). Για τους ζυγούς παραγωγής, όπου είναι γνωστή η τάση V_k και η πραγματική ισχύς P_k^{sch} , η γωνία της τάσης τίθεται ίση με αυτή του ζυγού ταλάντωσης ($\delta_k = 0^\circ$).
2. Για τους ζυγούς φορτίου, από τις σχέσεις (3.24), (3.25) υπολογίζονται οι $P_k^{(i)}$, $Q_k^{(i)}$ και στη συνέχεια οι $\Delta P_k^{(i)}$, $\Delta Q_k^{(i)}$ από τις (3.36) και (3.37).
3. Για τους ζυγούς παραγωγής, από τις σχέσεις (3.24) και (3.36) υπολογίζονται οι $P_k^{(i)}$, $\Delta P_k^{(i)}$ αντίστοιχα.
4. Από τις σχέσεις (3.28) έως (3.35) υπολογίζονται τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα.
5. Επιλύεται το σύστημα εξισώσεων (3.27) με τριγωνική παραγοντοποίηση και απαλοιφή Gauss.
6. Υπολογίζονται οι νέες τιμές για τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων από τις σχέσεις (3.38) και (3.39).
7. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τα σφάλματα $\Delta P_k^{(i)}$ και $\Delta Q_k^{(i)}$ να γίνουν μικρότερα από μια προκαθορισμένη ανοχή ε :

$$\Delta P_k^{(i)} \leq \varepsilon, \quad \Delta Q_k^{(i)} \leq \varepsilon \quad (3.40)$$

8. Μετά τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων, υπολογίζονται τα P_1 , Q_1 του ζυγού ταλάντωσης από τις σχέσεις (3.7), (3.8) και κατόπιν οι ροές φορτίου στις γραμμές από τις (3.18) και (3.19).

Τέλος, αναφέρεται ότι η ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου εξαρτάται από την αρχική λύση και το βασικό της μειονέκτημα είναι ο υπολογισμός και η αντιστροφή του Ιακωβιανού πίνακα, μια διαδικασία που απαιτεί αυξημένο χώρο και χρόνο υπολογιστή.

3.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Β. Κ. Παπαδιάς, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, *τομ. I*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., σελ. 127-132, 151-160, 1985.
- [3.2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., σελ. 20, 229-242, 2001.
- [3.3] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας”, *τομ. I*, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., σελ.115, 1994.
- [3.4] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, *New York: McGraw-Hill*, pp. 255-269, 1993.
- [3.5] H. Saadat, “Power System Analysis, second edition”, *New York: McGraw-Hill*, pp. 200-212, 232-240, 1999.
- [3.6] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, “Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας”, Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., σελ.26-32,35-37,39-44, 2003.

**ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ
ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ
ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ**

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εγκατάσταση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής (ΔΔ) γίνεται κυρίως για λόγους οικονομικούς, λειτουργικούς και περιβαλλοντικούς. Κατά την εγκατάσταση ΜΔΠ επιχειρείται η ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος, επομένως και το κόστος μεταφοράς και διανομής της ενέργειας [4.1]. Ακατάλληλη τοποθέτηση ΜΔΠ μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών ισχύος, καθώς επίσης και σε αύξηση στο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας του δικτύου [4.2]. Αντίθετα, η σωστή τοποθέτηση ΜΔΠ οδηγεί σε βελτίωση του μέτρου της τάσης, βελτιώνοντας και την ποιότητα ισχύος σε περιοχές που είναι δύσκολη η υποστήριξη της τάσης [4.3] και οι ΜΔΠ είναι γενικά πιο φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με μεγάλες κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ακόμα όταν αυτές χρησιμοποιούν ως καύσιμη ύλη το φυσικό αέριο [4.4], [4.5].

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η σύνδεση ΜΔΠ, οι διαχειριστές των ΔΔ απαιτούν την εύρεση μεθόδων για τον υπολογισμό του βέλτιστου μεγέθους και της βέλτιστης τοποθέτησης των ΜΔΠ που μπορούν να συνδεθούν χωρίς να χρειαστεί να ενισχυθεί επιπλέον το δίκτυο [4.6]. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές επίλυσης, οι οποίες βασίζονται σε μεθόδους βελτιστοποίησης. Μέθοδοι όπως ο γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) [4.7], ο εξελικτικός προγραμματισμός (ΕΡ) [4.8], η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO) [4.9] κλπ. έχουν εφαρμοστεί για την επίλυση προβλημάτων εγκατάστασης ΜΔΠ.

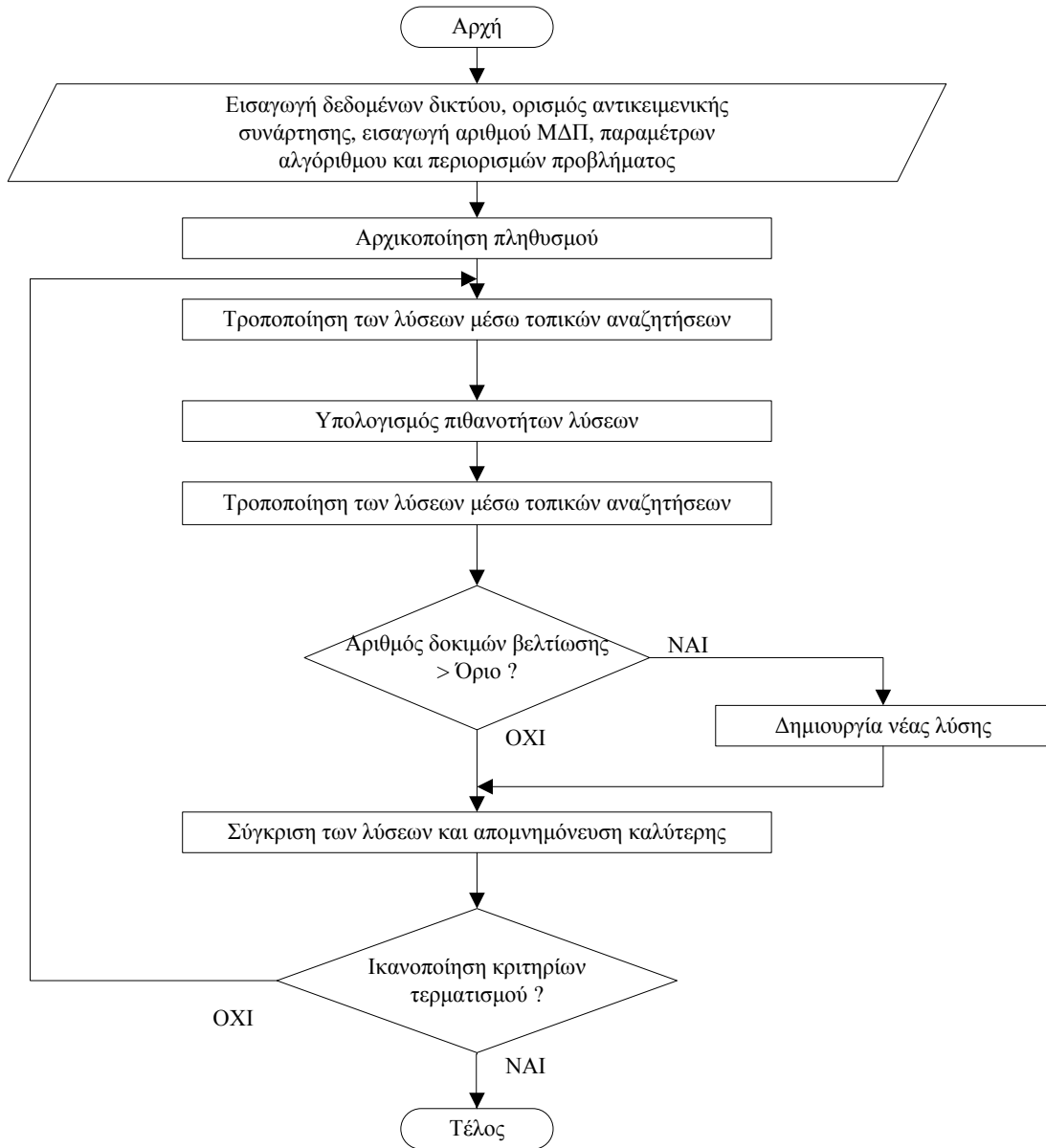
Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μία μέθοδος που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών για τον καθορισμό του μεγέθους, του συντελεστή ισχύος (ΣΙ) και της θέσης μιας ΜΔΠ ανάλογα με το στόχο του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Ο στόχος μπορεί να είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου διανομής είτε η μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος.

4.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης της εγκατάστασης ΜΔΠ σε ένα δίκτυο περιορίζεται από διάφορους παράγοντες, κυρίως λειτουργικούς και οικονομικούς. Για παράδειγμα, η τάση των ζυγών του δικτύου και τα θερμικά όρια των γραμμών και των μετασχηματιστών πρέπει να διατηρούνται εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων.

Με άλλα λόγια, το πρόβλημα εγκατάστασης ΜΔΠ αναλύεται στον υπολογισμό του βέλτιστου μεγέθους και της θέσης της, με βάση την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης, για την οποία ισχύουν ορισμένοι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Οι ισότητες είναι οι εξισώσεις ροής φορτίου και οι ανισότητες είναι τα όρια στις μεταβλητές ελέγχου ή τα λειτουργικά όρια των εξαρτημένων μεταβλητών του συστήματος. Οι μεταβλητές ελέγχου του προβλήματος περιλαμβάνουν τις γεννήτριες ενεργού ισχύος, τις τάσεις των ζυγών των γεννητριών, τις ρυθμίσεις των μετασχηματιστών (taps) , και τις πηγές μεταβλητής άεργου ισχύος. Οι εξαρτημένες μεταβλητές περιλαμβάνουν τις τάσεις των ζυγών φορτίου, τις άεργες ισχύεις των γεννητριών, και τις ροές ισχύος των γραμμών [4.10]. Οι υπολογισμοί για τη μέγιστη χωρητικότητα των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής γίνονται στο στιγμιότυπο της καμπύλης φορτίου, όπου παρατηρείται η χαμηλότερη ζήτηση, καθώς σε αυτήν την περίπτωση θα έχουμε την μεγαλύτερη ανύψωση τάσης.

Κατά την εκτέλεση αυτής της μεθόδου, αρχικά εισάγονται από το χρήστη τα δεδομένα του δικτύου και ο επιθυμητός αριθμός των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο. Ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών δημιουργεί διάφορους τυχαίους συνδυασμούς για τη θέση, την ισχύ και το ΣΙ για τις ΜΔΠ που πιθανόν θα εγκατασταθούν στο δίκτυο. Για κάθε συνδυασμό γίνεται ανάλυση ροών φορτίου στο δίκτυο και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και της καταλληλότητας (fitness). Με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται και η επιλογή της καλύτερης λύσης [4.11]. Μέσα από τα διάφορα στάδια του αλγόριθμου (φάση μέλισσας εργάτριας, θεατή και ανιχνευτή), όπως αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2, υπολογίζεται η τελική βέλτιστη λύση του προβλήματος, δηλαδή η βέλτιστη θέση, το βέλτιστο μέγεθος σε MW και ο ΣΙ της/των ΜΔΠ που πρέπει να συνδεθεί/συνδεθούν. Σε περίπτωση όπου ο χρήστης επιλέξει την προσθήκη μίας μόνο ΜΔΠ, του δίνεται η επιπλέον δυνατότητα να επιλέξει την εγκατάσταση ή όχι ενός πυκνωτή. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής μεθόδου.

4.2.1 Ρυθμιστικό πλαίσιο

Η βέλτιστη τοποθέτηση ΜΔΠ σε ένα δίκτυο διανομής θεωρείται ότι εξετάζεται από την πλευρά του διαχειριστή αυτού του δικτύου. Επομένως, η εγκατάσταση ή όχι ΜΔΠ στο δίκτυο εξαρτάται από τα πραγματικά ή αναμενόμενα οφέλη που θα έχει ο διαχειριστής με την επένδυση αυτή. Εδώ υιοθετείται το ρυθμιστικό πλαίσιο που ισχύει στη Μ. Βρετανία [4.6], [4.12].

Στη Μ. Βρετανία λειτουργεί ο οργανισμός που έχει ως στόχο τη διαφύλαξη του συμφέροντος των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας, ο ρυθμιστής της κυβέρνησης της για τις αγορές του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας (Office of Gas and Electricity Markets - OFGEM). Κάθε 5 χρόνια εκδίδει μια αναφορά, στην οποία ρυθμίζεται το πλαίσιο για τα έσοδα των διαχειριστών ΔΔ και τα κίνητρα εγκατάστασης ΜΔΠ (DPCR5). Σύμφωνα με την τελευταία αναφορά, δίνονται δύο ειδών οικονομικά κίνητρα εγκατάστασης ΜΔΠ στους διαχειριστές.

Σύμφωνα με το πρώτο, οι ιδιοκτήτες των ΜΔΠ είναι υποχρεωμένοι να καταβάλλουν στους διαχειριστές των ΔΔ ένα ποσό για τη χρήση του δικτύου. Η χρέωση αυτή αφορά την ενίσχυση που πιθανώς θα χρειαστεί το δίκτυο για την εγκατάσταση ΜΔΠ (π.χ. των γραμμών), καθώς και στη λειτουργία και συντήρησή του, είναι ίση με 3.24 \$/yr για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέεται στο δίκτυο. Σε περίπτωση όπου δε χρειάζεται κάποια εργασία ενίσχυσης κατά την εγκατάσταση ΜΔΠ, το ποσό αυτό είναι καθαρό κέρδος για το διαχειριστή του δικτύου και ορίζεται ως το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ (C_{DG}).

Επιπλέον, ορίζεται ένα άλλο οικονομικό κίνητρο για τους διαχειριστές, το κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (C_L). Ο κανονισμός θέτει ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος, το οποίο ισούται με τις απώλειες του δικτύου πριν την προσθήκη ΜΔΠ. Εάν μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο οι απώλειες ενεργού ισχύος είναι κάτω από το καθορισμένο όριο, τότε οι διαχειριστές επιβραβεύονται με ένα ποσό, ενώ στην αντίθετη περίπτωση όπου οι απώλειες ενεργού ισχύος ξεπερνούν αυτό το όριο, οι διαχειριστές είναι υποχρεωμένοι να καταβάλλουν ένα ποσό ως πρόστιμο. Το ποσό του κινήτρου αυτού είναι 97.2 \$/MWh, δηλαδή ο διαχειριστής κερδίζει 97.2 \$/h για κάθε MWh απωλειών που μειώνεται ή αντίστοιχα υποχρεούται να πληρώσει για κάθε MWh απωλειών που αυξάνεται σε σχέση με το όριο.

4.2.2 Διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πρόβλημα εγκατάστασης ΜΔΠ αναλύεται στον υπολογισμό του βέλτιστου μεγέθους και της θέσης της, με βάση την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης, για την οποία ισχύουν ορισμένοι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι εξισώσεις ρών φορτίου για τους ζυγούς, οι οποίες υπολογίζονται με τον τρόπο που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3. Για ένα τυχαίο ζυγό k του δικτύου οι εξισώσεις ενεργού και αέργου ισχύος είναι αντίστοιχα :

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (4.1)$$

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in A(k)} V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (4.2)$$

όπου:

V_k	μέτρο τάσης ζυγού k
δ_k	γωνία τάσης ζυγού k
G_{km}	πραγματικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
B_{km}	φανταστικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
$A(k)$	Το σύνολο $A(k)$ περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς που συνδέονται στον ζυγό k
P_{Gk}	παραγόμενη πραγματική ισχύς στον ζυγό k
P_{Dk}	καταναλισκόμενη πραγματική ισχύς στον ζυγό k
Q_{Gk}	παραγόμενη άεργος ισχύς στον ζυγό k
Q_{Dk}	καταναλισκόμενη άεργος ισχύς στον ζυγό k

Οι περιορισμοί ανισότητας είναι τα όρια των τάσεων των ζυγών, οι οποίες πρέπει να διατηρούνται εντός προκαθορισμένων ορίων:

$$V_{\min} \leq V_k \leq V_{\max} \quad (4.3)$$

όπου V_{\min} , V_{\max} είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο που μπορεί να πάρει το μέτρο της τάσης V_k σε όλους τους ζυγούς k. Αντίστοιχα ορίζεται ότι δεν πρέπει να υπερβαίνονται τα θερμικά όρια των γραμμών και των μετασχηματιστών του δικτύου. Δηλαδή για την ισχύ που ρέει σε κάθε γραμμή και μετασχηματιστή θα πρέπει να ισχύει:

$$|S_i| \leq S_{tmax} \quad (4.4)$$

Εκτός από τους λειτουργικούς περιορισμούς που τίθενται από το δίκτυο, ορίζονται και περιορισμοί της ΜΔΠ, οι οποίοι αφορούν το μέγεθος και το συντελεστή ισχύος (ΣΙ) της:

$$P_{\min}^{DG} \leq P^{DG} \leq P_{\max}^{DG} \quad (4.5)$$

$$p.f._{\min}^{DG} \leq p.f.^{DG} \leq p.f._{\max}^{DG} \quad (4.6)$$

Επίσης μπορεί να περιοριστεί το κόστος της εγκατάστασης ΜΔΠ, το οποίο δε θα πρέπει να ξεπερνά το αρχικό διαθέσιμο κεφάλαιο. Θεωρώντας ότι κάθε KW διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίσταται κοστίζει \$1620, δηλαδή 1620000 \$/MW, προκύπτει ο ακόλουθος περιορισμός για το κεφάλαιο:

$$1620 \cdot \sum_{i=1}^{\text{αριθμός ΜΔΠ}} P_i^{DG} \leq \text{αρχικό κεφάλαιο} \quad (4.7)$$

Ένας άλλος επιπρόσθετος περιορισμός αφορά τη συνολική διείσδυση των ΜΔΠ, που δεν θα πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο ποσοστό του συνολικού φορτίου:

$$\sum_{i=1}^{\text{αριθμός ΜΔΠ}} P_i^{DG} \leq (\text{ποσοστό διείσδυσης}) \cdot P_D \quad (4.8)$$

Τέλος, τίθεται και ο περιορισμός της θέσης (ζυγού) όπου μπορεί να εγκατασταθεί μία ΜΔΠ, δηλαδή για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο ζυγό k θα πρέπει να ισχύει:

$$k \notin B \quad (4.9)$$

όπου B το σύνολο των ζυγών που δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση ΜΔΠ.

Αναφορικά με την αντικειμενική συνάρτηση, επιλέγεται η κατάλληλη ανάλογα με το στόχο της βελτιστοποίησης της εγκατάστασης ΜΔΠ, τη μείωση των απωλειών ισχύος ή τη μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου.

Στην πρώτη περίπτωση, όπου στόχος είναι η μείωση των απωλειών ισχύος, η αντικειμενική συνάρτηση είναι:

$$\min_{PF} = \min \sum_{\text{όλες τις γραμμές}} P_{\text{loss}} \quad (4.10)$$

όπου οι απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής k - m υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{\text{loss}_{km}} = P_{km} + P_{mk} \quad (4.11)$$

και η ροή ενεργού ισχύος από το ζυγό k στο ζυγό m , P_{km} είναι (βλ. Κεφάλαιο 3):

$$P_{km} = V_k^2(g_{km} + g_{skm}) - V_k V_m [g_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (4.12)$$

Στην περίπτωση όπου στόχος είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου για το διαχειριστή, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται ως εξής:

$$\max_{PF} = \max [C_{DG} P_{DG} + C_L (P_L^{\text{before}} - P_L^{\text{after}})] \quad (4.13)$$

όπου C_{DG} είναι το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ ισχύος P_{DG} και C_L το χρηματικό κίνητρο που κερδίζει ο διαχειριστής, εάν μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ οι απώλειες ενεργού ισχύος, P_L^{after} , είναι μικρότερες από τις απώλειες του δικτύου πριν την εγκατάσταση, P_L^{before} , οι οποίες θεωρούνται ως το όριο απωλειών ενεργού ισχύος για το δίκτυο.

4.2.3 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Στο πρώτο βήμα του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών γίνεται αρχικοποίηση της αποικίας, δημιουργούνται δηλαδή τυχαίες θέσεις πηγής-τροφής, δηλαδή συνδυασμοί θέσης-μεγέθους-ΣΙ ΜΔΠ, ανάλογα με τον αριθμό ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν. Για κάθε θέση πηγής-τροφής γίνεται ανάλυση ροών φορτίου και υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και της καταλληλότητας της θέσης. Στη συνέχεια γίνεται απομνημόνευση της καλύτερης θέσης πηγής-τροφής (αυτή με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης).

Στο δεύτερο βήμα, γίνεται τροποποίηση των λύσεων με αναζητήσεις στις γειτονικές λύσεις, επιλέγεται δηλαδή τυχαία μία θέση εγκατάστασης της ΜΔΠ (ίδια ή διαφορετική από την προηγούμενη) και με τη βοήθεια μίας τυχαία επιλεγμένης λύσης από μία άλλη μέλισσα δημιουργείται μια νέα τιμή για το μέγεθος της ΜΔΠ, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.

Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται για κάθε θέση πηγής-τροφής (λύση) η πιθανότητα να επιλεγθεί από τις μέλισσες ως βέλτιστη. Όπως είναι λογικό, μια καλή λύση θα προσελκύσει περισσότερες μέλισσες. Έπειτα γίνεται νέα τροποποίηση των λύσεων με τη μεγαλύτερη πιθανότητα με τοπικές αναζητήσεις όπως και στο δεύτερο βήμα, μέχρι όλες οι μέλισσες σε αυτό το βήμα να κατανεμηθούν σε κάποια θέση πηγής-τροφής.

Εάν κάποια λύση δε βελτιώνεται για συγκεκριμένο αριθμό δοκιμών τότε αυτή εγκαταλείπεται και η μέλισσα, που σχετίζεται με αυτή τη λύση, γίνεται μέλισσα ανιχνευτής και αναζητά μια νέα θέση πηγής-τροφής (λύση). Όταν καθοριστεί η νέα λύση, ξεκινά ο επόμενος κύκλος του αλγόριθμου. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού, μέχρι δηλαδή να εκτελεστεί ο μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων που έχει οριστεί ή όταν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτύχει να βελτιωθεί για καθορισμένο αριθμό ανακυκλώσεων πάνω από μία συγκεκριμένη τιμή.

4.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] IEA, “Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets”, *Paris: IEA Publications*, pp.7-16, 25-51, 2002.
- [4.2] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziargyriou, “Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, issue 3, pp. 3420 – 3428, Aug. 2013.
- [4.3] R. A. Laurie, “Distributed Generation: Reaching the Market Just in Time”, *The Electricity Journal*, pp. 87-94, March 2001.
- [4.4] T. Ackermann, G. Andersson, L.Söder, “Distributed Generation: a definition”, *Electric Power System Research*, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [4.5] N. Strachan, H. Dowlatabadi, “Distributed generation and distribution utilities”, *Energy Policy* vol. 30, 649-661, 2002.
- [4.6] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, A. R. Wallace, “Hybrid GA and OPF evaluation of networks capacity for distributed generation connections”, *Electric Power System Research*, vol. 78, pp. 392-398, 2008.
- [4.7] M. Mardaneh, G.B. Gharehpetian, “Siting and sizing of DG units using GA and OPF based technique”, *Proc. IEEE Region 10 Conf. (TENECON)* , vol. 3, pp.331-334, 2004.
- [4.8] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci, F. Pilo, “A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, issue 2, pp.750-757, 2005.
- [4.9] O. Amanifar, “Optimal Distributed Generation Placement and Sizing for Loss and THD Reduction and Voltage Profile Improvement in Distribution Systems Using Particle Swarm Optimization and sensitivity analysis”, *16th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC)*, 2011.
- [4.10] B.K. Panigrahi, Y. Shi, M.-H. Lim (Eds.), “Handbook of Swarm Intelligence”, *ALO* vol. 8, pp. 241–268, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [4.11] M. E. El-Hawary, F. S. Abu-Mouti, “Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 2090–2101, 2011.
- [4.12] Office of Gas and Electricity Markets (OFGEM), “Electricity Distribution Price Control Review Final Proposals – Incentives and Obligations (DPCR5)”, 2009.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΕΛΙΣΣΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) με την χρήση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και της ανάλυσης ροών φορτίου. Αρχικά γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε (MATLAB) και των χρήσιμων εργαλείων που προσφέρονται από αυτό για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUIDE - Graphical User Interface Design Environment). Στη συνέχεια, αναφέρονται οι απαιτήσεις του συστήματος για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής, ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Τέλος, παρουσιάζεται η λειτουργία των αρχείων (m-files) και η δομή του λογισμικού.

5.2 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής βέλτιστης θέσης και μεγέθους ΜΔΠ είναι το MATLAB σε έκδοση 7.9.0 (R2009b).

Το MATLAB είναι ένα σύγχρονο ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιείται σε πανεπιστημιακά μαθήματα αλλά και ερευνητικές και άλλες εφαρμογές με επιστημονικούς υπολογισμούς (scientific computing). Το όνομά του προέρχεται από τα αρχικά γράμματα των λέξεων **MAT**rix **LAB**oratory (εργαστήριο πινάκων). Είναι ένα διαδραστικό πρόγραμμα για αριθμητικούς υπολογισμούς και οπτικοποίηση δεδομένων. Στις νεότερες εκδοχές του, το πακέτο περιλαμβάνει εργαλείοι που του επιτρέπουν συμβολικούς υπολογισμούς.

Το MATLAB είναι ειδικά σχεδιασμένο για υπολογισμούς με πίνακες, όπως η επίλυση γραμμικών συστημάτων, η εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, η αντιστροφή τετραγωνικών πινάκων κλπ. Το πακέτο αυτό είναι εφοδιασμένο και με πολλές επιλογές για γραφικά (κατασκευή γραφικών παραστάσεων). Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό για την επίλυση άλλων προβλημάτων, όπως η εύρεση των ριζών μη γραμμικής εξίσωσης, η επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, η επίλυση προβλημάτων αρχικών τιμών με συνήθεις διαφορικές εξισώσεις κλπ., καθώς περιέχει αρκετές εντολές όπως while, for και if. Η γλώσσα προγραμματισμού του MATLAB δίνει την ευχέρεια στον χρήστη να το επεκτείνει με δικά του προγράμματα. Συχνά θα γράφουμε η MATLAB (εννοώντας τη γλώσσα προγραμματισμού) και όχι το MATLAB (πακέτο). Οι βασικές εντολές της χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εντολές ελέγχου ροής (if) και τις εντολές για επαναληπτικές διαδικασίες (for, while).

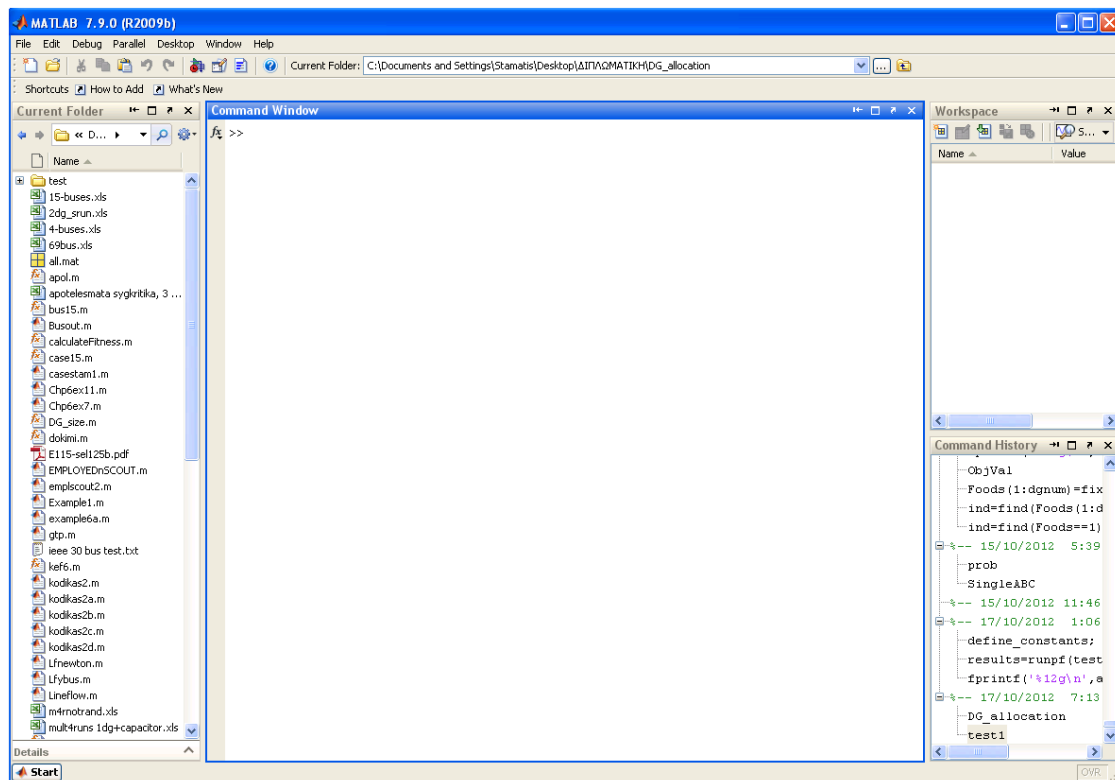
Το MATLAB είναι σχεδιασμένο για την αριθμητική επίλυση προβλημάτων σε αριθμητική πεπερασμένης ακρίβειας (finite-precision arithmetic), δηλαδή δεν βρίσκει την ακριβή αλλά μια προσεγγιστική λύση ενός προβλήματος. Αυτή είναι και η βασική του διαφορά από τα συστήματα συμβολικών υπολογισμών όπως η Maple και το Mathematica [5.1].

Συνοπτικά η γλώσσα MATLAB έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Μαθηματικούς/αριθμητικούς υπολογισμούς.
- Ανάπτυξη αλγόριθμων.
- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση.
- Ανάλυση και γραφική παρουσίαση δεδομένων.

5.2.1 Το περιβάλλον της MATLAB

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος της εφαρμογής MATLAB είναι (Σχήμα 5.1):



Σχήμα 5.1: Το περιβάλλον του MATLAB

- Command window (παράθυρο εντολών): Μέσα στο παράθυρο αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσής τους και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων, δηλαδή γίνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα.
- Command history (ιστορικό εντολών): Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται οι εντολές που εκτέλεσε ο χρήστης και αν θέλει μπορεί να τις αντιγράψει ή να τις σύρει (drag and drop) στο παράθυρο εντολών.

- Workspace (χώρος εργασίας): Ο χώρος διεκπεραίωσης των πράξεων είναι ο βασικός χώρος λειτουργίας του προγράμματος. Ο χώρος αυτός βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή και μέσα σε αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματά τους, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις.
- Current directory (τρέχων κατάλογος): Είναι το σημείο αναφοράς των αρχείων του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητό να κληθεί μια συνάρτηση ή ένα m-file πρέπει να βρίσκεται στο τρέχοντα κατάλογο [5.2].

5.2.2 Προγραμματισμός στη MATLAB

Ένα από τα πράγματα που κάνουν το MATLAB να υπερτερεί απέναντι σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού, είναι η ευκολία με την οποία μπορεί κανείς να προγραμματίσει. Στη γενική περίπτωση, για απλούς υπολογισμούς, το παράθυρο εντολών είναι αρκετά εύχρηστο. Όσο αυξάνεται όμως το πλήθος των εντολών ή πρέπει να αλλάζουν οι τιμές κάποιων μεταβλητών, η διαδικασία να γράφει ο χρήστης στο παράθυρο εντολών είναι χρονοβόρα. Το κυριότερο είναι ότι όταν κλείσει το πρόγραμμα τότε ότι γράφτηκε στο παράθυρο εντολών θα σβηστεί.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα πρέπει να γίνεται αποθήκευση των εντολών αυτών σε ένα αρχείο, το οποίο θα καλείται από το παράθυρο εντολών και θα εκτελούνται οι ανάλογες εντολές. Το MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τα λεγόμενα m-files, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα script files και τις functions.

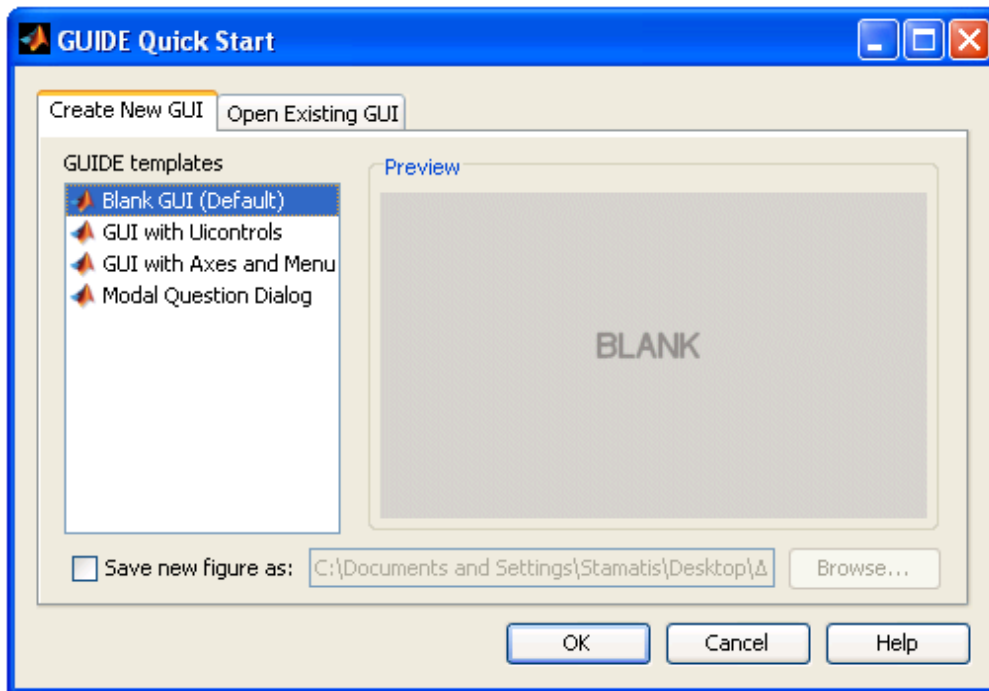
- Script files: Για να δημιουργηθεί ένα script file, ακολουθείται η διαδικασία: File → New → Script και ανοίγει ο editor. Μέσα στο παράθυρο αυτό συντάσσονται οι εντολές, όπως ακριβώς θα συντάσσονταν και μέσα στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται μέσα στην ενεργό διεύθυνση αποθήκευσης του MATLAB, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης εκτέλεσής τους με την κλήση του ονόματός τους από το παράθυρο εντολών. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα να αποθηκεύεται πλήθος εντολών, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται όποτε απαιτείται. Τα script files λειτουργούν με γενικές μεταβλητές, δηλαδή είναι “ορατές” και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έξω από το συγκεκριμένο αρχείο.
- Functions: Αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των m-files και η διαδικασία δημιουργίας τους είναι: File → New → Function. Η μεγάλη διαφορά τους με τα script files είναι ότι οι μεταβλητές είναι τοπικές, δηλαδή μία μεταβλητή που περιέχεται σε μια function δεν μπορεί να επηρεαστεί από διαδικασίες εκτός function. Ακόμα μπορεί να δεχθεί δεδομένα σαν ορίσματα και να επιστρέφει αποτελέσματα. Μια function πρέπει πάντα να αρχίζει με την ακόλουθη γραμμή:
function [out1 , ... , outn] = name (input1 , ... , inputm)

Όπου out_1, \dots, out_n είναι τα αποτελέσματα που επιστρέφονται, $name$ είναι το όνομα της και $input_1, \dots, input_m$ τα ορίσματά της. Μια function δεν είναι απαραίτητο να έχει ορίσματα ή να επιστρέφει αποτελέσματα. Σαν ορίσματα, (αντίστοιχα αποτελέσματα), μπορούν να μπου μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν να είναι πολλών ειδών. Όπως για παράδειγμα αριθμοί, συμβολοσειρές, πίνακες και πολλές άλλες δομές που μπορεί να επεξεργαστεί το MATLAB [5.3].

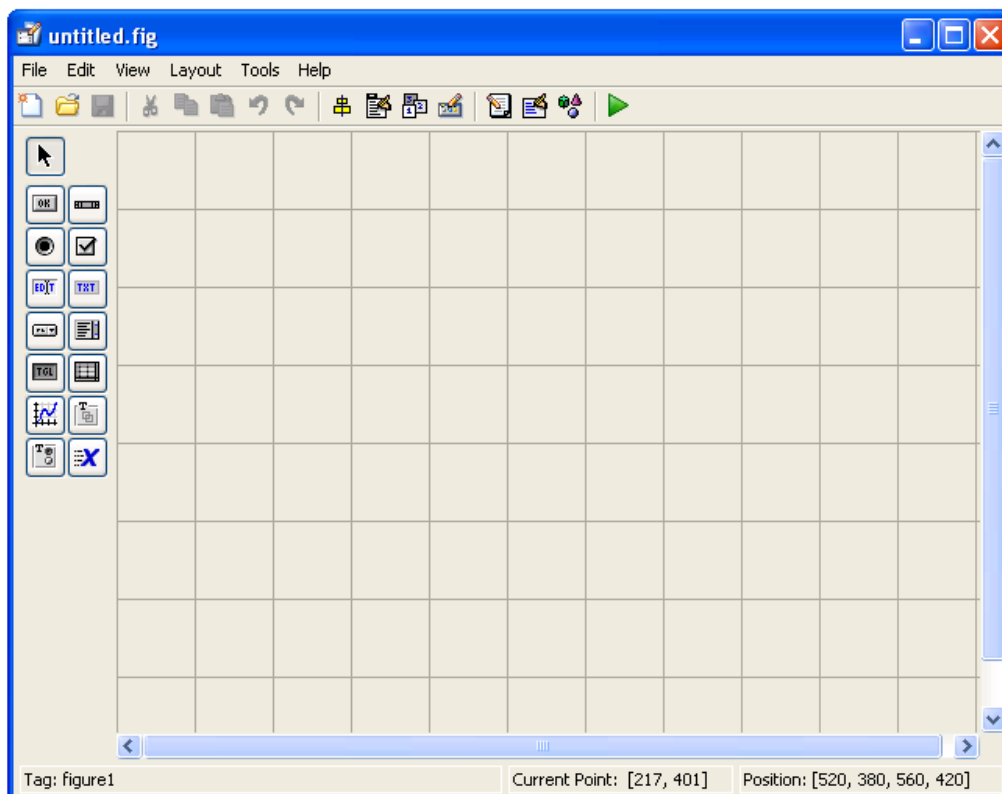
5.2.3 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)

Μια πολύ χρήσιμη δυνατότητα που προσφέρει το MATLAB στο χρήστη, είναι να δημιουργήσει γραφικό περιβάλλον για τις εφαρμογές του. Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται εύκολα με δύο τρόπους. Πρώτον, εκτελώντας την εντολή `guide` στο παράθυρο εντολών και δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή του μενού `File` → `New` → `GUI`.

Στη συνέχεια, ο οδηγός ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο (Σχήμα 5.2). Στη συνέχεια, αν ο χρήστης αφήσει την προεπιλεγμένη επιλογή ‘Blank GUI’ θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 5.3).

















Σχήμα 5.2: Επιλογές για δημιουργία νέου γραφικού περιβάλλοντος






Σχήμα 5.3: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία GUI

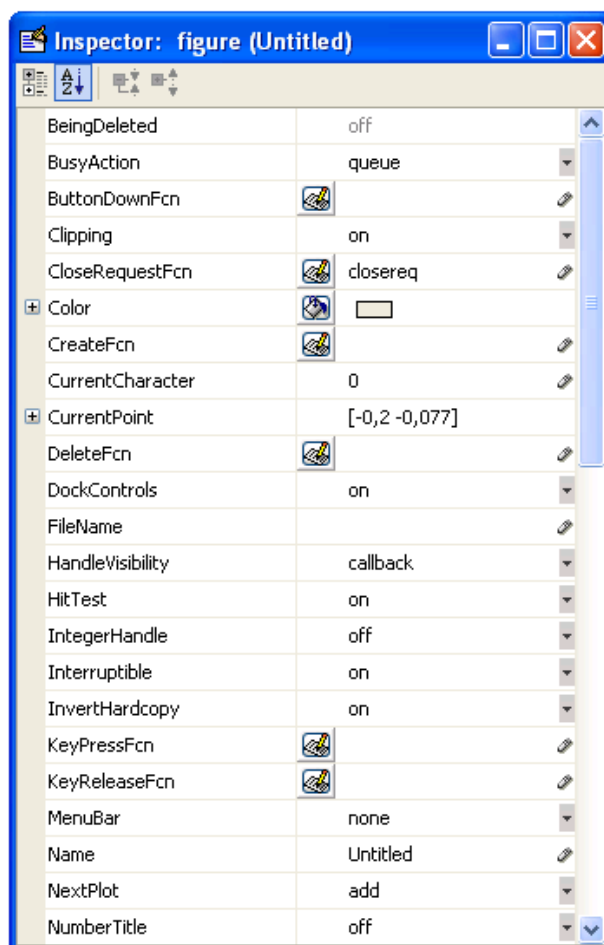
Ακολούθως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μία κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μία κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα είναι το φόντο του παραθύρου. Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει τα παρακάτω 14 αντικείμενα (objects), με τα οποία ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει το γραφικό του περιβάλλον:

1. Push button  : κουμπί που όταν πατηθεί εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία.
2. Slider  : δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή, με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα και η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.
3. Radio button  : στρογγυλό κουμπί με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.
4. Check box  : δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.
5. Edit text  : είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.

6. Static text  : προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.
7. Pop-up menu  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί.
8. List box  : παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.
9. Toggle button  : δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.
10. Table  : παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.
11. Axes  : δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής μιας γραφικής παράστασης στο παράθυρο.
12. Panel  : χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.
13. Button group  : είναι σαν το panel, αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.
14. ActiveX control  : αντικείμενο ελέγχου ActiveX.

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο είναι απλή και γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols).

Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε αντικείμενο στο παράθυρο. Μέσω του object browser  βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί, μέσω του εικονιδίου align objects . Χρησιμοποιώντας τον property inspector (Σχήμα 5.4), μέσω του εικονιδίου  ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει τις ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη γραμματοσειρά, το είδος των γραμμάτων, αν είναι ορατό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α.. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται.



Σχήμα 5.4: Property inspector


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

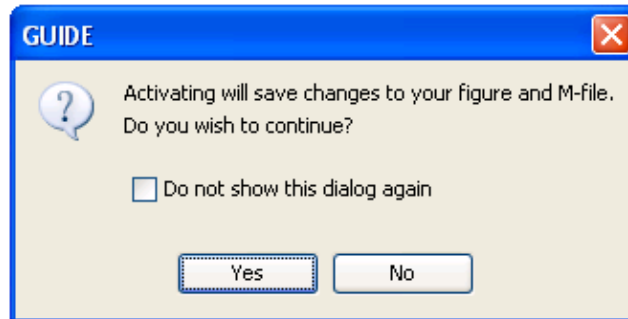
- gcf : δείκτης στο τρέχον figure
- gco : δείκτης στο τρέχον object
- gca : δείκτης στο τρέχον axes
- gcbo : δείκτης στο object του οποίου εκτελείται η συνάρτηση callback

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

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

Δύο χρήσιμες ιδιότητες στον προγραμματισμό των m-files είναι οι string και οι value. Με την ιδιότητα string ο χρήστης μπορεί να εισάγει κείμενο πάνω σε κάποιο αντικείμενο με την εντολή set ή να πάρει κείμενο με την εντολή get, ενώ με την ιδιότητα value να ορίσει ή να πάρει κάποια τιμή από ένα αντικείμενο. Επίσης, το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας dialogs. Τα dialogs είναι ειδικού τύπου παράθυρα τα οποία χρησιμοποιούνται για να δώσουν πληροφορίες στο χρήστη ή να ζητήσουν εισαγωγή πληροφορίας.

Τέλος, αφού κατασκευάσει ο χρήστης το παράθυρο της εφαρμογής με τα κουμπιά που επιθυμεί, μπορεί να τρέξει την εφαρμογή πατώντας το κουμπί “Run” . Το GUI θα ζητήσει να επιβεβαιώσει ο χρήστης τις αλλαγές που έκανε (Σχήμα 5.5). Επιλέγοντας “Yes” το GUI θα ζητήσει από το χρήστη να δώσει ένα όνομα στην εφαρμογή του και θα την αποθηκεύσει σε δύο αρχεία .fig και .m [5.4], [5.5].



Σχήμα 5.5: Παράθυρο διαλόγου για αποθήκευση αλλαγών στο GUI

5.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΥΡΕΣΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για την υλοποίηση του λογισμικού εύρεσης της βέλτιστης θέσης και του βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ, οι οποίες θα τοποθετηθούν σε ακτινικά δίκτυα διανομής, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η βελτιστοποίηση γίνεται έχοντας ως σκοπό είτε την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος είτε τη μεγιστοποίηση του οικονομικού κινήτρου του διαχειριστή του δικτύου διανομής. Επιπλέον, μέσα από την εφαρμογή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει όποια λύση επιθυμεί και να γίνει ο υπολογισμός της μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος και του συνολικού χρηματικού κινήτρου που επιτεύχθηκε.

5.3.1 Απαιτήσεις συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής είναι το MATLAB σε έκδοση 7.9.0 (R2009b).

Οι τυπικές απαιτήσεις για να μπορεί το σύστημα να χρησιμοποιήσει το λογισμικό MATLAB είναι στην περίπτωση λειτουργικού συστήματος Windows XP να είναι νεότερο από Windows XP Service Pack 2 ή 3, επεξεργαστή οποιοδήποτε Intel ή AMD×86 που να υποστηρίζει το σύνολο εντολών SSE2, 3-4 GB χώρο στο δίσκο και 512 MB RAM.


Ο υπολογιστής στον οποίο αναπτύχθηκε είχε λειτουργικό σύστημα Windows XP Professional 32 bit, επεξεργαστή AMD Sempron™ 3100+ 1.80 GHz, δίσκο 140 GB και RAM 1.00 GB.

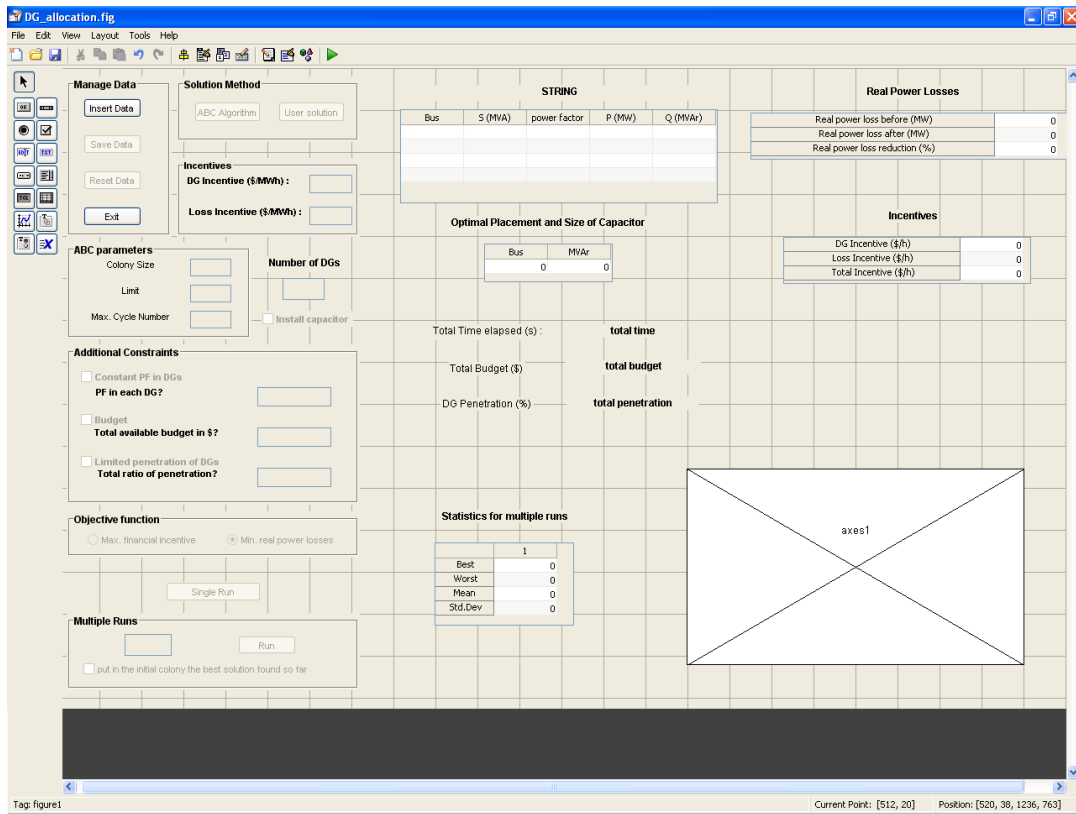
5.3.2 Γραφικό περιβάλλον εφαρμογής

Το γραφικό περιβάλλον που δημιουργήθηκε για την εφαρμογή ονομάστηκε DG_allocation και τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

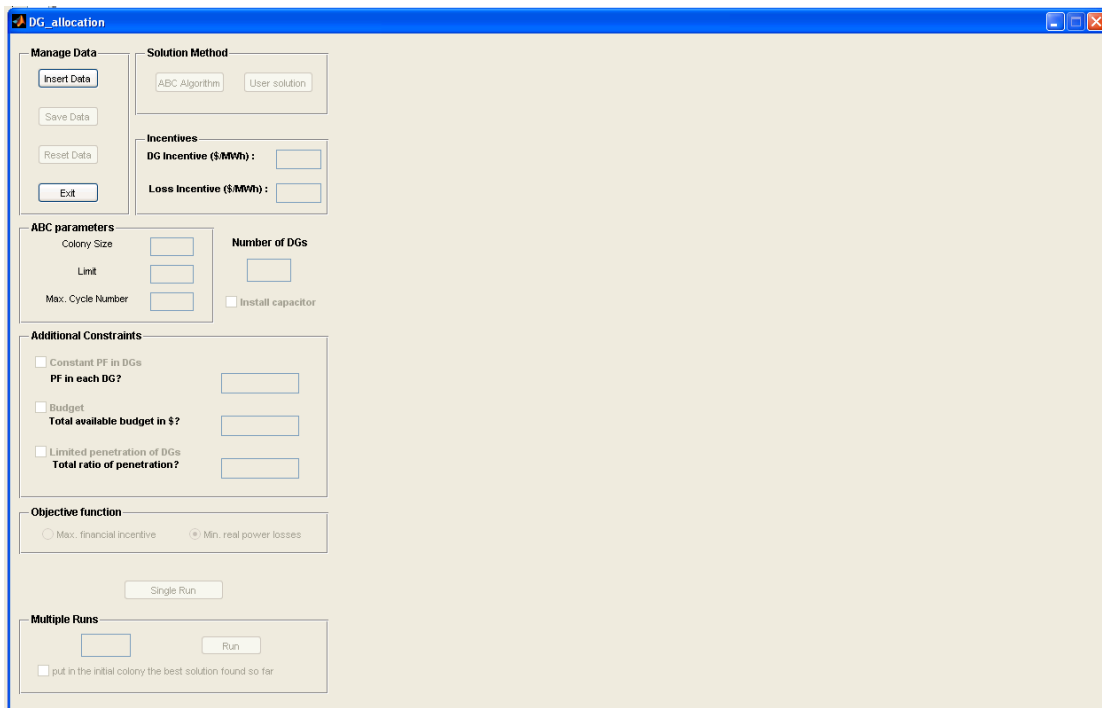
- 8 push buttons για την εισαγωγή δεδομένων, εκτέλεση υπολογισμών, καθαρισμό και αποθήκευση δεδομένων και έξοδο από την εφαρμογή.
- 20 static texts για εμφάνιση τίτλων, αλλά και αποτελεσμάτων.
- 5 tables για εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα.
- 7 panels, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την ομαδοποιημένη εμφάνιση των επιλογών του χρήστη.
- 10 edit texts, στα οποία ο χρήστης καλείται να δώσει τιμές σε διάφορες μεταβλητές.
- 5 check boxes, εκ των οποίων το πρώτο είναι για επιλογή εισαγωγής ή όχι πυκνωτή (για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ), τα 3 είναι για εισαγωγή επιπλέον περιορισμών στο πρόβλημα και το τελευταίο είναι για επιλογή απομνημόνευσης της καλύτερης λύσης πριν την έναρξη της επόμενης εκτέλεσης (για πολλαπλές εκτελέσεις).
- 2 radio buttons για την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιλέγοντας τη μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου απενεργοποιείται αυτόματα η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και αντίστροφα.
- 1 axes για την εμφάνιση αποτελεσμάτων σε μορφή διαγράμματος.

Μετά την εκκίνηση του GUIDE, όταν ο χρήστης επιλέξει να ανοίξει το γραφικό περιβάλλον DG_allocation, εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 5.6.

Πατώντας το κουμπί “Run” , ο χρήστης μπορεί να τρέξει την εφαρμογή (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.6: Εισαγωγή όλων των αντικειμένων του GUI για την υλοποίηση της εφαρμογής



Σχήμα 5.7: Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής

Από το Σχήμα 5.7 φαίνεται ότι μόνο δυο επιλογές είναι ενεργοποιημένες. Η εφαρμογή είναι φτιαγμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να καθοδηγεί το χρήστη στην επόμενη κίνηση που πρέπει κάνει. Για παράδειγμα, δεν μπορεί να τρέξει την εφαρμογή αν πρώτα δεν εισάγει δεδομένα, ή να αποθηκεύσει τα αποτελέσματα της εφαρμογής αν δεν τρέξει πρώτα την εφαρμογή. Έτσι κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, οι μοναδικές ενεργοποιημένες επιλογές του χρήστη στο γραφικό περιβάλλον είναι να εισάγει δεδομένα (“Insert Data”) ή να εγκαταλείψει την εφαρμογή (“Exit”). Αφού εισάγει δεδομένα ο χρήστης, ακολούθως θα ενεργοποιηθούν και άλλα κουμπιά. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργίες του κάθε κουμπιού και στις επόμενες υποενότητες γίνεται μια πιο λεπτομερής ανάλυσή τους.

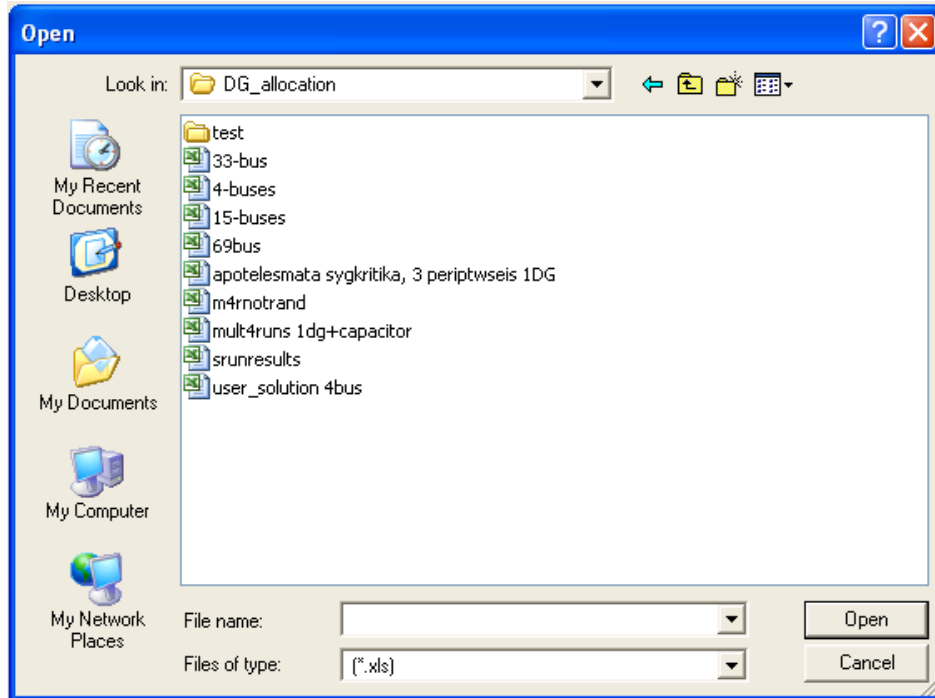
Πίνακας 5.1: Συνοπτική επεξήγηση λειτουργιών των κουμπιών του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής.

Κουμπί	Συνοπτική λειτουργία
Insert Data	Ανοίγει παράθυρο διαλόγου για την επιλογή αρχείου Excel, όπου είναι τα δεδομένα των ζυγών, των γραμμών, η βάση ισχύος, τα δεδομένα του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ, ο οποίος μοντελοποιείται σαν γεννήτρια, καθώς και οι ζυγοί στους οποίους δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση ΜΔΠ.
ABC Algorithm	Ενεργοποιεί όλες τις παραμέτρους του αλγόριθμου τεχνητής αποκίας μελισσών, δηλαδή το push button Single Run και τα panels ABC Parameters, Additional Constraints, Objective function και Multiple Runs.
Single Run	Εκτελεί τον αλγόριθμο μια φορά.
Run	Εκτελεί τον αλγόριθμο τόσες φορές, όσες έχει εισάγει ο χρήστης στο διπλανό edit box.
User Solution	Ο χρήστης επιλέγει μέσω παράθυρου διαλόγου μια δική του λύση για την τοποθέτηση των ΜΔΠ.
Save Data	Αποθηκεύει σε αρχείο excel τα αποτελέσματα, καθώς και τα settings που έχει δώσει ο χρήστης.
Reset Data	Κάνει επανεκκίνηση της εφαρμογής.
Exit	Μέσω ενός παραθύρου διαλόγου μπορεί να γίνει ο τερματισμός της εφαρμογής.

5.3.3 Εισαγωγή δεδομένων

Επιλέγοντας το κουμπί “Insert Data”, ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.8), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια δεδομένα εισόδου από ένα αρχείο Excel (*.xls) που ήδη υπάρχει. Αν ο χρήστης επιλέξει “Cancel”, τότε δεν γίνεται τίποτα και επιστρέφει στο αρχικό παράθυρο, ενώ αν εισάγει δικό του όνομα, εμφανίζεται ένα μήνυμα σφάλματος. Αν επιλέξει κάποιο υπάρχον αρχείο, τότε διαβάζεται το συγκεκριμένο αρχείο και στη συνέχεια ενεργοποιούνται τα κουμπιά “ABC Algorithm” και “User Solution”, καθώς και τα edit boxes στα οποία ο χρήστης εισάγει τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης ΜΔΠ και μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με αυτές πριν την εισαγωγή των ΜΔΠ, σε \$/MWh.

Ακόμα, απενεργοποιείται το κουμπί “Insert data”, αφού ο χρήστης έχει επιλέξει δεδομένα, όμως σε περίπτωση που θέλει να τα αλλάξει, τότε θα πρέπει να πατήσει πρώτα το κουμπί “Reset Data” για να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής και να εισάγει τα νέα δεδομένα με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε. Το κουμπί “Save Data” παραμένει απενεργοποιημένο, καθώς ακόμα δεν έχει γίνει κάποια εκτέλεση, έτσι ώστε να έχουμε αποτελέσματα.



Σχήμα 5.8: Εισαγωγή δεδομένων από αρχείο Excel

Τα δεδομένα που εισάγονται αφορούν τη βασική ισχύ, τα δεδομένα των ζυγών, τα δεδομένα των γεννητριών που προϋπήρχαν στο δίκτυο, τα δεδομένα των γραμμών και τους ζυγούς που δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση ΜΔΠ. Τονίζεται ότι για την εφαρμογή ο χρήστης θα πρέπει να δίνει τα δεδομένα με τον παρακάτω συγκεκριμένο τρόπο (format).

Στο πρώτο φύλλο του αρχείου Excel δίνεται η βάση ισχύος. Στο δεύτερο φύλλο δίνονται τα δεδομένα των ζυγών. Πιο συγκεκριμένα στη στήλη A δηλώνεται ο αριθμός του ζυγού, στη στήλη B ένας αριθμός από 1 έως 3 ο οποίος υποδηλώνει τον τύπο του ζυγού (1: PQ, 2: PV, 3: ζυγός ταλάντωσης), στη στήλη C το φορτίο ενεργού ισχύος του ζυγού σε MW και στη στήλη D το φορτίο άεργου ισχύος του ζυγού σε MVA_r. Στη στήλη E δηλώνεται η ενεργός ισχύς G_S σε MW για τυχόν εγκάρσιο στοιχείο και στη στήλη F δηλώνεται η άεργος ισχύς B_S σε MVA_r για τυχόν εγκάρσιο στοιχείο. Στη στήλη G δηλώνεται η περιοχή που βρίσκεται ο ζυγός και είναι ένας θετικός ακέραιος αριθμός, ενώ στη στήλη H και στη στήλη I αρχικοποιούνται το μέτρο και η γωνία της τάσης αντίστοιχα σε α.μ. τιμές. Στη στήλη J δηλώνεται η βασική τάση του κάθε ζυγού, στη στήλη K η ζώνη απωλειών, η οποία είναι ένας θετικός ακέραιος αριθμός και στη στήλη L και στη στήλη M δηλώνονται το μέγιστο και ελάχιστο επιτρεπτό όριο αντίστοιχα για το πλάτος της τάσης.

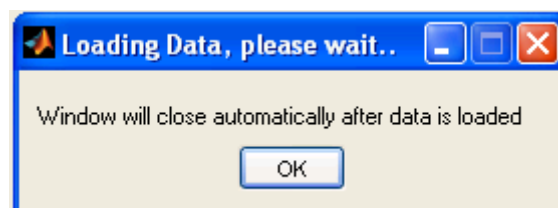
Στο τρίτο φύλλο του αρχείου Excel δηλώνονται τα χαρακτηριστικά των γεννητριών, και πιο συγκεκριμένα στη στήλη A δηλώνεται ο ζυγός της γεννήτριας, στη στήλη B η ονομαστική ενεργός ισχύς (MW) της γεννήτριας, στη στήλη C η ονομαστική άεργος ισχύς (MVA) της γεννήτριας. Στη στήλη D και στη στήλη E δηλώνονται το μέγιστο και το ελάχιστο όριο αντίστοιχα της άεργου ισχύος που μπορεί να παράγει η γεννήτρια ενώ στη στήλη F αρχικοποιείται το μέτρο της τάσης της γεννήτριας. Στη στήλη G δηλώνεται η κατάσταση της γεννήτριας, δηλαδή αν είναι μεγαλύτερη του μηδενός η γεννήτρια είναι ενεργοποιημένη, ενώ αν είναι μικρότερο ή ίσο του μηδενός η γεννήτρια είναι απενεργοποιημένη. Στη στήλη H και στη στήλη I δηλώνονται η μέγιστη και η ελάχιστη ενεργός ισχύς (MW) αντίστοιχα που μπορεί να παράγει η γεννήτρια.

Στο τέταρτο φύλλο του αρχείου Excel που εισάγεται στο λογισμικό, δηλώνονται τα στοιχεία των γραμμών. Πιο συγκεκριμένα στη στήλη A δηλώνεται ο ζυγός αναχώρησης της γραμμής και στη στήλη B δηλώνεται ο ζυγός άφιξης της γραμμής. Στη στήλη C, τη στήλη D και τη στήλη E δηλώνονται αντίστοιχα σε α.μ. τιμές η αντίσταση, η αντίδραση και η χωρητικότητα της γραμμής. Στις στήλες F, G, H δηλώνονται τα ανώτερα επιτρεπτά όρια φαινόμενης ισχύος (MVA) που επιτρέπεται να ρέουν στη γραμμή για κανονική λειτουργία του δικτύου, μεταβατική λειτουργία του δικτύου και για περίπτωση εκτάκτου ανάγκης αντίστοιχα. Στις στήλες I και J δηλώνεται ο λόγος μετασχηματισμού του μέτρου και της γωνίας της τάσης αντίστοιχα, σε περίπτωση που η γραμμή αντιπροσωπεύει μετασχηματιστή ΣΑΤΥΦ. Στη στήλη K δηλώνεται η κατάσταση της γραμμής (1= λειτουργεί, 2 = δεν λειτουργεί) και στις στήλες L,M δηλώνεται η ελάχιστη και η μέγιστη διαφορά των γωνιών της τάσης που μπορεί να έχουν ο ζυγός αναχώρησης και άφιξης.

Στο πέμπτο φύλλο του αρχείου Excel δηλώνονται οι ζυγοί στους οποίους δεν επιτρέπεται η εγκατάσταση ΜΔΠ.

Ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα συμφωνεί με τον τρόπο με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα στο λογισμικό MATPOWER [5.6], καθώς αυτό το λογισμικό χρησιμοποιείται για την ανάλυση ροών φορτίου.

Αφού πατήσει ο χρήστης το κουμπί “Insert Data” εμφανίζεται pop up window το οποίο ενημερώνει την χρήστη να περιμένει και στη συνέχεια κλείνει αυτόματα αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων (Σχήμα 5.9).



Σχήμα 5.9: Pop up window που ενημερώνει το χρήστη να περιμένει

Στη συνέχεια αφού τα δεδομένα από το excel εισαχθούν στο λογισμικό ο χρήστης πρέπει να εισάγει στα edit boxes το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ στο δίκτυο, καθώς και το χρηματικό κίνητρο για τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με αυτές πριν την εισαγωγή των ΜΔΠ, σε \$/MWh.

5.3.4 Επεξεργασία δεδομένων

Αφού γίνει η εισαγωγή δεδομένων, ο χρήστης καλείται να επιλέξει τη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος (“ Solution Method ”) και μπορεί να επιλέξει μεταξύ του “ABC Algorithm” και του “User Solution”.

Σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών (“ABC Algorithm”), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.11, τότε ενεργοποιούνται το κουμπί “Single Run” και το panel “Multiple Runs”, καθώς και το edit box στο οποίο ο χρήστης εισάγει το αριθμό των ΜΔΠ που θέλει να εγκαταστήσει στο δίκτυο.

Ακόμα ενεργοποιούνται το panel “ABC Parameters” όπου ο χρήστης εισάγει το μέγεθος της αποικίας, το όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης, καθώς και το μέγιστο αριθμό ανακυκλώσεων του αλγόριθμου. Όταν εκτελεστεί ο μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων ή η καλύτερευση της τιμής του συνολικού οικονομικού κινήτρου είναι μικρότερη ή ίση με 0.005 \$/h για καθορισμένο αριθμό ανακυκλώσεων, τότε ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών τερματίζεται.

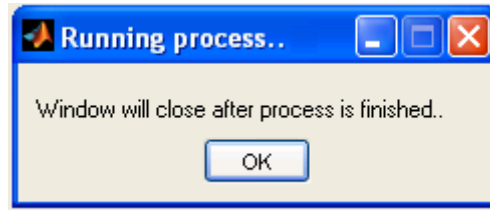
Ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τον αριθμό των ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο. Αν επιλεγθεί η εισαγωγή μίας μόνο ΜΔΠ, τότε ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την εγκατάσταση ή όχι ενός πυκνωτή αντιστάθμισης.

Επιπλέον ενεργοποιείται το panel “Additional Constraints” στο οποίο ο χρήστης δηλώνει επιπλέον περιορισμούς για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, αν ο χρήστης επιλέξει το check box “Constant PF in DGs”, τότε ενεργοποιείται από κάτω το edit box “PF in each DG?” και ο χρήστης καλείται να δηλώσει πόσο θα είναι ο συντελεστής ισχύος για κάθε μια από τις ΜΔΠ που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο. Αν ο χρήστης επιλέξει το check box “Budget”, τότε ενεργοποιείται από κάτω το edit box “Total available budget in \$?” και ο χρήστης πρέπει να εισάγει το ανώτερο κεφάλαιο το οποίο είναι διαθέσιμο για την επένδυση. Τέλος αν ο χρήστης επιλέξει το check box “Limited penetration of DGs” τότε ενεργοποιείται από κάτω το edit box “Total ratio of penetration?” και ο χρήστης πρέπει να εισάγει ποιο θα είναι το επιτρεπτό συνολικό ποσοστό διείσδυσης όλων των ΜΔΠ στο δίκτυο.

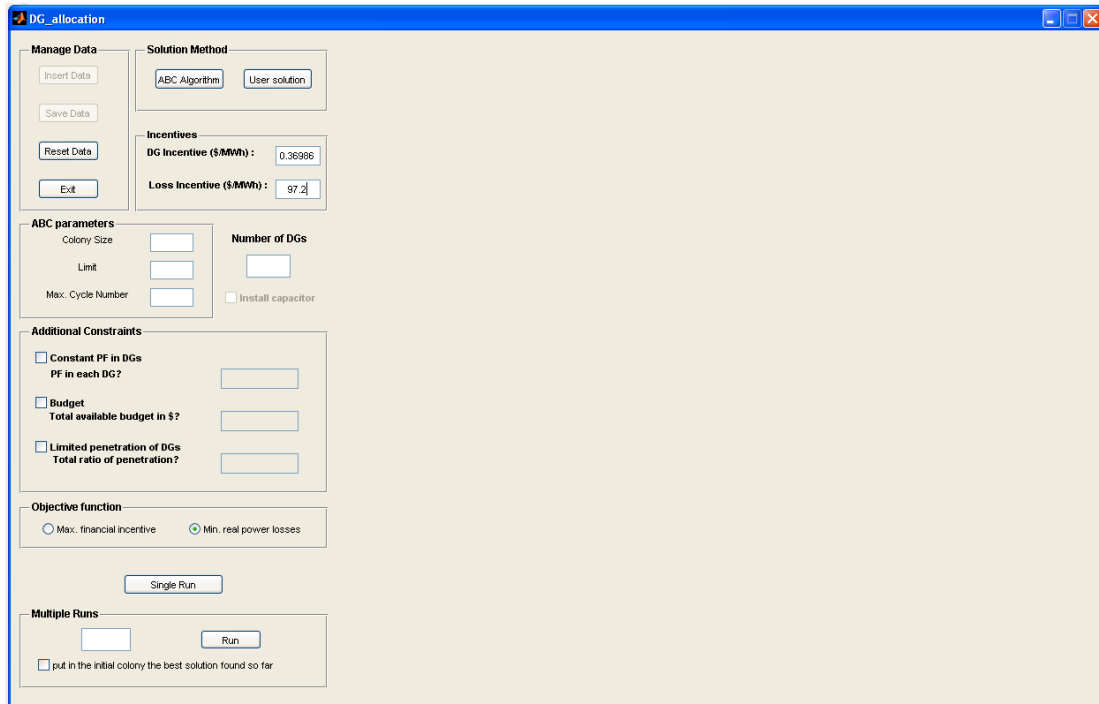
Τέλος στο panel “Objective function” ο χρήστης καλείται να επιλέξει ποια θα είναι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα πρέπει να επιλέξει μεταξύ της μεγιστοποίησης του συνολικού χρηματικού κινήτρου (“Max. financial incentive”) και ελαχιστοποίησης των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου (“Min. real power losses”).

Αφού ο χρήστης εισάγει όλες τις παραπάνω παραμέτρους, στη συνέχεια πρέπει να επιλέξει μεταξύ του να εκτελέσει τον αλγόριθμο μια φορά, ή πολλαπλές συνεχόμενες φορές.

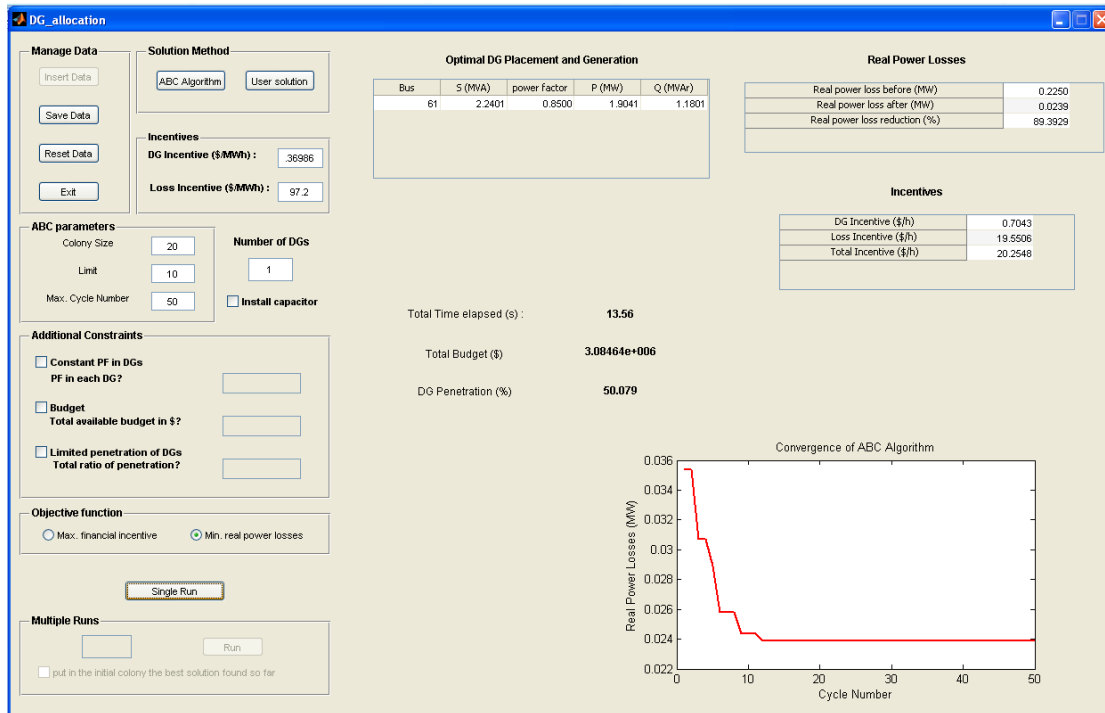
Αν ο χρήστης επιλέξει το κουμπί “Single Run”, τότε απενεργοποιείται το panel “Multiple Runs” και ο αλγόριθμος θα εκτελεστεί μια μόνο φορά και αφού εκτελεστεί θα εμφανίσει τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 5.12. Όσο ο αλγόριθμος εκτελείται, εμφανίζεται το pop up window του Σχήματος 5.10, το οποίο κλείνει αυτόματα όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί.



Σχήμα 5.10: Pop up window που ενημερώνει το χρήστη να περιμένει κατά το Single Run



Σχήμα 5.11: Επιλογή του κουμπιού “ABC Algorithm”

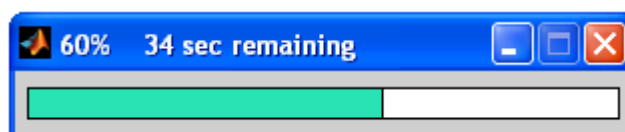


Σχήμα 5.12: Αποτελέσματα για “Single Run”

Από το Σχήμα 5.12, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα για μία μόνο εκτέλεση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών εμπεριέχουν τον πίνακα “Optimal DG Placement and Generation”, στον οποίο εμφανίζονται οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης των ΜΔΠ, η φαινόμενη ισχύς τους σε MVA, ο ΣΙ τους, η ονομαστική τους ισχύς σε MW, καθώς και η άεργος ισχύς που παράγουν οι ΜΔΠ σε MVar. Σε περίπτωση όπου επιλεγθεί η εισαγωγή πυκνωτή, τότε στα αποτελέσματα εμφανίζεται και ο πίνακας “Optimal Placement and Size of Capacitor”, όπου απεικονίζεται η θέση και το μέγεθός του πυκνωτή.

Ο πίνακας “Real power losses” αποτελείται από τρεις γραμμές όπου στην πρώτη εμφανίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εγκατάσταση ΜΔΠ, στη δεύτερη οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο και στην τρίτη γραμμή φαίνεται το ποσοστό μείωσης των απωλειών. Ο πίνακας “Incentives” αποτελείται από τρεις γραμμές, όπου στην πρώτη εμφανίζεται το χρηματικό κίνητρο του διαχειριστή που προέρχεται από την εγκατάσταση ΜΔΠ στο δίκτυο, στη δεύτερη γραμμή εμφανίζεται το χρηματικό κίνητρο του διαχειριστή που προέρχεται από την μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος μετά την είσοδο ΜΔΠ στο δίκτυο και στην τρίτη γραμμή φαίνεται το συνολικό χρηματικό κίνητρο του διαχειριστή που είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω. Ακόμα εμφανίζονται ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης (sec), το συνολικό κόστος της επένδυσης (\$) και η συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο σε static texts. Επίσης εμφανίζεται ένα γράφημα το οποίο δείχνει τη σύγκλιση του αλγόριθμου στη βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, μέσα από κάθε κύκλο εκτέλεσής του.

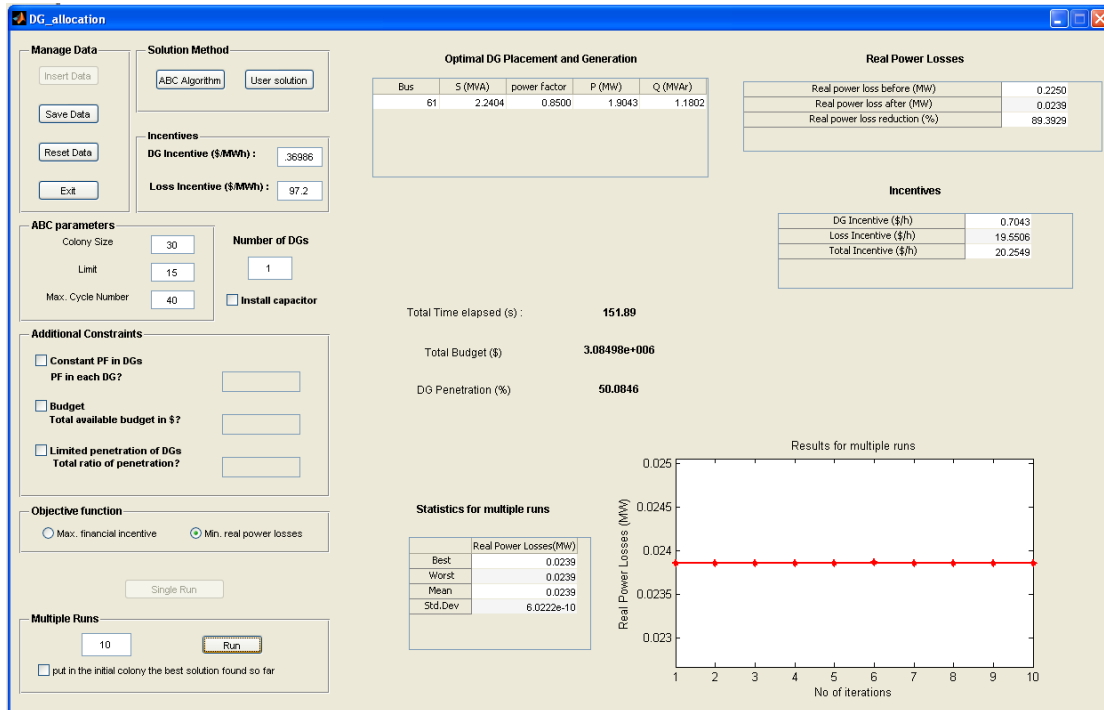
Σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει να εκτελέσει τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών πολλαπλές φορές, τότε πρέπει να εισάγει στο edit box τον αριθμό των συνεχόμενων εκτελέσεων του αλγόριθμου. Αν ο χρήστης δεν επιλέξει το check box “put in the initial colony the best solution found so far” τότε σε κάθε νέα εκτέλεση του αλγόριθμου οι αρχικές θέσεις πηγής-τροφής (λύσεις) της αποικίας είναι κάθε φορά τυχαίες, ενώ σε περίπτωση που επιλεγθεί τότε σε κάθε νέα εκτέλεση περνιέται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Κατά τη διάρκεια της πολλαπλής εκτέλεσης του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών εμφανίζεται ένα pop up window (Σχήμα 5.13), το οποίο είναι μια μπάρα και ενημερώνει το χρήστη για την εξέλιξη της διαδικασίας και πόσος χρόνος υπολείπεται.



Σχήμα 5.13: Μπάρα ενημέρωσης χρήστη για την ολοκλήρωση των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών

Στο Σχήμα 5.14 φαίνονται τα αποτελέσματα που εμφανίζονται ύστερα από την εκτέλεση των πολλαπλών εκτελέσεων. Όπως φαίνεται υπάρχουν πάλι οι πίνακες “Optimal DG Placement and Generation”, “Real Power Losses” και “Incentives”, καθώς και τα static texts που ενημερώνουν το χρήστη για το χρόνο που χρειάστηκε να εκτελεστεί ο αλγόριθμος, το συνολικό κόστος της επένδυσης και τη συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο. Επιπλέον υπάρχει και ο πίνακας “Statistics for multiple runs”, στον οποίο φαίνονται τα στατιστικά στοιχεία για τις εκτελέσεις (μέγιστη τιμή, ελάχιστη τιμή, μέση τιμή, τυπική απόκλιση) του αλγόριθμου.

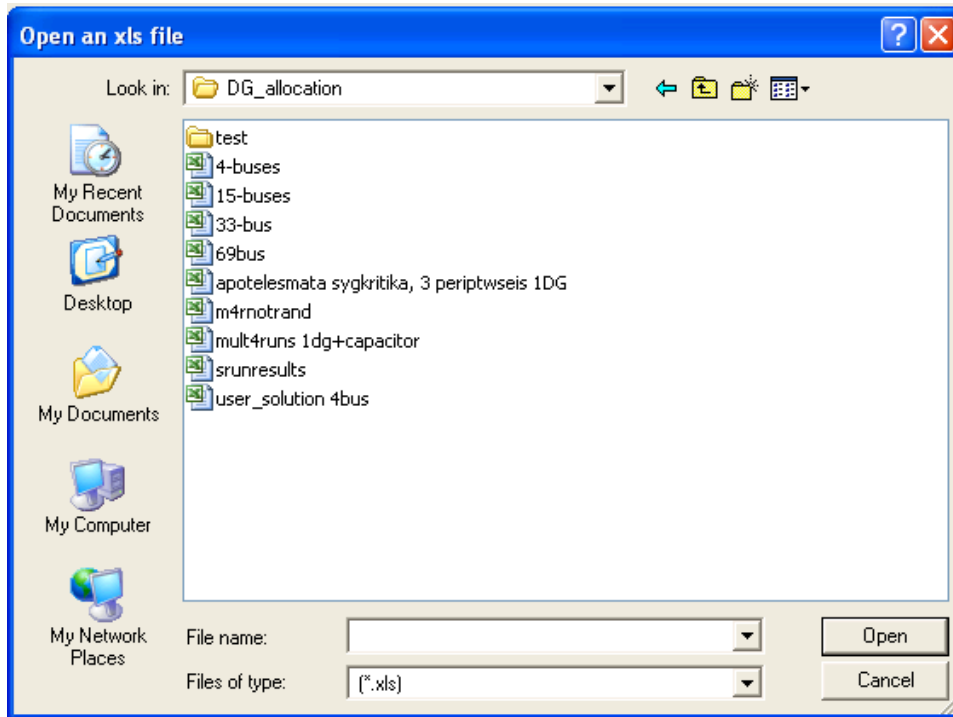
Το διάγραμμα που εμφανίζεται έχει σαν οριζόντιο άξονα τον αύξοντα αριθμό της εκτέλεσης του αλγόριθμου και σαν κάθετο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.



Σχήμα 5.14: Αποτελέσματα ύστερα από πολλαπλή εκτέλεση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών

Αν ο χρήστης επιλέξει σαν μέθοδο επίλυσης την “User Solution”, τότε ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.15), στο οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει κάποια δεδομένα εισόδου από ένα αρχείο Excel (*.xls) που ήδη υπάρχει. Ο χρήστης στην περίπτωση αυτή καλείται να εισάγει μέσω του αρχείου Excel τη δικιά του λύση και αναμένει να δει τι αποτελέσματα θα έχει με αυτή. Το αρχείο Excel, το οποίο περιέχει τη λύση του χρήστη, πρέπει στο πρώτο φύλλο στη στήλη A να δηλώνει τον ζυγό τοποθέτησης των ΜΔΠ, στη στήλη B την αντίστοιχη ονομαστική ενεργό ισχύ των ΜΔΠ σε MW και στη στήλη C το συντελεστή ισχύος της κάθε ΜΔΠ. Αν έχει επιλεγεί εισαγωγή μίας μόνο ΜΔΠ, τότε από το δεύτερο φύλλο του αρχείου Excel στη στήλη A δηλώνεται η θέση και στη στήλη B το μέγεθος σε MVar του πυκνωτή αντιστάθμισης.

Στο Σχήμα 5.16 φαίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν ύστερα από την εισαγωγή της λύσης του χρήστη. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.16 σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζονται οι πίνακες “User Solution DG placement and Generation”, “Real Power Losses” και “Incentives”, καθώς και τα static texts που ενημερώνουν το χρήστη για το συνολικό κόστος της επένδυσης και τη συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο.



Σχήμα 5.15: Εισαγωγή της λύσης του χρήστη από αρχείο Excel

User solution DG Placement and Generation

Bus	S (MVA)	power factor	P (MW)	Q (MVar)
4	1	0.9000	0.9000	0.4359

Real Power Losses

Real power loss before (MW)	0.0646
Real power loss after (MW)	0.0063
Real power loss reduction (%)	90.2819

Optimal Placement and Size of Capacitor

Bus	MVar
2	0.4900

Incentives

DG Incentive (\$/h)	0.3329
Loss Incentive (\$/h)	5.6682
Total Incentive (\$/h)	6.0011

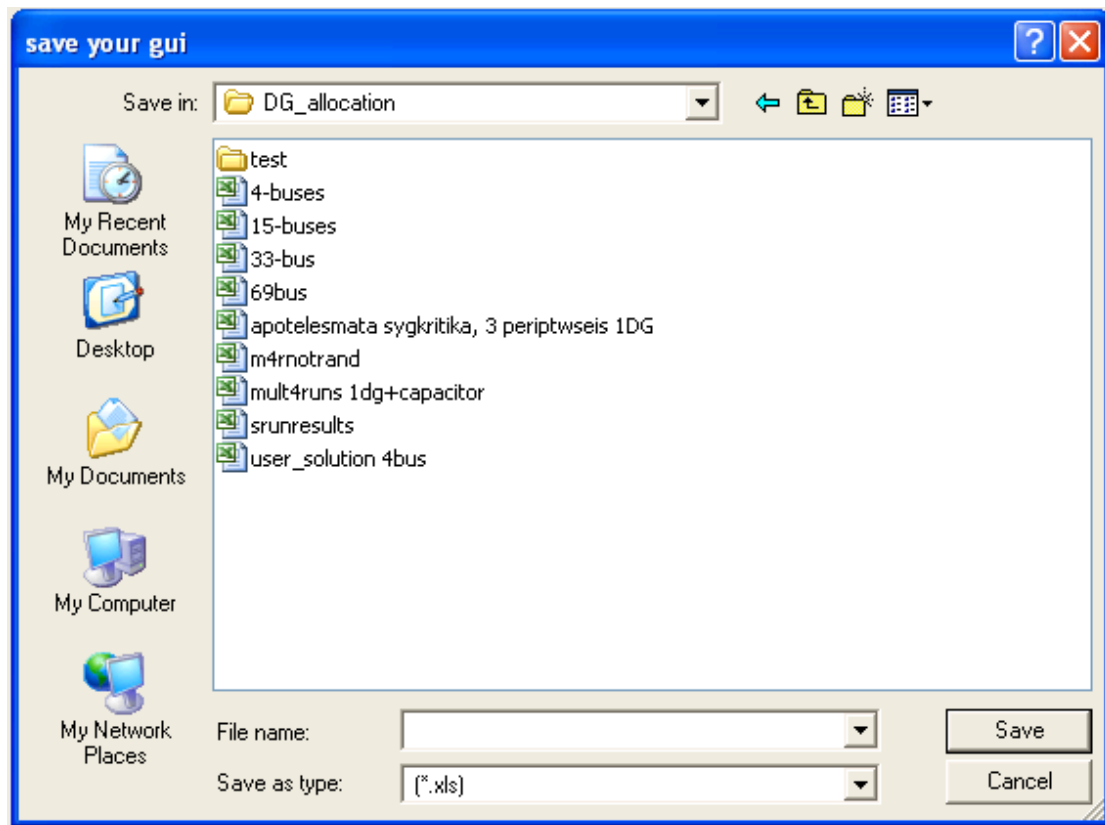
Total Budget (\$) 1.458e+006

DG Penetration (%) 60

Σχήμα 5.16: Αποτελέσματα ύστερα από την εισαγωγή της λύσης του χρήστη

5.3.5 Αποθήκευση αποτελεσμάτων και έξοδος

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων από το λογισμικό, μέσω της αποθήκευσής τους σε κάποιο εξωτερικό αρχείο Excel. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το πάτημα του κουμπιού “Save Data”, όπου αναδύεται ένα παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 5.17), το οποίο ζητά από το χρήστη να δώσει ένα δικό του όνομα σε κάποιο αρχείο Excel, στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα.



Σχήμα 5.17: Αποθήκευση αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel

Το αποθηκευμένο αυτό αρχείο Excel έχει διαφορές ανάλογα με το ποια μέθοδο επίλυσης έχει επιλέξει ο χρήστης.

Σε περίπτωση που ο χρήστης επέλεξε να εκτελεστεί ο αλγόριθμος μόνο μία φορά, τότε το αρχείο Excel αποτελείται από ένα φύλλο, στο οποίο εμφανίζονται οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης των ΜΔΠ, η φαινόμενη ισχύς σε MVA και ο συντελεστής ισχύος κάθε ΜΔΠ, η ενεργός και άεργος ισχύς σε MW και MVA_g αντίστοιχα, η θέση και η χωρητικότητα του πυκνωτή (σε περίπτωση όπου έχει συνδεθεί), το χρηματικό κίνητρο που προκύπτει από τη σύνδεση των ΜΔΠ στο δίκτυο, το χρηματικό κίνητρο που προκύπτει από τη μείωση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου και το συνολικό χρηματικό κίνητρο, όπου είναι το σύνολο αυτών των δύο. Ακόμα στο πρώτο φύλλο αποθηκεύονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ, καθώς και η συνολική ποσοστιαία μείωση αυτών.

Επίσης αποθηκεύεται ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης, το συνολικό κόστος της επένδυσης, η συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο και επιπλέον αποθηκεύονται και όλες οι παράμετροι που έδωσε ο χρήστης για την επίλυση του προβλήματος, δηλαδή οι παράμετροι του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και οι επιπλέον περιορισμοί που επιβλήθηκαν στο πρόβλημα, καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση (μεγιστοποίηση συνολικού χρηματικού κινήτρου ή ελαχιστοποίηση συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος).

Σε περίπτωση όπου ο χρήστης είχε επιλέξει να εκτελεστεί ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών πολλαπλές φορές, τότε το Excel αρχείο στο οποίο αποθηκεύονται τα αποτελέσματα αποτελείται από ένα φύλλο το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό σε περίπτωση που ο χρήστης είχε επιλέξει “Single Run” και εμφανίζονται τα αποτελέσματα της καλύτερης εκτέλεσης. Ακόμα, δημιουργούνται τόσα επιπλέον φύλλα όσα και ο αριθμός των εκτελέσεων, στα οποία αποθηκεύονται τα αποτελέσματα για κάθε εκτέλεση του αλγόριθμου. Δηλαδή για κάθε εκτέλεση σε ένα φύλλο αποθηκεύονται ο αύξων αριθμός της εκτέλεσης, οι βέλτιστοι ζυγοί τοποθέτησης των ΜΔΠ και οι αντίστοιχες ονομαστικές τους ισχείς, τα χρηματικά κίνητρα, οι απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ, καθώς και η αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση, το συνολικό κόστος της επένδυσης, η συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο και ο χρόνος που διαρκεί κάθε εκτέλεση.

Σε περίπτωση που ο χρήστης εισάγει τη δικιά του λύση στο λογισμικό και μετά αποθηκεύσει τα αποτελέσματα, τότε το αρχείο Excel που δημιουργείται αποτελείται από ένα φύλλο, το οποίο περιέχει όλα τα αποτελέσματα, δηλαδή τους ζυγούς τοποθέτησης των ΜΔΠ και τις αντίστοιχες ονομαστικές τους ισχείς, τα χρηματικά κίνητρα, τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ, καθώς και την αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση, το συνολικό κόστος της επένδυσης και τη συνολική διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο.

Τέλος, αφού γίνει και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων από το χρήστη, μπορεί να γίνει επανεκκίνηση της εφαρμογής με το κουμπί “Reset Data” ή τερματισμός της εφαρμογής πατώντας το κουμπί “Exit”. Ακόμα και να μην αποθηκεύτηκαν τα αποτελέσματα πάλι είναι δυνατή η επανεκκίνηση ή ο τερματισμός της εφαρμογής. Για τον τερματισμό, ο χρήστης πατάει το κουμπί “Exit” και στο παράθυρο διαλόγου που θα εμφανιστεί (Σχήμα 5.18) πρέπει να επιλέξει “Yes”. Σε αντίθετη περίπτωση που επιλέξει “No” ή “Cancel” τότε απλά γίνεται επιστροφή στο παράθυρο της εφαρμογής.



Σχήμα 5.18: Επιλογή τερματισμού της εφαρμογής

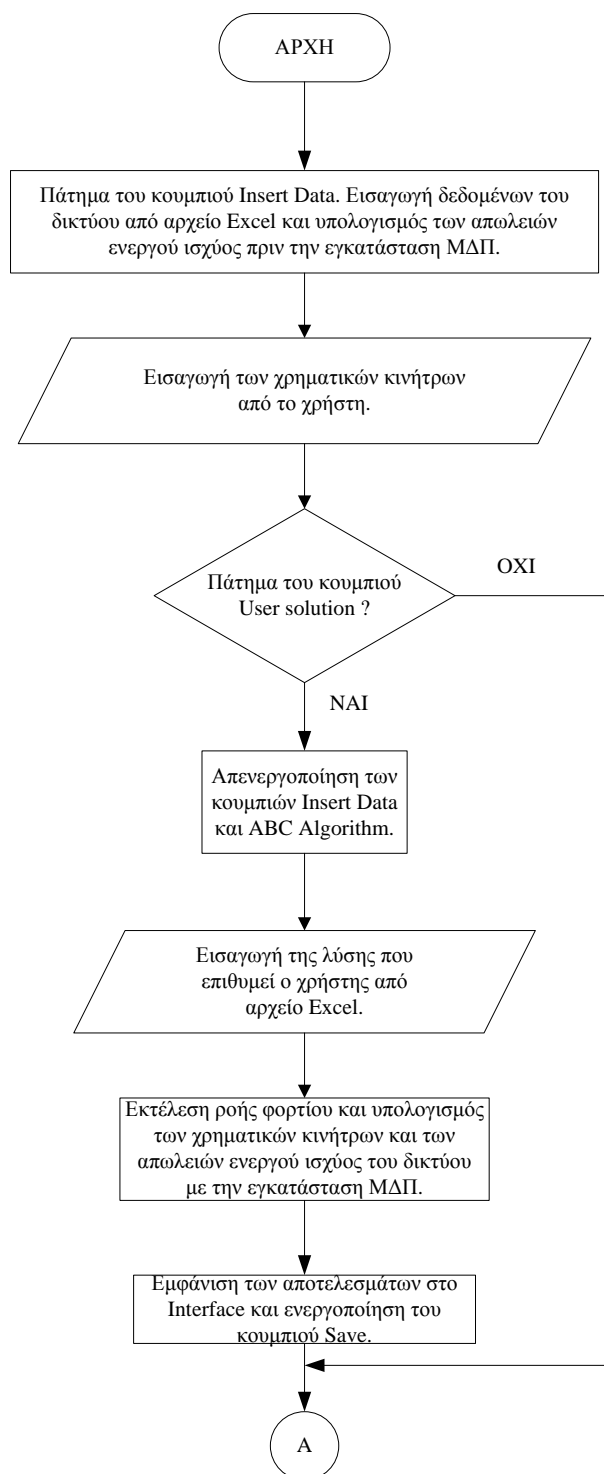
5.3.6 Ανάλυση m-files και δομή της εφαρμογής

Η εφαρμογή που υλοποιήθηκε αποτελείται από ένα (1) fig-αρχείο και επτά (7) m-files. Ακόμα προκειμένου να εκτελεστεί η εφαρμογή, θα πρέπει στο direction path του MATLAB να είναι δηλωμένο και το MATPOWER [5.6] , καθώς αυτό το λογισμικό χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ροών φορτίου. Τα επτά (7) συνολικά m-files που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται στον Πίνακα 5.2.

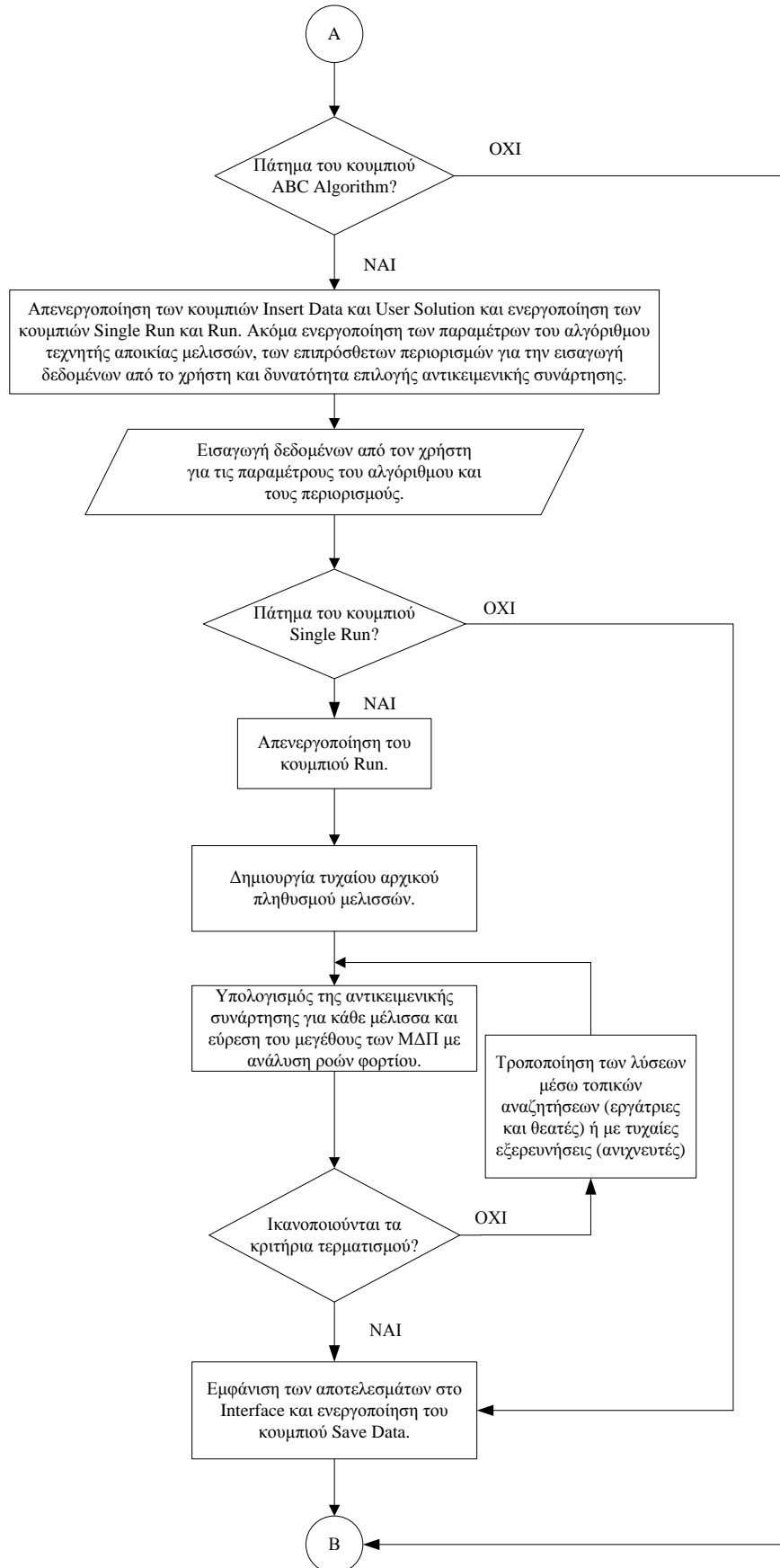
Πίνακας 5.2: Περιγραφή m-files της μεθόδου εύρεσης βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ για δίκτυα διανομής

A/A	Όνομα αρχείου	Περιγραφή λειτουργίας
1	DG_allocation.m	Αρχείο στο οποίο υπάρχει ο κώδικας που ενσωματώθηκε στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελούν τις επιθυμητές λειτουργίες για την υλοποίηση της εφαρμογής και να είναι λειτουργικό το γραφικό περιβάλλον.
2	mycase.m	Γεμίζει τη δομή mpc του λογισμικού MATPOWER με τα δεδομένα του δικτύου που έχει εισάγει ο χρήστης, πριν ακόμα εγκατασταθεί κάποια ΜΔΠ, καθώς επίσης και στο SingleABC.m κατά την αρχικοποίηση.
3	runpf.m	Τρέχει μία απλή ροή φορτίου με βάση τη δομή mpc που έχει δημιουργηθεί. Αυτή ουσιαστικά είναι μια συνάρτηση του MATPOWER.
4	mycase_usersolution.m	Γεμίζει τη δομή mpc με τη λύση που έδωσε ο χρήστης.
5	SingleABC.m	Εκτελεί τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών, τόσες φορές όσες έχει επιλέξει ο χρήστης (μία φορά επιλέγοντας single run ή πολλαπλές επιλέγοντας τον αριθμό των επαναλήψεων και πατώντας μετά run). Κατά την πολλαπλή εκτέλεση του αλγόριθμου δίνεται η δυνατότητα να εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων.
6	obj1.m	Αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, στην οποία υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος και το συνολικό οικονομικό κίνητρο.
7	calculateFitness.m	Υπολογίζει την καταλληλότητα (Fitness) της λύσης, με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

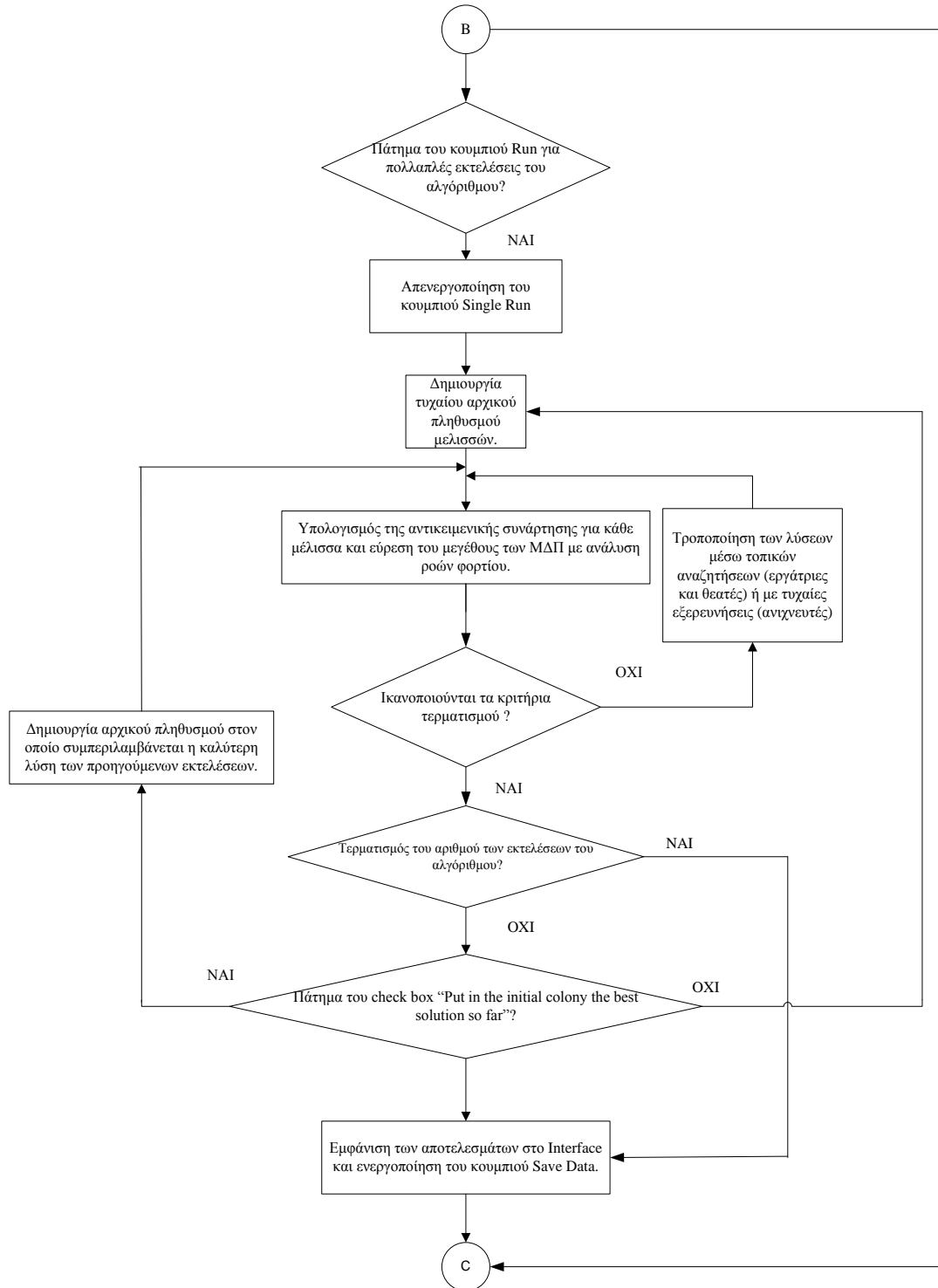
Τέλος, στο Σχήμα 5.19 φαίνεται το διάγραμμα ροής, το οποίο δείχνει τη λειτουργία του παραπάνω λογισμικού, ανάλογα με το τι κουμπί θα πατήσει ο χρήστης.



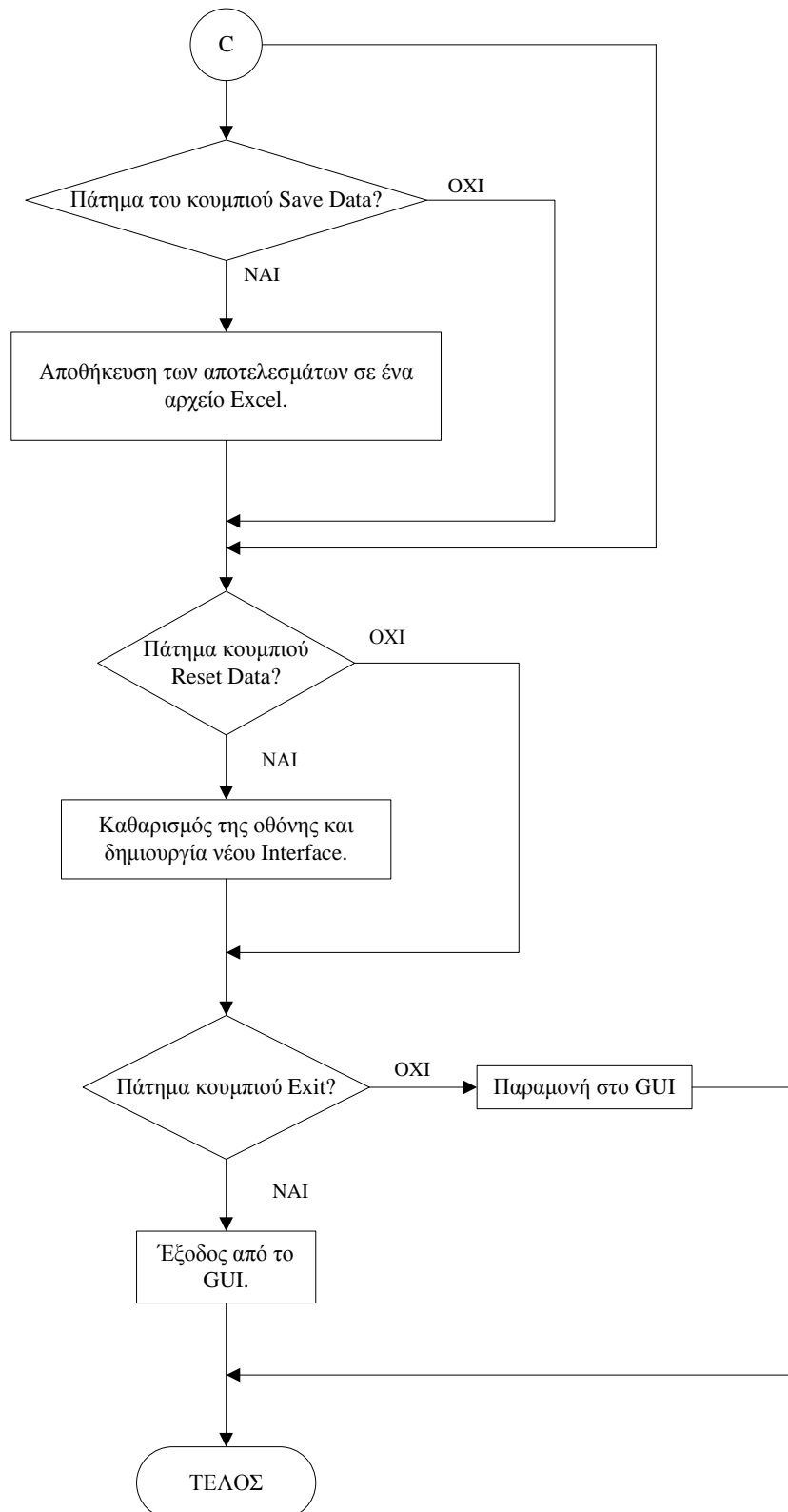
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ (μέρος Α)



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ (μέρος Β)



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ (μέρος Γ)



Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροής του λογισμικού εύρεσης βέλτιστης θέσης και βέλτιστου μεγέθους ΜΔΠ (μέρος Δ)

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφώντος, “Εισαγωγή στη MATLAB”, Λευκωσία 2007, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www2.ucy.ac.cy/~georgios/bookfiles/MATLABbook.pdf>, προσπελάστηκε το Μάιο 2012.
- [5.2] Α. Αρβανιτίδης, και Χ. Σαραγιώτης, “Εισαγωγή στο MATLAB”, [Online]. Διαθέσιμο: http://users.auth.gr/~arvanit/Eisagogi_sto_Matlab.pdf, προσπελάστηκε το Μάιο 2012.
- [5.3] Γ. Θεοδώρου, και Ν. Θεοδώρου, “Πρακτικός οδηγός στο MATLAB”, [Online]. Διαθέσιμο: http://users.auth.gr/~theodoru/CompuStat/MATLAB_AUTH.pdf, προσπελάστηκε το Μάιο 2012.
- [5.4] Δ. Βαρσάμης, “MATLAB - Graphical User Interfaces”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://teiserron.gr/index.php/topic,539.msg2744.html>, προσπελάστηκε τον Ιούνιο 2012.
- [5.5] The MathWorks, Inc., “MATLAB Creating Graphical User Interfaces”, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf προσπελάστηκε τον Ιούνιο 2012.
- [5.6] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, “MATPOWER 4.1 - A MATLAB Power System Simulation Package, User’s Manual”, Cornell Univ., Shc. Elect. Eng., Ithaca, NY, 2010. [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>, προσπελάστηκε τον Ιούνιο 2012

ΔΟΚΙΜΕΣ-ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εφαρμογές του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5, σε διάφορα ακτινικά δίκτυα. Αρχικά παρουσιάζεται ένα αναλυτικό παράδειγμα σε ένα δίκτυο 4 ζυγών, δείχνοντας κάθε βήμα της μεθόδου καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν εκτελώντας το λογισμικό του Κεφαλαίου 5 σε ακτινικά δίκτυα 15, 33 και 69 ζυγών για διάφορα σενάρια. Όλες οι εκτελέσεις έγιναν με τη βοήθεια H/Y με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής: AMD Sempron™ 3100+ 1.80 GHz
- Μνήμη RAM: 1 GB
- Λειτουργικό σύστημα: Microsoft Windows XP Professional Version 2002

6.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

6.2.1 Μαθηματικά σύμβολα

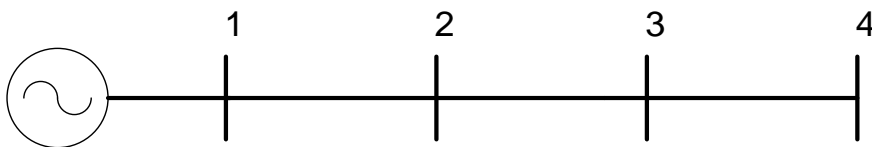
Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στις παρακάτω ενότητες της Ενότητας 6.2 είναι τα ακόλουθα:

V_k	μέτρο τάσης ζυγού k
δ_k	γωνία τάσης ζυγού k
R_{km}	αντίσταση σε α.μ. τιμές της γραμμής διανομής μεταξύ των ζυγών k και m
X_{km}	επαγωγική αντίδραση σε α.μ. τιμές της γραμμής διανομής μεταξύ των ζυγών k και m
Y_{km}	στοιχείο πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών που αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα ζυγών k και m
G_{km}	πραγματικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
B_{km}	φανταστικό μέρος του στοιχείου Y_{km} του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών
$A(k)$	Το σύνολο $A(k)$ περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς που συνδέονται στο ζυγό k
P_{Gk}	παραγόμενη πραγματική ισχύς στο ζυγό k
P_{Dk}	καταναλισκόμενη πραγματική ισχύς στο ζυγό k
Q_{Gk}	παραγόμενη άεργος ισχύς στο ζυγό k
Q_{Dk}	καταναλισκόμενη άεργος ισχύς στο ζυγό k
S_{km}	φαινόμενη ισχύς που ρέει από το ζυγό k στο ζυγό m
S_{mk}	φαινόμενη ισχύς που ρέει από το ζυγό m στο ζυγό k
P_{DG}	παραγόμενη πραγματική ισχύς της μονάδος διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ)

Q_{DG}	παραγόμενη άεργος ισχύς της ΜΔΠ
pf^{DG}	ο συντελεστής ισχύος της ΜΔΠ
C_{DG}	χρηματικό κίνητρο ($\frac{\$}{MWh}$), το οποίο καταβάλλεται στο διαχειριστή του δικτύου διανομής και αφορά το κόστος σύνδεσης ΜΔΠ στο δίκτυο
C_L	χρηματικό κίνητρο ($\frac{\$}{MWh}$), το οποίο καταβάλλεται στο διαχειριστή του δικτύου και αφορά το κέρδος από τη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος με την είσοδο ΜΔΠ στο δίκτυο.
P_L^{before}	απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την τοποθέτηση ΜΔΠ
P_L^{after}	απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την τοποθέτηση ΜΔΠ
V_{min}	κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει το μέτρο της τάσης σε ένα ζυγό
V_{max}	ανώτατο όριο που μπορεί να πάρει το μέτρο της τάσης σε ένα ζυγό
δ_{min}	κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει η γωνία της τάσης σε ένα ζυγό
δ_{max}	ανώτατο όριο που μπορεί να πάρει η γωνία της τάσης σε ένα ζυγό
S_{max}	ανώτατο όριο φαινόμενης ισχύος που επιτρέπεται να ρέει από μια γραμμή
P_{min}^{DG}	κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει η παραγόμενη πραγματική ισχύς της ΜΔΠ
P_{max}^{DG}	ανώτατο όριο που μπορεί να πάρει η παραγόμενη πραγματική ισχύς της ΜΔΠ
pf_{min}^{DG}	κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει ο συντελεστής ισχύος της ΜΔΠ
pf_{max}^{DG}	ανώτατο όριο που μπορεί να πάρει ο συντελεστής ισχύος της ΜΔΠ
<i>Budget</i>	διαθέσιμο κεφάλαιο για την επένδυση
<i>pen</i>	μέγιστη διείσδυση ΜΔΠ

6.2.2 Δεδομένα συστήματος και διατύπωση προβλήματος

Θεωρείται δίκτυο 4 ζυγών και 3 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, θεωρώντας ότι σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί ΜΔΠ. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Η βασική ισχύς είναι $S_{BASE}=0.1$ MVA και η βασική τάση είναι $V_{BASE}=11$ kV. Τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 6.1.



Σχήμα 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 4 ζυγών.

Πίνακας 6.1: Δεδομένα αριθμητικού παραδείγματος 4 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (α.μ.)	X (α.μ.)	P ζυγού άφιξης (α.μ.)	Q ζυγού άφιξης (α.μ.)
1	1	2	0.000907	0.000888	5	4
2	2	3	0.001209	0.001183	3	2
3	3	4	0.000604	0.000592	7	6
Σύνολο					15	12

Σε αυτό το δίκτυο των 4 ζυγών πρόκειται να συνδεθεί μια ΜΔΠ και ζητείται να βρεθεί ποιος είναι ο βέλτιστος ζυγός και ποια πρέπει να είναι η ονομαστική ισχύς P_{DG} της μονάδας που θα συνδεθεί.

Σύμφωνα με το ρυθμιστικό πλαίσιο που ισχύει στο Ηνωμένο Βασίλειο, κάθε επενδυτής ΜΔΠ είναι υποχρεωμένος να καταβάλει στον διαχειριστή του δικτύου διανομής 3.24 \$/yr για κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής που εγκαθίσταται στο δίκτυο. Το ποσό αυτό περιλαμβάνει χρέωση για τη χρήση του δικτύου από την ΜΔΠ, καθώς και για διαδικασίες συντήρησης ή ενίσχυσης που μπορεί να χρειαστεί το δίκτυο μετά την εισαγωγή της ΜΔΠ. Επομένως :

$$C_{DG} = 3.24 \frac{\$}{\text{kW}\cdot\text{yr}} = 3.24 \frac{\$}{\text{kW}\cdot\text{yr}} \cdot \frac{1000 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} \cdot \frac{0.1 \text{ MW}}{1 \text{ α.μ.}} \cdot \frac{1 \text{ yr}}{8760 \text{ h}} = 0.036986 \frac{\$}{(\text{α.μ.})\cdot\text{h}} \quad (6.1)$$

Ακόμα ο κανονισμός θέτει ένα όριο απωλειών ενεργού ισχύος, το οποίο είναι ίσο με τις απώλειες του δικτύου χωρίς καθόλου ΜΔΠ, και αν αυξηθούν οι απώλειες σε σχέση με αυτό το όριο τότε ο διαχειριστής υποχρεούται να πληρώσει πρόστιμο 97.2 \$/MWh για κάθε MWh απωλειών που αυξάνεται. Στην αντίθετη περίπτωση που οι απώλειες μειωθούν σε σχέση με το όριο που έχει τεθεί, τότε ο διαχειριστής επιβραβεύεται από τον ρυθμιστή με 97.2 \$/MWh για κάθε MWh απωλειών που μειώνεται. Επομένως :

$$C_L = 97.2 \frac{\$}{\text{MWh}} = 97.2 \frac{\$}{\text{MWh}} \cdot \frac{0.1 \text{ MW}}{1 \text{ α.μ.}} = 9.72 \frac{\$}{(\text{α.μ.})\cdot\text{h}} \quad (6.2)$$

Οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων σε κάθε ζυγό να μην ξεπερνούν το $\pm 5\%$ της ονομαστικής τιμής, οι γωνίες να είναι μεταξύ -30° και 30° και τα θερμικά όρια των γραμμών τίθενται στα 3 MVA για κάθε γραμμή. Ακόμα θεωρείται ότι η ΜΔΠ έχει σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με 0.9 επαγωγικό, το διαθέσιμο κεφάλαιο είναι \$810000, με κάθε kW διεσπαρμένης παραγωγής να κοστίζει \$1620, και η μέγιστη επιτρεπτή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής δεν πρέπει να ξεπερνάει το 50% του φορτίου. Άρα:

$$V_{\min} = 0.95 \text{ α.μ.} \quad (6.3)$$

$$V_{\max} = 1.05 \text{ α.μ.} \quad (6.4)$$

$$\delta_{\min} = -30^\circ \quad (6.5)$$

$$\delta_{\max} = 30^\circ \quad (6.6)$$

$$S_{\max} = 3 \text{ MVA} = 30 \text{ α.μ.} \quad (6.7)$$

$$\text{pf}^{DG} = 0.9 \quad (6.8)$$

$$\text{Budget} = \$ 810000 \quad (6.9)$$

$$\text{pen} = 0.5 \quad (6.10)$$

6.2.3 Δεδομένα αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών

Θεωρείται ότι το μέγεθος της αποικίας των μελισσών του αλγόριθμου, που αποτελείται από ίσο αριθμό από μέλισσες εργάτριες και θεατές, είναι 20. Το όριο, που ισούται με τον αριθμό των επαναλήψεων μετά από τις οποίες μια λύση (θέση πηγής-τροφής) εγκαταλείπεται είναι 20. Η προτεινόμενη τιμή του ορίου είναι μεγαλύτερη ή ίση του $0.5 \times CS \times D$, όπου CS το μέγεθος της αποικίας (εδώ 20) και D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση (εδώ 1). Η τρίτη παράμετρος έλεγχου του αλγόριθμου, ο μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων είναι 50. Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα του αλγόριθμου.

Πίνακας 6.2: Δεδομένα αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών

Μέγεθος αποικίας	20
Πλήθος μελισσών εργατριών	10
Πλήθος μελισσών θεατών	10
Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	20
Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων	50

6.2.4 Επίλυση ροής φορτίου αρχικού συστήματος

Ο πίνακας αγωγιμοτήτων ζυγών θα είναι:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{12}+jX_{12}} & -\frac{1}{R_{12}+jX_{12}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{R_{12}+jX_{12}} & \frac{1}{R_{12}+jX_{12}} + \frac{1}{R_{23}+jX_{23}} & -\frac{1}{R_{23}+jX_{23}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_{23}+jX_{23}} & \frac{1}{R_{23}+jX_{23}} + \frac{1}{R_{34}+jX_{34}} & -\frac{1}{R_{34}+jX_{34}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_{34}+jX_{34}} & \frac{1}{R_{34}+jX_{34}} \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Αντικαθιστώντας στην (6.11) τις τιμές των R_{ij} και X_{ij} από τον Πίνακα 6.1, προκύπτει ο πίνακας αγωγιμοτήτων (α.μ.) :

$$Y = [G] + [B] = \begin{bmatrix} 562.94-j551.14 & -562.94+j551.14 & 0 & 0 \\ -562.94+j551.14 & 985.49-j964.61 & -422.55+j413.47 & 0 \\ 0 & -422.55+j413.47 & 1266.97-j1241.12 & -844.42+j827.65 \\ 0 & 0 & -844.42+j827.65 & 844.42-j827.65 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Όπου οι πίνακες G και B από την (6.12) είναι:

$$G = \begin{bmatrix} 562.94 & -562.94 & 0 & 0 \\ -562.94 & 985.49 & -422.55 & 0 \\ 0 & -422.55 & 1266.97 & -844.22 \\ 0 & 0 & -844.22 & 844.22 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -551.14 & 551.14 & 0 & 0 \\ 551.14 & -964.61 & 413.47 & 0 \\ 0 & 413.47 & -1241.12 & 827.65 \\ 0 & 0 & 827.65 & -827.65 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Η εξίσωση ενεργού ισχύος ροής φορτίου για το ζυγό k είναι :

$$P_{Gk} - P_{Dk} = V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in \Lambda(k)} V_m [G_{km} \cos(\delta_k - \delta_m) + B_{km} \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (6.15)$$

Η εξίσωση άεργου ισχύος ροής φορτίου για το ζυγό k είναι :

$$Q_{Gk} - Q_{Dk} = -V_k^2 B_{kk} + V_k \sum_{m \in \Lambda(k)} V_m [G_{km} \sin(\delta_k - \delta_m) - B_{km} \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (6.16)$$

Με βάση τις εξισώσεις (6.15) , (6.16) και αντικαθιστώντας τις τιμές των G_{ij} , B_{ij} , οι εξισώσεις ροής φορτίου για το ζυγό 1 είναι:

$$P_{G1} = 562.94V_1^2 + V_1 V_2 [-562.94 \cos(-\delta_2) + 551.14 \sin(-\delta_2)] \quad (6.17)$$

$$Q_{G1} = 551.14V_1^2 + V_1 V_2 [-562.94 \sin(-\delta_2) - 551.14 \cos(-\delta_2)] \quad (6.18)$$

Ομοίως, προκύπτουν οι αντίστοιχες εξισώσεις και για τους υπόλοιπους ζυγούς του δικτύου:

- Ζυγός 2

$$-5 = 985.49V_2^2 + V_1 V_2 [-562.94 \cos(\delta_2) + 551.14 \sin(\delta_2)] + V_2 V_3 [-422.55 \cos(\delta_2 - \delta_3) + 413.47 \sin(\delta_2 - \delta_3)] \quad (6.19)$$

$$-4 = 964.61V_2^2 + V_1 V_2 [-562.94 \sin(\delta_2) - 551.14 \cos(\delta_2)] + V_2 V_3 [-422.55 \sin(\delta_2 - \delta_3) - 413.47 \cos(\delta_2 - \delta_3)] \quad (6.20)$$

- Ζυγός 3

$$-3 = 1266.97V_3^2 + V_3 V_2 [-422.55 \cos(\delta_3 - \delta_2) + 413.47 \sin(\delta_3 - \delta_2)] + V_3 V_4 [-844.22 \cos(\delta_3 - \delta_4) + 827.65 \sin(\delta_3 - \delta_4)] \quad (6.21)$$

$$-2 = 1241.12V_3^2 + V_3 V_2 [-422.55 \sin(\delta_3 - \delta_2) - 413.47 \cos(\delta_3 - \delta_2)] + V_3 V_4 [-844.22 \sin(\delta_3 - \delta_4) - 827.65 \cos(\delta_3 - \delta_4)] \quad (6.22)$$

- Ζυγός 4

$$-7 = 844.22V_4^2 + V_4 V_3 [-844.22 \cos(\delta_4 - \delta_3) + 827.65 \sin(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.23)$$

$$-6 = 827.65V_4^2 + V_4 V_3 [-844.22 \sin(\delta_4 - \delta_3) - 827.65 \cos(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.24)$$

Το σύστημα αποτελείται από 3 ζυγούς φορτίου, τους 2, 3 και 4, επομένως οι εξισώσεις (6.19) έως (6.24) συνιστούν τις 6 πραγματικές εξισώσεις του προβλήματος ροών φορτίου. Το διάνυσμα κατάστασης x αποτελείται από τις ακόλουθες μεταβλητές:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} \text{ όπου } \delta = [\delta_2, \delta_3, \delta_4]^T \text{ και } V = [V_2, V_3, V_4]^T$$

Για την επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου χρησιμοποιήθηκε όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 η μέθοδος Newton-Raphson, η οποία εφαρμόστηκε σε περιβάλλον MATLAB με τη χρήση του λογισμικού MATPOWER (εντολή runpf). Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης φαίνονται στους Πίνακες 6.3 και 6.4.

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, πριν την τοποθέτηση διεσπαρμένης παραγωγής

Αποτελέσματα ροών φορτίου						
Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAr)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAr)
1	1	0	0	0	1.565	1.26
2	0.975	-0.143	0.5	0.4	0	0
3	0.952	-0.277	0.3	0.2	0	0
4	0.944	-0.310	0.7	0.6	0	0
Σύνολο:			1.5	1.2	1.565	1.26

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, πριν την τοποθέτηση διεσπαρμένης παραγωγής

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	1.567	1.26	-1.530	-1.22	0.037	0.04
2	2	3	1.032	0.83	-1.010	-0.81	0.022	0.02
3	3	4	0.706	0.61	-0.700	-0.60	0.006	0.01
Σύνολο							0.065	0.06

Από τον Πίνακα 6.4 φαίνεται ότι οι απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο πριν την τοποθέτηση ΜΔΠ είναι:

$$P_L^{\text{before}} = 0.065 \text{ MW} = 0.65 \text{ α.μ.} \quad (6.25)$$

6.2.5 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει στο λογισμικό αν ο στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μείωση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο ή η μεγιστοποίηση του συνολικού οικονομικού κινήτρου.

Η αντικειμενική συνάρτηση του υπό εξέταση προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση του συνολικού οικονομικού κινήτρου και φαίνεται στη σχέση (6.26) :

$$\max_{\mathbf{x}} f_{PF} = \max_{\mathbf{x}} [C_{DG}P_{DG} + C_L(P_L^{\text{before}} - P_L^{\text{after}})] = \max_{\mathbf{x}} [DGInc_{DG} + LossInc_{DG}] \quad (6.26)$$

όπου

$$\begin{aligned} DGInc_{DG} &= C_{DG}P_{DG} \\ LossInc_{DG} &= C_L(P_L^{\text{before}} - P_L^{\text{after}}) \end{aligned}$$

και είναι αντίστοιχα τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης της ΜΔΠ και της μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος, εκφρασμένα σε \$/h.

Το P_L^{after} εκφράζει τις απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ σε α.μ. τιμές.

Το P_{DG} είναι η παραγόμενη πραγματική ισχύς της ΜΔΠ και εκφράζεται σε α.μ. τιμές.

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\min_{\mathbf{x}} f_{PF} = \min_{\mathbf{x}} [-C_{DG}P_{DG} - C_L(P_L^{\text{before}} - P_L^{\text{after}})] \quad (6.27)$$

και αντικαθιστώντας τις τιμές των C_{DG} , C_L από τις σχέσεις (6.1) και (6.2)

$$\min_{\mathbf{x}} f_{PF} = \min_{\mathbf{x}} [-0.036986 \frac{\$}{(\alpha\mu)\cdot h} P_{DG} - 9.72 \frac{\$}{(\alpha\mu)\cdot h} (P_L^{\text{before}} - P_L^{\text{after}})] \quad (6.28)$$

Επιπλέον ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$P_{G1} - P_{D1} = V_1^2 G_{11} + V_1 \sum_{m \in A(1)} V_m [G_{1m} \cos(\delta_1 - \delta_m) + B_{1m} \sin(\delta_1 - \delta_m)] \quad (6.29)$$

$$Q_{G1} - Q_{D1} = -V_1^2 B_{11} + V_1 \sum_{m \in A(1)} V_m [G_{1m} \sin(\delta_1 - \delta_m) - B_{1m} \cos(\delta_1 - \delta_m)] \quad (6.30)$$

$$P_{G2} - P_{D2} = V_2^2 G_{22} + V_2 \sum_{m \in A(2)} V_m [G_{2m} \cos(\delta_2 - \delta_m) + B_{2m} \sin(\delta_2 - \delta_m)] \quad (6.31)$$

$$Q_{G2} - Q_{D2} = -V_2^2 B_{22} + V_2 \sum_{m \in A(2)} V_m [G_{2m} \sin(\delta_2 - \delta_m) - B_{2m} \cos(\delta_2 - \delta_m)] \quad (6.32)$$

$$P_{G3} - P_{D3} = V_3^2 G_{33} + V_3 \sum_{m \in A(3)} V_m [G_{3m} \cos(\delta_3 - \delta_m) + B_{3m} \sin(\delta_3 - \delta_m)] \quad (6.33)$$

$$Q_{G3} - Q_{D3} = -V_3^2 B_{33} + V_3 \sum_{m \in A(3)} V_m [G_{3m} \sin(\delta_3 - \delta_m) - B_{3m} \cos(\delta_3 - \delta_m)] \quad (6.34)$$

$$P_{G4} - P_{D4} = V_4^2 G_{44} + V_4 \sum_{m \in A(4)} V_m [G_{4m} \cos(\delta_4 - \delta_m) + B_{4m} \sin(\delta_4 - \delta_m)] \quad (6.35)$$

$$Q_{G4} - Q_{D4} = -V_4^2 B_{44} + V_4 \sum_{m \in A(4)} V_m [G_{4m} \sin(\delta_4 - \delta_m) - B_{4m} \cos(\delta_4 - \delta_m)] \quad (6.36)$$

$$V_1 = 1.0 \quad (6.37)$$

$$V_{\min} \leq V_2 \leq V_{\max} \quad (6.38)$$

$$V_{\min} \leq V_3 \leq V_{\max} \quad (6.39)$$

$$V_{\min} \leq V_4 \leq V_{\max} \quad (6.40)$$

$$\delta_1 = 0^0 \quad (6.41)$$

$$\delta_{\min} \leq \delta_2 \leq \delta_{\max} \quad (6.42)$$

$$\delta_{\min} \leq \delta_3 \leq \delta_{\max} \quad (6.43)$$

$$\delta_{\min} \leq \delta_4 \leq \delta_{\max} \quad (6.44)$$

$$|S_{12}| \leq S_{\max} \quad (6.45)$$

$$|S_{23}| \leq S_{\max} \quad (6.46)$$

$$|S_{34}| \leq S_{\max} \quad (6.47)$$

$$|S_{21}| \leq S_{\max} \quad (6.48)$$

$$|S_{32}| \leq S_{\max} \quad (6.49)$$

$$|S_{43}| \leq S_{\max} \quad (6.50)$$

$$P_{\min}^{DG} \leq P^{DG} \leq P_{\max}^{DG} \quad (6.51)$$

$$p.f.^{DG}_{\min} \leq p.f.^{DG}_i \leq p.f.^{DG}_{\max} \quad (6.52)$$

$$162000 \cdot P^{DG} \leq \text{Budget} \quad (6.53)$$

$$0 \leq P^{DG} \leq \text{pen} \cdot \sum_{k=1}^4 P_{Dk} \quad (6.54)$$

Για τους περιορισμούς (6.45) έως (6.50) ισχύει ότι η φαινόμενη ισχύς που ρέει μεταξύ των ζυγών k και m είναι:

$$|S_{km}| = \sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2} \quad (6.55)$$

όπου:

$$P_{km} = g_{km} \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot [g_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m) + b_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m)] \quad (6.56)$$

$$Q_{km} = -b_{km} \cdot V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot [g_{km} \cdot \sin(\delta_k - \delta_m) - b_{km} \cdot \cos(\delta_k - \delta_m)] \quad (6.57)$$

και

$$g_{km} + jb_{km} = \frac{1}{R_{km} + jX_{km}} \quad (6.58)$$

δηλαδή

$$g_{km} = \frac{R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \quad (6.59)$$

$$b_{km} = -\frac{X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} \quad (6.60)$$

Για παράδειγμα ισχύει από τις σχέσεις (6.55) έως (6.60) ότι:

$$g_{12} = \frac{R_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} = \frac{0.000907}{0.000907^2 + 0.000888^2} = 562.94 \text{ α.μ.}$$

$$b_{12} = -\frac{X_{12}}{R_{12}^2 + X_{12}^2} = -\frac{0.000888}{0.000907^2 + 0.000888^2} = -551.14 \text{ α.μ.}$$

$$P_{12} = g_{12} \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [g_{12} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) + b_{12} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2)] =$$

$$= 562.94 \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [562.94 \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) - 551.14 \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2)]$$

$$Q_{12} = -b_{12} \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [g_{12} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) - b_{12} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2)] =$$

$$= 551.14 \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [562.94 \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) + 551.14 \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2)]$$

$$|S_{12}| = \sqrt{P_{12}^2 + Q_{12}^2} = \sqrt{(562.94 \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [562.94 \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) - 551.14 \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2)])^2 + (551.14 \cdot V_1^2 - V_1 \cdot V_2 \cdot [562.94 \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) + 551.14 \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2)])^2}$$

Ομοίως υπολογίζονται και οι υπόλοιπες ροές ισχύος.

Ως όριο της μέγιστης τιμής που μπορεί να πάρει η ενεργός ισχύς της ΜΔΠ (P_{\max}^{DG}) λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή του συνολικού φορτίου του δικτύου και των 100 MW (μέγιστη ισχύς ΜΔΠ). Στο δίκτυο των 4 ζυγών ισχύει δηλαδή

$$P_{\max}^{DG} = \min[100, 1.5] = 1.5 \text{ MW} = 15 \text{ α.μ.} \quad (6.61)$$

Ο συντελεστής ισχύος της ΜΔΠ έχει ρυθμιστεί να είναι σε τιμές λειτουργικές για το δίκτυο, από 0.85 έως 1, είτε δίνει στο δίκτυο άεργο ισχύ (επαγωγικός) είτε απορροφά από αυτό άεργο ισχύ (χωρητικός). Επιπλέον, ο ΣΙ της ΜΔΠ πρέπει να είναι διαφορετικός από το ΣΙ του φορτίου που είναι συνδεδεμένο πάνω στο ζυγό που θα συνδεθεί και η ΜΔΠ.

Θεωρώντας ότι εγκαθίσταται μια ΜΔΠ στο ζυγό 2 (π.χ. λόγω περιορισμού τοποθέτησής της στους ζυγούς 3,4) και με βάση τις σχέσεις (6.25) και (6.28), το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_x f_{PF} = \min_x [-0.036986 P_{DG} - 9.72(0.65 - P_L^{\text{after}})] =$$

$$= \min_x [-0.036986 P_{DG} + 9.72 P_L^{\text{after}} - 6.318] \quad (6.62)$$

και οι περιορισμοί, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.3) έως (6.10), θα είναι :

$$P_{G1} = 562.94 V_1^2 + V_1 V_2 [-562.94 \cos(-\delta_2) + 551.14 \sin(-\delta_2)] \quad (6.63)$$

$$Q_{G1} = 551.14 V_1^2 + V_1 V_2 [-562.94 \sin(-\delta_2) - 551.14 \cos(-\delta_2)] \quad (6.64)$$

$$-5 + P^{DG} = 985.49 V_2^2 + V_1 V_2 [-562.94 \cos(\delta_2) + 551.14 \sin(\delta_2)] +$$

$$V_2 V_3 [-422.55 \cos(\delta_2 - \delta_3) + 413.47 \sin(\delta_2 - \delta_3)] \quad (6.65)$$

$$-4 + Q^{DG} = 964.61 V_2^2 + V_1 V_2 [-562.94 \sin(\delta_2) - 551.14 \cos(\delta_2)] +$$

$$V_2 V_3 [-422.55 \sin(\delta_2 - \delta_3) - 413.47 \cos(\delta_2 - \delta_3)] \quad (6.66)$$

$$-3 = 1266.97V_3^2 + V_3V_2[-422.55 \cos(\delta_3 - \delta_2) + 413.47 \sin(\delta_3 - \delta_2)] + V_3V_4[-844.22 \cos(\delta_3 - \delta_4) + 827.65 \sin(\delta_3 - \delta_4)] \quad (6.67)$$

$$-2 = 1241.12V_3^2 + V_3V_2[-422.55 \sin(\delta_3 - \delta_2) - 413.47 \cos(\delta_3 - \delta_2)] + V_3V_4[-844.22 \sin(\delta_3 - \delta_4) - 827.65 \cos(\delta_3 - \delta_4)] \quad (6.68)$$

$$-7 = 844.22V_4^2 + V_4V_3[-844.22 \cos(\delta_4 - \delta_3) + 827.65 \sin(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.69)$$

$$-6 = 827.65V_4^2 + V_4V_3[-844.22 \sin(\delta_4 - \delta_3) - 827.65 \cos(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.70)$$

$$V_1 = 1.0 \quad (6.71)$$

$$0.95 \leq V_2 \leq 1.05 \quad (6.72)$$

$$0.95 \leq V_3 \leq 1.05 \quad (6.73)$$

$$0.95 \leq V_4 \leq 1.05 \quad (6.74)$$

$$\delta_1 = 0 \quad (6.75)$$

$$-30 \leq \delta_2 \leq 30 \quad (6.76)$$

$$-30 \leq \delta_3 \leq 30 \quad (6.77)$$

$$-30 \leq \delta_4 \leq 30 \quad (6.78)$$

$$|S_{12}| \leq 30 \quad (6.79)$$

$$|S_{23}| \leq 30 \quad (6.80)$$

$$|S_{34}| \leq 30 \quad (6.81)$$

$$|S_{21}| \leq 30 \quad (6.82)$$

$$|S_{32}| \leq 30 \quad (6.83)$$

$$|S_{43}| \leq 30 \quad (6.84)$$

$$0 \leq P^{DG} \leq 15 \quad (6.85)$$

$$p.f._i^{DG} = 0.9 \quad (6.86)$$

$$162000 \cdot P^{DG} \leq 810000 \quad (6.87)$$

$$0 \leq P^{DG} \leq 0.5 \cdot 15 = 7.5 \quad (6.88)$$

Επιλύοντας το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης στο MATLAB με τη χρήση του MATPOWER, καθώς και τα παρόμοια προβλήματα βελτιστοποίησης για την εγκατάσταση ΜΔΠ στους ζυγούς 3 και 4, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.5 έως 6.13.

Από τον Πίνακα 6.7 φαίνεται ότι η ενεργός ισχύς που παράγει η ΜΔΠ στο ζυγό 2 είναι 0.5 MW (5 α.μ.). Από τον ίδιο Πίνακα προκύπτει ότι οι απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο μετά την τοποθέτηση της ΜΔΠ στο ζυγό 2 είναι 0.0466 MW (0.466 α.μ.). Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση (6.61) προκύπτει ότι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι:

$$f_{PF} = -1.9369 \quad (6.89)$$

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζονται και οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων για τοποθέτηση μίας ΜΔΠ στο ζυγό 3 και στο ζυγό 4, όπως φαίνεται στους Πίνακες 6.10 και 6.13, αντίστοιχα.

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ στο ζυγό 2

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAr)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAr)
1	1.00	0	0	0	1.047	1.00
2	0.982	-0.011	0.5	0.4	0.50	0.24
3	0.959	-0.143	0.3	0.2	0	0
4	0.951	-0.175	0.7	0.6	0	0
Σύνολο:			1.5	1.2	1.547	1.24

Πίνακας 6.6: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ στο ζυγό 2

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	1.047	1.00	-1.028	-0.98	0.019	0.02
2	2	3	1.028	0.83	-1.006	-0.81	0.022	0.02
3	3	4	0.706	0.61	-0.700	-0.60	0.006	0.01
Σύνολο							0.047	0.05

Πίνακας 6.7: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ στο ζυγό 2

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.047
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	27.9
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	1.7519
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	1.9369

Πίνακας 6.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ στο ζυγό 3

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVA _r)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVA _r)
1	1.00	0	0	0	1.031	0.99
2	0.982	-0.011	0.5	0.4	0	0
3	0.969	0.039	0.3	0.2	0.500	0.24
4	0.961	0.007	0.7	0.6	0	0
Σύνολο:			1.5	1.2	1.531	1.23

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ στο ζυγό 3

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1	2	1.031	0.99	-1.013	-0.97	0.019	0.02
2	2	3	0.513	0.57	-0.506	-0.56	0.007	0.01
3	3	4	0.706	0.61	-0.700	-0.60	0.006	0.01
Σύνολο							0.031	0.03

Πίνακας 6.10: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ στο ζυγό 3

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.031
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	51.3
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	3.2210
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	3.4059

Πίνακας 6.11: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ στο ζυγό 4

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVA _r)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVA _r)
1	1.00	0	0	0	1.027	0.98
2	0.982	-0.011	0.5	0.4	0	0
3	0.969	0.039	0.3	0.2	0	0
4	0.965	0.098	0.7	0.6	0.500	0.24
Σύνολο:			1.5	1.2	1.527	1.23

Πίνακας 6.12: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ στο ζυγό 4

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	1.027	0.98	-1.008	-0.97	0.018	0.02
2	2	3	0.508	0.57	-0.501	-0.56	0.007	0.01
3	3	4	0.201	0.36	-0.200	-0.36	0.001	0.00
Σύνολο							0.027	0.03

Πίνακας 6.13: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ στο ζυγό 4

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.027
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	58.69
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	3.6850
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	3.8699

Όταν στο δίκτυο προστίθεται μόνο μία ΜΔΠ, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την εγκατάσταση ή όχι ενός πυκνωτή, του οποίου το μέγεθος κυμαίνεται από 150 έως 4050 kVAr.

$$150 \text{ kVAr} \leq Q_{inj} \leq 4050 \text{ kVAr} \quad (6.90)$$

Με την προσθήκη του πυκνωτή, για παράδειγμα 500 kVAr (5 α.μ.) στο ζυγό 4, θα αλλάξει όπως είναι λογικό η μήτρα αγωγιμοτήτων, συγκεκριμένα το στοιχείο (4,4). Η σχέση (6.12) θα γίνει:

$$Y = [G] + [B] = \begin{bmatrix} 562.94-j551.14 & -562.94+j551.14 & 0 & 0 \\ -562.94+j551.14 & 985.49-j964.61 & -422.55+j413.47 & 0 \\ 0 & -422.55+j413.47 & 1266.97-j1241.12 & -844.42+j827.65 \\ 0 & 0 & -844.42+j827.65 & 844.42-j822.65 \end{bmatrix} \quad (6.91)$$

και αντίστοιχα η (6.14) :

$$B = \begin{bmatrix} -551.14 & 551.14 & 0 & 0 \\ 551.14 & -964.61 & 413.47 & 0 \\ 0 & 413.47 & -1241.12 & 827.65 \\ 0 & 0 & 827.65 & -822.65 \end{bmatrix} \quad (6.92)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} f_{PF} &= \min_{\mathbf{x}} [-0.036986P_{DG} - 9.72(0.65 - P_L^{\text{after}})] = \\ &= \min_{\mathbf{x}} [-0.036986P_{DG} + 9.72P_L^{\text{after}} - 6.318] \end{aligned} \quad (6.93)$$

και οι περιορισμοί, σύμφωνα με τις σχέσεις (6.3) έως (6.10) και (6.90) θα είναι :

$$P_{G1} = 562.94V_1^2 + V_1V_2[-562.94 \cos(-\delta_2) + 551.14 \sin(-\delta_2)] \quad (6.94)$$

$$Q_{G1} = 551.14V_1^2 + V_1V_2[-562.94 \sin(-\delta_2) - 551.14 \cos(-\delta_2)] \quad (6.95)$$

$$\begin{aligned} -5 &= 985.49V_2^2 + V_1V_2[-562.94 \cos(\delta_2) + 551.14 \sin(\delta_2)] + \\ &V_2V_3[-422.55 \cos(\delta_2 - \delta_3) + 413.47 \sin(\delta_2 - \delta_3)] \end{aligned} \quad (6.96)$$

$$\begin{aligned} -4 &= 964.61V_2^2 + V_1V_2[-562.94 \sin(\delta_2) - 551.14 \cos(\delta_2)] + \\ &V_2V_3[-422.55 \sin(\delta_2 - \delta_3) - 413.47 \cos(\delta_2 - \delta_3)] \end{aligned} \quad (6.97)$$

$$\begin{aligned} -3 &= 1266.97V_3^2 + V_3V_2[-422.55 \cos(\delta_3 - \delta_2) + 413.47 \sin(\delta_3 - \delta_2)] + \\ &V_3V_4[-844.22 \cos(\delta_3 - \delta_4) + 827.65 \sin(\delta_3 - \delta_4)] \end{aligned} \quad (6.98)$$

$$\begin{aligned} -2 &= 1241.12V_3^2 + V_3V_2[-422.55 \sin(\delta_3 - \delta_2) - 413.47 \cos(\delta_3 - \delta_2)] + \\ &V_3V_4[-844.22 \sin(\delta_3 - \delta_4) - 827.65 \cos(\delta_3 - \delta_4)] \end{aligned} \quad (6.99)$$

$$-7 + P^{DG} = 844.22V_4^2 + V_4V_3[-844.22 \cos(\delta_4 - \delta_3) + 827.65 \sin(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.100)$$

$$-6 + Q^{DG} + Q_{inj} = 822.65V_4^2 + V_4V_3[-844.22 \sin(\delta_4 - \delta_3) - 827.65 \cos(\delta_4 - \delta_3)] \quad (6.101)$$

$$V_1 = 1.0 \quad (6.102)$$

$$0.95 \leq V_2 \leq 1.05 \quad (6.103)$$

$$0.95 \leq V_3 \leq 1.05 \quad (6.104)$$

$$0.95 \leq V_4 \leq 1.05 \quad (6.105)$$

$$\delta_1 = 0 \quad (6.106)$$

$$-30 \leq \delta_2 \leq 30 \quad (6.107)$$

$$-30 \leq \delta_3 \leq 30 \quad (6.108)$$

$$-30 \leq \delta_4 \leq 30 \quad (6.109)$$

$$|S_{12}| \leq 30 \quad (6.110)$$

$$|S_{23}| \leq 30 \quad (6.111)$$

$$|S_{34}| \leq 30 \quad (6.112)$$

$$|S_{21}| \leq 30 \quad (6.113)$$

$$|S_{32}| \leq 30 \quad (6.114)$$

$$|S_{43}| \leq 30 \quad (6.115)$$

$$0 \leq P^{DG} \leq 15 \quad (6.116)$$

$$p.f._i^{DG} = 0.9 \quad (6.117)$$

$$162000 \cdot P^{DG} \leq 810000 \quad (6.118)$$

$$0 \leq P^{DG} \leq 0.5 \cdot 15 = 7.5 \quad (6.119)$$

$$1.5 \leq Q_{inj} \leq 40.5 \quad (6.120)$$

Εκτελώντας τα προβλήματα βελτιστοποίησης για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή κάθε φορά στους ζυγούς 2, 3 και 4 προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.14 έως 6.22.

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 2

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAr)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAr)
1	1.00	0	0	0	1.037	-0.03
2	0.991	-0.547	0.5	0.4	0.50	0.24
3	0.969	-0.676	0.3	0.2	0	0
4	0.960	-0.708	0.7	0.6	0	0
Σύνολο:			1.5	1.2	1.537	0.21

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 2

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	1.037	-0.03	-1.027	0.04	0.010	0.01
2	2	3	1.027	0.83	-1.006	-0.81	0.021	0.02
3	3	4	0.706	0.61	-0.700	-0.60	0.006	0.01
Σύνολο							0.037	0.04

Πίνακας 6.16: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 2

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Ονομαστική ισχύς (MVAr) του πυκνωτή	1.041
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.037
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	43.16
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	2.7096
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	2.8945

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 3

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVar)
1	1.00	0	0	0	1.019	0.23
2	0.989	-0.403	0.5	0.4	0	0
3	0.985	-0.885	0.3	0.2	0.500	0.24
4	0.977	-0.916	0.7	0.6	0	0
Σύνολο:			1.5	1.2	1.519	0.47

Πίνακας 6.18: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 3

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	1.019	0.23	-1.009	-0.22	0.019	0.01
2	2	3	0.509	-0.18	-0.505	0.18	0.004	0.00
3	3	4	0.705	0.61	-0.700	-0.60	0.005	0.01
Σύνολο							0.019	0.02

Πίνακας 6.19: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 3

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Ονομαστική ισχύς (MVar) του πυκνωτή	0.769
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.019
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	70.77
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.4435
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	4.6284

Πίνακας 6.20: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVar)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVar)
1	1.00	0	0	0	1.014	0.32
2	0.988	-0.353	0.5	0.4	0	0
3	0.983	-0.769	0.3	0.2	0	0
4	0.983	-0.944	0.7	0.6	0.500	0.24
Σύνολο:			1.5	1.2	1.514	0.56

Πίνακας 6.21: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	1.014	0.32	-1.004	-0.31	0.010	0.01
2	2	3	0.504	-0.09	-0.501	0.09	0.003	0.00
3	3	4	0.201	-0.29	-0.200	0.29	0.001	0.00
Σύνολο							0.014	0.01

Πίνακας 6.22: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Ονομαστική ισχύς (MVar) του πυκνωτή	0.673
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.014
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	77.87
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.8891
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	5.0740

6.2.6 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Ενότητας 6.2.2 επιλύεται με αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών με τις παραμέτρους της Ενότητας 6.2.3 και τα βήματα της επίλυσης περιγράφονται στις Ενότητες 6.2.6 έως 6.2.10.

6.2.7 Αρχικοποίηση πληθυσμού

Στο βήμα αυτό δημιουργείται τυχαία ο αρχικός πληθυσμός, δηλαδή η θέση, το μέγεθος και ο συντελεστής ισχύος (ΣI) της ΜΔΠ, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.23. Για καθένα από τα συγκεκριμένα δεδομένα υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και της καταλληλότητας της λύσης (fitness). Στη συνέχεια απομονώνεται η καλύτερη λύση, αυτή με την υψηλότερη καταλληλότητα, η οποία αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Πίνακας 6.23: Αρχικός πληθυσμός

a/a μέλισσας	Ζυγός τοποθέτησης ΜΑΠ	Μέγεθος ΜΑΠ (MW)	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (\$/h)
1	2	0.0376	-0.1673
2	3	0.0760	-0.6220
3	4	0.4915	-3.8211
4	4	0.0819	-0.7804
5	4	0.2549	-2.2356
6	3	0.3124	-2.3143
7	4	0.4000	-3.2619
8	3	0.2834	-2.1258
9	3	0.3466	-2.5291
10	3	0.4893	-3.3494

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ο ΣΙ της ΜΑΠ είναι σταθερός και ίσος με 0.9.

Για παράδειγμα για την πρώτη μέλισσα, έχοντας ως δεδομένα τη θέση, το μέγεθος και το ΣΙ της ΜΑΠ, ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών συνεργάζεται με την ανάλυση ροών φορτίου, η οποία επιλύεται με τη μέθοδο Newton-Raphson, και προκύπτει η νέα τιμή των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου.

Με βάση αυτήν την τιμή υπολογίζεται στη συνέχεια η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο και για τις υπόλοιπες μέλισσες.

6.2.8 Φάση μέλισσας εργάτριας

Σε αυτή τη φάση οι μέλισσες εξερευνούν τις λύσεις με τοπικές αναζητήσεις στη γειτονιά των λύσεων που έχουν επιλεγεί στο στάδιο της αρχικοποίησης του πληθυσμού. Επιλέγεται δηλαδή τυχαία μία θέση εγκατάστασης της ΜΑΠ (ίδια ή διαφορετική από την προηγούμενη) και με τη βοήθεια μίας τυχαία επιλεγμένης λύσης από μία άλλη μέλισσα εργάτρια δημιουργείται μια νέα τιμή για το μέγεθος της ΜΑΠ. Στη συνέχεια επιλύεται το πρόβλημα ροών φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson και υπολογίζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης και της καταλληλότητας της λύσης. Συγκρίνοντας την καταλληλότητα της λύσης με αυτήν της προηγούμενης απομνημονευμένης λύσης, αποθηκεύεται σε αυτή τη μέλισσα η λύση με την υψηλότερη καταλληλότητα. Σε περίπτωση που δεν υπάρξει βελτίωση της λύσης, τότε αυξάνεται κατά 1 ο αριθμός δοκιμών βελτίωσης της λύσης.

Για παράδειγμα, για τη μέλισσα εργάτρια 1 επιλέγεται με τη βοήθεια της μέλισσας εργάτριας 7 η τοποθέτηση στο ζυγό 3 μίας ΜΑΠ μεγέθους 0.4590 MW. Μετά την επίλυση του προβλήματος ροών φορτίου, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και της καταλληλότητας της νέας λύσης είναι -3.1857 και 0.0040353 αντίστοιχα. Η καταλληλότητα της προηγούμενης απομνημονευμένης λύσης για τη μέλισσα 1 είναι 0.0039867. Επομένως θα γίνει αντικατάσταση της προηγούμενης λύσης με τη νέα βελτιωμένη, δηλαδή ως βέλτιστη λύση για τη μέλισσα εργάτρια 1 θα αποθηκευτεί η εγκατάσταση μίας ΜΑΠ 0.4590 MW στο ζυγό 3. Παρόμοιοι υπολογισμοί γίνονται και για τις υπόλοιπες μέλισσες. Ο νέος πληθυσμός μετά τη φάση μέλισσας εργάτριας φαίνεται στον Πίνακα 6.24.

Πίνακας 6.24: Πληθυσμός μετά τη φάση μέλισσας εργάτριας

a/a μέλισσας	Ζυγός τοποθέτησης ΜΑΠ	Μέγεθος ΜΑΠ (MW)	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (\$/h)
1	3	0.4590	-3.1857
2	3	0.0760	-0.6220
3	4	0.4997	-3.8679
4	3	0.3259	-2.3999
5	4	0.2549	-2.2356
6	3	0.3124	-2.3143
7	4	0.4000	-3.2619
8	3	0.2834	-2.1258
9	3	0.3466	-2.5291
10	3	0.4893	-3.3494

6.2.9 Φάση μέλισσας θεατή

Αρχικά υπολογίζεται για κάθε λύση η πιθανότητα να επιλεγεί από τις μέλισσες θεατές ως βέλτιστη. Όπως είναι λογικό, μια καλή λύση θα προσελκύσει περισσότερες μέλισσες από ότι μια χειρότερη (με χαμηλότερη καταλληλότητα). Στη συνέχεια, για κάθε μέλισσα θεατή παράγεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στη φάση μέλισσας εργάτριας, μία νέα λύση. Εάν η καταλληλότητά της είναι υψηλότερη από την καταλληλότητα της προηγούμενης λύσης (που έχει θεωρηθεί από αυτή τη μέλισσα ως βέλτιστη), τότε γίνεται αντικατάσταση και η νέα λύση αποθηκεύεται ως βέλτιστη για αυτή τη μέλισσα. Ο νέος πληθυσμός μετά τη φάση της μέλισσας θεατή φαίνεται στον Πίνακα 6.25.

Πίνακας 6.25: Πληθυσμός μετά τη φάση μέλισσας-θεατή

a/a μέλισσας	Ζυγός τοποθέτησης ΜΑΠ	Μέγεθος ΜΑΠ (MW)	Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (\$/h)
1	3	0.4681	-3.2357
2	4	0.3475	-2.9107
3	4	0.4997	-3.8679
4	3	0.4242	-2.9911
5	4	0.2549	-2.2356
6	4	0.2844	-2.4587
7	4	0.4146	-3.3558
8	3	0.2834	-2.1258
9	3	0.3466	-2.5291
10	3	0.4893	-3.3494

6.2.10 Φάση μέλισσας ανιχνευτή

Όταν μια λύση δε βελτιώνεται μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό προσπαθειών και ξεπεράσει το όριο που έχει τεθεί (εδώ 20), τότε θεωρείται πως αυτή η λύση έχει εξαντληθεί. Ως επακόλουθο, η μέλισσα εργάτρια που ασχολείται με αυτή τη λύση, την εγκαταλείπει, γίνεται μέλισσα ανιχνευτής και ψάχνει για μια τελείως νέα λύση.

Στη συγκεκριμένη εκτέλεση, αυτό έγινε για πρώτη φορά κατά την 21^η ανακύκλωση του αλγόριθμου, όπου εξαντλήθηκε το όριο βελτίωσης της λύσης της μέλισσας 3. Η νέα λύση είναι η εγκατάσταση 0.4042 MW στο ζυγό 4. Στη συνέχεια ξεκινά μία νέα ανακύκλωση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών.

6.2.11 Τελική λύση προβλήματος

Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν εκτελεστεί ο αριθμός ανακυκλώσεων που έχει οριστεί. Στο πρόβλημα που εξετάστηκε μετά από 50 επαναλήψεις (μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων) βρέθηκε η βέλτιστη λύση, η οποία είναι η τοποθέτηση μίας ΜΔΠ 0.5 MW με ΣΙ 0.9 στο ζυγό 4. Το συνολικό χρηματικό κίνητρο, δηλαδή το οικονομικό κέρδος του διαχειριστή, μετά την τοποθέτηση της ΜΔΠ στο δίκτυο θα είναι 3.86989 \$/h.

6.2.12 Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση μίας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής και πυκνωτή

Σε αυτήν την Ενότητα επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μίας ΜΔΠ με ΣΙ 0.9 και ενός πυκνωτή με τον αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο της Ενότητας 6.2.2, με στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού οικονομικού κινήτρου. Οι παράμετροι του αλγόριθμου είναι αυτοί της Ενότητας 6.2.3. Το μέγιστο χρηματικό κίνητρο επιτυγχάνεται κατά την εγκατάσταση της ΜΔΠ και του πυκνωτή στο ζυγό 4 και τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 6.26 έως 6.28.

Πίνακας 6.26: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAr)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAr)
1	1.00	0	0	0	1.014	0.32
2	0.988	-0.353	0.5	0.4	0	0
3	0.983	-0.769	0.3	0.2	0	0
4	0.983	-0.944	0.7	0.6	0.500	0.24
Σύνολο:			1.5	1.2	1.514	0.56

Πίνακας 6.27: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	1.014	0.32	-1.004	-0.31	0.010	0.01
2	2	3	0.504	-0.09	-0.501	0.09	0.003	0.00
3	3	4	0.201	-0.29	-0.200	0.29	0.001	0.00
Σύνολο							0.014	0.01

Πίνακας 6.28: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στο ζυγό 4

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ	0.5
Ονομαστική ισχύς (MVA _r) του πυκνωτή	0.673
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.014
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	77.87
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.1849
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	4.8891
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	5.0740

6.2.13 Επίλυση του προβλήματος με τοποθέτηση δύο μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Στην Ενότητα αυτή επιλύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης 2 ΜΔΠ με ΣΙ 0.9 στο δίκτυο 4 ζυγών, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην Ενότητα 6.2.2. Τα δεδομένα του δικτύου παραμένουν ίδια με αυτά του προβλήματος τοποθέτησης μίας ΜΔΠ. Επιπλέον ισχύουν οι σχέσεις (6.1) έως (6.8), ενώ το διαθέσιμο κεφάλαιο τώρα είναι ίσο με \$ 1620000 και η συνολική επιτρεπόμενη διείσδυση των ΜΔΠ στο δίκτυο είναι 60%:

$$\text{Budget} = \$ 1620000$$

$$\text{pen} = 0.6$$

Οι παράμετροι του αλγόριθμου είναι:

$$\text{CS} = 20$$

$$\text{limit} = 40$$

$$\text{MCN} = 50$$

Επιλύοντας το παραπάνω πρόβλημα στο λογισμικό το οποίο παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, προκύπτει ότι η βέλτιστη λύση είναι η εγκατάσταση μίας ΜΔΠ 0.104 MW στο ζυγό 3 και μίας ΜΔΠ 0.796 MW στο ζυγό 4. Το συνολικό χρηματικό κίνητρο είναι 5.5452\$/h.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 6.29 έως 6.31.

Πίνακας 6.29: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών με δύο ΜΔΠ στους ζυγούς 3 και 4

Αριθμός ζυγού	Μέτρο τάσης (pu)	Γωνία τάσης (deg)	Φορτίο (MW)	Φορτίο (MVAr)	Παραγωγή (MW)	Παραγωγή (MVAr)
1	1.00	0	0	0	0.611	0.77
2	0.988	0.093	0.5	0.4	0	0
3	0.982	0.283	0.3	0.2	0.111	0.05
4	0.981	0.392	0.7	0.6	0.789	0.38
Σύνολο:			1.5	1.2	1.511	1.21

Πίνακας 6.30: Αποτελέσματα ανάλυσης ροών φορτίου του δικτύου 4 ζυγών, όσον αφορά τις γραμμές και τις απώλειες, με δύο ΜΔΠ στους ζυγούς 3 και 4

Ροές γραμμών και απώλειες								
Αριθμός γραμμής	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	Ροή ισχύος στο ζυγό αναχώρησης		Ροή ισχύος στο ζυγό άφιξης		Απώλειες γραμμών	
			P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1	2	0.611	0.77	-0.602	-0.77	0.009	0.01
2	2	3	0.102	0.37	-0.100	-0.36	0.002	0.00
3	3	4	-0.096	0.21	0.096	-0.21	0.000	0.00
Σύνολο							0.011	0.01

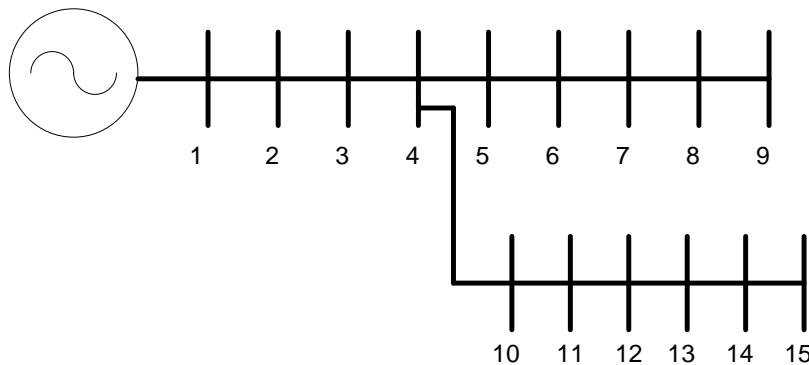
Πίνακας 6.31: Βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στους ζυγούς 3 και 4

Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό 3	0.1036
Ονομαστική ισχύς (MW) της ΜΔΠ στο ζυγό 4	0.7964
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου πριν τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.065
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) δικτύου μετά τη σύνδεση της ΜΔΠ	0.011
Ποσοστό της μείωσης των απωλειών ισχύος (%)	83.02
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) σύνδεσης ΜΔΠ	0.3329
Χρηματικό κίνητρο (\$/h) μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος	5.2124
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης	5.5452

6.3 ΔΙΚΤΥΟ 15 ΖΥΓΩΝ

6.3.1 Δεδομένα δικτύου 15 ζυγών

Θεωρείται δίκτυο 15 ζυγών και 14 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, θεωρώντας ότι σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί ΜΔΠ. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Η βασική ισχύς είναι $S_{BASE}=0.1$ MVA και η βασική τάση είναι $V_{BASE}=11$ kV. Τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 6.32.



Σχήμα 6.2: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 15 ζυγών

Για να ελεγχθεί η εγκυρότητα του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, θεωρήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο των 15 ζυγών. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται εγκατάσταση μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος και στη δεύτερη εισάγονται επιπλέον περιορισμοί, όπως το ποσοστό διείσδυσης ή το διαθέσιμο κεφάλαιο. Η τρίτη περίπτωση περιλαμβάνει εγκατάσταση μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης, ενώ στην τέταρτη περίπτωση εξετάζεται η εγκατάσταση πολλαπλών ΜΔΠ.

Τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης της ΜΔΠ και μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου δίνονται από τις σχέσεις (6.1) και (6.2), αντίστοιχα. Δηλαδή το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης της ΜΔΠ είναι 0.36986 \$/MWh και το χρηματικό κίνητρο μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος είναι 97.2 \$/MWh. Επιπλέον οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων για κάθε ζυγό να είναι εντός των ορίων $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, οι γωνίες να είναι μεταξύ -30° και 30° και σε όλες τις γραμμές του δικτύου να μην ρέει φαινόμενη ισχύς μεγαλύτερη των 3 MVA.

Στην Ενότητα 6.3.2 διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων του αλγόριθμου για κάθε μια από τις περιπτώσεις δοκιμών. Επιπλέον στις Ενότητες 6.3.3 και 6.3.4 διερευνάται η επίδραση που έχουν η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης και ο αριθμός των εκτελέσεων στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις περιπτώσεις στην Ενότητα 6.3.5.

Πίνακας 6.32: Δεδομένα δικτύου 15 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MW)
1	1	2	1.097	1.074	0.100	0.090
2	2	3	1.463	1.432	0.060	0.040
3	3	4	0.731	0.716	0.150	0.130
4	4	5	0.366	0.358	0.075	0.050
5	5	6	1.828	1.790	0.015	0.009
6	6	7	1.097	1.074	0.018	0.014
7	7	8	0.731	0.716	0.013	0.010
8	8	9	0.731	0.716	0.016	0.011
9	4	10	1.080	0.734	0.020	0.010
10	10	11	1.620	1.101	0.016	0.009
11	11	12	1.080	0.734	0.050	0.040
12	12	13	1.350	0.917	0.105	0.090
13	13	14	0.810	0.550	0.025	0.015
14	14	15	1.944	1.321	0.040	0.025
Σύνολο					0.703	0.543

6.3.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 15 ζυγών

Σε αυτήν την Ενότητα διερευνάται αρχικά ποιος είναι ο καλύτερος συνδυασμός του μεγέθους της αποικίας μελισσών και του ορίου εξάντλησης βελτίωσης της λύσης για κάθε μια περίπτωση. Η προτεινόμενη τιμή του ορίου είναι ίση ή μεγαλύτερη του $0.5 \times CS \times D$, όπου CS το μέγεθος της αποικίας και D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού θα μελετηθούν διάφοροι συνδυασμοί μεγέθους αποικίας - ορίου. Η επιλογή του καλύτερου συνδυασμού γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει μετά από κάθε εκτέλεση, από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των τιμών που προκύπτουν, καθώς και από το συνολικό χρόνο που διαρκεί αυτή. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερό το βέλτιστο συνδυασμό μεγέθους αποικίας και ορίου, διερευνάται ποιος είναι ο ιδανικότερος μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων (στο εξής MCN) του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών (στο εξής αλγόριθμος ABC).

Οι τιμές των απωλειών ενεργού ισχύος εκφράζονται σε MW. Όταν η διαφορά μεταξύ δύο τιμών είναι μικρότερη από 10 W, δηλαδή μικρότερη από 0.00001 MW, τότε η διαφορά είναι τόσο ασήμαντη ώστε οι δυο τιμές θεωρούνται ως ίσες.

1^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος.

Στην πρώτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος 0.9 στο δίκτυο των 15 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 1 έως 6 που φαίνονται στον Πίνακα 6.33. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.34. Στην προτελευταία στήλη του Πίνακα 6.34 φαίνεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε και για τις 10 εκτελέσεις.

Πίνακας 6.33: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
1	20	10	80
2	20	20	80
3	20	30	80
4	30	15	80
5	30	30	80
6	30	45	80

Πίνακας 6.34: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 1	0.0045	0.0050	0.0046	0.00015751	164.55	90
Σενάριο 2	0.0045	0.0051	0.0046	0.00019836	161.21	90
Σενάριο 3	0.0045	0.0050	0.0047	0.00025988	164.48	60
Σενάριο 4	0.0045	0.0050	0.0046	0.00015753	233.78	90
Σενάριο 5	0.0045	0.0051	0.0046	0.00023922	229.30	80
Σενάριο 6	0.0045	0.0050	0.0046	0.00021001	226.39	80

Από τον Πίνακα 6.34 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 20 και 10 αντίστοιχα (Σενάριο 1), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (σε 9 από τις 10 εκτελέσεις) με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (164.55 s) και τη μικρότερη τυπική απόκλιση.

Κρατώντας το μέγεθος της αποικίας σταθερό, ίσο με 20 και το όριο σταθερό, ίσο με 10, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.35.

Υλοποιώντας τα σενάρια 7 έως 10 για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.36.

Πίνακας 6.35: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
7	20	10	40
8	20	10	50
9	20	10	60
10	20	10	80

Πίνακας 6.36: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 7	0.0045	0.0051	0.0046	0.00023536	85.11	80
Σενάριο 8	0.0045	0.0049	0.0046	0.00011906	102.45	90
Σενάριο 9	0.0045	0.0051	0.0046	0.00023927	123.78	80
Σενάριο 10	0.0045	0.0050	0.0046	0.00015751	164.55	90

Από τον Πίνακα 6.36 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 50 (Σενάριο 8), καθώς τότε έχουμε τη μικρότερη τυπική απόκλιση και επιτυγχάνεται το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (σε 9 από τις 10 εκτελέσεις) με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (102.45 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 1 είναι:

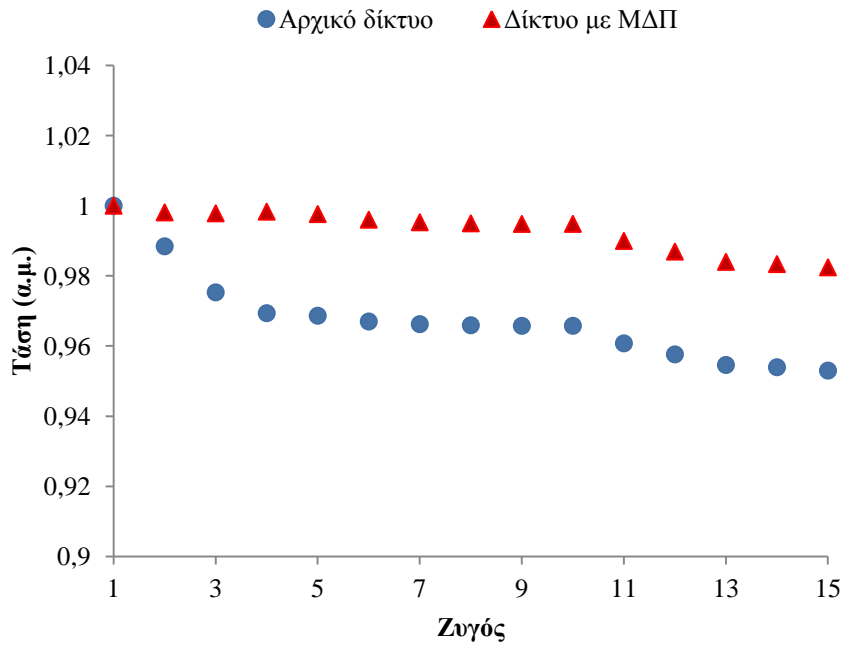
- Μέγεθος αποικίας : 20
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 10
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.37:

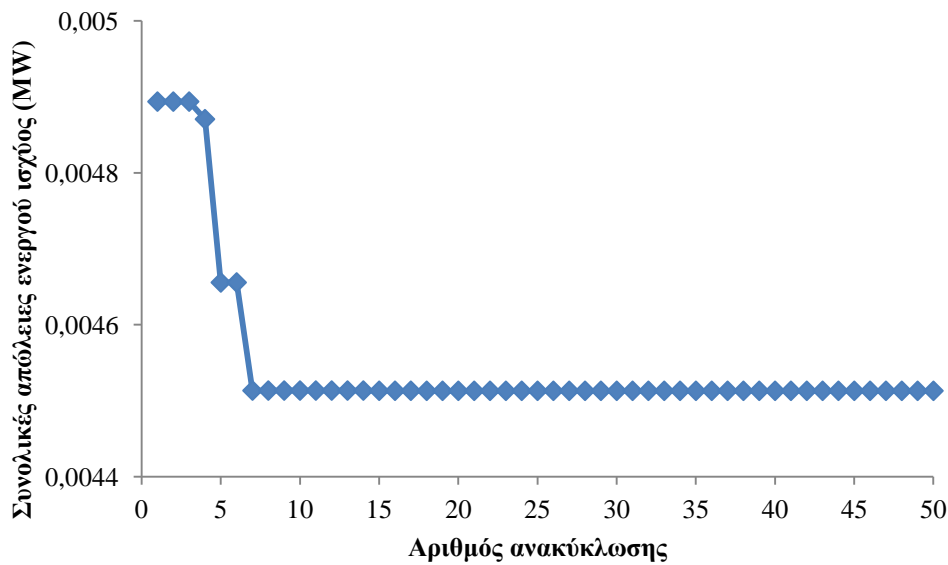
Πίνακας 6.37: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
4	0.700	0.9

Στο Σχήμα 6.3 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση μίας ΜΔΠ 0.7 MW στο ζυγό 4, ενώ στο Σχήμα 6.4 φαίνεται η σύγκλιση του αλγόριθμου προς την καλύτερη λύση κατά την εκτέλεση του λογισμικού μία μόνο φορά.



Σχήμα 6.3 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 15 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 1.



Σχήμα 6.4: Μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την εξέλιξη του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για το δίκτυο των 15 ζυγών, στην περίπτωση 1.

2^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος, με περιορισμό της διείσδυσης.

Στη δεύτερη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος 0.9 στο δίκτυο των 15 ζυγών, ενώ παράλληλα η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο δεν πρέπει να ξεπερνά το 60%. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 11 έως 16 που φαίνονται στον Πίνακα 6.38. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.39.

Πίνακας 6.38: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
11	20	10	80
12	20	20	80
13	20	30	80
14	30	15	80
15	30	30	80
16	30	45	80

Πίνακας 6.39: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 11	0.0053	0.0053	0.0053	0	143.84	100
Σενάριο 12	0.0053	0.0053	0.0053	0	149.09	100
Σενάριο 13	0.0053	0.0053	0.0053	0	162.38	100
Σενάριο 14	0.0053	0.0053	0.0053	0	231.24	100
Σενάριο 15	0.0053	0.0053	0.0053	0	236.82	100
Σενάριο 16	0.0053	0.0053	0.0053	0	241.00	100

Από τον Πίνακα 6.39 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 20 και 10 αντίστοιχα (Σενάριο 11), καθώς με αυτό το συνδυασμό επιτυγχάνεται ο μικρότερος χρόνος εκτέλεσης (143.84 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 20 και το όριο ίσο με 10, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.40.

Υλοποιώντας τα σενάρια 17 έως 20 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.41.

Πίνακας 6.40: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
17	20	10	40
18	20	10	50
19	20	10	60
20	20	10	80

Πίνακας 6.41: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 17	0.0053	0.0053	0.0053	0	87.53	100
Σενάριο 18	0.0053	0.0053	0.0053	0	118.67	100
Σενάριο 19	0.0053	0.0053	0.0053	0	132.24	100
Σενάριο 20	0.0053	0.0053	0.0053	0	143.84	100

Από τον Πίνακα 6.41 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 40 (Σενάριο 17), καθώς τότε επιτυγχάνεται ο μικρότερος χρόνος εκτέλεσης (87.53 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 2 είναι:

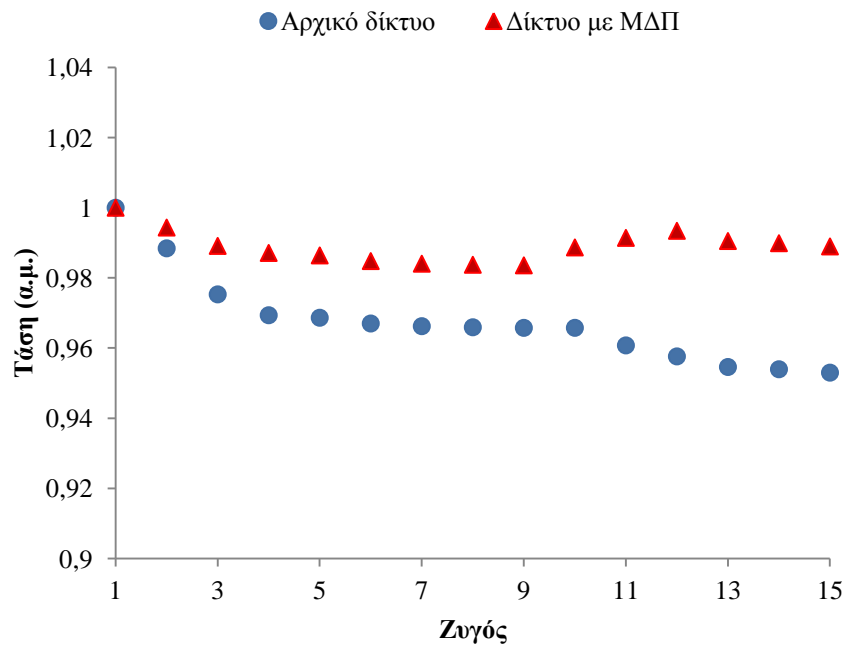
- Μέγεθος αποικίας : 20
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 10
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 40

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.42:

Πίνακας 6.42: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 2

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
12	0.422	0.9

Στο Σχήμα 6.5 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 12.



Σχήμα 6.5 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 15 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 2.

3^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης.

Στην τρίτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης στο δίκτυο των 15 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 21 έως 26 που φαίνονται στον Πίνακα 6.43. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.44.

Πίνακας 6.43: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
21	30	15	80
22	30	45	80
23	30	75	80
24	40	20	80
25	40	60	80
26	40	100	80

Πίνακας 6.44: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 21	0.0026	0.0032	0.0030	0.00025192	184.42	30
Σενάριο 22	0.0026	0.0032	0.0028	0.00028856	197.39	60
Σενάριο 23	0.0026	0.0032	0.0028	0.00025844	204.36	70
Σενάριο 24	0.0026	0.0032	0.0028	0.00025470	221.09	70
Σενάριο 25	0.0026	0.0032	0.0028	0.00024715	258.45	70
Σενάριο 26	0.0026	0.0032	0.0028	0.00027434	266.42	70

Από τον Πίνακα 6.44 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 40 και 60 αντίστοιχα (Σενάριο 25), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση και το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (σε 7 από τις 10 εκτελέσεις).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 40 και το όριο ίσο με 60, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.45.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.46.

Πίνακας 6.45: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
27	40	60	40
28	40	60	50
29	40	60	60
30	40	60	80

Πίνακας 6.46: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 27	0.0026	0.0032	0.0029	0.00025190	147.22	40
Σενάριο 28	0.0026	0.0032	0.0028	0.00028401	166.61	60
Σενάριο 29	0.0026	0.0032	0.0028	0.00027087	203.95	70
Σενάριο 30	0.0026	0.0032	0.0028	0.00024715	258.45	70

Από τον Πίνακα 6.46 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 30), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή και το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (70 %).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 3 είναι:

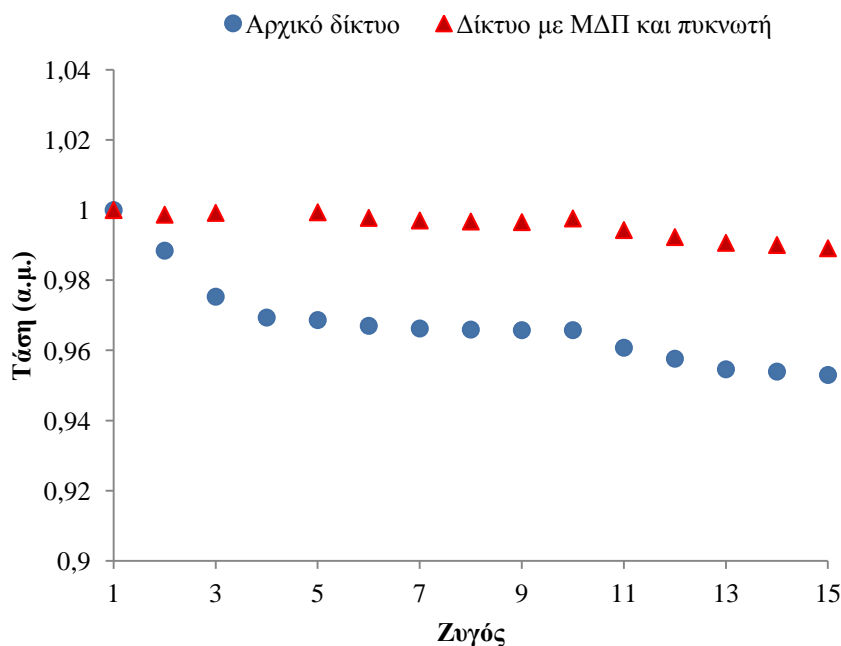
- Μέγεθος αποικίας : 40
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 60
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.47:

Πίνακας 6.47: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή στο δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)	Ζυγός τοποθέτησης πυκνωτή	Βέλτιστο μέγεθος πυκνωτή (MVar)
4	0.631	0.9	13	0.17

Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 4 και του πυκνωτή στο ζυγό 13.



Σχήμα 6.6 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 15 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στην περίπτωση 3.

4^η περίπτωση: Εισαγωγή δύο ΜΔΠ.

Στην τέταρτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή δύο ΜΔΠ χωρίς επιπλέον περιορισμούς στο δίκτυο των 15 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 31 έως 36 που φαίνονται στον Πίνακα 6.48. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.49.

Πίνακας 6.48: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
31	30	30	80
32	30	60	80
33	30	90	80
34	40	40	80
35	40	60	80
36	40	120	80

Πίνακας 6.49: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 31	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000040660	245.75	100
Σενάριο 32	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000732570	251.49	100
Σενάριο 33	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000015278	263.56	100
Σενάριο 34	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000021446	265.19	100
Σενάριο 35	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000017721	264.50	100
Σενάριο 36	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000015428	260.67	100

Από τον Πίνακα 6.49 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 30 και 90 αντίστοιχα (Σενάριο 33), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (263.56 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 30 και το όριο ίσο με 90, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.50.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.51.

Πίνακας 6.50: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
37	30	90	40
38	30	90	50
39	30	90	60
40	30	90	80

Πίνακας 6.51: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 37	0.0007	0.0008	0.0007	0.00005095700	120.20	70
Σενάριο 38	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000313180	160.28	100
Σενάριο 39	0.0007	0.0008	0.0007	0.00001433600	162.13	90
Σενάριο 40	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000015278	263.56	100

Από τον Πίνακα 6.51 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 40), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 4 είναι:

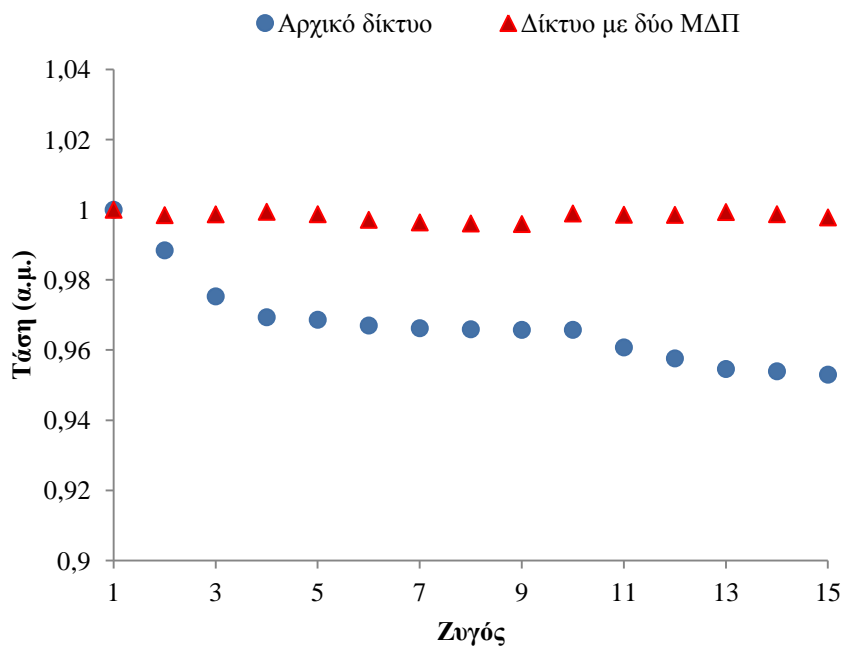
- Μέγεθος αποικίας : 30
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 90
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.52:

Πίνακας 6.52: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 4

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
4	0.431	0.85
13	0.233	0.85

Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ στους ζυγούς 4 και 13 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.7 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 15 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στην περίπτωση 4.

6.3.3 Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 15 ζυγών

Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα αν εκτελεστεί ο αλγόριθμος ABC πολλαπλές φορές. Αρχικά θα επιλυθεί το πρόβλημα της περίπτωσης 1 για 10, 20 και 40 ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου, χωρίς δηλαδή να εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Για όλες τις ανωτέρω ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην Ενότητα 6.3.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 20
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 10
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Από τις δοκιμές που έγιναν προκύπτει ότι και στις τρεις εκτελέσεις ο αλγόριθμος ABC είχε 90% επιτυχία εύρεσης της βέλτιστης λύσης, η οποία είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.37. Στον Πίνακα 6.53 φαίνονται τα αποτελέσματα των πολλαπλών εκτελέσεων. Στην προτελευταία στήλη του φαίνεται ο χρόνος που χρειάστηκε για το σύνολο των εκτελέσεων.

Πίνακας 6.53: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτελέσεων αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
10	0.0045	0.0049	0.0046	0.00011906	102.45	90
20	0.0045	0.0050	0.0046	0.00015623	210.63	90
40	0.0045	0.0050	0.0045	0.00011771	382.61	90

Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος για 40 φορές, τώρα όμως εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου και είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.37.

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω Πίνακα, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης είναι 353.23 sec, είναι δηλαδή μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης χωρίς την εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση. Αυτό συμβαίνει διότι με τον ερευνώμενο εδώ τρόπο επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση του αλγόριθμου. Επιπλέον το ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της βέλτιστης λύσης είναι 100%, διότι η καλύτερη λύση βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου.

Πίνακας 6.54: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC με εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτελέσεων αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
40	0.0045	0.0045	0.0045	0.000000052112	353.23	100

6.3.4 Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 15 ζυγών

Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα επιλύεται το πρόβλημα της περίπτωσης 3 (εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και πυκνωτή), στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι αρχικά η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου από τη σύνδεση ΜΔΠ και ύστερα η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου από τη σύνδεση ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.55. Για τις εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές υπολογίστηκαν στην Ενότητα 6.3.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 40
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 60
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Από τον Πίνακα 6.55 προκύπτει ότι όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ, παρατηρείται ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος μεγαλύτερη από την ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου. Αντίθετα, όταν επιλεγεί ως αντικειμενική συνάρτηση η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ στο δίκτυο, το συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h) για τον διαχειριστή θα είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με αυτό όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα αυτά είναι φυσιολογικά, καθώς όταν ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου, είναι λογικό να αναμένεται μεγαλύτερο συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή κέρδος για τον διαχειριστή, και μικρότερη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την περίπτωση που τίθεται σαν στόχος η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Πίνακας 6.55: Αποτελέσματα εκτέλεσης ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση για το δίκτυο των 15 ζυγών στην περίπτωση 3

Αντικειμενική συνάρτηση	Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος	Μεγιστοποίηση χρηματικού κινήτρου
Βέλτιστη λύση	ΜΔΠ: 0.631 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.90 Πυκνωτής : 0.17 MVAg στο ζυγό 13	ΜΔΠ: 0.696 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.91 Πυκνωτής : 0.17 MVAg στο ζυγό 13
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ (\$/h)	0.2334	0.2573
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/h)	1.8831	1.8711
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	2.1165	2.1284
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.02198	0.02198
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.00261	0.00273
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος (%)	88.1263	87.5640
Συνολική διείσδυση της ΔΠ στο δίκτυο (%)	89.78	98.96
Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)	1 022 410	1 127 050

6.3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 15 ζυγών

Συνδυάζοντας τον αριθμό των ΜΔΠ που θα εισαχθούν, την εγκατάσταση ή όχι πυκνωτή κατά την επιλογή εισαγωγής μίας ΜΔΠ και τους διάφορους περιορισμούς (σταθερός συντελεστής ισχύος, περιορισμένο διαθέσιμο κεφάλαιο, περιορισμός στο ποσοστό διείσδυσης, στη θέση που θα εγκατασταθεί ΜΔΠ), μπορούν να προκύψουν διάφορες περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο, πέραν αυτών που μελετήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ορισμένες ενδεικτικές περιπτώσεις εγκατάστασης ΜΔΠ. Οι παράμετροι εισόδου των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.56. Εκτελώντας τον αλγόριθμο 10 ανεξάρτητες φορές (χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση) για κάθε περίπτωση στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.57.

Πίνακας 6.56: Παράμετροι εισόδου για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 15 ζυγών

Περίπτωση	Μέγεθος αποικίας	Όριο	Μεγ. αριθμός ανακυκλώσεων	Αριθμός ΜΔΠ	Εισαγωγή πυκνωτή	Συντελεστής ισχύος	Διαθέσιμο κεφάλαιο (\$)	Ποσοστό διείσδυσης (%)	Αποκλειόμενοι ζυγοί
1	20	10	50	1	ΟΧΙ	0.9	–	–	–
2	20	10	40	1	ΟΧΙ	0.9	–	60	–
3	40	60	80	1	ΝΑΙ	–	–	–	–
4	30	90	80	2	ΟΧΙ	–	–	–	–
5	20	10	50	1	ΟΧΙ	–	810 000	–	4 , 7
6	40	60	80	1	ΝΑΙ	1.0	–	–	–
7	30	90	80	3	ΟΧΙ	–	–	–	–
8	30	90	80	4	ΟΧΙ	–	–	–	–

Πίνακας 6.57: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 15 ζυγών

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
		Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
1	ΜΔΠ: 0.700 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.9	0.0045	0.0049	0.0046	0.00011906	102.45	90
2	ΜΔΠ: 0.422 MW στο ζυγό 12 με ΣΙ 0.9	0.0053	0.0053	0.0053	0	87.53	100
3	ΜΔΠ: 0.631 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.9 Πυκνωτής: 0.17 MVA _g στο ζυγό 13	0.0026	0.0032	0.0028	0.00024715	258.45	70
4	ΜΔΠ 1: 0.431 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.233 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	0.0007	0.0007	0.0007	0.00000015278	263.56	100
5	ΜΔΠ: 0.447 MW στο ζυγό 12 με ΣΙ 0.85	0.0046	0.0046	0.0046	0.000000048934	84.31	100
6	ΜΔΠ: 0.631 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 0.48 MVA _g στο ζυγό 4	0.0038	0.0041	0.0040	0.000143980	246.03	60
7	ΜΔΠ 1: 0.063 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.375 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.233 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	0.00052	0.00058	0.00055	0.000019580	321.55	70
8	ΜΔΠ 1: 0.099 MW στο ζυγό 2 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.083 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.287 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.239 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	0.00042	0.00054	0.00047	0.000040718	349.78	40

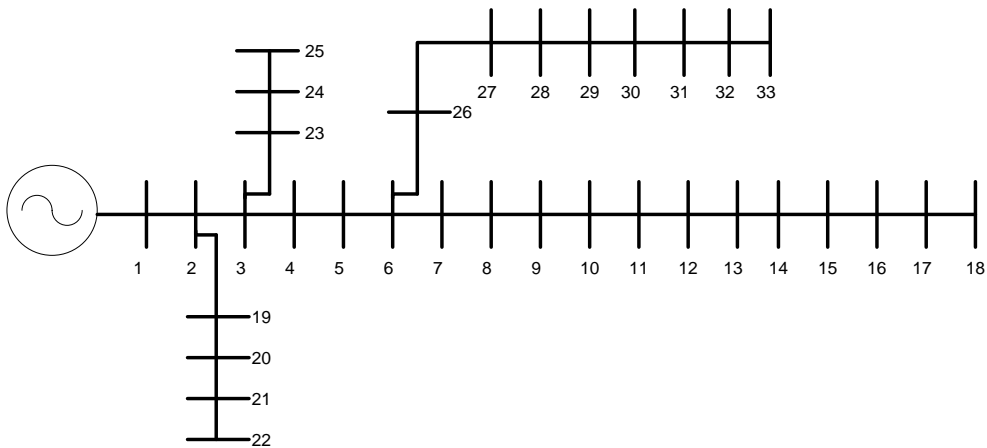
Πίνακας 6.57: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 15 ζυγών (συνέχεια)

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (%)	Ποσοστό διείσδυσης ΜΔΠ (%)	Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)
1	ΜΔΠ: 0.700 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.9	1.9571	79.47	99.58	1 134 030
2	ΜΔΠ: 0.422 MW στο ζυγό 12 με ΣΙ 0.9	1.7789	75.95	60	683 316
3	ΜΔΠ: 0.631 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.9 Πυκνωτής: 0.17 MVA _r στο ζυγό 13	2.1165	88.13	89.78	1 022 410
4	ΜΔΠ 1: 0.431 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.233 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	2.3135	96.78	94.41	1 075 210
5	ΜΔΠ: 0.447 MW στο ζυγό 12 με ΣΙ 0.85	1.8517	78.91	63.70	725 420
6	ΜΔΠ: 0.631 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 0.48 MVA _r στο ζυγό 4	1.9974	82.56	89.70	1 021 560
7	ΜΔΠ 1: 0.063 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.375 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.233 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	2.3326	97.57	95.44	1 087 020
8	ΜΔΠ 1: 0.099 MW στο ζυγό 2 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.083 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.287 MW στο ζυγό 4 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.239 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.85	2.3579	98.09	100.71	1 146 980

6.4 ΔΙΚΤΥΟ 33 ΖΥΓΩΝ

6.4.1 Δεδομένα δικτύου 33 ζυγών

Θεωρείται δίκτυο 33 ζυγών και 32 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, θεωρώντας ότι σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί ΜΔΠ. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Η βασική ισχύς είναι $S_{BASE}=10$ MVA και η βασική τάση είναι $V_{BASE}=12.66$ kV. Τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 6.58.



Σχήμα 6.8: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 33 ζυγών

Για να ελεγχθεί η εγκυρότητα του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, θεωρήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο των 33 ζυγών. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται εγκατάσταση μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος και στη δεύτερη εισάγονται επιπλέον περιορισμοί, όπως το ποσοστό διείσδυσης ή το διαθέσιμο κεφάλαιο. Η τρίτη περίπτωση περιλαμβάνει εγκατάσταση μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης, ενώ στην τέταρτη περίπτωση εξετάζεται η εγκατάσταση πολλαπλών ΜΔΠ.

Τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης της ΜΔΠ και μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου δίνονται από τις σχέσεις (6.1) και (6.2), αντίστοιχα. Δηλαδή το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης της ΜΔΠ είναι 0.36986 \$/MWh και το χρηματικό κίνητρο μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος είναι 97.2 \$/MWh. Επιπλέον οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων για κάθε ζυγό να είναι εντός των ορίων $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, οι γωνίες να είναι μεταξύ -30° και 30° και σε όλες τις γραμμές του δικτύου να μην ρέει φαινόμενη ισχύς μεγαλύτερη των 3 MVA.

Στην Ενότητα 6.4.2 διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων του αλγόριθμου για κάθε μια από τις περιπτώσεις δοκιμών. Επιπλέον στις Ενότητες 6.4.3 και 6.4.4 διερευνάται η επίδραση που έχουν η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης και ο αριθμός των εκτελέσεων στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις περιπτώσεις στην Ενότητα 6.4.5.

Πίνακας 6.58: Δεδομένα δικτύου 33 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MW)
1	1	2	0.0922	0.047	0.100	0.060
2	2	3	0.493	0.2511	0.090	0.040
3	3	4	0.366	0.1864	0.120	0.080
4	4	5	0.3811	0.1941	0.060	0.030
5	5	6	0.819	0.707	0.060	0.020
6	6	7	0.1872	0.6188	0.200	0.100
7	7	8	1.7114	1.2351	0.200	0.100
8	8	9	1.03	0.74	0.060	0.020
9	9	10	1.044	0.74	0.060	0.020
10	10	11	0.1966	0.065	0.045	0.030
11	11	12	0.3744	0.1238	0.060	0.035
12	12	13	1.468	1.155	0.060	0.035
13	13	14	0.5416	0.7129	0.120	0.080
14	14	15	0.591	0.526	0.060	0.010
15	15	16	0.7463	0.545	0.060	0.020
16	16	17	1.289	1.721	0.060	0.020
17	17	18	0.732	0.574	0.090	0.040
18	2	19	0.164	0.1565	0.090	0.040
19	19	20	1.5042	1.3554	0.090	0.040
20	20	21	0.4095	0.4784	0.090	0.040
21	21	22	0.7089	0.9373	0.090	0.040
22	3	23	0.4512	0.3083	0.090	0.050
23	23	24	0.898	0.7091	0.420	0.200
24	24	25	0.896	0.7011	0.420	0.200
25	6	26	0.203	0.1034	0.060	0.025
26	26	27	0.2842	0.1447	0.060	0.025
27	27	28	1.059	0.9337	0.060	0.020
28	28	29	0.8042	0.7006	0.120	0.070
29	29	30	0.5075	0.2585	0.200	0.600
30	30	31	0.9744	0.963	0.150	0.070
31	31	32	0.3105	0.3619	0.210	0.100
32	32	33	0.341	0.5302	0.060	0.040
Σύνολο					3.715	2.300

6.4.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 33 ζυγών

Σε αυτήν την Ενότητα διερευνάται αρχικά ποιος είναι ο καλύτερος συνδυασμός του μεγέθους της αποικίας μελισσών και του ορίου εξάντλησης βελτίωσης της λύσης για κάθε μια περίπτωση. Η προτεινόμενη τιμή του ορίου είναι ίση ή μεγαλύτερη του $0.5 \times CS \times D$, όπου CS το μέγεθος της αποικίας και D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού θα μελετηθούν διάφοροι συνδυασμοί μεγέθους αποικίας - ορίου.

Η επιλογή του καλύτερου συνδυασμού γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει μετά από κάθε εκτέλεση, από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των τιμών που προκύπτουν, καθώς και από το συνολικό χρόνο που διαρκεί αυτή. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερό το βέλτιστο συνδυασμό μεγέθους αποικίας και ορίου, διερευνάται ποιος είναι ο ιδανικότερος μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων (στο εξής MCN) του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών (στο εξής αλγόριθμος ABC).

Οι τιμές των απωλειών ενεργού ισχύος εκφράζονται σε MW. Όταν η διαφορά μεταξύ δυο τιμών είναι μικρότερη από 10 W, δηλαδή μικρότερη από 0.00001 MW, τότε η διαφορά είναι τόσο ασήμαντη ώστε οι δυο τιμές θεωρούνται ως ίσες.

1^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος.

Στην πρώτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος 0.9 στο δίκτυο των 33 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 1 έως 6 που φαίνονται στον Πίνακα 6.59. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.60. Στην προτελευταία στήλη του Πίνακα 6.60 φαίνεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε και για τις 10 εκτελέσεις.

Πίνακας 6.59: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
1	20	10	80
2	20	20	80
3	20	30	80
4	30	15	80
5	30	30	80
6	30	45	80

Πίνακας 6.60: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 1	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000015883	147.63	100
Σενάριο 2	0.0709	0.0710	0.0709	0.000037562000	148.28	90
Σενάριο 3	0.0709	0.0718	0.0710	0.000297850000	147.56	90
Σενάριο 4	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000033185	232.34	100
Σενάριο 5	0.0709	0.0710	0.0709	0.000027802000	220.48	90
Σενάριο 6	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000025807	217.30	100

Από τον Πίνακα 6.60 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 20 και 10 αντίστοιχα (Σενάριο 1), καθώς με αυτό το συνδυασμό επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (147.63 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 20 και το όριο ίσο με 10, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.61.

Υλοποιώντας τα σενάρια 7 έως 10 για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.62.

Πίνακας 6.61: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
7	20	10	40
8	20	10	50
9	20	10	60
10	20	10	80

Πίνακας 6.62: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 7	0.0709	0.0710	0.0709	0.000054372000	74.94	90
Σενάριο 8	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000012494	94.53	100
Σενάριο 9	0.0709	0.0712	0.0709	0.000122640000	113.25	80
Σενάριο 10	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000015883	147.63	100

Από τον Πίνακα 6.62 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 50 (Σενάριο 8), καθώς τότε έχουμε τη μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (94.53 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 1 είναι:

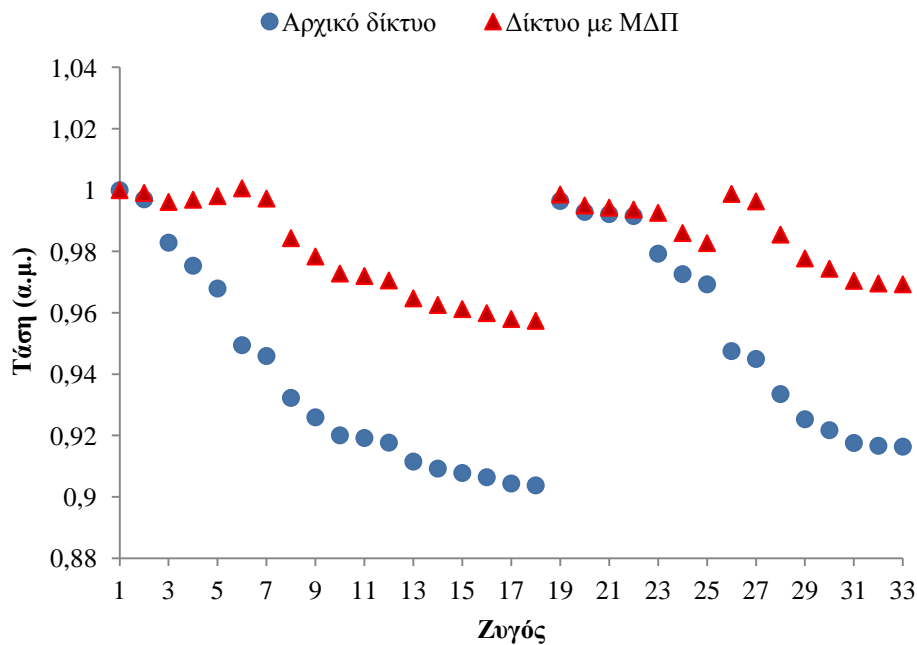
- Μέγεθος αποικίας : 20
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 10
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.63:

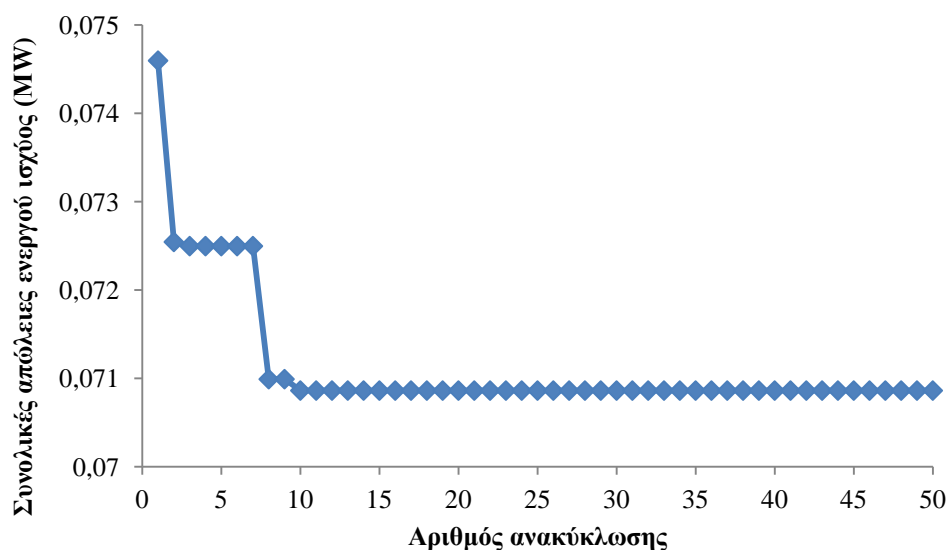
Πίνακας 6.63: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
6	2.7663	0.9

Στο Σχήμα 6.9 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση μίας ΜΔΠ 2.7663 MW στο ζυγό 6, ενώ στο Σχήμα 6.10 φαίνεται η σύγκλιση του αλγόριθμου προς την καλύτερη λύση κατά την εκτέλεση του λογισμικού μία μόνο φορά.



Σχήμα 6.9 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 33 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 1.



Σχήμα 6.10: Μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την εξέλιξη του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για το δίκτυο των 33 ζυγών, στην περίπτωση 1.

2^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος, με περιορισμό της διείσδυσης.

Στη δεύτερη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος 0.9 στο δίκτυο των 33 ζυγών, ενώ παράλληλα η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο δεν πρέπει να ξεπερνά το 70%. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 11 έως 16 που φαίνονται στον Πίνακα 6.64. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.65.

Πίνακας 6.64: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
11	20	10	80
12	20	20	80
13	20	30	80
14	30	15	80
15	30	30	80
16	30	45	80

Πίνακας 6.65: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 11	0.0713	0.0723	0.0714	0.000322260	152.33	90
Σενάριο 12	0.0713	0.0723	0.0714	0.000322280	151.93	90
Σενάριο 13	0.0713	0.0715	0.0713	0.000072595	145.45	90
Σενάριο 14	0.0713	0.0713	0.0713	0	218.84	100
Σενάριο 15	0.0713	0.0713	0.0713	0	219.60	100
Σενάριο 16	0.0713	0.0723	0.0715	0.000429680	219.72	90

Από τον Πίνακα 6.65 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 30 και 15 αντίστοιχα (Σενάριο 14), καθώς με αυτό το συνδυασμό επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (218.84 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 30 και το όριο ίσο με 15, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.66.

Υλοποιώντας τα σενάρια 17 έως 20 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.67.

Πίνακας 6.66: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
17	30	15	40
18	30	15	50
19	30	15	60
20	30	15	80

Πίνακας 6.67: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 17	0.0713	0.0723	0.0714	0.00032227	112.94	90
Σενάριο 18	0.0713	0.0713	0.0713	0	144.69	100
Σενάριο 19	0.0713	0.0713	0.0713	0	172.61	100
Σενάριο 20	0.0713	0.0713	0.0713	0	218.84	100

Από τον Πίνακα 6.67 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 50 (Σενάριο 18), καθώς τότε έχουμε τη μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (144.69 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 2 είναι:

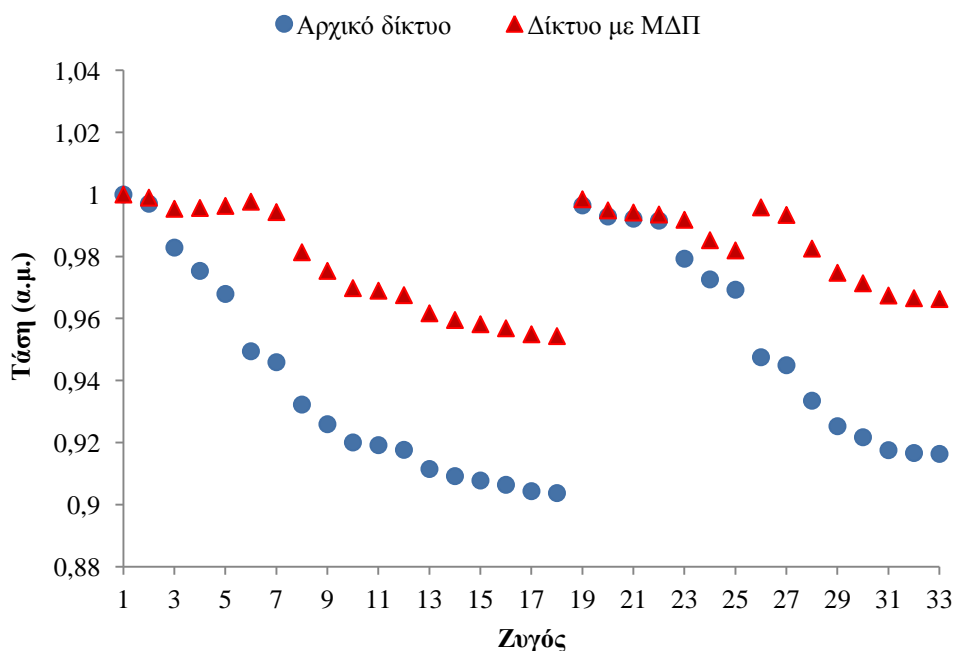
- Μέγεθος αποικίας : 30
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 15
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.68:

Πίνακας 6.68: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 2

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
6	2.6005	0.9

Στο Σχήμα 6.11 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 6.



Σχήμα 6.11 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 33 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 2.

3^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης.

Στην τρίτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης στο δίκτυο των 33 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 21 έως 26 που φαίνονται στον Πίνακα 6.69. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.70.

Πίνακας 6.69: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
21	40	20	80
22	40	60	80
23	40	100	80
24	50	25	80
25	50	75	80
26	50	125	80

Πίνακας 6.70: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 21	0.0529	0.0571	0.0540	0.001500000	299.02	60
Σενάριο 22	0.0529	0.0533	0.0529	0.000148690	303.31	80
Σενάριο 23	0.0529	0.0540	0.0530	0.000348020	303.56	80
Σενάριο 24	0.0529	0.0545	0.0531	0.000499590	364.08	80
Σενάριο 25	0.0529	0.0530	0.0529	0.000036871	377.14	90
Σενάριο 26	0.0529	0.0531	0.0529	0.000070036	376.22	80

Από τον Πίνακα 6.70 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 50 και 75 αντίστοιχα (Σενάριο 25), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση και το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (σε 9 από τις 10 εκτελέσεις).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 50 και το όριο ίσο με 75, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.71.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.72.

Πίνακας 6.71: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
27	50	75	40
28	50	75	50
29	50	75	60
30	50	75	80

Πίνακας 6.72: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 27	0.0529	0.0552	0.0535	0.000738350	211.58	60
Σενάριο 28	0.0529	0.0556	0.0536	0.000905630	262.35	60
Σενάριο 29	0.0529	0.0551	0.0533	0.000711560	298.63	70
Σενάριο 30	0.0529	0.0530	0.0529	0.000036871	377.14	90

Από τον Πίνακα 6.72 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 30), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή και το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (90 %).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 3 είναι:

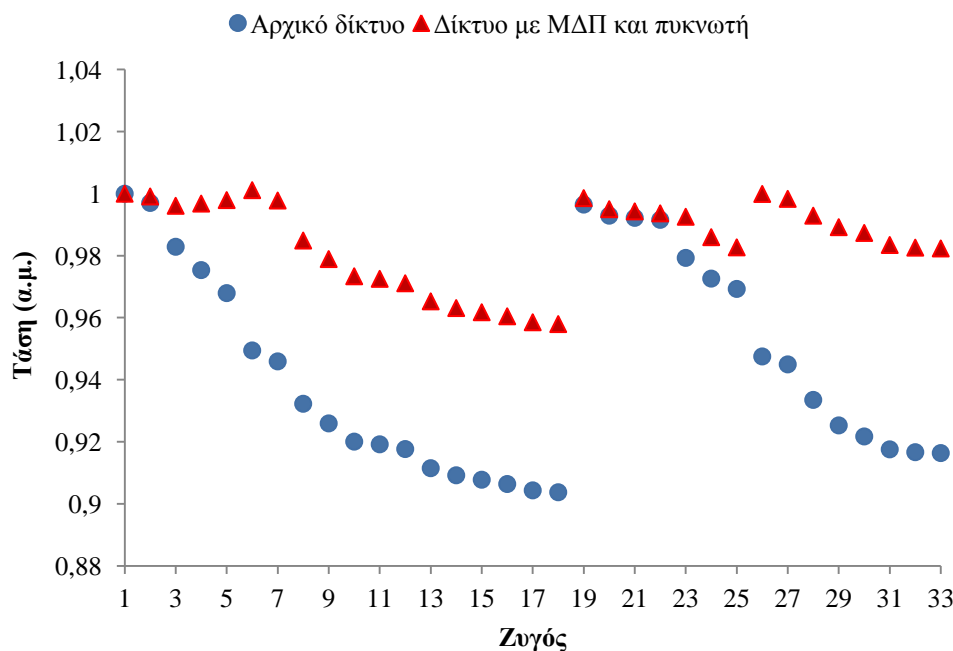
- Μέγεθος αποικίας : 50
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 75
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.73:

Πίνακας 6.73: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή στο δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)	Ζυγός τοποθέτησης πυκνωτή	Βέλτιστο μέγεθος πυκνωτή (MVar)
6	2.5311	0.95	30	0.92

Στο Σχήμα 6.12 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 6 και του πυκνωτή στο ζυγό 30.



Σχήμα 6.12 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 33 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στην περίπτωση 3.

4^η περίπτωση: Εισαγωγή δύο ΜΔΠ.

Στην τέταρτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή δύο ΜΔΠ χωρίς επιπλέον περιορισμούς στο δίκτυο των 33 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 31 έως 36 που φαίνονται στον Πίνακα 6.74. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.75.

Πίνακας 6.74: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
31	40	40	80
32	40	80	80
33	40	120	80
34	50	50	80
35	50	100	80
36	50	150	80

Πίνακας 6.75: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 31	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000060280	336.26	100
Σενάριο 32	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000017572	364.22	100
Σενάριο 33	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000030331	342.59	100
Σενάριο 34	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000108250	402.41	100
Σενάριο 35	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000188980	393.89	100
Σενάριο 36	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000033825	403.17	100

Από τον Πίνακα 6.75 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 40 και 80 αντίστοιχα (Σενάριο 32), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (364.22 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 40 και το όριο ίσο με 80, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.76.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.77.

Πίνακας 6.76: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
37	40	80	40
38	40	80	50
39	40	80	60
40	40	80	80

Πίνακας 6.77: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 37	0.0312	0.0318	0.0313	0.0002090800	177.85	70
Σενάριο 38	0.0312	0.0313	0.0312	0.0000534690	224.31	80
Σενάριο 39	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000114000	283.47	100
Σενάριο 40	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000017572	364.22	100

Από τον Πίνακα 6.77 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 40), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 4 είναι:

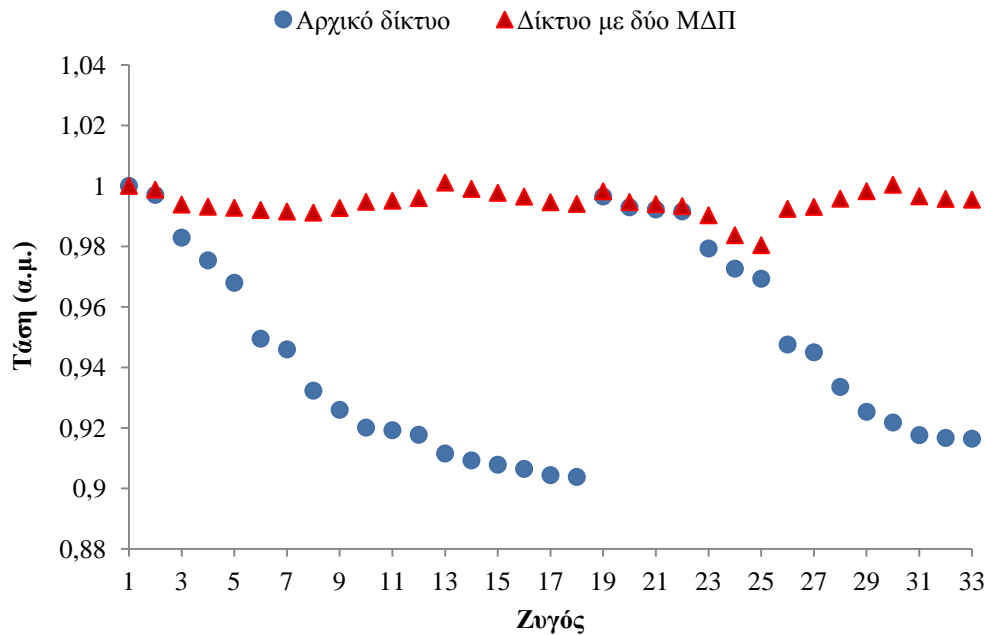
- Μέγεθος αποικίας : 40
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 80
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.78:

Πίνακας 6.78: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 4

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
13	0.8004	0.86
30	1.3008	0.85

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ στους ζυγούς 13 και 30 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.13 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 33 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στην περίπτωση 4.

6.4.3 Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 33 ζυγών

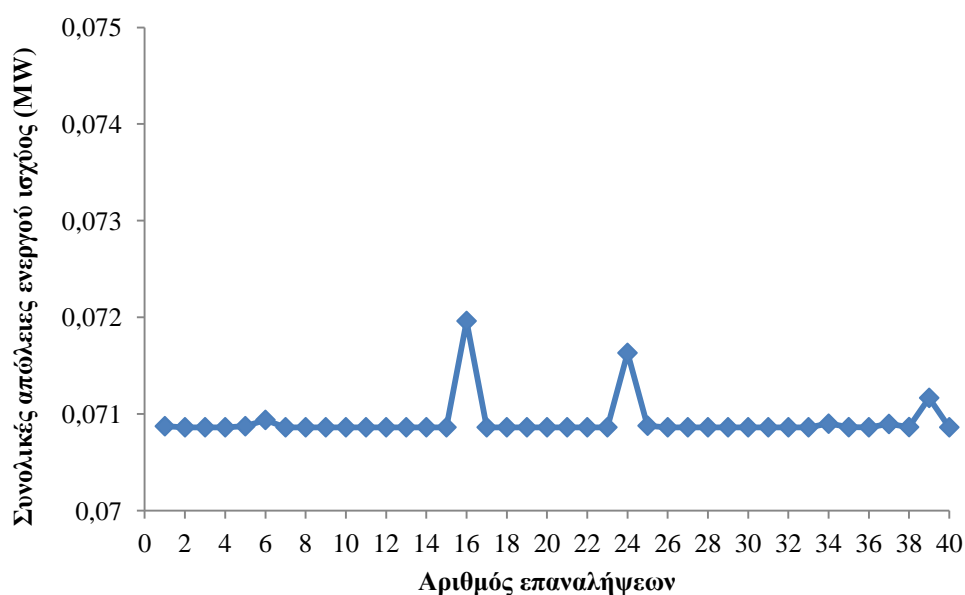
Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα αν εκτελεστεί ο αλγόριθμος ABC πολλαπλές φορές. Αρχικά θα επιλυθεί το πρόβλημα της περίπτωσης 1 για 40 ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου, χωρίς δηλαδή να εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Για τις ανωτέρω ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην Ενότητα 6.4.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 20
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 10
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Από τις δοκιμές που έγιναν βρέθηκε η βέλτιστη λύση, η οποία είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.63, με ποσοστό επιτυχίας 90%. Στον Πίνακα 6.79 φαίνονται τα αποτελέσματα των πολλαπλών εκτελέσεων. Στην προτελευταία στήλη του φαίνεται ο χρόνος που χρειάστηκε για το σύνολο των εκτελέσεων. Στο Σχήμα 6.14 φαίνονται οι συνολικές απώλειες του δικτύου των 33 ζυγών, σε σχέση με τις εκτελέσεις του αλγόριθμου.

Πίνακας 6.79: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτελέσεων αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
40	0.0709	0.0720	0.0709	0.000020208	378.23	90



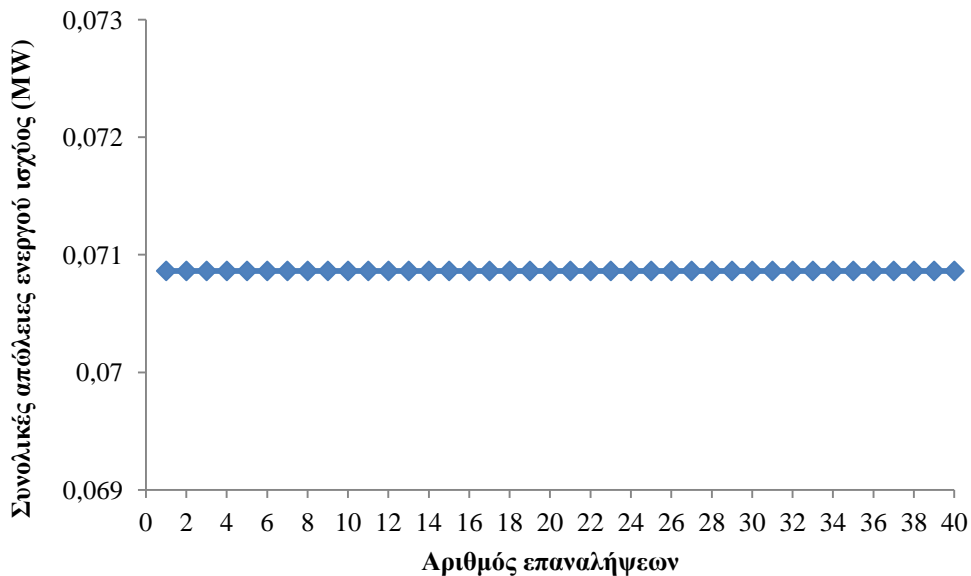
Σχήμα 6.14: Συνολικές απώλειες του δικτύου των 33 ζυγών στην περίπτωση 1, σε σχέση με τις διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος για 40 φορές, τώρα όμως εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου και είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.63.

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω Πίνακα, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης είναι 362.15 sec, είναι δηλαδή μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης χωρίς την εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση. Αυτό συμβαίνει διότι με τον ερευνώμενο εδώ τρόπο επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση του αλγόριθμου. Επιπλέον το ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της βέλτιστης λύσης είναι 100%, διότι η καλύτερη λύση βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου. Στο Σχήμα 6.15 φαίνονται οι συνολικές απώλειες του δικτύου των 33 ζυγών, σε σχέση με τις εκτελέσεις του αλγόριθμου, κατά την εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

Πίνακας 6.80: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC με εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτέλεσης αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
40	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000036318	362.15	100



Σχήμα 6.15: Συνολικές απώλειες του δικτύου των 33 ζυγών στην περίπτωση 1, σε σχέση με τις διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, με εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

6.4.4 Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 33 ζυγών

Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα επιλύεται το πρόβλημα της περίπτωσης 3 (εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και πυκνωτή), στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι αρχικά η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου από τη σύνδεση ΜΔΠ και ύστερα η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου από τη σύνδεση ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.81. Για τις εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές υπολογίστηκαν στην Ενότητα 6.4.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 50
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 75
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Από τον Πίνακα 6.81 προκύπτει ότι όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ, παρατηρείται ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος μεγαλύτερη από την ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου. Αντίθετα, όταν επιλεγεί ως αντικειμενική συνάρτηση η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ στο δίκτυο, το συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h) για τον διαχειριστή θα είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με αυτό όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα αυτά είναι φυσιολογικά, καθώς όταν ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου είναι λογικό να αναμένεται μεγαλύτερο συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή κέρδος για τον διαχειριστή, και μικρότερη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την περίπτωση που τίθεται σαν στόχος η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Πίνακας 6.81: Αποτελέσματα εκτέλεσης ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση για το δίκτυο των 33 ζυγών στην περίπτωση 3

Αντικειμενική συνάρτηση	Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος	Μεγιστοποίηση χρηματικού κινήτρου
Βέλτιστη λύση	ΜΔΠ: 2.5311 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.95 Πυκνωτής : 0.92 MVAγ στο ζυγό 30	ΜΔΠ: 2.6653 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.95 Πυκνωτής : 0.90 MVAγ στο ζυγό 30
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ (\$/h)	0.9361	0.9858
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/h)	15.3712	15.3460
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	16.3073	16.3318
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.2110	0.2110
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.0529	0.0531
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος (%)	74.9482	74.8256
Συνολική διείσδυση της ΔΠ στο δίκτυο (%)	68.13	71.74
Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)	4 100 301	4 317 851

6.4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 33 ζυγών

Συνδυάζοντας τον αριθμό των ΜΔΠ που θα εισαχθούν, την εγκατάσταση ή όχι πυκνωτή κατά την επιλογή εισαγωγής μίας ΜΔΠ και τους διάφορους περιορισμούς (σταθερός συντελεστής ισχύος, περιορισμένο διαθέσιμο κεφάλαιο, περιορισμός στο ποσοστό διείσδυσης, στη θέση που θα εγκατασταθεί ΜΔΠ), μπορούν να προκύψουν διάφορες περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο, πέραν αυτών που μελετήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ορισμένες ενδεικτικές περιπτώσεις εγκατάστασης ΜΔΠ. Οι παράμετροι εισόδου των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.82. Εκτελώντας τον αλγόριθμο 10 ανεξάρτητες φορές (χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση) για κάθε περίπτωση στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.83.

Πίνακας 6.82: Παράμετροι εισόδου για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 33 ζυγών

Περίπτωση	Μέγεθος αποικίας	Όριο	Μεγ. αριθμός ανακυκλώσεων	Αριθμός ΜΔΠ	Εισαγωγή πυκνωτή	Συντελεστής ισχύος	Διαθέσιμο κεφάλαιο (\$)	Ποσοστό διείσδυσης (%)	Αποκλειόμενοι ζυγοί
1	20	10	50	1	ΟΧΙ	0.9	–	–	–
2	30	15	50	1	ΟΧΙ	0.9	–	70	–
3	50	75	80	1	ΝΑΙ	–	–	–	–
4	40	80	80	2	ΟΧΙ	–	–	–	–
5	30	15	50	1	ΟΧΙ	–	2 430 000	–	6 , 9
6	50	75	80	1	ΝΑΙ	1.0	–	–	–
7	40	80	80	3	ΟΧΙ	–	–	–	–
8	50	60	80	4	ΟΧΙ	–	–	–	–

Πίνακας 6.83: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 33 ζυγών

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
		Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
1	ΜΔΠ: 2.7663 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.9	0.0709	0.0709	0.0709	0.000000012494	94.53	100
2	ΜΔΠ: 2.6005 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.9	0.0713	0.0713	0.0713	0	144.69	100
3	ΜΔΠ: 2.5311 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.95 Πυκνωτής: 0.92 MVA _r στο ζυγό 30	0.0529	0.0530	0.0529	0.000036871	377.14	90
4	ΜΔΠ 1: 0.8004 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.86 ΜΔΠ 2: 1.3008 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	0.0312	0.0312	0.0312	0.0000017572	364.22	100
5	ΜΔΠ: 1.500 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	0.0749	0.0749	0.0749	0.000000000000000000001463	186.77	100
6	ΜΔΠ: 2.5315 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 1.29 MVA _r στο ζυγό 30	0.0585	0.0585	0.0585	0.0000000041500	309.80	100
7	ΜΔΠ 1: 1.0379 MW στο ζυγό 24 με ΣΙ 0.87 ΜΔΠ 2: 0.743 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.86 ΜΔΠ 3: 1.2133 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	0.0145	0.0152	0.0148	0.00022801	292.55	60
8	ΜΔΠ 1: 0.9228 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.8948 MW στο ζυγό 24 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.6338 MW στο ζυγό 14 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.7172 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85	0.0100	0.0114	0.0108	0.00040311	351.22	30

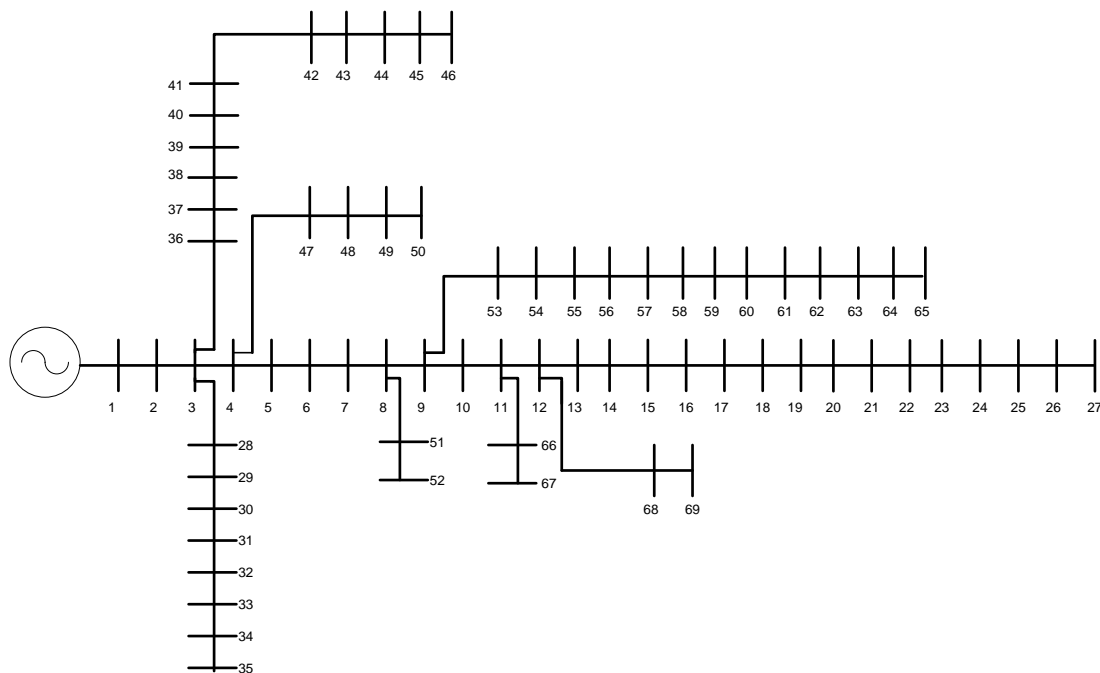
Πίνακας 6.83: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 33 ζυγών (συνέχεια)

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (%)	Ποσοστό διείσδυσης ΜΔΠ (%)	Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)
1	ΜΔΠ: 2.7663 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.9	14.6443	66.42	74.46	4 481 422
2	ΜΔΠ: 2.6005 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.9	14.5387	66.20	70	4 212 810
3	ΜΔΠ: 2.5311 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 0.95 Πυκνωτής: 0.92 MVA _Γ στο ζυγό 30	16.3073	74.95	68.13	4 100 301
4	ΜΔΠ 1: 0.8004 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.86 ΜΔΠ 2: 1.3008 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	18.2582	85.24	56.56	3 403 940
5	ΜΔΠ: 1.500 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	13.7793	64.48	40.38	2 430 000
6	ΜΔΠ: 2.5315 MW στο ζυγό 6 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 1.29 MVA _Γ στο ζυγό 30	15.7634	72.29	68.14	4 101 046
7	ΜΔΠ 1: 1.0379 MW στο ζυγό 24 με ΣΙ 0.87 ΜΔΠ 2: 0.743 MW στο ζυγό 13 με ΣΙ 0.86 ΜΔΠ 3: 1.2133 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85	20.2044	93.11	80.60	4 850 604
8	ΜΔΠ 1: 0.9228 MW στο ζυγό 30 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.8948 MW στο ζυγό 24 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.6338 MW στο ζυγό 14 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.7172 MW στο ζυγό 7 με ΣΙ 0.85	20.7055	95.24	85.29	5 133 148

6.5 ΔΙΚΤΥΟ 69 ΖΥΓΩΝ

6.5.1 Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών

Θεωρείται δίκτυο 69 ζυγών και 68 γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.16. Στο ζυγό 1 βρίσκεται ο υποσταθμός ΥΤ/ΜΤ και για αυτό το λόγο θεωρείται ως ζυγός ταλάντωσης, θεωρώντας ότι σε αυτό το ζυγό δεν μπορεί να συνδεθεί ΜΔΠ. Οι υπόλοιποι ζυγοί του συστήματος είναι ζυγοί φορτίου (PQ). Η βασική ισχύς είναι $S_{BASE}=10$ MVA και η βασική τάση είναι $V_{BASE}=12.66$ kV. Τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 6.84.



Σχήμα 6.16: Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου 69 ζυγών

Για να ελεγχθεί η εγκυρότητα του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης, θεωρήθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται εγκατάσταση μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος και στη δεύτερη εισάγονται επιπλέον περιορισμοί, όπως το ποσοστό διείσδυσης ή το διαθέσιμο κεφάλαιο. Η τρίτη περίπτωση περιλαμβάνει εγκατάσταση μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης, ενώ στην τέταρτη περίπτωση εξετάζεται η εγκατάσταση πολλαπλών ΜΔΠ.

Τα χρηματικά κίνητρα σύνδεσης της ΜΔΠ και μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου δίνονται από τις σχέσεις (6.1) και (6.2), αντίστοιχα. Δηλαδή το χρηματικό κίνητρο σύνδεσης της ΜΔΠ είναι 0.36986 \$/MWh και το χρηματικό κίνητρο μείωσης των απωλειών ενεργού ισχύος είναι 97.2 \$/MWh. Επιπλέον οι περιορισμοί που τίθενται για το δίκτυο είναι τα μέτρα των τάσεων για κάθε ζυγό να είναι εντός των ορίων $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης, οι γωνίες να είναι μεταξύ -30° και 30° και σε όλες τις γραμμές του δικτύου να μην ρέει φαινόμενη ισχύς μεγαλύτερη των 3 MVA.

Στην Ενότητα 6.5.2 διερευνάται η επίδραση των παραμέτρων του αλγόριθμου για κάθε μια από τις περιπτώσεις δοκιμών. Επιπλέον στις Ενότητες 6.5.3 και 6.5.4 διερευνάται η επίδραση που έχουν η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης και ο αριθμός των εκτελέσεων στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά για όλες τις περιπτώσεις στην Ενότητα 6.5.5.

Πίνακας 6.84: Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MW)
1	1	2	0.0005	0.0012	0	0
2	2	3	0.0005	0.0012	0	0
3	3	4	0.0015	0.0036	0	0
4	4	5	0.0251	0.0294	0	0
5	5	6	0.366	0.1864	0.0026	0.0022
6	6	7	0.3811	0.1941	0.0404	0.030
7	7	8	0.0922	0.047	0.075	0.054
8	8	9	0.0493	0.0251	0.030	0.022
9	9	10	0.819	0.2707	0.028	0.019
10	10	11	0.1872	0.0619	0.145	0.104
11	11	12	0.7114	0.2351	0.145	0.104
12	12	13	1.03	0.34	0.008	0.0055
13	13	14	1.044	0.345	0.008	0.0055
14	14	15	1.058	0.3496	0	0
15	15	16	0.1966	0.065	0.0455	0.030
16	16	17	0.3744	0.1238	0.06	0.035
17	17	18	0.0047	0.0016	0.06	0.035
18	18	19	0.3276	0.1083	0	0
19	19	20	0.2106	0.069	0.001	0.0006
20	20	21	0.3416	0.1129	0.114	0.081
21	21	22	0.014	0.0046	0.0053	0.0035
22	22	23	0.1591	0.0526	0	0
23	23	24	0.3463	0.1145	0.028	0.02
24	24	25	0.7488	0.2475	0	0
25	25	26	0.3089	0.1021	0.014	0.01
26	26	27	0.1732	0.0572	0.014	0.01
27	3	28	0.0044	0.0108	0.026	0.0186
28	28	29	0.064	0.1565	0.026	0.0186
29	29	30	0.3978	0.1315	0	0
30	30	31	0.0702	0.0232	0	0
31	31	32	0.351	0.116	0	0
32	32	33	0.839	0.2816	0.014	0.01
33	33	34	1.708	0.5646	0.0195	0.014
34	34	35	1.474	0.4873	0.006	0.004
35	3	36	0.0044	0.0108	0.026	0.01855
36	36	37	0.064	0.1565	0.026	0.01855
37	37	38	0.1053	0.123	0	0
38	38	39	0.0304	0.0355	0.024	0.017
39	39	40	0.0018	0.0021	0.024	0.017
40	40	41	0.7283	0.8509	0.0012	0.001

Πίνακας 6.84: Δεδομένα δικτύου 69 ζυγών (συνέχεια)

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X (Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MW)
41	41	42	0.31	0.3623	0	0
42	42	43	0.041	0.0478	0.006	0.0043
43	43	44	0.0092	0.0116	0	0
44	44	45	0.1089	0.1373	0.03922	0.0263
45	45	46	0.0009	0.0012	0.03922	0.0263
46	4	47	0.0034	0.0084	0	0
47	47	48	0.0851	0.2083	0.079	0.0564
48	48	49	0.2898	0.7091	0.3847	0.2745
49	49	50	0.0822	0.2011	0.3847	0.2745
50	8	51	0.0928	0.0473	0.0405	0.0283
51	51	52	0.3319	0.1114	0.0036	0.0027
52	9	53	0.174	0.0886	0.00435	0.0035
53	53	54	0.203	0.1034	0.0264	0.019
54	54	55	0.2842	0.1447	0.024	0.0172
55	55	56	0.2813	0.1433	0	0
56	56	57	1.5900	0.5337	0	0
57	57	58	0.7837	0.263	0	0
58	58	59	0.3042	0.1006	0.100	0.072
59	59	60	0.3861	0.1172	0	0
60	60	61	0.5075	0.2585	1.244	0.888
61	61	62	0.0974	0.0496	0.032	0.023
62	62	63	0.145	0.0738	0	0
63	63	64	0.7105	0.3619	0.227	0.162
64	64	65	1.041	0.5302	0.059	0.042
65	11	66	0.2012	0.0611	0.018	0.013
66	66	67	0.0047	0.0014	0.018	0.013
67	12	68	0.7394	0.2444	0.028	0.020
68	68	69	0.0047	0.0016	0.028	0.020
Σύνολο					3.80219	2.6946

6.5.2 Διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σε αυτήν την Ενότητα διερευνάται αρχικά ποιος είναι ο καλύτερος συνδυασμός του μεγέθους της αποικίας μελισσών και του ορίου εξάντλησης βελτίωσης της λύσης για κάθε μια περίπτωση. Η προτεινόμενη τιμή του ορίου είναι ίση ή μεγαλύτερη του $0.5 \times CS \times D$, όπου CS το μέγεθος της αποικίας και D ο αριθμός των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Για την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού θα μελετηθούν διάφοροι συνδυασμοί μεγέθους αποικίας - ορίου. Η επιλογή του καλύτερου συνδυασμού γίνεται με βάση την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που προκύπτει μετά από κάθε εκτέλεση, από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των τιμών που προκύπτουν, καθώς και από το συνολικό χρόνο που διαρκεί αυτή. Στη συνέχεια, κρατώντας σταθερό το βέλτιστο συνδυασμό μεγέθους αποικίας και ορίου, διερευνάται ποιος είναι ο ιδανικότερος μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων (στο εξής MCN) του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών (στο εξής αλγόριθμος ABC).

Οι τιμές των απωλειών ενεργού ισχύος εκφράζονται σε MW. Όταν η διαφορά μεταξύ δυο τιμών είναι μικρότερη από 10 W, δηλαδή μικρότερη από 0.00001 MW, τότε η διαφορά είναι τόσο ασήμαντη ώστε οι δυο τιμές θεωρούνται ως ίσες.

1^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος.

Στην πρώτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ με σταθερό συντελεστή ισχύος 0.9 στο δίκτυο των 69 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 1 έως 6 που φαίνονται στον Πίνακα 6.85. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.86. Στην προτελευταία στήλη του Πίνακα 6.86 φαίνεται ο συνολικός χρόνος που χρειάστηκε και για τις 10 εκτελέσεις.

Πίνακας 6.85: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
1	20	10	80
2	20	20	80
3	20	30	80
4	30	15	80
5	30	30	80
6	30	45	80

Πίνακας 6.86: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 1	0.0280	0.0280	0.0280	0.0000000032806	244.28	100
Σενάριο 2	0.0280	0.0280	0.0280	0.0000000012932	236.70	100
Σενάριο 3	0.0280	0.0280	0.0280	0.0000000010596	265.25	100
Σενάριο 4	0.0280	0.0280	0.0280	0	365.06	100
Σενάριο 5	0.0280	0.0280	0.0280	0	355.02	100
Σενάριο 6	0.0280	0.0280	0.0280	0	359.11	100

Από τον Πίνακα 6.86 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 30 και 30 αντίστοιχα (Σενάριο 5), καθώς με αυτό το συνδυασμό επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (355.02 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 30 και το όριο ίσο με 30, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.87.

Υλοποιώντας τα σενάρια 7 έως 10 για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.88.

Πίνακας 6.87: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
7	30	30	40
8	30	30	50
9	30	30	60
10	30	30	80

Πίνακας 6.88: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 7	0.0280	0.0280	0.0280	0	184.30	100
Σενάριο 8	0.0280	0.0280	0.0280	0	218.05	100
Σενάριο 9	0.0280	0.0280	0.0280	0	293.66	100
Σενάριο 10	0.0280	0.0280	0.0280	0	355.02	100

Από τον Πίνακα 6.88 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 40 (Σενάριο 7), καθώς τότε έχουμε το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (184.30 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 1 είναι:

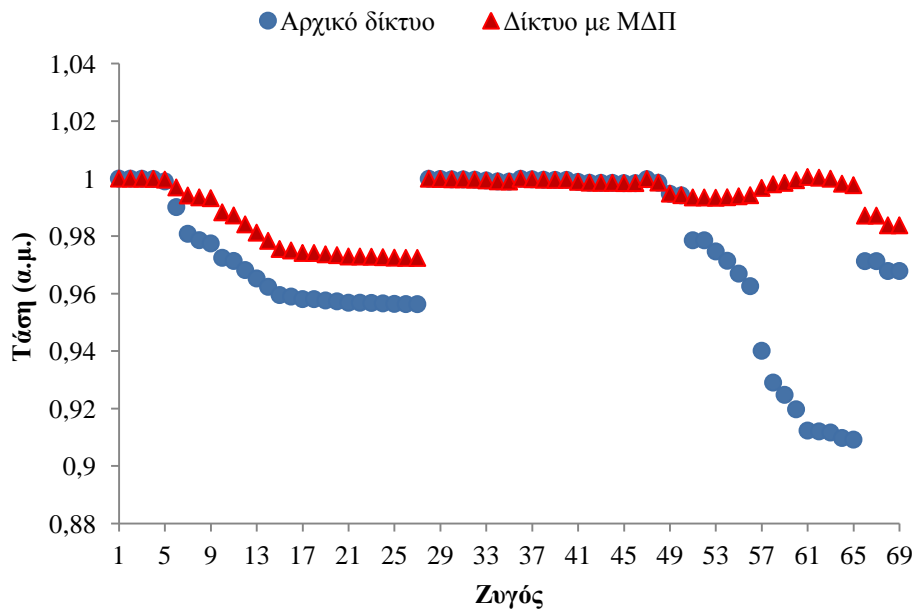
- Μέγεθος αποικίας : 30
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 30
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 40

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.89:

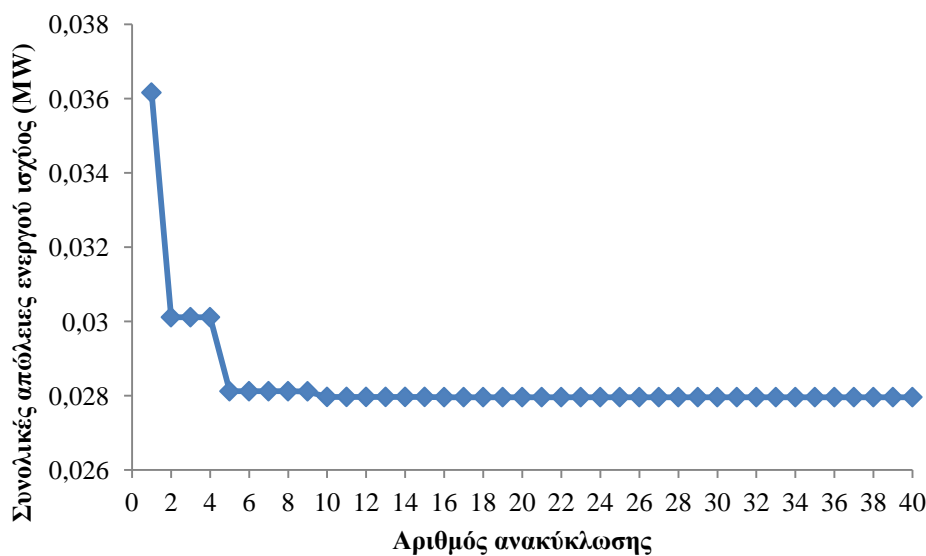
Πίνακας 6.89: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
61	1.9955	0.9

Στο Σχήμα 6.17 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση μίας ΜΔΠ 1.9955 MW στο ζυγό 61, ενώ στο Σχήμα 6.18 φαίνεται η σύγκλιση του αλγόριθμου προς την καλύτερη λύση κατά την εκτέλεση του λογισμικού μία μόνο φορά.



Σχήμα 6.17 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 69 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 1.



Σχήμα 6.18: Μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την εξέλιξη του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για το δίκτυο των 69 ζυγών, στην περίπτωση 1.

2^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ με περιορισμό της διείσδυσης.

Στη δεύτερη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών και ο μοναδικός περιορισμός που ισχύει είναι ότι η διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στο δίκτυο δεν πρέπει να ξεπερνά το 60%. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 11 έως 16 που φαίνονται στον Πίνακα 6.90. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του λογισμικού και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.91.

Πίνακας 6.90: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
11	20	10	80
12	20	20	80
13	20	30	80
14	30	15	80
15	30	30	80
16	30	45	80

Πίνακας 6.91: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 11	0.0239	0.0239	0.0239	0.0000000018588	254.17	100
Σενάριο 12	0.0239	0.0239	0.0239	0.0000000003657	247.06	100
Σενάριο 13	0.0239	0.0239	0.0239	0.0000000003657	241.95	100
Σενάριο 14	0.0239	0.0239	0.0239	0	351.22	100
Σενάριο 15	0.0239	0.0239	0.0239	0	329.20	100
Σενάριο 16	0.0239	0.0239	0.0239	0	378.11	100

Από τον Πίνακα 6.91 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 30 και 30 αντίστοιχα (Σενάριο 15), καθώς με αυτό το συνδυασμό επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (329.20 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 30 και το όριο ίσο με 30, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.92.

Υλοποιώντας τα σενάρια 17 έως 20 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.93.

Πίνακας 6.92: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
17	30	30	40
18	30	30	50
19	30	30	60
20	30	30	80

Πίνακας 6.93: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 2

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 17	0.0239	0.0239	0.0239	0.0000000011702	188.81	100
Σενάριο 18	0.0239	0.0239	0.0239	0	221.02	100
Σενάριο 19	0.0239	0.0239	0.0239	0	267.39	100
Σενάριο 20	0.0239	0.0239	0.0239	0	329.20	100

Από τον Πίνακα 6.93 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 50 (Σενάριο 18), καθώς τότε έχουμε τη μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (221.02 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 2 είναι:

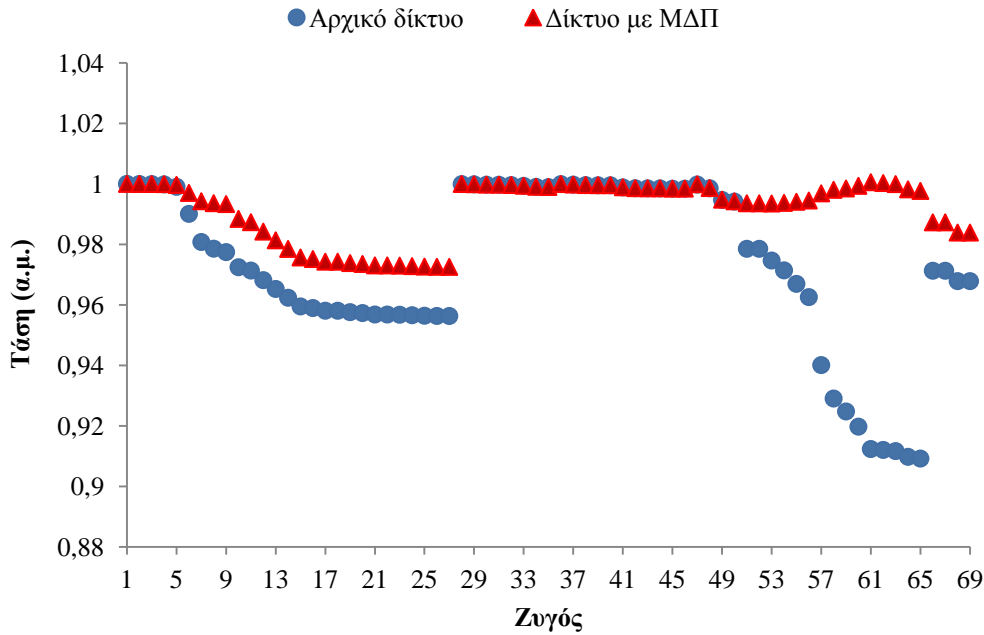
- Μέγεθος αποικίας : 30
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 30
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 50

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.94:

Πίνακας 6.94: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 2

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
61	1.9043	0.85

Στο Σχήμα 6.19 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 61.



Σχήμα 6.19 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 69 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ στην περίπτωση 2.

3^η περίπτωση: Εισαγωγή μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης.

Στην τρίτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή μιας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή αντιστάθμισης στο δίκτυο των 69 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 21 έως 26 που φαίνονται στον Πίνακα 6.95. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.96.

Πίνακας 6.95: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
21	50	25	80
22	50	50	80
23	50	75	80
24	60	30	80
25	60	60	80
26	60	90	80

Πίνακας 6.96: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 21	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000848	486.63	100
Σενάριο 22	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	498.44	100
Σενάριο 23	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	582.21	100
Σενάριο 24	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	592.25	100
Σενάριο 25	0.0184	0.0184	0.0184	0.0000068747	589.48	100
Σενάριο 26	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	589.59	100

Από τον Πίνακα 6.96 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 50 και 50 αντίστοιχα (Σενάριο 22), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (498.44 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 50 και το όριο ίσο με 50, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.97.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.98.

Πίνακας 6.97: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
27	50	50	40
28	50	50	50
29	50	50	60
30	50	50	80

Πίνακας 6.98: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 27	0.0184	0.0186	0.0184	0.000075394	249.29	80
Σενάριο 28	0.0184	0.0184	0.0184	0.0000020696	311.69	100
Σενάριο 29	0.0184	0.0184	0.0184	0.00000044275	374.16	100
Σενάριο 30	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	498.44	100

Από τον Πίνακα 6.98 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 30), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή με το μικρότερο χρόνο εκτέλεσης (498.44 s).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 3 είναι:

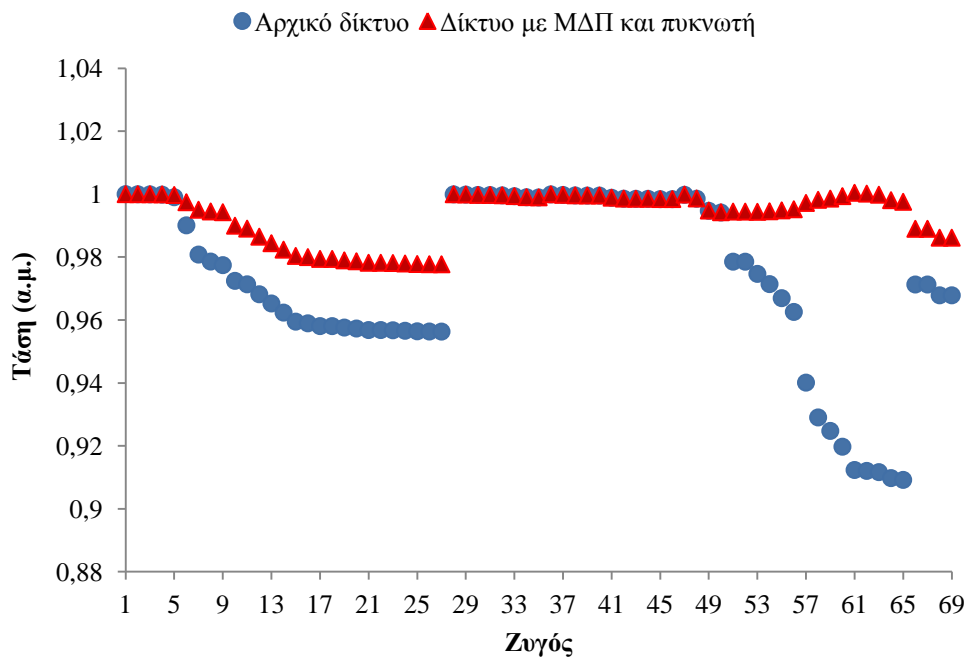
- Μέγεθος αποικίας : 50
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 50
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.99:

Πίνακας 6.99: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και ενός πυκνωτή στο δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)	Ζυγός τοποθέτησης πυκνωτή	Βέλτιστο μέγεθος πυκνωτή (MVar)
61	1.8748	0.85	17	0.38

Στο Σχήμα 6.20 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση της ΜΔΠ στο ζυγό 61 και του πυκνωτή στο ζυγό 17.



Σχήμα 6.20 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 69 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση ΜΔΠ και πυκνωτή στην περίπτωση 3.

4^η περίπτωση: Εισαγωγή δύο ΜΔΠ.

Στην τέταρτη περίπτωση επιλέγεται η εισαγωγή δύο ΜΔΠ χωρίς επιπλέον περιορισμούς στο δίκτυο των 69 ζυγών. Για την επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεγέθους αποικίας και ορίου θεωρούνται τα σενάρια 31 έως 36 που φαίνονται στον Πίνακα 6.100. Υλοποιώντας τα σενάρια για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.101.

Πίνακας 6.100: Σενάρια για την επιλογή κατάλληλου μεγέθους αποικίας και ορίου για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
31	50	25	80
32	50	50	80
33	50	150	80
34	60	30	80
35	60	60	80
36	60	180	80

Πίνακας 6.101: Επίδραση μεγέθους αποικίας και ορίου για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 31	0.0079	0.0079	0.0079	0.00001796300	462.57	100
Σενάριο 32	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000732870	488.02	100
Σενάριο 33	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000669080	494.59	100
Σενάριο 34	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000084968	567.81	100
Σενάριο 35	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000212190	564.82	100
Σενάριο 36	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000339870	642.21	100

Από τον Πίνακα 6.101 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα οι διάφοροι συνδυασμοί δεν επηρεάζουν τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή μεγέθους αποικίας και ορίου είναι 60 και 30 αντίστοιχα (Σενάριο 34), καθώς με αυτό το συνδυασμό έχουμε την μικρότερη τυπική απόκλιση με το μικρότερο δυνατό χρόνο εκτέλεσης (567.81 s).

Κρατώντας σταθερό το μέγεθος της αποικίας και ίσο με 60 και το όριο ίσο με 30, διερευνάται ποιος είναι ο βέλτιστος MCN του αλγόριθμου. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούνται τα σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 6.102.

Υλοποιώντας τα σενάρια 27 έως 30 στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.103.

Πίνακας 6.102: Σενάρια για την επιλογή του κατάλληλου μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Μέγεθος αποικίας	Όριο εξάντλησης βελτίωσης λύσης	Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων
37	60	30	40
38	60	30	50
39	60	30	60
40	60	30	80

Πίνακας 6.103: Επίδραση μέγιστου αριθμού ανακυκλώσεων για 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 4

Σενάριο	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
Σενάριο 37	0.0079	0.0090	0.0081	0.00032730	312.27	50
Σενάριο 38	0.0079	0.0084	0.0080	0.00016476	384.51	50
Σενάριο 39	0.0079	0.0082	0.0080	0.000073668	472.18	90
Σενάριο 40	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000084968	567.81	100

Από τον Πίνακα 6.103 προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο πρόβλημα ο MCN δεν επηρεάζει τη βέλτιστη λύση. Η ιδανικότερη επιλογή MCN είναι 80 (Σενάριο 40), καθώς τότε επιτυγχάνεται η μικρότερη τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή και το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της καλύτερης λύσης (100 %).

Οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου για την περίπτωση 4 είναι:

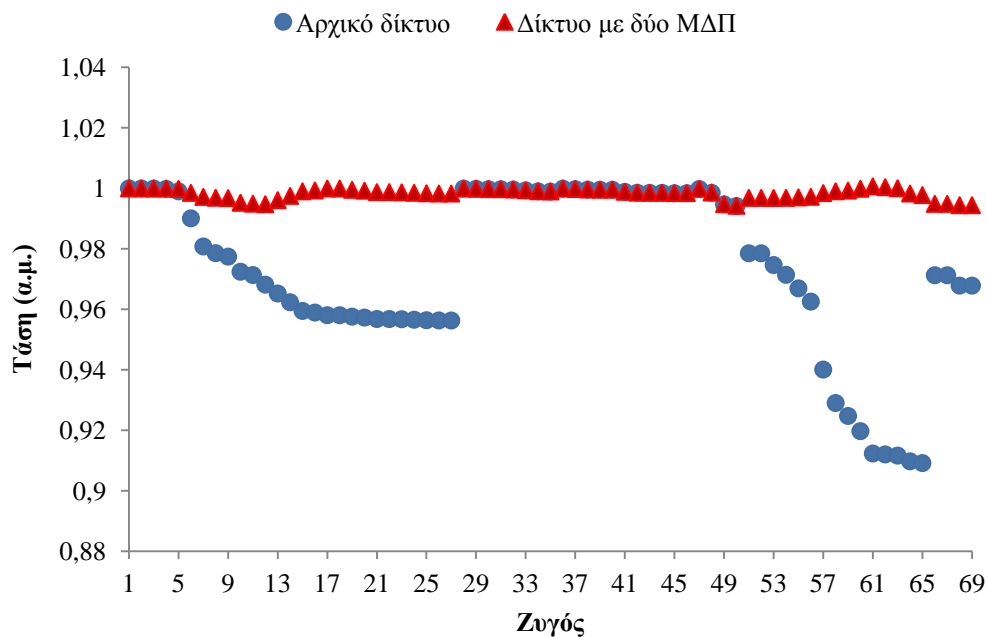
- Μέγεθος αποικίας : 60
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 30
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Η βέλτιστη λύση που προκύπτει μετά την εκτέλεση του αλγόριθμου ABC, επιλέγοντας τις παραπάνω παραμέτρους, φαίνεται στον Πίνακα 6.104:

Πίνακας 6.104: Βέλτιστη λύση για εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 4

Ζυγός τοποθέτησης ΜΔΠ	Βέλτιστη παραγωγή ΜΔΠ (MW)	Συντελεστής ισχύος (ΣΙ)
17	0.5354	0.85
61	1.8087	0.85

Στο Σχήμα 6.21 φαίνεται η βελτίωση του μέτρου της τάσης των ζυγών μετά την εγκατάσταση των ΜΔΠ στους ζυγούς 17 και 61 αντίστοιχα.



Σχήμα 6.21 : Η τάση των ζυγών του δικτύου 69 ζυγών, πριν και μετά την εγκατάσταση δύο ΜΔΠ στην περίπτωση 4.

6.5.3 Διερεύνηση της επίδρασης των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών στο δίκτυο των 69 ζυγών

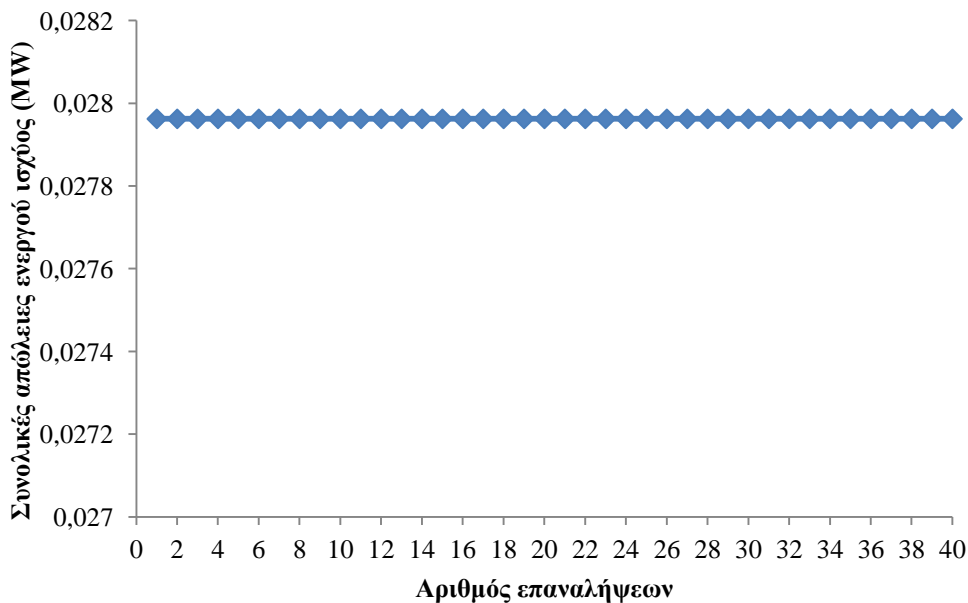
Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα αν εκτελεστεί ο αλγόριθμος ABC πολλαπλές φορές. Αρχικά θα επιλυθεί το πρόβλημα της περίπτωσης 1 για 40 ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου, χωρίς δηλαδή να εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Για τις ανωτέρω ανεξάρτητες διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στην Ενότητα 6.5.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 30
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 30
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 40

Από τις δοκιμές που έγιναν βρέθηκε η βέλτιστη λύση, η οποία είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.89, με ποσοστό επιτυχίας 100%. Στον Πίνακα 6.105 φαίνονται τα αποτελέσματα των πολλαπλών εκτελέσεων. Στην προτελευταία στήλη του φαίνεται ο χρόνος που χρειάστηκε για το σύνολο των εκτελέσεων. Στο Σχήμα 6.22 φαίνονται οι συνολικές απώλειες του δικτύου των 33 ζυγών, σε σχέση με τις εκτελέσεις του αλγόριθμου.

Πίνακας 6.105: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτελέσεων αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
40	0.0280	0.0280	0.0280	0.0000000029306	646.13	100



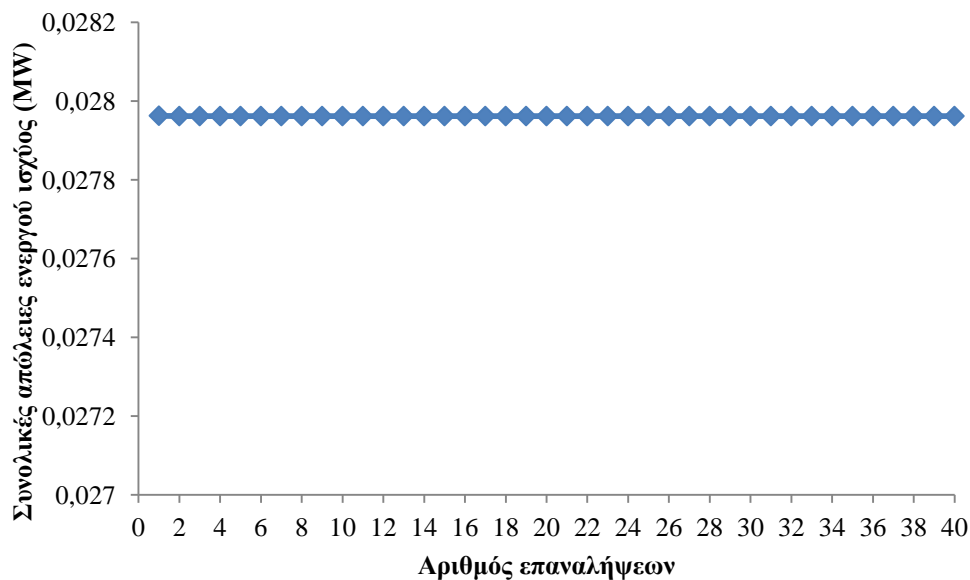
Σχήμα 6.22: Συνολικές απώλειες του δικτύου των 69 ζυγών στην περίπτωση 1, σε σχέση με τις διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

Στη συνέχεια εκτελείται ο αλγόριθμος για 40 φορές, τώρα όμως εισάγεται στον αρχικό πληθυσμό η καλύτερη λύση των προηγούμενων εκτελέσεων. Η βέλτιστη λύση του προβλήματος βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου και είναι ίδια με αυτή του Πίνακα 6.89.

Όπως φαίνεται από τον παρακάτω Πίνακα, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης είναι 608.20 sec, είναι δηλαδή μειωμένος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης χωρίς την εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση. Αυτό συμβαίνει διότι με τον ερευνώμενο εδώ τρόπο επιτυγχάνεται ταχύτερη σύγκλιση του αλγόριθμου. Επιπλέον το ποσοστό επιτυχίας εύρεσης της βέλτιστης λύσης είναι 100%, διότι η καλύτερη λύση βρέθηκε από την πρώτη εκτέλεση του αλγόριθμου. Στο Σχήμα 6.23 φαίνονται οι συνολικές απώλειες του δικτύου των 69 ζυγών, σε σχέση με τις εκτελέσεις του αλγόριθμου, κατά την εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

Πίνακας 6.106: Αποτελέσματα πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου ABC με εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 1

Αριθμός εκτέλεσης αλγόριθμου	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
	Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
40	0.0280	0.0280	0.0280	0.0000000014593	608.20	100



Σχήμα 6.23: Συνολικές απώλειες του δικτύου των 69 ζυγών στην περίπτωση 1, σε σχέση με τις διαδοχικές εκτελέσεις του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, με εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση.

6.5.4 Διερεύνηση της επίδρασης της αντικειμενικής συνάρτησης στο δίκτυο των 69 ζυγών

Σε αυτή την Ενότητα διερευνάται κατά πόσο επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα επιλύεται το πρόβλημα της περίπτωσης 3 (εγκατάσταση μίας ΜΔΠ και πυκνωτή), στην οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι αρχικά η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου από τη σύνδεση ΜΔΠ και ύστερα η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου από τη σύνδεση ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.107. Για τις εκτελέσεις του αλγόριθμου ABC χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες παράμετροι του αλγόριθμου, όπως αυτές υπολογίστηκαν στην Ενότητα 6.5.2, δηλαδή:

- Μέγεθος αποικίας : 50
- Όριο εξάντλησης βελτίωσης της λύσης: 50
- Μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων: 80

Από τον Πίνακα 6.107 προκύπτει ότι όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ, παρατηρείται ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος μεγαλύτερη από την ποσοστιαία μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου. Αντίθετα, όταν επιλεγεί ως αντικειμενική συνάρτηση η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ στο δίκτυο, το συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h) για τον διαχειριστή θα είναι ελαφρώς αυξημένο σε σχέση με αυτό όταν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ. Τα αποτελέσματα αυτά είναι φυσιολογικά, καθώς όταν ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση του χρηματικού κινήτρου είναι λογικό να αναμένεται μεγαλύτερο συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h), δηλαδή κέρδος για τον διαχειριστή, και μικρότερη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος σε σχέση με την περίπτωση που τίθεται σαν στόχος η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος.

Πίνακας 6.107: Αποτελέσματα εκτέλεσης ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση για το δίκτυο των 69 ζυγών στην περίπτωση 3

Αντικειμενική συνάρτηση	Ελαχιστοποίηση απωλειών ενεργού ισχύος	Μεγιστοποίηση χρηματικού κινήτρου
Βέλτιστη λύση	ΜΔΠ: 1.8748 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 Πυκνωτής : 0.38 MVAγ στο ζυγό 17	ΜΔΠ: 1.9170 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 Πυκνωτής : 0.37 MVAγ στο ζυγό 17
Χρηματικό κίνητρο σύνδεσης ΜΔΠ (\$/h)	0.6934	0.7090
Χρηματικό κίνητρο μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (\$/h)	20.0834	20.0755
Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	20.7768	20.7845
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου πριν την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.2250	0.2250
Απώλειες ενεργού ισχύος του δικτύου μετά την εισαγωγή ΜΔΠ (MW)	0.0184	0.0185
Μείωση απωλειών ενεργού ισχύος (%)	91.8292	91.7930
Συνολική διείσδυση της ΔΠ στο δίκτυο (%)	49.31	50.42
Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)	3 037 225	3 105 475

6.5.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο των 69 ζυγών

Συνδυάζοντας τον αριθμό των ΜΔΠ που θα εισαχθούν, την εγκατάσταση ή όχι πυκνωτή κατά την επιλογή εισαγωγής μίας ΜΔΠ και τους διάφορους περιορισμούς (σταθερός συντελεστής ισχύος, περιορισμένο διαθέσιμο κεφάλαιο, περιορισμός στο ποσοστό διείσδυσης, στη θέση που θα εγκατασταθεί ΜΔΠ), μπορούν να προκύψουν διάφορες περιπτώσεις δοκιμών εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο, πέραν αυτών που μελετήθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από ορισμένες ενδεικτικές περιπτώσεις εγκατάστασης ΜΔΠ. Οι παράμετροι εισόδου των περιπτώσεων φαίνονται στον Πίνακα 6.108. Εκτελώντας τον αλγόριθμο 10 ανεξάρτητες φορές (χωρίς εισαγωγή της καλύτερης λύσης στην επόμενη εκτέλεση) για κάθε περίπτωση στο λογισμικό και θέτοντας σαν αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτουν τα αποτελέσματα που φαίνονται στον Πίνακα 6.109.

Πίνακας 6.108: Παράμετροι εισόδου για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 69 ζυγών

Περίπτωση	Μέγεθος αποικίας	Όριο	Μεγ. αριθμός ανακυκλώσεων	Αριθμός ΜΔΠ	Εισαγωγή πυκνωτή	Συντελεστής ισχύος	Διαθέσιμο κεφάλαιο (\$)	Ποσοστό διείσδυσης (%)	Αποκλειόμενοι ζυγοί
1	30	30	40	1	ΟΧΙ	0.9	–	–	–
2	30	30	50	1	ΟΧΙ	–	–	60	–
3	50	50	80	1	ΝΑΙ	–	–	–	–
4	60	30	80	2	ΟΧΙ	–	–	–	–
5	30	30	50	1	ΟΧΙ	–	2 430 000	–	61 , 4
6	60	30	50	1	ΝΑΙ	1.0	–	–	–
7	70	140	110	3	ΟΧΙ	0.85	–	–	–
8	90	225	200	5	ΟΧΙ	0.85	–	–	–

Πίνακας 6.109: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 69 ζυγών

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικές απώλειες ενεργού ισχύος (MW)				Συνολικός χρόνος (s)	Επίτευξη καλύτερης τιμής (%)
		Καλύτερη τιμή	Χειρότερη τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση		
1	ΜΔΠ: 1.9955 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.9	0.0280	0.0280	0.0280	0	184.30	100
2	ΜΔΠ: 1.9043 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85	0.0239	0.0239	0.0239	0	221.02	100
3	ΜΔΠ: 1.8748 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 Πυκνωτής: 0.38 MVA _r στο ζυγό 17	0.0184	0.0184	0.0184	0.000000000036	498.44	100
4	ΜΔΠ 1: 0.5354 MW στο ζυγό 17 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 1.8087 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85	0.0079	0.0079	0.0079	0.00000084968	567.81	100
5	ΜΔΠ: 1.500 MW στο ζυγό 62 με ΣΙ 0.85	0.0328	0.0328	0.0328	0.00000000000000007314	242.56	100
6	ΜΔΠ: 1.8286 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 1.30 MVA _r στο ζυγό 61	0.0232	0.0232	0.0232	0	241.27	100
7	ΜΔΠ 1: 1.7493 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.3914 MW στο ζυγό 18 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.5288 MW στο ζυγό 11 με ΣΙ 0.85	0.0050	0.0054	0.0051	0.00013840	1152.17	50
8	ΜΔΠ 1: 1.4413 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.7308 MW στο ζυγό 50 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.3022 MW στο ζυγό 64 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.5731 MW στο ζυγό 11 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 5: 0.3526 MW στο ζυγό 21 με ΣΙ 0.85	0.0020	0.0024	0.0022	0.00024442	1427.42	40

Πίνακας 6.109: Αποτελέσματα 10 ανεξάρτητων εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών για κάθε περίπτωση για το δίκτυο των 69 ζυγών (συνέχεια)

Περίπτωση	Βέλτιστη λύση	Συνολικό χρηματικό κίνητρο (\$/h)	Ποσοστό μείωσης απωλειών ενεργού ισχύος (%)	Ποσοστό διείσδυσης ΜΔΠ (%)	Συνολικό κόστος επένδυσης (\$)
1	ΜΔΠ: 1.9955 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.9	19.8905	87.57	52.48	3 232 678
2	ΜΔΠ: 1.9043 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85	20.2549	89.39	50.08	3 084 982
3	ΜΔΠ: 1.8748 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 Πυκνωτής: 0.38 MVA _r στο ζυγό 17	20.7768	91.83	49.31	3 037 225
4	ΜΔΠ 1: 0.5354 MW στο ζυγό 17 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 1.8087 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85	21.9668	96.48	61.65	3 797 442
5	ΜΔΠ: 1.500 MW στο ζυγό 62 με ΣΙ 0.85	19.2360	85.42	39.45	2 430 000
6	ΜΔΠ: 1.8286 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 1.0 Πυκνωτής: 1.30 MVA _r στο ζυγό 61	20.2945	89.70	48.09	2 962 316
7	ΜΔΠ 1: 1.7493 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.3914 MW στο ζυγό 18 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.5288 MW στο ζυγό 11 με ΣΙ 0.85	22.3707	97.77	70.21	4 324 590
8	ΜΔΠ 1: 1.4413 MW στο ζυγό 61 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 2: 0.7308 MW στο ζυγό 50 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 3: 0.3022 MW στο ζυγό 64 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 4: 0.5731 MW στο ζυγό 11 με ΣΙ 0.85 ΜΔΠ 5: 0.3526 MW στο ζυγό 21 με ΣΙ 0.85	22.9328	99.11	89.42	5 508 047

6.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, *New York: McGraw-Hill*, pp. 255-269, 1993.
- [6.2] Κ. Βουρνάς, και Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, *Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π.*, 2001.
- [6.3] H. Saadat, “Power System Analysis, second edition”, *New York: McGraw-Hill*, pp. 200-212, 232-240, 1999.
- [6.4] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, “MATPOWER 4.1 - A MATLAB Power System Simulation Package, User’s Manual”, Cornell Univ., Shc. Elect. Eng., Ithaca, NY, 2010. [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/manual.pdf>, προσπελάστηκε τον Ιούνιο 2012.
- [6.5] G. P. Harrison, A. Piccolo, P. Siano, A. R. Wallace, “Hybrid GA and OPF evaluation of networks capacity for distributed generation connections”, *Electric Power System Research*, vol. 78, pp. 392-398, 2008.
- [6.6] M. E. El-Hawary, “Electrical Power Systems: Design and Analysis”, *IEEE Press Power Systems Eng. Ser.*, *New York: Wiley*, 1995.
- [6.7] M. E. El-Hawary, F. S. Abu-Mouti, “Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing in Distribution Systems via Artificial Bee Colony Algorithm”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 2090–2101, 2011.
- [6.8] R. Srinivasa Rao, “Capacitor Placement in Radial Distribution System for Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm”, *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 4 number 2, pp. 84-88, 2010.
- [6.9] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon, M. I. Buhari, “A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks”, *International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 251 – 256, London, 2000.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Η πρόοδος της τεχνολογίας και η επιθυμία των πελατών για φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια έχει οδηγήσει σε αύξηση του ενδιαφέροντος στον τομέα της διεσπαρμένης παραγωγής. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΜΔΠ) σε ακτινικά δίκτυα διανομής, με τη χρήση του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών, ενώ αναπτύχθηκε λογισμικό για την επίλυση του προβλήματος σε περιβάλλον MATLAB.

Ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών ανήκει στην κατηγορία των μεθυστικών αλγόριθμων, βασίζεται στην ευφυή συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι μέλισσες σε μια κυψέλη κατά την αναζήτηση τροφής και χρησιμοποιείται για την επίλυση διάφορων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στην Εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με την ανάλυση ροών φορτίου, σύμφωνα με τη μέθοδο Newton-Raphson, για τον βέλτιστο καθορισμό της θέσης, του μεγέθους και του συντελεστή ισχύος (ΣΙ) των ΜΔΠ που πρόκειται να εισαχθούν σε ένα δίκτυο διανομής.

Ο στόχος της βελτιστοποίησης διαφέρει ανάλογα με την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου είτε το συνολικό οικονομικό κίνητρο του διαχειριστή του δικτύου διανομής, όπως αυτό ορίζεται από την ισχύουσα νομοθεσία.

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε λογισμικό σε περιβάλλον MATLAB. Στο λογισμικό αυτό αναπτύχθηκε επιπλέον γραφικό περιβάλλον (GUI), φιλικό προς το χρήστη, για την ευκολότερη εισαγωγή των δεδομένων, την επίλυση του προβλήματος και την εξαγωγή και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Το λογισμικό παρουσιάστηκε στην αρχή σε ένα δίκτυο 4 ζυγών σαν αριθμητικό παράδειγμα και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε 3 δίκτυα διανομής 15, 33 και 69 ζυγών, όπου μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις, ανάλογα με τους περιορισμούς που τέθηκαν κάθε φορά στα προβλήματα. Ορισμένες περιπτώσεις ομαδοποιήθηκαν και έγινε διερεύνηση των βέλτιστων παραμέτρων του αλγόριθμου σε κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση των πολλαπλών εκτελέσεων του αλγόριθμου τεχνητής αποικίας μελισσών και της αντικειμενικής συνάρτησης στα αποτελέσματα.

Από τα αποτελέσματα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, προκύπτει ότι ο αλγόριθμος έχει υψηλά ποσοστά εύρεσης της καλύτερης λύσης, ενώ συγκλίνει σε σχετικά μικρό αριθμό ανακυκλώσεων (MCN), δίνοντας το βέλτιστο αποτέλεσμα σε σημαντικά χαμηλό συνολικό χρόνο εκτέλεσης. Επιπλέον, μετά από 10 ανεξάρτητες εκτελέσεις του αλγόριθμου σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται ότι η τυπική απόκλιση είναι σχετικά μικρή και σε αρκετές περιπτώσεις μηδενική.

Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, παρατηρείται μεγάλη μείωση των απωλειών ισχύος που επιτυγχάνεται μετά την προσθήκη ΜΔΠ, καθώς επίσης και σημαντική βελτίωση της τάσης των ζυγών. Όσο αυξάνεται η διείσδυση της ΔΠ στο δίκτυο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος και αύξηση του οικονομικού κινήτρου αντίστοιχα. Το ποσοστό εύρεσης της καλύτερης λύσης μειώνεται με την αύξηση των ΜΔΠ που πρόκειται να συνδεθούν σε ένα δίκτυο, ενώ το ποσοστό είναι ακόμα μικρότερο όσο αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου, αφού προκύπτουν περισσότεροι δυνατοί συνδυασμοί ζυγών τοποθέτησης.

Όταν επιλεγεί σαν αντικειμενική συνάρτηση η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, προκύπτει μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης των απωλειών ισχύος και μικρότερο συνολικό οικονομικό κίνητρο, σε σχέση με την επιλογή της μεγιστοποίησης του οικονομικού κινήτρου σαν αντικειμενική συνάρτηση. Ωστόσο, οι διαφορές που προκύπτουν σε αυτές τις τιμές είναι αρκετά μικρές, διότι στην αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης του οικονομικού κινήτρου, η τιμή του οικονομικού κινήτρου ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος (C_{LOSS}) είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν της εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο (C_{DG}).

Όσο πιο πολύπλοκο είναι το πρόβλημα βελτιστοποίησης (αύξηση αριθμού ζυγών, αύξηση ΜΔΠ που προστίθενται, εισαγωγή πυκνωτή, κλπ.), τόσο αυξάνονται το μέγεθος της αποικίας (CS), το όριο (limit) και ο μέγιστος αριθμός ανακυκλώσεων (MCN) του αλγόριθμου. Σε αντίθεση με άλλους μεθυστικούς αλγόριθμους, ο αλγόριθμος τεχνητής αποικίας μελισσών έχει μόνο τρεις παραμέτρους που πρέπει να ρυθμιστούν (CS, limit, MCN). Επομένως, ο προσδιορισμός της κατάλληλης τιμής των παραμέτρων για τη μέγιστη αποδοτικότητα του αλγόριθμου, έχει μεγαλύτερη πιθανότητα επιτυχίας σε σχέση με άλλες μεθόδους, που έχουν περισσότερες παραμέτρους ελέγχου.

7.2 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι υπολογισμοί για τη μέγιστη χωρητικότητα των ΜΔΠ που θα συνδεθούν στο δίκτυο διανομής γίνονται στο στιγμιότυπο της καμπύλης φορτίου, όπου παρατηρείται η χαμηλότερη ζήτηση, καθώς σε αυτήν την περίπτωση θα έχουμε την μεγαλύτερη ανύψωση τάσης. Καθώς η ζήτηση του φορτίου δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, μια πρώτη επέκταση της εργασίας θα μπορούσε να είναι η θεώρηση περισσότερων σεναρίων φόρτισης, όπως για παράδειγμα η αύξηση της ζήτησης του φορτίου κατά 50%.

Επιπλέον, τα μεγέθη των ΜΔΠ, του πυκνωτή και ο ΣΙ θα μπορούσαν να λαμβάνουν διακριτές, αντί για συνεχείς τιμές. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα θα αντιστοιχούσαν σε πραγματικά, διαθέσιμα μεγέθη ΜΔΠ και πυκνωτών, ενώ πιθανώς θα προέκυπτε σε λιγότερο χρόνο μεγαλύτερη επιτυχία εύρεσης της καλύτερης λύσης κατά την προσθήκη πολλαπλών ΜΔΠ σε ένα δίκτυο.

Τέλος, η πιο σημαντική επέκταση που μπορεί να υλοποιηθεί είναι η χρησιμοποίηση διαφορετικής οικονομικής αντικειμενικής συνάρτησης. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί δηλαδή να τροποποιηθεί μέσω μιας οικονομικής ανάλυσης, στην οποία λαμβάνονται υπόψη το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης των ΜΔΠ και των αποθηκευτικών μέσων που είναι εγκατεστημένα στο δίκτυο, ώστε ο τελικός σκοπός να είναι η ελαχιστοποίηση των οικονομικών δαπανών, επομένως και του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας.