



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΣΕΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ
ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΥΡΕΤΙΚΟΥ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χατζηγεωργίου Δημήτριος

Επίβλεψη : Κανέλλος Φώτιος , Λέκτορας Π.Κ.

Χανιά 2015

.....
Χατζηγεωργίου Δημήτριος
Διπλωματούχος Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης.

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 το συγγραφέα.

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

*Αφιερώνεται στους γονείς μου,
σε όσους με αγαπούν και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.*

Ευχαριστίες

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ.Κανέλλο για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε μέσω της βοήθειας που μου παρείχε. Τους γονείς μου για τη υπομονή και τη στήριξή τους και τέλος την Ελευθερία για την καλοσύνη και τη φιλοξενία της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθώς η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια συνεχώς αυξάνεται, τα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι οι απώλειες και η υπερφόρτωση που παρουσιάζονται μέσω των γραμμών μεταφοράς, οι περιβαντολογικές επιπτώσεις κλπ. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να λυθούν με την εισαγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής στα ΣΗΕ. Για μέγιστη αξιοπιστία, τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα και οφέλη, το σωστό μέγεθος, η χωρητικότητα των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, η σειρά τοποθέτησης τέτοιων μονάδων, η σωστή τους κατανομή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ο τύπος σύνδεσης με το δίκτυο, ο τύπος μονάδας και η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί είναι ιδιαίτερα κρίσιμης σημασίας. Από όλους τους παραπάνω παράγοντες σημαντικότερο ρόλο παίζει η τοποθέτηση των μονάδων και η σωστή διαστασιολόγησή τους. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα γίνεται η εισαγωγή μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε δίκτυο 69 ζυγών. Στις δύο αυτές περιπτώσεις γίνεται μια ανάλυση δυνατότητας θέτοντας προς ελαχιστοποίηση μια συνάρτηση κόστους η οποία αντιπροσωπεύει το κόστος επένδυσης σε €/kw. Στην συγκεκριμένη διπλωματική γίνεται αναφορά σε διάφορες μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την επίλυση τέτοιου είδους προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η μέθοδος Newton-Raphson (N-R) χρησιμοποιείται για την ανάλυση της ροής φορτίου.

Επικουρικά με τη (N-R) εφαρμόζεται η βασική μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων Particle Swarm Optimization (PSO) για την εύρεση της βέλτιστης θέσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση 69 ζυγών.

Για την επίλυση του προβλήματος που περιεγράφηκε χρησιμοποιούνται αρκετές μορφές του αλγορίθμου PSO. Στη συγκεκριμένη ανάλυση λαμβάνονται υπόψη τα όρια του μεγέθους των μονάδων παραγωγής, ο τύπος του ζυγού στον οποίο είναι τοποθετημένη η μονάδα κλπ. Το προφίλ της τάσης και η υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς είναι επίσης σχετικά με τέτοιου είδους προβλήματα. Τέλος παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Διεσπαρμένη Παραγωγή, Ηλεκτρική Ενέργεια, Ροή Φορτίου, Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

ABSTRACT

As the demand of electricity consumption increases, conventional power system leads to several disadvantages like considerable amount of transmission loss, transmission line congestion, increasing environmental impact etc. These problems can be solved by the introduction of Distributed Generation (DG). For maximum reliability, technical and economic advantages and benefits, proper sizing or capacity of distributed generators, number of such units, its proper allocation in the power systems, types of network connection, types of generating unit and technology to be used etc. are very important. Among these factors, the problem of installation of DG units at proper location and sizing is of great importance. In this proposed method, DGs are installed in the standard IEEE 69 bus network system and feasibility analysis is being done by minimizing the cost of an objective function that represent the cost of investment of DG's in €/kw. This work also presents a critical review of different methodologies employed in solving these optimization problems. Initially optimal sizing and location of a single DG is obtained and with the help of Newton-Raphson (N-R) method, the power flow equation is solved.

A basic Particle Swarm Optimization (PSO) technique is applied to find the optimum value of size of DGs and its optimal location. This technique is applied on IEEE 69 bus network system.

Different types of improved version of PSO are used to solve the above problem. In this analysis, problems have been closely analyzed considering the limits of generators size, the type of bus DG is placed on. Voltage profile and transmission line congestion problems have also been incorporated with these problems. Finally comparative simulation result is presented.

KEYWORDS

Distributed Generation, Electric Power, Power Flow, Particle Swarm Optimization Algorithm, Optimization Methods

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 :	<u>ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)</u>	10
1.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ (ΣΗΕ)	10
1.1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1.2	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΗΕ	11
1.1.3	ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	11
1.2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 :	<u>ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΔΠ)</u>	16
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2.2	ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	17
2.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ..	18
2.3.1	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	18
2.3.2	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	21
2.4	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 :	<u>ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΡΦ)</u>	23
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
3.2	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΡΟΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ	24
3.3	ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON – RAPHSON	27
3.4	ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	33
3.4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
3.4.2	Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	34
3.4.3	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	34
3.5	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	<u>ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΜΔΠ) ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ</u>	42
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	42
4.2	ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	43
4.3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: <u>ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (Particle Swarm Optimization-PSO)</u>	46
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	46
5.1.1 ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΣΜΗΝΩΝ	46
5.1.2 ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	47
5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ – PSO	48
5.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ	53
5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: <u>ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PSO – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ</u>	55
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
6.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	56
6.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ MATPOWER	56
6.2.2 ΔΙΑΝΥΣΜΑ PSO ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	59
6.2.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ.....	60
6.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: <u>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΠ</u>	64
7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	64
7.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ 69 ΖΥΓΩΝ	65
7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	67
7.3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΔΙΑΝΥΣΜΑ	67
7.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	68
7.3.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	71
7.4 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	72

ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

1.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ (ΣΗΕ)

1.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

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 αποθηκευτεί 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 έχει γίνει μια ανάπτυξη στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας 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 υπερύψηλης 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 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.

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.

1.1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΗΕ

Ο σκοπός ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια εξυπηρετούμενη περιοχή καταναλώσεως. Το σύστημα αυτό πρέπει να έχει μελετηθεί λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους ώστε να είναι ικανό να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η ζήτηση πραγματικής και άεργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο, και το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.
- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες συνιστούν την ποιότητα αυτή: 1) σταθερή συχνότητα. 2) σταθερή τάση, 3) υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.[1.1]

1.1.3 ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1.3.1 ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΣΗΕ

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από απόψεως εκτάσεως μπορούν να διακριθούν σε «Εθνικά Συστήματα», «Περιφερειακά Συστήματα» και «Ιδιωτικά Συστήματα» εφόσον αντίστοιχα καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής, ή τις ανάγκες μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος. Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιδιότητα, η οποία χαρακτηρίζει κυρίως τη δομή του συστήματος είναι το μέγεθος του συστήματος. Η δομή και η σύνθεση του συστήματος εξαρτώνται από το μέγεθος αυτού.

1.1.3.2 ΕΙΔΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΗΕ

Οι μονάδες των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιότητες τη χρησιμότητά τους, τη διακύμανση της ζήτησης, την τεχνολογία και κυρίως τα καύσιμα που χρησιμοποιούν. Οι μονάδες παραγωγής επίσης διακρίνονται σε αργοκίνητες ή μονάδες βάσης και στις μονάδες αιχμής. Πιο συγκεκριμένα διακρίνονται τρεις κατηγορίες σταθμών παραγωγής, οι **θερμοηλεκτρικοί** σταθμοί παραγωγής, οι **υδροηλεκτρικοί** σταθμοί και τέλος οι **Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ)** η λεγόμενη καθαρή ενέργεια.

Θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής

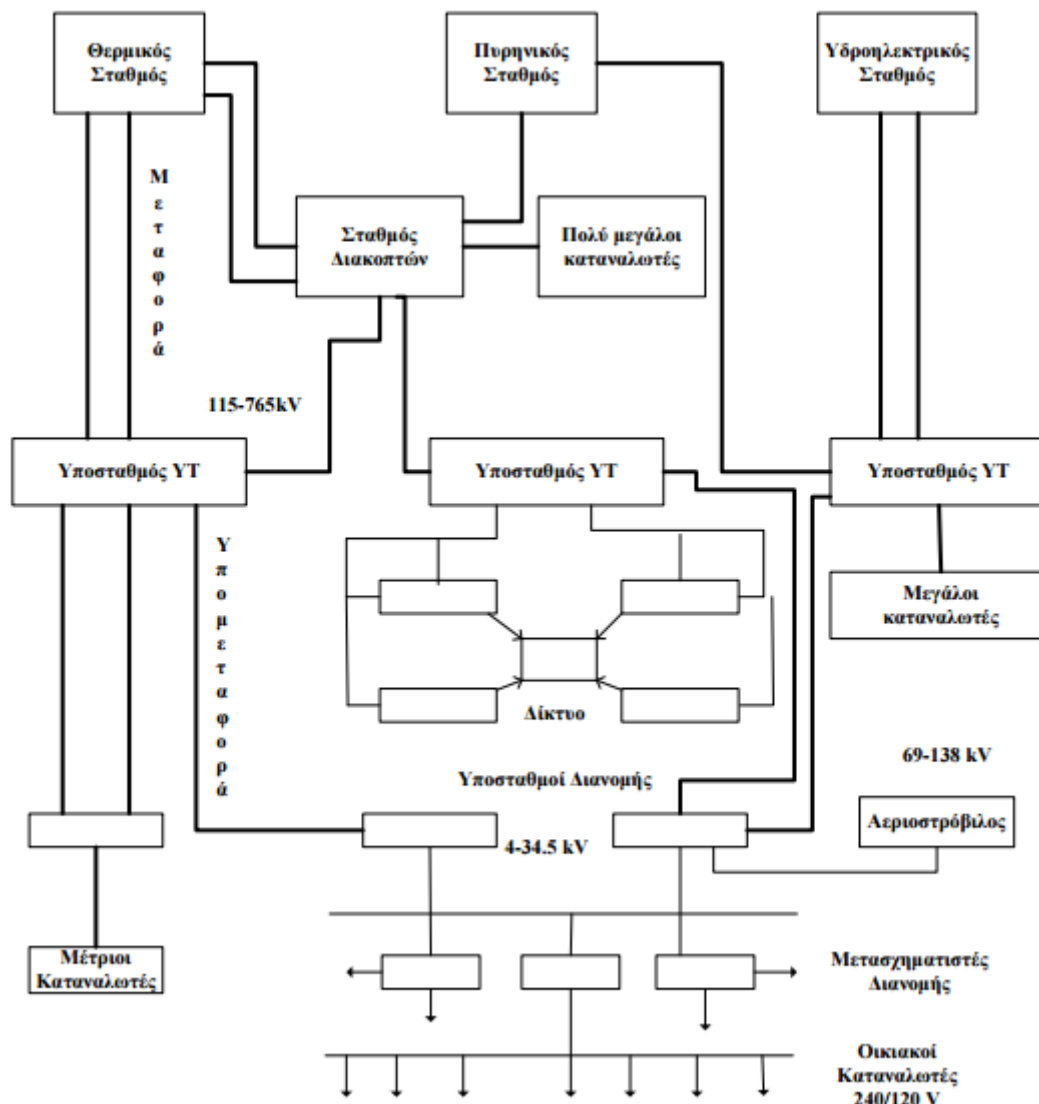
- **Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί:** Χρησιμοποιούν ως καύσιμο συμβατικά προϊόντα καύσης όπως είναι λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη, μαζούτ και φυσικό αέριο. Στην Ελλάδα γίνεται ιδιαίτερη χρήση λιγνίτη λόγω αυθωνείας και μικρού κόστους ανά παραγόμενο kw. Έχουν βαθμό απόδοσης 30-45% ενώ είναι αρκετά αργοκίνητες μονάδες που σημαίνει ότι απαιτείται μεγάλος χρόνος και πολύπλοκη διαδικασία για την έναρξή τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ως μονάδες βάσης. Ο παραγόμενος ατμός από την καύση κινεί τον ατμοστρόβιλο που μπορεί να αποτελείται από πολλές βαθμίδες (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης) και ο οποίος στη συνέχεια κινεί την ηλεκτρογεννήτρια.[1.3]
- **Αεριοστροβιλικόι σταθμοί:** Χρησιμοποιεί πεπιεσμένο αέρα και καύσιμο, συνήθως φυσικό αέριο ή πετρέλαιο. Ο ατμοσφαιρικός αέρας αφού συμπιεστεί στα 10bar περίπου, οδηγείται στο θάλαμο καύσης που ψεκάζεται με πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Τα αέρια προϊόντα της καύσης θερμοκρασίας περίπου 850°C οδηγούνται στον αεριοστρόβιλο που κινεί την ηλεκτρογεννήτρια. Έχουν βαθμό απόδοσης περίπου στο 25-35% και λόγω της γρήγορης εκκίνησής τους χρησιμοποιούνται ως μονάδες αιχμής για κάλυψη φορτίων αιχμής.[1.3]
- **Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (combined cycle):** Οι σταθμοί αυτοί είναι συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Μια συνηθισμένη διάταξη είναι η χρήση αεριοστροβιλικών μονάδων ως αρχικών μονάδων καύσης του καυσίμου, των οποίων τα παραγόμενα καυσαέρια υψηλής θερμοκρασίας οδηγούνται σε ένα λέβητα ανακομιδής θερμότητας προς παραγωγή ατμού σε ένα ατμοπαραγωγό.[1.4]
- **Πυρηνικοί σταθμοί:** Ο πυρηνικός σταθμός είναι ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός με τη διαφορά ότι η παραγωγή ατμού γίνεται χρησιμοποιώντας τη θερμική ενέργεια που εκλύεται από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται μίγμα ουρανίου U_{235} και άλλων ισοτόπων του.[1.4]

Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής

- **Φυσικής ροής:** Χρησιμοποιούν ως πρωτογενή μορφή ενέργειας το διερχόμενο υδάτινο ρεύμα (ροή ποταμού)
- **Ρυθμιζόμενης ροής:** Χρησιμοποιούν σαν καύσιμο το νερό το οποίο συλλέγεται σε ταμιευτήρες (τεχνητές λίμνες-φράγματα), ώστε να δημιουργείται υψομετρική διαφορά με σκοπό την εκμετάλλευση της δυναμικής ενέργειας του νερού. Το νερό διέρχεται μέσα από υδροστροβίλους οι οποίοι με την περιστροφική τους κίνηση παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω ενός στάτορα. Τα φράγματα που χρησιμοποιούνται είναι είτε φράγματα σκυροδέματος, είτε γαιώδη.
- **Υδροαντλητικοί:** Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν όπως και οι ρυθμιζόμενης ροής, με τη διαφορά ότι έχουν δυο φράγματα, ένα σε υψηλότερη και ένα σε χαμηλότερη στάθμη από το σταθμό και χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου για να αντλούν νερό από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη δεξαμενή. [1.4]

Σταθμοί παραγωγής από ΑΠΕ

- **Φωτοβολταϊκοί σταθμοί:** Μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων. Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων (σύνολο φωτοβολταϊκών κυττάρων) και μπορεί να περιλαμβάνει, ανάλογα με τη χρήση, ένα μετατροπέα για τη μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ρυθμιστές τάσης και ρεύματος, διατάξεις ελέγχου και συστοιχίες συσσωρευτών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Αιολικά πάρκα:** Εκμεταλλεύονται τα ρεύματα αέρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν το αιολικό πάρκο.
- **Μικρά υδροηλεκτρικά:** Παράγουν ενέργεια από την φυσική ροή του ποταμού. Κατατάσσονται και στην κατηγορία των ΑΠΕ εκτός από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς για το λόγο ότι δεν διαταράσσουν το οικοσύστημα.
- **Κυψέλες καυσίμου:** Μέσω ηλεκτρόλυσης μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική.
- **Γεωθερμία :** Αξιοποιείται η υψηλή θερμική ενέργεια από τα κατώτερα στρώματα της γης με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Βιομάζα:** Μέσω κατάλληλης επεξεργασίας οργανικών υπολειμμάτων δημιουργούνται καύσιμες ύλες τα λεγόμενα βιοκαύσιμα.



Σχήμα 1.1: Βασικά στοιχεία συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [1.2].

Ειδικότερα σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται τα εξής συστήματα:

- Σύστημα Παραγωγής: Περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής όπου παράγεται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με τους σταθμούς ανυψώσεως της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση.
- Σύστημα Διασυνδέσεως και Μεταφοράς: Περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής.
- Σύστημα Υπομεταφοράς: Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης.

- Σύστημα Διανομής: Περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων η τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση [1.1],[1.2]

1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] Β. Παπαδιά, Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι. Αθήνα, 1995, σελ.1-28
- [1.2] H. Saadat, Power System Analysis, 1st ed., Ed New York: McGraw-Hill, 1999, σελ.4-11 και σελ.208-256
- [1.3] Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας Α.Γ. ΜΠΑΚΙΡΤΖΗ Αναπληρωτής Καθηγητής Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ. Εκδόσεις ΖΗΤΗ Θεσσαλονίκη 1998 σελ. 53-54
- [1.4] Διαφάνειες μαθήματος Ηλεκτρικής Οικονομίας - Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείο Κρήτης.

ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (ΔΠ)

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ΣΗΕ έχουν αναπτυχθεί με γνώμονα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απλό μεγάλες μονάδες και τη μεταφορά αυτής σε μεγάλες αποστάσεις. Η μεταφορά αυτή γίνεται μέσω του δικτύου μεταφοράς απλό τις γραμμές υψηλής και υπερύψηλης τάσης 150kV και 400kV αντίστοιχα, μέχρι το δίκτυο διανομής όπου μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσης, στα 20-22kV περίπου, διανέμεται στους καταναλωτές περνώντας ένα τελευταίο στάδιο υποβιβασμού της τάσης μερί να φτάσει τα 220-230V. Τα υφιστάμενα ΣΗΕ υπάρχουν εδώ και πάρα πολλά χρόνια με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται αναχρονιστικά καθώς αδυνατούν να ανταποκριθούν στις νέες τεχνολογικές, οικονομικές και περιβαλλοντολογικές απαιτήσεις της κοινωνίας.[2.4]

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο επίπεδο της διανομής κάτι που ονομάζουμε Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ). Με αυτό τον τρόπο τα δίκτυα διανομής δεν έχουν πλέον μόνο παθητικό ρόλο τροφοδοτώντας μόνο φορτία αλλά είναι ενεργά με ροές ισχύος που καθορίζονται τόσο απλό την παραγωγή όσο και από τα φορτία. Η διεξόδυση των μονάδων θα πρέπει να γίνεται με τον βέλτιστο τρόπο λαμβάνοντας υπόψιν τεχνικούς περιορισμούς όπως είναι το θερμικό όριο, η στάθμη σφάλματος, η επαρκής υποστήριξη ως προς την τάση του δικτύου κλπ. Τα οικονομικά οφέλη εμφανίζονται κυρίως λόγω του μειωμένου λειτουργικού κόστους, και λόγω των μειωμένων απωλειών στο δίκτυο.

Ιδιαίτερα θα πρέπει να αναφερθούν και τα περιβαλλοντολογικά οφέλη από τη χρήση ΔΠ. Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θέσει μία σειρά απαιτητικών κλιματικών και ενεργειακών στόχων που θα πρέπει να επιτευχθούν ως το 2020. Οι στόχοι αυτοί, γνωστοί στο σύνολό τους ως στόχοι «20-20-20» (Ευρωπαϊκή Στρατηγική 2020), είναι:

- Μείωση κατά 20% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ σε σχέση με τα επίπεδα του 1990.
- Συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20%
- Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της ΕΕ κατά 20%.[2.3]

Η ΔΠ ηλεκτρικής ενέργειας είναι το μέσο για να κινηθούμε προς αυτό το στόχο καθώς πετυχαίνει βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας καθώς και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό επιτυγχάνεται με μείωση της λειτουργίας των ληγνιτικών - πετρελαϊκών μονάδων λόγω διεξόδυσης μονάδων ΔΠ κυρίως όταν οι δεύτερες αποτελούνται από μονάδες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να αποτελούνται από ντιζελογεννήτριες, μικροτουρμπίνες, τουρμπίνες εσωτερικής καύσης, μηχανές εσωτερικής καύσης, μηχανές stirling,

κυψέλες καυσίμου και μονάδες ΑΠΕ όπως φωτοβολταικά, αιολικά, μικρά υδροηλεκτρικά, συστήματα βιομάζας, ανάκτηση ενέργειας από κύματα και παλίρροιες κλπ.

Η συντριπτική πλειοψηφία των τεχνολογιών ΔΠ σχετίζεται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ως εκ τούτου χαρακτηρίζεται τόσο από στοχαστικότητα όσο και από εξάρτηση της από φυσικά φαινόμενα. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η ασφαλής, αδιάλειπτη και υψηλής ποιότητας λειτουργία του συστήματος στο οποίο συνδέονται τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής υποστηρίζεται από ένα αυστηρό πλαίσιο λειτουργίας τους.

Πρόκληση αποτελεί ο εντοπισμός των κατάλληλων θέσεων και του κατάλληλου μεγέθους των μονάδων ΔΠ στα δίκτυα διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς ή/και οικονομικούς περιορισμούς, ώστε να επιτευχθεί μεγάλη διείσδυση ΔΠ και παράλληλα να αποφευχθεί ο κορεσμός του δικτύου, καθώς η τοποθέτηση των πηγών σε τυχαίες θέσεις μειώνει την συνολική διείσδυση.

2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Οι επιδράσεις των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής στο δίκτυο διανομής που συνδέονται συνίστανται σε:

- Αλλαγή της εικόνας τάσης (συνήθως είναι ανύψωση τάσης οπότε δρα ευεργετικά κατά τις ώρες μεγίστου φορτίου, μπορεί όμως να μην είναι αποδεκτή κατά τις ώρες ελαχίστου φορτίου)
- Εισαγωγή στο δίκτυο ρευμάτων ανώτερων αρμονικών που επηρεάζουν την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος
- Δυσχέρεια στην προγραμματισμένη συντήρηση του δικτύου, διότι η τροφοδότηση από πολλά σημεία επηρεάζει τις διαδικασίες ασφάλειας
- Αλλαγή των απωλειών του δικτύου, (εάν μια μικρή μονάδα ΔΠ βρίσκεται κοντά σε ένα μεγάλο φορτίο, τότε οι απώλειες του δικτύου θα μειωθούν ενώ αν μια μεγάλη μονάδα ΔΠ βρίσκεται μακριά από τα φορτία του δικτύου, τότε οι απώλειες του δικτύου είναι πιθανόν να αυξηθούν)
- Επίδραση στα σήματα ακουστικής συχνότητας που μεταφέρονται στο δίκτυο διανομής
- Αύξηση στην ισχύ βραχυκυκλώσεως.

2.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

2.3.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Όπως γίνεται αντιληπτό υπάρχει πληθώρα πλεονεκτημάτων από τη χρήση ΔΠ και αυτός είναι και ο λόγος που εισάγονται στα ΣΗΕ βελτιώνοντας τη λειτουργία τους. Οι βελτιώσεις που προσφέρουν τα δίκτυα ΔΠ είναι ιδιαίτερα σημαντικά τόσο για το ίδιο το δίκτυο και τους καταναλωτές όσο και για το περιβάλλον.

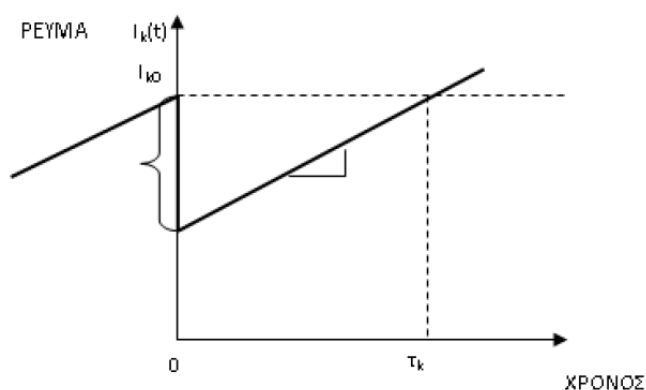
2.3.1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

- Μείωση ηλεκτρικών απωλειών στο δίκτυο: Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται δεν είναι ίση με αυτή που καταλήγει στους καταναλωτές αλλά είναι πάντα μεγαλύτερη. Αυτό ισχύει γιατί όπως σε όλα τα συστήματα έτσι και στο σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν απώλειες. Οι απώλειες οφείλονται στις ωμικές αντιστάσεις κυρίως των γραμμών μεταφοράς και διανομής ενώ εμφανίζονται υπό μορφή θερμότητας. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής όντας τοποθετημένες κοντά στην κατανάλωση (δίκτυο διανομής) δεν απαιτούν μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με αποτέλεσμα μειωμένες ωμικές αντιστάσεις άρα και απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και διασυνδέσεις, το ποσοστό των ενεργειακών απωλειών ανέρχεται περίπου στο 2% της εγχέομενης ενέργειας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και των εθνικών διασυνδέσεων στο σύστημα μεταφοράς (400kV και 150kV), ενώ στο σύστημα διανομής (20kV και 0.4kV) το ποσοστό ανέρχεται περίπου στο 7,5% εγχέομενης ενέργειας, εκ των οποίων το 62% εμφανίζεται στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Επιπρόσθετα, εφόσον οι απώλειες είναι τετραγωνική συνάρτηση της έντασης του ρεύματος, οι μεγαλύτερες απώλειες εμφανίζονται κατά τη χρονική περίοδο του μέγιστου φορτίου. Η προσεχτική μελέτη των παραπάνω στοιχείων αποδεικνύει ότι η μερική ή ολική τροφοδότηση τοπικών φορτίων με το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να συμβάλει στη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών και στην εξοικονόμηση ενέργειας, διότι με τον τρόπο αυτό μειώνεται η μεταφερόμενη ενέργεια μέσω των γραμμών μεταφοράς και διανομής. Επιπλέον περιορίζονται οι δαπάνες επέκτασης και ενίσχυσης των δικτύων μεταφοράς και διανομής.

- Βελτίωση του Προφίλ της Τάσης: Η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής σε ένα δίκτυο μπορεί να μειώσει τις διακυμάνσεις της τάσης των διαφόρων ζυγών του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι όπως προαναφέρθηκε, ένα μέρος του φορτίου θα τροφοδοτείται από τη διεσπαρμένη παραγωγή και επομένως η ισχύς που απαιτείται από τους σταθμούς διανομής, ή αλλιώς από την πηγή, θα είναι μειωμένη, άρα μικρότερες θα είναι και οι πτώσεις τάσεις κατά μήκος κάποιων γραμμών του συστήματος. Έτσι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν μπορεί μόνο να βοηθήσει τη λειτουργία δικτύων με μεγάλες πτώσεις τάσεις, αλλά μπορεί και να συμβάλλει θετικά σε περιπτώσεις που εμφανίζονται μικρότερες διακυμάνσεις τάσης, βελτιώνοντας το προφίλ της τάσης του δικτύου.
- Προσφέρει μεγαλύτερη αξιοπιστία και ποιότητα ισχύος, ειδικά σε περιοχές όπου οι διακυμάνσεις τάσης είναι συχνές ή όπου η ενέργεια που παρέχεται από το δίκτυο δεν είναι αξιόπιστη. Πιο συγκεκριμένα με τον όρο αξιοπιστία, όπως εκφράζεται στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, σημαίνει διαθεσιμότητα-συνέχιση της εξυπηρέτησης του καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα αξιόπιστο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχει ηλεκτρισμό χωρίς διακοπές, δηλαδή ενέργεια η οποία είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή. Οτιδήποτε λιγότερο από το τέλειο σε αυτό το κομμάτι μπορεί να σημαίνει ότι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναξιόπιστη. Μία διαθεσιμότητα της τάξης 99.9% μπορεί να ακούγεται εντυπωσιακή αλλά αυτό σημαίνει 8 ώρες και 45 λεπτά χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα κάθε χρόνο, επίπεδο εξυπηρέτησης που σύμφωνα με έρευνες θεωρείται ανικανοποίητο από σχεδόν όλους τους καταναλωτές της Βόρειας Αμερικής.
- Προσφέρει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η επιλογή των παραδοσιακών γραμμών διανομής δεν είναι δυνατή. Τέτοιες περιοχές όπως πύργοι κεραίων, μικρά απομακρυσμένα χωριά ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου στον ωκεανό βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού δικτύου και επωφελούνται από τη διεσπαρμένη παραγωγή ως βασική πηγή ενέργειας.
- Μειώνει την υπερφόρτωση των γραμμών διανομής.

2.3.1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ

- Προσφέρει καθαρότερη, πιο αθόρυβη λειτουργία και μειώνει τις εκπομπές ρύπων εάν οι Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΜΔΠ) είναι μονάδες ΑΠΕ.
- Μειώνει ή αναβάλλει τις αναβαθμίσεις των έργων υποδομής (γραμμές και υποσταθμοί) : Γνωστό και ως χρόνος αναβολής επένδυσης. Οι επιχειρήσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παραδοσιακά ακολουθούσαν την αύξηση του φορτίου, επενδύοντας σε μεγαλύτερους μετασχηματιστές και καλώδια όταν αυτά έφταναν στο όριο λειτουργίας τους από την άποψη της ποσότητας φορτίου που μπορούσαν να μεταφέρουν. Το κόστος όμως μιας τέτοιας κίνησης μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα, ειδικά στα κέντρα των μεγάλων πόλεων. Επομένως με την εγκατάσταση μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου, η αναβάθμιση συγκεκριμένων στοιχείων με μεγάλο κόστος, μπορεί να αναβληθεί για ένα χρονικό διάστημα, εξοικονομώντας χρήματα για τους εμπλεκόμενους φορείς.



Σχήμα 2.1 Χρόνος αναβολής επένδυσης σε ΣΗΕ με χρήση Διεσπαρμένης Παραγωγής.[2.1]

Αν υποθέσουμε ότι το φορτίο αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3, μετά την τοποθέτηση μιας μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής και τη μείωση του ρεύματος, θα περάσει ένα χρονικό διάστημα μέχρι το ρεύμα να ξαναπάρει εξαιτίας της αύξησης του φορτίου, την τιμή που είχε πριν την τοποθέτηση της μονάδας. Έτσι, θα αναβληθεί κατά αυτό το χρονικό διάστημα η ανάγκη αντικατάστασης ενός μετασχηματιστή ή κάποιου άλλου στοιχείου του δικτύου, σε σχέση με το χρόνο που επρόκειτο να συμβεί κανονικά.

- Οικονομικό και περιβαντολλογικό όφελος από τη μείωση των απωλειών ισχύος: Είναι φανερό πως με τη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο έχουμε μείωση των απωλειών λόγω ουσιαστικής απουσίας συστήματος μεταφοράς. Οι μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν ρεύμα έντασης πολύ μικρότερης από αυτό που θα παρήγαγαν χωρίς τις ΜΔΠ. Με αυτό τον τρόπο και με γνώμονα πως οι απώλειες εξαρτώνται από το τετράγωνο της έντασης του ρεύματος, καταλαβαίνουμε πως η μείωση των απωλειών είναι ιδιαίτερα σημαντική. Επομένως οι μεγάλες μονάδες παραγωγής μειώνουν την λειτουργία τους εξοικονομώντας ορυκτά καύσιμα ενώ ταυτόχρονα μειώνονται σημαντικά οι εκπομπές ρύπων.

Το οικονομικό όφελος που προκύπτει από τη μείωση της λειτουργίας των κεντρικών μονάδων θα πρέπει να αποδοθεί, στο κομμάτι που του αναλογεί, στον ιδιοκτήτη της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς αυτός είναι που δημιουργεί αυτό το επιπλέον όφελος και αν του αποδοθεί αυτό το επιπλέον κέρδος, θα έχει εντονότερο κίνητρο για επένδυση. Έτσι, αφού για να μπορέσει να αναπτυχθεί η αγορά της ενέργειας και να υπάρξει μεγαλύτερη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει πρόσφορο περιβάλλον για επενδύσεις, αυτό το επιπλέον όφελος που προκύπτει από τη μείωση των απωλειών θα πρέπει να αποδοθεί στους προμηθευτές, ώστε να αποτελέσει ένα ακόμα κίνητρο για επενδύσεις.

2.3.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

- Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι το υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής. Διαφορές όμως υπάρχουν και στα κόστη κεφαλαίου για διαφορετικές τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής και μπορούν να ποικίλλουν από 1000€/kW έως 10.000€/kW, στις τουρμπίνες καύσης και τις κυψέλες καυσίμου αντίστοιχα.
- Πολλές φορές δεν μπορεί να υπάρξει ακριβής πρόβλεψη για την ικανότητα παραγωγής συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, καθώς σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρξουν αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως είναι οι ανεμογεννήτριες. Έτσι υπάρχουν περιορισμοί πάνω στο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, ενώ πρέπει να υπάρχει πάντα εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα αφορά κυρίως τα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι τα νησιά.
- Ένας αυξημένος αριθμός μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να προκαλέσει ροή φορτίου, από την χαμηλή τάση στο δίκτυο μέσης τάσης. Έτσι, απαιτούνται διαφορετικά μέσα προστασίας και στα δύο επίπεδα τάσης[2.2]

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Χρονική Επίδραση της Διεσπαρμένης Παραγωγής στις Επενδύσεις ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Διπλωματική εργασία Θωμάς Κασσελας ΕΜΠ on line διαθέσιμο http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2008-0118/DT2008-0118.pdf
- [2.2] Βέλτιστη διαστασιολόγισή μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με τη χρήση υβριδικής pso και βέλτιστης ροής φορτίου. Διπλωματική εργασία Αλεξάνδρα Σ. Ζίγκηρη ΕΜΠ on line διαθέσιμη <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/bitstream/123456789/6330/1/DT2012-0118.pdf>
- [2.3] Enermed Mediterranean Renewable Energy
http://enermed.cres.gr/Overalll_Res_Profile_EL
- [2.4] Distributed Power Generation: Planning and Evaluation [H.Lee Willis, Walter G.Scott]

ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ (ΡΦ)

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) έχει σκοπό να προμηθεύει τα διασυνδεδεμένα φορτία με πραγματική και άεργο ισχύ. Η ροή της ισχύος ή φορτίου στο δίκτυο για την τροφοδότηση της ζήτησεως, αποτελεί την χαρακτηριστικότερη εκδήλωση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας για ένα ΣΗΕ. Επιπλέον, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η συχνότητα και η τάση στους διαφόρους ζυγούς θα βρίσκονται μέσα σε προδιαγεγραμμένα όρια παρά το γεγονός ότι τα φορτία συχνά μεταβάλλονται απρόβλεπτα.[3.1]

Στο σχεδιασμό των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η γνώση της τάσης σε κάθε ζυγό και της ροής ισχύος στις γραμμές του δικτύου. Η επίλυση της απλής Ροής Φορτίου (ΡΦ) απαιτεί συγκεκριμένες τιμές για το φορτίο των ζυγών, την παραγόμενη ενεργό ισχύ των γεννητριών και τα χαρακτηριστικά του δικτύου.[3.2]

Στα δίκτυα που λειτουργούν ακτινικά, η ροή της ισχύος είναι καθορισμένη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα προβλήματα. Όμως στα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς και σε περιπτώσεις όπου η διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι μεγάλη, η κατανομή των ροών ισχύος έχει πολύ μεγάλη τεχνική και οικονομική σημασία. Έτσι, η μελέτη της ροής φορτίου σε ένα σύστημα είναι απαραίτητη για την καθημερινή λειτουργία του, την επέκτασή του, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής καθώς και για τη διασύνδεσή του με άλλα συστήματα.

Προς την κατεύθυνση αυτή, το πρόβλημα των ροών φορτίου συνίσταται στον προσδιορισμό των μεταβλητών του συστήματος (ισχύων, ρευμάτων, τάσεων), σε μια δεδομένη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας αντιστοιχεί σε μια ορισμένη εικόνα φορτίων, μια αντίστοιχη εικόνα παραγόμενης ισχύος και αντίστοιχη εικόνα τάσεων και ροών στο δίκτυο. Κάθε διαφορετική εικόνα φορτίων ή ροών, συνιστά μια άλλη κατάσταση λειτουργίας και περιγράφεται από άλλες τιμές μεταβλητών.

Πλέον, η ανάλυση ροών φορτίου γίνεται με τη χρήση υπολογιστών που επιτρέπουν την ανάλυση δικτύων με πολυάριθμους κόμβους και διασυνδέσεις, επιλέγοντας και την επιθυμητή μέθοδο ανάλυσης. Η ανάλυση επιτυγχάνεται με μαθηματικές υπολογιστικές μεθόδους. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών θα ήταν αδύνατη χωρίς τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών λόγω υψηλής πολυπλοκότητας και πλήθους δεδομένων. Υπάρχουν διάφορα λογισμικά που έχουν αναπτυχθεί και εστιάζουν στην επίλυση ΡΦ. Ένα από αυτά είναι το πακέτο MATPOWER, λογισμικό που έχει αναπτυχθεί σε MATLAB, με πολλές δυνατότητες και πληθώρα αριθμητικών μεθόδων που λύνουν τις εξισώσεις ΡΦ.

Ο στόχος κάθε προγράμματος ανάλυσης ροής φορτίου είναι να παράγει σε μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας τις παρακάτω πληροφορίες:

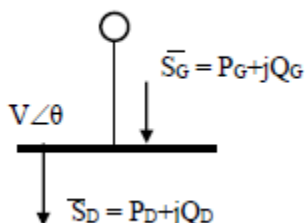
- Το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία σε κάθε ζυγό.
- Την ενεργό και άεργο ισχύ που ρέει σε κάθε στοιχείο.
- Την άεργο ισχύ φόρτισης κάθε γεννήτριας[3.4]

3.2 ΕΙΣΩΣΕΙΣ ΡΩΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

Ο στόχος μελέτης της ροής φορτίου είναι η παροχή πληροφορίας σχετικά με την γωνία τάσης και το μέγεθος της τάσης σε κάθε ζυγό για καθορισμένες απώλειες και ενεργή ισχύ. Εφόσον υπολογιστούν αυτά τα μεγέθη και έχουμε τις απαραίτητες πληροφορίες μπορούν να υπολογιστούν η ενεργή και άεργος ισχύς σε κάθε ζυγό όπως επίσης και η άεργη ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συμφωνά με τη μη γραμμική φύση του προβλήματος, υπολογιστικές μέθοδοι εφαρμόζονται για να πετύχουν μια αποδεκτή λύση σύμφωνα με τις ανοχές.[3.1]

Η λύση της ροής φορτίου ξεκινάει αναγνωρίζοντας τις γνωστές και άγνωστες μεταβλητές του συστήματος. Οι γνωστές και άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος εξαρτώνται από τον τύπο του ζυγού. Ένας ζυγός χωρίς καμία γεννήτρια συνδεδεμένη καλείται ζυγός φορτίου, ενώ με μία συνδεδεμένη γεννήτρια καλείται ζυγός γεννήτριας. Ο τελευταίος καλείται και ζυγός χαλαρότητας (slack bus) και αυτό που επιτελεί είναι να ισορροπήσει την ενεργή και άεργη ισχύ στο σύστημα.[3.2]

Θεωρώντας τη γενική περίπτωση ενός ζυγού του συστήματος, με παραγωγή και φορτίο, που εκφράζονται ως ισχύεις, διακρίνουμε τα ακόλουθα μεγέθη, όπως φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.1 : Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά μεγέθη ζυγού

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΣΥΜΒΟΛΑ

P_i : καθαρή ισχύς που εγχέεται στο ζυγό i

g_{ji} : πραγματικό μέρος του στοιχείου στο ζυγό Y_{BUS} πίνακα αγωγιμοτήτων

b_{ji} : φανταστικό μέρος της στοιχείου της Y_{BUS}

θ_{ji} : διαφορά της γωνίας τάσης ($\theta_{ji} = \delta_j - \delta_i$)

Q_i : καθαρή άεργος ισχύς που εγχέεται στο ζυγό i .

V_i : μέτρο της τάσης στο ζυγό i

V_j : μέτρο της τάσης στο γειτονικό ζυγό j

Y_{ji} : στοιχείο του πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών

P_{Gi} : παραγωγή ενεργού ισχύος στο ζυγό i

Q_{Gi} : παραγωγή άεργου ισχύος στο ζυγό i

P_{Di} : κατανάλωση ενεργού ισχύος στο ζυγό i

Q_{Di} : κατανάλωση άεργου ισχύος στο ζυγό i

Τα ηλεκτρικά αυτά μεγέθη αποτελούν τις μεταβλητές του προβλήματος και είναι έξι 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) είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος και χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές διαταραχής. Οι ισχύεις παραγωγής (P_G , Q_G) χαρακτηρίζονται σαν μεταβλητές ελέγχου και οι τάσεις και

οι γωνίες των ζυγών, οι οποίες είναι οι εξαρτημένες μεταβλητές, χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές καταστάσεως.

Η συνισταμένη ισχύς του ζυγού δίνεται από τη σχέση:

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

Αντίστοιχα, ορίζεται το ρεύμα ζυγού:

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

Για την πραγματοποίηση της μελέτης ροής φορτίου ορίζουμε τρεις τύπους ζυγών:

- Ζυγοί φορτίου (PQ), στους οποίους είναι γνωστές οι ισχύεις ζητήσεως ή φορτίου και άγνωστη είναι η τάση (κατά μέγεθος και γωνία).
- Ζυγοί παραγωγής (PV), στους οποίους είναι γνωστά, η παραγόμενη ενεργός ισχύς και το μέτρο της τάσεως και προσδιορίζονται η άεργος ισχύς και η γωνία της τάσεως
- Ζυγός ταλαντώσεως ή ζυγός αναφοράς, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής και επιβάλλεται σε αυτόν σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία ενώ προσδιορίζονται οι ισχύεις παραγωγής. Ο ζυγός αναφοράς χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές εξ' αρχής και γενικά για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος.

Η μαθηματική ανάλυση καταλήγει στη διαμόρφωση ενός συστήματος $2N$ μη γραμμικών εξισώσεων, όπου N ο αριθμός των κόμβων (ζυγών) του δικτύου. Θεωρούμε ένα αντιπροσωπευτικό ζυγό του συστήματος, με ισχύ ζυγού και συμβολές γραμμών μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς παριστάνονται με το ισοδύναμο Π με ανηγμένες παραμέτρους και τα φορτία θεωρούνται συμμετρικά. Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες προς τη γη των γραμμών μεταφοράς συγκεντρώνονται στους ζυγούς, οπότε για το θεωρούμενο ζυγό θα είναι:

$$Y_{io} = \sum_{j=1}^N Y_{ij} \quad (3.3)$$

Εάν $Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{iN}$, είναι οι αγωγιμότητες σειράς των γραμμών οι οποίες συνδέονται στο ζυγό i και V_1, V_2, \dots, V_N , οι τάσεις προς τη γη των ζυγών του δικτύου, τότε:

$$y_{ii} = Y_{io} + \sum_{j=1}^N Y_{ij} \quad (3.4)$$

$$\text{Και} \quad y_{ij} = -Y_{ij} = -Y_{ji} \quad (3.5)$$

Επομένως, η εξίσωση των ρευμάτων στο ζυγό γράφεται:

$$\bar{J}_i = y_{i1} \bar{V}_1 + y_{i2} \bar{V}_2 + \dots + y_{ii} \bar{V}_i + \dots + y_{iN} \bar{V}_N = \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j \quad (3.6)$$

Ή σε μορφή μήτρας:

$$\begin{bmatrix} \bar{J}_1 \\ \bar{J}_2 \\ \vdots \\ \bar{J}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1N} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & & \\ \vdots & & \ddots & \\ y_{N1} & y_{N2} & \cdots & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_N \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ή

$$[Jz] = [Yz] [Vz] \quad (3.8)$$

Όπου:

- $[Jz]$, $[Vz]$, τα διανύσματα ρευμάτων και τάσεων ζυγών, διαστάσεων N
- $[Yz]$ η μήτρα αγωγιμοτήτων ζυγών του συστήματος, διαστάσεων N x N, με μιγαδικά στοιχεία.

Όμως ισχύει ότι:

$$\bar{J}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i} \quad (3.9)$$

Οπότε η εξίσωση ροών φορτίου γίνεται:

$$P_i - jQ_i = \bar{V}_i \sum_{j=1}^N y_{ij} \bar{V}_j \quad (3.10)$$

Χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν δύο εξισώσεις της μορφής:

$$P_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \cos(\delta_j - \delta_i) - b_{ji} \cdot \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (3.11)$$

$$-Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^N |V_j| \cdot [g_{ji} \cdot \sin(\delta_j - \delta_i) + b_{ji} \cdot \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (3.12)$$

$$\text{Όπου} \quad y_{ji} = g_{ji} + jb_{ji} \quad (3.13)$$

Η αντιστροφή της εξισώσεως (3.8) δίνει την εξίσωση:

$$[Vz] = [Zz] [Jz] \quad (3.14)$$

Όπου

$$[Z_Z] = [Y_Z]^{-1} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{N1} & \cdots & \cdots & z_{NN} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

είναι η μήτρα σύνθετων αντιστάσεων ζυγών, επίσης με μιγαδικά στοιχεία.

Συνεπώς, για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας N ζυγών, έχουμε $2N$ εξισώσεις ροών φορτίου. Οι εξισώσεις είναι αλγεβρικές, εφ' όσον αναφέρονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και μη γραμμικές, γεγονός που κάνει προτιμότερη την αριθμητική επίλυση με ψηφιακό υπολογιστή.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON – RAPHSON

Μια από τις ψηφιακές μεθόδους για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου είναι η μέθοδος Newton – Raphson. Η μέθοδος αυτή απαιτεί στην επίλυση την κατάστρωση των εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα σαν σύστημα $F(x) = 0$.

Έστω λοιπόν το προς επίλυση σύστημα :

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

και $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ η αρχική λύση.

Υποθέτουμε ότι $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ είναι οι διαφορές, οι οποίες προστιθέμενες στην αρχική λύση δίνουν την τελική λύση, της μορφής

$$x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)} \quad (28)$$

Παίρνοντας το ανάπτυγμα Taylor των εξισώσεων γύρω από τα σημεία $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ έχουμε:

$$f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)}) = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right)^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right)^{(0)} + \dots + \Delta x_n^{(0)} \left(\frac{\partial f_N}{\partial x_N} \right)^{(0)} \quad (3.17)$$

και καταστρώνουμε το γενικό σύστημα εξισώσεων :

$$[\Delta f] = [J] [\Delta x] \quad (3.18)$$

όπου το διάνυσμα των διαφορών των συναρτήσεων είναι η παρακάτω σχέση (3.19)

$$[\Delta f] = \begin{bmatrix} f_1(x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0), \dots, x_n(0) + \Delta x_n(0)) - f_1(x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \\ \vdots \\ f_n(x_1(0) + \Delta x_1(0), x_2(0) + \Delta x_2(0), \dots, x_n(0) + \Delta x_n(0)) - f_n(x_1(0), x_2(0), \dots, x_n(0)) \end{bmatrix}$$

και το διάνυσμα διαφορών είναι :

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Η Ιακωβιανή μήτρα του συστήματος είναι:

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Στην περίπτωση των ροών φορτίου οι μεταβλητές x και f παριστάνουν τα ακόλουθα μεγέθη:

$$[x] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_i}{|V_i|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ -\frac{\delta_n}{|V_1|} \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$[x_0] = \begin{bmatrix} -\frac{\delta_{0,i}}{|V_{0,i}|} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

όπου $[x]$ το διάνυσμα τελικής καταστάσεως και $[x_0]$ το διάνυσμα αρχικών τιμών. Οπότε, το διάνυσμα που περιέχει τις προσδιορισμένες τιμές των ισχύων P_S και Q_S είναι:

$$[f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{p_{Si}}{Q_{Si}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{Si} \\ \vdots \\ -\frac{p_{Sn}}{Q_{S1}} \\ \vdots \\ Q_{Sn} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$[f(x_0)] = \begin{bmatrix} -\frac{p_i}{Q_i} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

το διάνυσμα των κάθε φορά προσεγγίσεων.

Τα P , Q υπολογίζονται κάθε φορά από τις προσεγγίσεις δ_0 , $|V_0|$ ενώ τα P_S , Q_S είναι δεδομένα του προβλήματος ροής φορτίου.

Οι διορθώσεις των ζυγών κατάστασης είναι:

$$[\Delta x] = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta \delta_i}{|\Delta V_i|} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

ενώ τα σφάλματα των ζυγών:

$$[\Delta f(x)] = \begin{bmatrix} -\frac{P_{Si} - P_i}{Q_{Si} - Q_i} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Οπότε η Ιακωβιανή μήτρα έχει τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \vdots & \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & \vdots & J_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_3 & \vdots & J_4 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Οι ισχύεις των ζυγών δίνονται συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης από τις σχέσεις:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^N y_{ij} V_j = |V_i|^2 |y_{ii}| + \sum_{j=1, j \neq i}^N V_i^* y_{ij} V_j \quad (3.29)$$

Και θεωρώντας ότι $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ και $y_{i,j} = |y_{i,j}| \angle -\theta_{ij}$ έχουμε:

$$P_i = |V_i|^2 |y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.30)$$

$$Q_i = |V_i|^2 |y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N |V_i y_{ij} V_j| \cdot \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.31)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις μερικές παραγώγους που αποτελούν τα στοιχεία της Ιακωβιανής. Για κάθε υπομήτρα ($J_1 - J_4$) υπολογίζουμε χωριστά τα διαγώνια και τα μη διαγώνια στοιχεία, λόγω των σχέσεων (3.30) και (3.31)

$$J_{1ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.32)$$

$$J_{1ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -\sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = -Q_i + |V_i^2 y_{ii}| \sin \theta_{ii}, j \neq i \quad (3.33)$$

$$J_{2ij} = \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.34)$$

$$J_{2ii} = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2|V_i y_{ii}| \cdot \cos \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ij}| \cos \theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|}, j \neq i \quad (3.35)$$

$$J_{3ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.36)$$

$$J_{3ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i V_j y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = P_i - |V_i^2 y_{ii}| \cos \theta_{ii}, j \neq i \quad (3.37)$$

$$J_{4ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = |V_i y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.38)$$

$$J_{4ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = 2|V_i y_{ii}| \cdot \sin \delta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_i y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) = |V_i y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|}, j \neq i \quad (3.39)$$

Οι πλήρεις διαστάσεις της Ιακωβιανής μήτρας για ένα σύστημα N ζυγών είναι $(2N) \times (2N)$. δε χρειάζεται όμως να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι γιατί στο ζυγό αναφοράς το μέτρο και η γωνία της τάσης είναι γνωστά και στους ζυγούς παραγωγής είναι γνωστά τα μέτρα των τάσεων και άγνωστα τα Q_s .

Έτσι, αριθμώντας τους ζυγούς ώστε ο ζυγός 1 να είναι ζυγός ταλάντωσης, οι ζυγοί 2 έως m ζυγοί παραγωγής και οι ζυγοί $m+1$ έως N ζυγοί φορτίου, η Ιακωβιανή που χρειάζεται είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] & \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] \\ \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] & \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$[\Delta P] = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] [\Delta P] + \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] [\Delta V] \quad (3.41)$$

$$[\Delta V] = \left([\Delta P] - \left[\frac{\partial P}{\partial V} \right] [\Delta V] \right) \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right]^{-1} \quad (3.42)$$

$$[\Delta V] = \left([\Delta Q] - \left[\frac{\partial Q}{\partial \delta} \right] [\Delta \delta] \right) \left[\frac{\partial Q}{\partial V} \right]^{-1} \quad (3.43)$$

Από τη σχέση (3.42) βρίσκονται όλες οι γωνίες των ζυγών $\Delta\delta$, ενώ από τη σχέση (3.43) βρίσκεται το ΔV για ζυγούς με P, Q γνωστά.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου Newton – Raphson είναι ο τετραγωνικός ρυθμός σύγκλισης, ο οποίος είναι ταχύτερος κάθε άλλης μεθόδου. Επίσης είναι μια πολύ αξιόπιστη μέθοδος που δεν επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επιλογή του ζυγού ταλαντώσεως ή μικρές επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ των ζυγών. Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αναγκαιότητα διαμόρφωσης και αντιστροφής της Ιακωβιανής μήτρας σε κάθε ανακύκλωση. Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε κοίλες συναρτήσεις και ότι συγκλίνει στη λύση που βρίσκεται πλησιέστερα στην αρχική τιμή.

Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι το πρόβλημα της ροής φορτίου έχει διπλάσιο αριθμό πιθανών λύσεων από τον αριθμό των κόμβων του δικτύου. Στην πράξη όμως η σωστή λύση είναι διακριτή και επιτυγχάνεται πάντοτε ή η λύση αποκλίνει.

Ένας συνοπτικός αλγόριθμος της μεθόδου **Newton – Raphson** που μπορεί να δοθεί είναι ο ακόλουθος:

1. Δίνονται οι αρχικές τιμές στα $|V|$ και δ , όπου αυτά δεν είναι καθορισμένα.
2. Υπολογίζονται οι ισχύεις των ζυγών από τις εξισώσεις (3.30),(3.31). Είναι γνωστά τα P για όλους τους ζυγούς (πλην του ζυγού αναφοράς) και τα Q για τους ζυγούς φορτίου. Συνεπώς χρειάζεται ο υπολογισμός των P_2, \dots, P_N και μόνο των Q_{m+1}, \dots, Q_N που θα δώσουν τις αποκλίσεις $[\Delta P]$ και $[\Delta Q]$ που χρειάζεται η (3.40).
3. Υπολογίζεται η Ιακωβιανή από τις σχέσεις (3.32) – (3.39).
4. Επιλύεται το σύστημα (3.40) και υπολογίζονται οι αποκλίσεις $[\Delta V]$ και $[\Delta \delta]$.
5. Αν οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες από τα όρια ανοχής, επανερχόμαστε στο βήμα (2).
6. Μετά την σύγκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται τα P και Q του ζυγού αναφοράς και κατόπιν οι ροές φορτίου στις γραμμές. [3.4]

3.4 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου έχει μεγάλη ιστορία αναφορικά με την ανάπτυξή του. Η πρώτη αναφορά έγινε από τον Carpentier το 1962 και πέρασαν αρκετές δεκαετίες έως ότου εφαρμοστεί ένας επιτυχημένος αλγόριθμος που να μπορεί να χρησιμοποιείται ευρέως. Αποτελεί ένα πρόβλημα ανάλυσης λειτουργίας των ΣΗΕ το οποίο αποσκοπεί στην εύρεση των κατάλληλων χειρισμών, των ελεγχόμενων μεγεθών του συστήματος που οδηγούν στην καλύτερη δυνατή λειτουργική κατάσταση, με βάση κάποιο αντικειμενικό κριτήριο και ικανοποιώντας περιορισμούς ασφαλείας και λειτουργίας συστήματος.

Η βέλτιστη ροή φορτίου είναι ένα μεγάλης κλίμακας πολύπλοκο μη-γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνει όσο η μαθηματική του θεμελίωση περιλαμβάνει περισσότερες παραμέτρους και περιορισμούς για τη λειτουργία του συστήματος. Μια από τις βασικές εφαρμογές αποτελεί η οικονομική κατανομή φορτίου με ή χωρίς περιορισμούς (Economic Dispatch – ED , Security Constrained Economic Dispatch – SCED) : σκοπός είναι η κατανομή της παραγωγής στις μονάδες του συστήματος κατά τον πλέον οικονομικό τρόπο (ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας) υπό τους περιορισμούς ασφαλείας του συστήματος που συνίσταται κυρίως στους περιορισμούς του δικτύου μεταφοράς, και σε διάφορες απαιτούμενες ή επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας.

Σήμερα κάθε πρόβλημα το οποίο σχετίζεται με τον ορισμό μιας στιγμιαίας βέλτιστης λειτουργικής κατάστασης ενός ΣΗΕ θεωρείται πρόβλημα βέλτιστης ροής φορτίου. Διαφορετικές κατηγορίες και είδη βέλτιστης ροής φορτίου, προσαρμοσμένα για εφαρμογές με συγκεκριμένους σκοπούς και απαιτήσεις, ορίζονται επιλέγοντας διαφορετικού τύπου αντικειμενικές συναρτήσεις, διαφορετικές ομάδες μεταβλητών ελέγχου και διαφορετικές κατηγορίες περιορισμών.

Η αντικειμενική συνάρτηση που τίθενται προς ελαχιστοποίηση μπορεί να είναι :

- α) Το λειτουργικό κόστος των θερμικών μονάδων του συστήματος, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση
- β) Οι απώλειες ενεργού ισχύος του συστήματος μεταφοράς (βέλτιστη ροή έργου ισχύος)
- γ) Το πλήθος των μονάδων που απαιτείται να αλλάξουν την παραγωγή τους λόγω συνωστισμού
- δ) Η συνολική απόλυτη απόκλιση των εξόδων των μονάδων από το αρχικό τους πρόγραμμα παραγωγής λόγω συνωστισμού
- ε) Το κόστος εγκατάστασης εγκάρσιων αγωγιμοτήτων (πυκνωτών ή πηνίων αντιστάθμισης) για ανόρθωση τάσης σε ορισμένα σημεία του συστήματος
- στ) Η περιβαλλοντική μόλυνση, που προκαλείται από τις εκπομπές ρύπων των μονάδων παραγωγής
- ζ) Ο χρόνος απόκρισης του ελέγχου σε περίπτωση απώλειας γραμμής μεταφοράς ή μονάδας παραγωγή

Υπο τους εξής πιθανούς περιορισμούς :

- α) Τα όρια ισχύος των γραμμών μεταφοράς,
- β) Τα όρια του μέτρου της τάσης των ζυγών παραγωγής και φορτίου,
- γ) Τα όρια παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος των μονάδων,
- δ) Τα όρια των λήψεων (taps) ή των στροφών φάσης των μετασχηματιστών (ΜΣ) ισχύος,
- ε) Τα όρια των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων (πυκνωτών ή πηνίων αντιστάθμισης), και
- στ) Όρια ευστάθειας

3.4.2 Η ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η γενική μαθηματική μορφή του προβλήματος της βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς είναι η εξής :

$$\text{Min } f(x,u) \quad (3.44)$$

$$g(x,u) = 0 \quad (3.45)$$

$$h(x,u) \leq 0 \quad (3.46)$$

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (3.47)$$

x : Είναι οι μεταβλητές κατάστασης του δικτύου, δηλαδή τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων σε όλους τους ζυγούς του δικτύου.

u : Αποτελεί το διάνυσμα των ελεγχόμενων μεταβλητών του δικτύου.

f : Αντικειμενική συνάρτηση προς βελτιστοποίηση.

g : Είναι οι σχέσεις που εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε ζυγό του συστήματος.

h : Οι εξισώσεις που εκφράζουν τους περιορισμούς του προβλήματος.

Οι μεταβλητές και οι περιορισμοί του συστήματος μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με τη φύση και την επίδρασή τους στη λειτουργία του συστήματος.

3.4.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου έχουν αναπτυχθεί διάφορες υπολογιστικές τεχνικές οι οποίες βέβαια χρησιμοποιούνται σε πληθώρα άλλων προβλημάτων που απαιτούν βελτιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων υπό περιορισμούς. Οι τεχνικές [3.7] αναφέρονται παρακάτω.

- **Μέθοδος μη γραμμικού προγραμματισμού (Non-Linear Programming)**

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται σε προβλήματα στα οποία τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί είναι μη γραμμικές συναρτήσεις. Μέθοδοι όπως η συνεχής χωρίς περιορισμούς ελαχιστοποίηση (Sequential Unconstrained Minimization Technique), η μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση τέτοιων προβλημάτων.

- **Μέθοδος τετραγωνικού προγραμματισμού (Quadratic Programming).**

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός αποτελεί μια ειδική περίπτωση του μη γραμμικού προγραμματισμού στον οποίο η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική εξίσωση και οι περιορισμοί γραμμικές εξισώσεις. Πολλές εφαρμογές της βέλτιστης ροής φορτίου χρησιμοποιούν τετραγωνικό προγραμματισμό για να επιλύσουν προβλήματα απωλειών, τάσεων και οικονομικής κατανομής.

- **Μέθοδος Newton.**

Στην προσέγγιση αυτή γίνεται χρήση των συνθηκών βελτιστοποίησης γνωστών και ως Kuhn-Tucker. Η μέθοδος Newton παρουσιάζει πολύ ταχείς ρυθμούς σύγκλισης καθώς έχει το πλεονέκτημα της τετραγωνικής σύγκλισης, αλλά μπορεί να εμφανίσει προβλήματα όταν γίνεται χρήση ανισοτικών περιορισμών.

- **Μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming Techniques).**

Ο γραμμικός προγραμματισμός εφαρμόζεται σε προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις ή μπορούν να μετατραπούν σε γραμμικές χωρίς να αλλάξουν ιδιαίτερα τα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Περίπου το 25% των εργασιών επιλύουν το πρόβλημα της βέλτιστης ροής φορτίου βασιζόμενες στο μοντέλο του ΓΠ με κυριότερη τεχνική επίλυσης την μέθοδο Simplex.

- **Μέθοδοι εσωτερικών σημείων (Interior Point Methods).**

Η μέθοδος των εσωτερικών σημείων αποτελεί μια μέθοδο που επιλύει το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού καλύτερα και ταχύτερα από την μέθοδο Simplex. Η επέκταση και η εφαρμογή της λογικής που χρησιμοποιεί η μέθοδος αυτή σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και τετραγωνικού προγραμματισμού έχει παρουσιάσει πολύ ποιοτικά αποτελέσματα και προοπτικές εφαρμογών.

- **Υβριδικές μέθοδοι με γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό.**

Οι υβριδικές μέθοδοι που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία αποτελούν εφαρμογές μοντέλων μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Γενικά ο ακέραιος και ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, ενώ το πλήθος των μεταβλητών που είναι διακριτές αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη δυσκολία επίλυσης του προβλήματος.

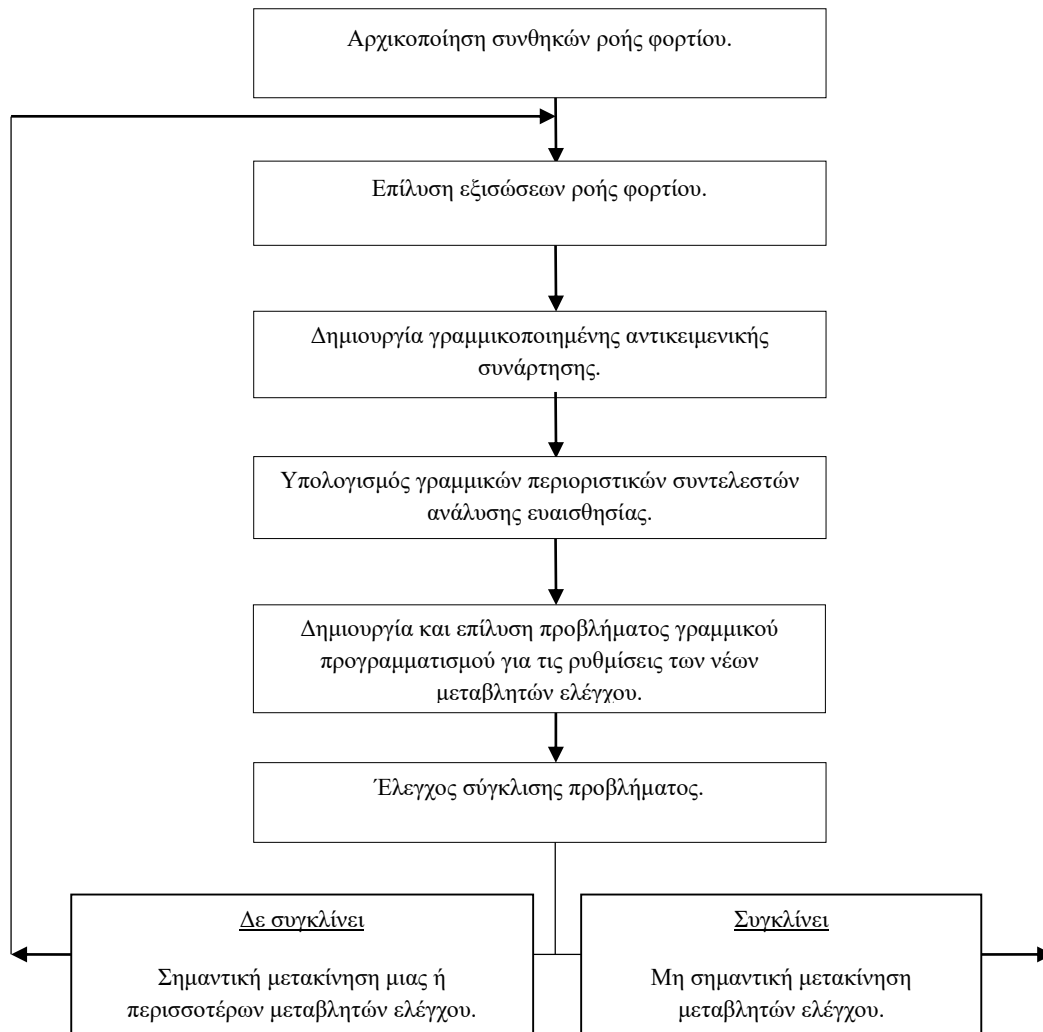
- **Γενετικοί αλγόριθμοι και Ασαφής Λογική (Genetic Algorithm – Fuzzy Logic).**

Η οικογένεια αυτή των μεθόδων έχει εμφανιστεί σε ερευνητικό επίπεδο, εφαρμοζόμενη σε προβλήματα ιδιαίτερα πολύπλοκα στην επίλυση τους. Ωστόσο η ευρεία χρήση τους ακόμα δεν έχει εξελιχθεί λόγω των ιδιαιτεροτήτων που εμφανίζουν όπως μεγάλη χρονική διάρκεια επίλυσης και ιδιαίτερα πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται.

Οι επικρατέστερες και περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι αυτές του γραμμικού προγραμματισμού και του εσωτερικού σημείου. Αναλύουμε παρακάτω τις δυο αυτές μεθόδους εκτενέστερα

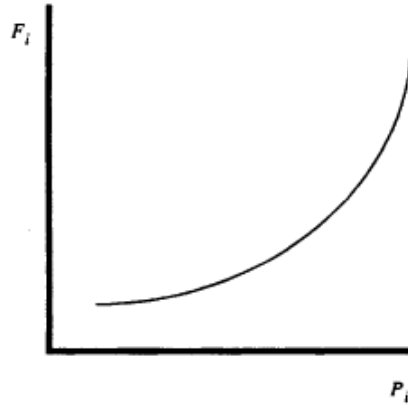
3.4.3.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ (LINEAR PROGRAMMING TECHNIQUES)

Με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού είναι πιο εύκολος ο χειρισμός ανισοτικών περιορισμών, εφόσον το πρόβλημα είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να γραμμικοποιηθεί χωρίς σημαντική απώλεια της ακρίβειας.



Σχήμα (3.2) Στρατηγική επίλυσης LPOP [3.5]

Αρχικά τίθεται το πρόβλημα της έκφρασης των μη γραμμικών εισόδων και εξόδων ή της συνάρτησης κόστους ως ένα σύνολο μη γραμμικών συναρτήσεων. Έτσι, χωρίζουμε τη μη γραμμική συνάρτηση κόστους, σε τμήματα τα οποία αποτελούνται από ευθείες γραμμές. Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται η μη γραμμική συνάρτηση κόστους.



Σχήμα (3.3) Μη γραμμική συνάρτηση κόστους. [3.5]

Χωρίζοντας τη συνάρτηση κόστους σε τρία τμήματα P_{i1} , P_{i2} , P_{i3} το κάθε ένα από τα οποία έχει κλίση S_{i1} , S_{i2} , S_{i3} τότε αυτή θα γίνει :

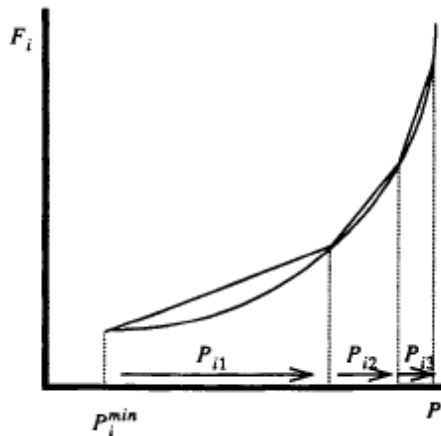
$$F_i(P_i) = F_i(P_{imin}) + S_{i1} P_{i1} + S_{i2} P_{i2} + S_{i3} P_{i3} \quad (3.48)$$

Όπου ισχύει

$$0 \leq P_{ix} \leq P_{ix}^+ \text{ για } x=1,2,3 \text{ και } P_i = P_{imin} + P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} \quad (3.49)$$

Έτσι η συνάρτηση κόστους αποτελείται πλέον από μια γραμμική έκφραση των P_{ix}

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η γραμμικοποιημένη συνάρτηση κόστους.



Σχήμα (3.4) Γραμμικοποιημένη συνάρτηση κόστους. [3.5]

Κατά το σχηματισμό του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου, με τη χρήση του γραμμικού προγραμματισμού, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι μεταβλητές ελέγχου, ενώ παραλείπονται οι μεταβλητές κατάστασης. Έτσι, λαμβάνονται αντίστοιχα υπόψη μόνο οι περιορισμοί του προβλήματος που επηρεάζουν τις μεταβλητές ελέγχου και όχι τις μεταβλητές κατάστασης.

Οι επόμενοι περιορισμοί που θεωρούνται σε ένα πρόβλημα LOPF είναι εκείνοι που αναπαριστούν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος. Το ισοζύγιο ενεργού ισχύος αναπαρίσταται με την ακόλουθη σχέση:

$$P_{gen} - P_{load} - P_{loss} = 0 \quad (3.50)$$

Ο όρος P_{gen} αναπαριστά την παραγόμενη ενεργό ισχύ από τις γεννήτριες του συστήματος, ο όρος P_{load} την ενεργό ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία, ενώ με ο όρος P_{loss} αναπαριστά τις απώλειες στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος, που ισούνται με I^2R , και τις απώλειες στους μετασχηματιστές. Συμβολίζοντας τις μεταβλητές ελέγχου με το γράμμα u και παραγωγίζοντας τη σχέση (3.50) ως προς u , προκύπτει:

$$\sum_u \left(\frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left(\frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) \Delta u - \sum_u \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial u} \right) \Delta u = 0 \quad (3.51)$$

$$\text{Θεωρούμε :} \quad \Delta u = u - u^o \quad (3.52)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3.51) στην (3.52) προκύπτει:

$$\sum_u \left(\frac{\partial P_{gen}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left(\frac{\partial P_{load}}{\partial u} \right) u - \sum_u \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial u} \right) u = K_p$$

Με την ίδια λογική, μπορεί αντίστοιχα να γραφτεί μια παρόμοια εξίσωση για το ισοζύγιο αέργου ισχύος.

Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού περιορίζει τις μεταβλητές ελέγχου έτσι ώστε αυτές να βρίσκονται πάντα μέσα στο εύρος των επιτρεπτών ορίων τους, ωστόσο δεν βελτιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί των γραμμών μεταφοράς, ή τα όρια της τάσης των ζυγών. Για να προστεθούν οι τελευταίοι περιορισμοί, χρειάζεται να γίνει προσθήκη ενός επιπλέον περιορισμού σε αυτή τη μέθοδο.

Έστω ότι η θερμικής ισχύς των γραμμών έχει ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, δηλαδή σε μία γραμμή από το ζυγό n μέχρι το ζυγό m ισχύει:

$$MVA_{flow,nm} \leq MVA_{flow,nm,MAX}$$

Ο περιορισμός μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη χρήση σειρών Taylor και με τη διατήρηση των γραμμικών όρων.

$$MVA_{flow,nm} = MVA_{flow,nm}^0 + \sum_u \left(\frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) \Delta u \leq MVA_{flow,nm,MAX}$$

Θεωρώντας ότι ισχύει η (3.52) η σχέση γίνεται :

$$\sum_u \left(\frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm} \right) u \leq MVA_{flow,nm,MAX} - K_f$$

όπου

$$K_f = MVA_{flow,nm,MAX} + \sum_u \frac{\partial}{\partial u} MVA_{flow,nm}^{u^0}$$

Με τον ίδιο τρόπο μπορούν να προστεθούν και άλλοι περιορισμοί, όπως τα όρια τάσης των ζυγών του συστήματος. Για την επίλυση της βέλτιστης ροής φορτίου με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού, θα πρέπει να γίνει προσθήκη όσων περιορισμών είναι απαραίτητοι ώστε το σύστημα ισχύος να παραμείνει μέσα στα προκαθορισμένα όρια.

3.4.3.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ (INTERIOR POINT METHOD)

Το 1984 ο Karmarkar παρουσίασε ένα νέο αλγόριθμο επίλυσης, γραμμικού προγραμματισμού ο οποίος δεν επιλύεται ως προς τη βέλτιστη λύση ακολουθώντας μια σειρά σημείων που ανήκουν στα όρια των περιορισμών, αλλά ακολουθεί ένα μονοπάτι εσωτερικά των περιορισμών ακριβώς προς την βέλτιστη λύση στα όρια των περιορισμών. Αυτή η λύση ήταν αρκετά πιο γρήγορη από συμβατικούς αλγόριθμους γραμμικού προγραμματισμού.

Το 1986 ο Gill επέδειξε τη σχέση μεταξύ αλγορίθμου Karmarkar και του επονομαζόμενου αλγορίθμου λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης. Αυτός ο αλγόριθμος έχει γίνει η βάση για την επίλυση πολλών αλγορίθμων ΒΡΦ.

Σε αυτή την προσέγγιση δεν γίνεται διάκριση μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου και των μεταβλητών κατάστασης. Όλες οι μεταβλητές σχεδίασης θεωρείται ότι περιλαμβάνονται στο διάνυσμα \mathbf{x} . Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η $f(\mathbf{x})$. Οι περιορισμοί χωρίζονται σε περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Οι περιορισμοί ισότητας είναι της μορφής $g(\mathbf{x}) = 0$, ενώ οι περιορισμοί ανισότητας $\mathbf{h}_- \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}_+$, όπου τα διανύσματα \mathbf{h}_- και \mathbf{h}_+ είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο των περιορισμών αντίστοιχα. Ακόμα και οι μεταβλητές σχεδίασης περιορίζονται μεταξύ ενός κατώτερου και ενός ανώτερου ορίου, δηλαδή

$$\mathbf{x}_- \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_+.$$

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος είναι η πρόσθεση κάποιων νέων μεταβλητών, έτσι ώστε όλες οι εξισώσεις να γίνουν περιορισμοί ισότητας. Κατά συνέπεια προκύπτει το ακόλουθο σύνολο εξισώσεων

$$\begin{aligned} \min_x f(x) \\ g(x) &= 0 \\ h(x) + s_h &= h^+ \\ s_h + s_{sh} &= h^+ - h^- \\ x + s_x &= x^+ \\ x - x^- &\geq 0, s_x, s_{sh}, s_h \geq 0 \end{aligned}$$

Όλοι οι περιορισμοί έχουν μετατραπεί σε περιορισμούς ισότητας, εκτός από τις τελικές συνθήκες μη αρνητικότητας στις $x-x^-$ και τις ελεύθερες μεταβλητές. Αυτές οι συνθήκες μη αρνητικότητας εντάσσονται στην επίλυση με την προσθήκη της λεγόμενης λογαριθμικής φραγμένης συνάρτησης στην αντικειμενική συνάρτηση. Η συνάρτηση που προκύπτει είναι μια μορφή συνάρτησης σφάλματος, που γίνεται πολύ μεγάλη όσο η συνάρτηση ή οι μεταβλητές πλησιάζουν κοντά στο μηδέν. Επομένως η νέα αντικειμενική συνάρτηση έχει την ακόλουθη μορφή

$$f_\mu = f(x) - \mu \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \sum_i \ln(s_h)_i - \mu \sum_i \ln(s_{sh})_i$$

Η παράμετρος μ ονομάζεται παράμετρος φραγής και είναι ένας θετικός αριθμός που εξαναγκάζεται να πάει στο μηδέν, καθώς ο αλγόριθμος συγκλίνει στην βέλτιστη λύση. Αυτό παρουσιάζεται από την εξίσωση Lagrange που φαίνεται στην παρακάτω σχέση

$$\begin{aligned} L_\mu = f(x) - \lambda^T g(x) - \lambda_h^T [h^+ - s_h - h(x)] - \lambda_{sh}^T (h^+ - h^- - s_h - s_{sh}) - \lambda_x^T (x^+ - x - s_x) \\ - \mu \sum_j \ln(x - x^-)_j - \mu \sum_j \ln(s_x)_j - \mu \sum_i \ln(s_h)_i - \mu \sum_i \ln(s_{sh})_i \end{aligned}$$

Η λύση αυτής της εξίσωσης Lagrange προκύπτει θέτοντας την κλίση ίση με το μηδέν και το σύστημα των εξισώσεων που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο είναι:

$$\nabla_x L_\mu = \nabla f(x) - \nabla_g(x)^T \lambda + \nabla h(x)^T \lambda_h + \lambda_x - \mu(x - x^-)^{-1} e = 0$$

$$\nabla_{sh} L_\mu = \lambda_\mu + \lambda_{sh} - \mu_h^{-1} e = 0$$

$$\nabla_{sh} L_\mu = \lambda_{sh} - \mu(s_{sh})^{-1} e = 0$$

$$\nabla_{sx} L_\mu = \lambda_x - \mu(s_x)^{-1} e = 0$$

$$\nabla_\lambda L_\mu = -g(x)$$

$$\nabla_{\lambda sh} L_\mu = h(x) + s_h - h^+$$

$$\nabla_{\lambda x} L_\mu = x + s_x - x^+$$

$$\nabla_{\lambda h} L_\mu = s_h + s_{sh} - h^+ + h^-$$

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Βέλτιστος σχεδιασμός διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής λαμβάνοντας υπόψιν αβεβαιότητες. Διπλωματική εργασία. Βασίλειος Α. Ευαγγελόπουλος ΕΜΠ.
Online διαθέσιμο: <http://artemis-new.cslab.ece.ntua.gr:8080/jspui/handle/123456789/6574>
- [3.2] Βέλτιστη ροή ισχύος σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και σε υβριδικούς ενεργειακούς διανομείς. Διπλωματική εργασία Ιωάννα Σ. Φαμπιου ΕΜΠ
Online διαθέσιμο: http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2008-0223/DT2008-0223.pdf
- [3.3] Power-flow problem formulation, Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Power-flow_study
- [3.4] Εφαρμογή πιθανοτήτων εργαλείων στην εποπτεία και πρόβλεψη γραμμής με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Διπλωματική εργασία. Μαυρογένου Κυριακή
- [3.5] Power Generation Operation and Control - Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg Chapter 13 Optimal Power Flow
- [3.6] MATPOWER's Extensible Optimal Power Flow Architecture online διαθέσιμο: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/MATPOWER-OPF-slides.pdf>
- [3.7] Βέλτιστος προγραμματισμός και έλεγχος λειτουργίας συστήματος με διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς Διδακτορική διατριβή: Βλάχος Ανδρέας (2001 Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)) online διαθέσιμη: <http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/12796#page/1/mode/2up>

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΙΣΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ΜΔΠ) ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εγκατάσταση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) στα δίκτυα διανομής είναι ιδιαίτερης σημασίας και έχει να κάνει κυρίως με οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως και με παράγοντες που σχετίζονται με την αξιοπιστία του συστήματος. Η εγκατάσταση των μονάδων ΔΠ δεν θα πρέπει να γίνεται τυχαία. Πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κάποιοι περιορισμοί κυρίως τεχνικοί. Η θέση όπως και το μέγεθος των μονάδων ΔΠ παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, τόσο στην αξιοπίστη λειτουργία του συστήματος όσο και στην οικονομική του απόδοση. Κατά την εγκατάσταση μονάδων ΔΠ επιχειρείται η ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενεργού ισχύος του συστήματος, επομένως και το κόστος μεταφοράς και διανομής της ενέργειας^[4.1]. Ακατάλληλη τοποθέτηση μονάδων ΔΠ μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση των απωλειών ισχύος, αναδιαμόρφωση του σχήματος προστασίας, προβλήματα τάσης, επίδραση με αύξηση στο κόστος λειτουργίας, συνεπώς το αποτέλεσμα να είναι κάθε άλλο παρά επιθυμητό.^[4.2]

Η βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων ΔΠ λαμβάνοντας υπόψιν και το μέγεθός τους μπορεί να επιφέρει μείωση στις εκπομπές ρύπων ακόμα και αν αυτές οι μονάδες είναι μη ανανεώσιμες (μονάδες φυσικού αερίου, μονάδες πετρελαίου κλπ.). Επίσης για τους επενδυτές είναι ιδιαίτερα σημαντική η μελέτη για την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος προκειμένου να αποδώσει όσο το δυνατόν περισσότερο η επένδυσή τους (return on Investment). Για το λόγο αυτό έπειτα από έρευνες έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά εργαλεία και μεθοδολογίες με σκοπό την βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων ΔΠ. Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται σε προγράμματα βελτιστοποίησης ή ευρετική τεχνικές, τεχνικούς περιορισμούς που αξιολογούν πολλές πτυχές, όπως τις απώλειες, την αξιοπιστία, τα επίπεδα τάσης.^[4.2] Μέθοδοι όπως ο γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ), ο εξελικτικός προγραμματισμός (ΕΡ), η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO) κλπ. έχουν εφαρμοστεί για την επίλυση προβλημάτων εγκατάστασης μονάδων ΔΠ.^[4.3] Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται χρήση του αλγορίθμου PSO η λειτουργία του οποίου αναλύεται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο.

4.2 ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα εγκατάστασης ΜΔΠ αναλύεται στον υπολογισμό του βέλτιστου μεγέθους και της θέσης των, με βάση την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης, για την οποία ισχύουν ορισμένοι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Οι περιορισμοί ισότητας είναι οι εξισώσεις ροών φορτίου για τους ζυγούς, οι οποίες υπολογίζονται με τον τρόπο που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3. Επομένως όπως αναφέρθηκε για ένα τυχαίο ζυγό j του δικτύου οι εξισώσεις ενεργού και άεργου ισχύος είναι οι εξισώσεις (3.11) και (3.12) αντίστοιχα.

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

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

όπου V_{\min} , V_{\max} είναι το κατώτερο και το ανώτερο όριο που μπορεί να πάρει το μέτρο της τάσης j σε όλους τους ζυγούς j . 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:

$$|S_t| \leq S_{t\max} \quad (4.4)$$

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:

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

$$p \cdot f_{\min}^{DG} \leq p \cdot f^{DG} \leq p \cdot f_{\max}^{DG} \quad (4.6)$$

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 έχει κόστος C_1 €, προκύπτει ο ακόλουθος περιορισμός για το κεφάλαιο:

$$C_1 \times \sum_{i=1}^{\text{αριθμός ΜΔΠ}} P_i^{DG} \leq \text{αρχικό κεφάλαιο} \quad (4.7)$$

Ένας άλλος επιπρόσθετος περιορισμός αφορά τη συνολική διείσδυση των ΜΔΠ, που δεν θα

πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο ποσοστό του συνολικού φορτίου:

$$\sum_{i=1}^{\alpha \rho \iota \theta \mu \acute{o} \varsigma \text{ΜΠΔ}} \times P_i^{DG} \leq P_D \times (\text{Ποσοστό διείσδυσης}) \quad (4.8)$$

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

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

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:

$$\min f_{PF} = \min \sum_{\text{ολες τις γραμμες}} P_{loss} \quad (4.10)$$

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

$$P_{lossjm} = P_{jm} + P_{mj} \quad (4.11)$$

και η ροή ενεργού ισχύος από το ζυγό j στο ζυγό m, P_{jm} είναι :

$$P_{Gk} - P_{km} = V_j^2 (g_{jm} + g_{sjm}) - V_j V_m [g_{jm} \cos(\delta_j - \delta_m) + b_{jm} \sin(\delta_j - \delta_m)] \quad (4.12)$$

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

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

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.

4.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] IEA, “Distributed Generation in Liberalized Electricity Markets”, Paris: IEA Publications, p.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.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (Particle Swarm Optimization-PSO)

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

5.1.1 ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΣΜΗΝΩΝ

Με τον όρο Νοημοσύνη Σμηνών (ΝΣ) (swarm intelligence) στην Επιστήμη των Υπολογιστών χαρακτηρίζουμε όλους εκείνους τους αλγόριθμους και τις κατανεμημένες μεθόδους επίλυσης προβλημάτων που έχουν σαν πηγή έμπνευσης την συλλογική συμπεριφορά (collective behavior) και την εκδηλούμενη νοημοσύνη (emergent intelligence) που εμφανίζεται σε πληθυσμούς [5.2].

Ο όρος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε τεχνολογικές εφαρμογές για να χαρακτηρίσει την συμπεριφορά ομάδων αυτόματων μηχανισμών (robots) τα οποία, υπακούοντας το καθένα σε κάποιους απλούς κανόνες, εμφάνιζαν με την πάροδο του χρόνου κάποιου είδους συλλογική συμπεριφορά [5.3]. Τέτοιες συμπεριφορές είχαν παρατηρηθεί νωρίτερα και στην φύση, σε κοινωνικές ομάδες εντόμων και ζώων, αλλά και σε ομάδες ανθρώπων. Έτσι, κοινωνιολογικά ο όρος χρησιμοποιούνταν για να καταδείξει το αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οντοτήτων, από την πλευρά της ομάδας ή του σμήνους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σμήνη μυρμηγκιών, όπου ενώ κάθε μυρμήγκι σαν μονάδα έχει πολύ περιορισμένο αριθμό δυνατοτήτων και αντιδράσεων στο περιβάλλον του, οι ομάδες μυρμηγκιών παρουσιάζουν μια αξιοθαύμαστη οργάνωση και δομή. Η ΝΣ αποτελεί τόσο γενική έννοια που χρησιμοποιείται ακόμη και σημειολογικά για τον χαρακτηρισμό των ιδεών που διέπουν την ερμηνεία συμβόλων και συμβολισμών κατά την επικοινωνία δύο ατόμων [5.2]. Ο πρώτος αλγόριθμος ΝΣ που εμφανίστηκε ήταν η Βελτιστοποίηση με Αποικία Μυρμηγκιών (BAM) (Ant Colony Optimization) [5.3], ο οποίος μιμείται τον τρόπο με τον οποίο οι τερμίτες αναζητούν τροφή επιλέγοντας την συντομότερη διαδρομή μεταξύ της πηγής τροφής και της θάσης τους. Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε πολλά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με εντυπωσιακά αποτελέσματα και μέχρι σήμερα έχει υιοθετηθεί σε πολλές εφαρμογές του πραγματικού κόσμου, όπως η οργάνωση δρομολογίων αεροσκαφών και η δρομολόγηση τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων (εφαρμόζεται στους δορυφόρους του τηλεπικοινωνιακού κολοσσού France Telecom). Επίσης, έχει αποτελέσει την αφετηρία για το πρόγραμμα ANTS: Autonomous Nano–Technology Swarm της NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) με στόχο την εξερεύνηση αστεροειδών με μικρά, μη–επανδρωμένα διαστημικά σκάφη με ικανότητες αυτο–οργάνωσης και κατανεμημένης, αυτόνομης λειτουργίας και λήψης αποφάσεων σε ομάδες με ιεραρχία. Ωστόσο, οι εφαρμογές της BAM δεν επεκτείνονται ιδιαίτερα σε προβλήματα αριθμητικής βελτιστοποίησης.

Το κενό στα προβλήματα αριθμητικής βελτιστοποίησης ήρθε να καλύψει η μέθοδος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (PSO) (Particle Swarm Optimization) [5.2], η οποία αποτέλεσε την πρώτη μέθοδο ΝΣ για τέτοιου είδους προβλήματα. Παρόλο που η φιλοσοφία πίσω από την PSO διαφέρει άρδην από αυτή των ΕΑ, αρχικά κατατάσσονταν στην ίδια κατηγορία λόγω των ομοιοτήτων που εμφάνιζε στην λειτουργία της με τους ΕΑ, όπως για παράδειγμα η στοχαστικότητα, η χρήση πληθυσμών, η ανάγκη για γνώση μονάχα της συναρτησιακής τιμής κλπ. Αργότερα, όταν η ΝΣ εμφανίστηκε σαν αυτόνομη κατηγορία αλγορίθμων, η PSO αποτέλεσε το κύριο εργαλείο αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων για την αντιμετώπιση προβλημάτων αριθμητικής βελτιστοποίησης.

5.1.2 ΜΕΘΕΥΡΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδοι επίλυσης που συνδυάζουν διαδικασίες τοπικής αναζήτησης και υψηλότερου επιπέδου στρατηγικές για να δημιουργήσουν μια διαδικασία που είναι ικανή να ξεφύγει από κάποιο τοπικό ελάχιστο. Χρησιμοποιούνται για να επιλύσουμε προβλήματα για τα οποία γνωρίζουμε πολύ λίγα που μπορούν να μας βοηθήσουν. Δε γνωρίζουμε πως θα μοιάζει η βέλτιστη λύση, δε γνωρίζουμε πως θα τη βρούμε με κάποια συγκεκριμένη, δημοφιλή, τακτική και η πλήρη απαρίθμηση των λύσεων είναι αδύνατη, λόγω του εύρους του πεδίου των λύσεων. Όμως, όταν μας δοθεί μια οποιαδήποτε λύση μπορούμε να τη δοκιμάσουμε και να κρίνουμε πόσο ικανοποιητική είναι.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθευρετικών αλγορίθμων είναι τα ακόλουθα:

- Μοντελοποιούν ένα φαινόμενο που υπάρχει στη φύση
- Μπορούν να μεταφερθούν εύκολα σε παράλληλη μορφή
- Είναι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι

Οι πιο γνωστοί μεθευρετικοί αλγόριθμοι είναι οι εξής:

- Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)
- Περιορισμένη αναζήτηση (Tabu Search)
- Προσομοιωμένη ανόπτηση (Simulated Annealing)
- Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)
- Εξελικτικοί αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)
- Νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks)
- Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization)
- Αλγόριθμος διασκορπισμένης αναζήτησης (Scatter Search)
- Διαδικασία άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοστικής αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)
- Αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (Differential Evolution)

5.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ – PSO

Οι ακούσιοι κανόνες που ακολουθούν τα μέλη σμήνων στην φύση και τους επιτρέπουν να κινούνται συγχρονισμένα, χωρίς συγκρούσεις, σε εντυπωσιακούς σχηματισμούς αποτέλεσαν πηγή έρευνας και προσομοιώσεων για ερευνητές σε διάφορα επιστημονικά πεδία [5.4], [5.5]. Στις προσομοιώσεις, η κίνηση του σμήνους ήταν απόρροια της προσπάθειας των μελών του σμήνους να διατηρήσουν μια βέλτιστη απόσταση από τα γειτνιάζοντα μέλη [5.6].

Πολλοί νόμοι που διέπουν την κοινωνική συμπεριφορά των ζώων χαρακτηρίζουν και τις ομάδες ανθρώπων [5.7]. Ασφαλώς, στην περίπτωση των ανθρώπων τα πράγματα είναι πιο πολύπλοκα, καθώς οι άνθρωποι κινούνται τόσο στον τριδιάστατο χώρο (περιβάλλον) όσο και στο χώρο των ιδεών, και ενώ στον μεν πρώτο δεν έχουν συγκρούσεις, στον δεύτερο μπορεί να καταλαμβάνουν τις ίδιες θέσεις (πολλοί άνθρωποι μπορούν να μοιράζονται τις ίδιες ιδέες). Αυτή η γενικότητα και αφηρημένη θεώρηση της κοινωνικής συμπεριφοράς των ανθρώπων αποτέλεσε κίνητρο για βαθύτερη μελέτη μέσω προσομοιώσεων, τα αποτελέσματα των οποίων ήρθαν να επιβεβαιώσουν παρατηρήσεις από την φύση, οι οποίες ήγειραν την γενικότερη πεποίθηση ότι [5.2]

«η κοινωνική ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των μελών ενός πληθυσμού δύναται να προσδώσει ένα εξελικτικό πλεονέκτημα στον πληθυσμό».



Εικόνα 5.1 Σμήνος πουλιών σε διάταξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτο-οργάνωσης στη φύση [5.1]

Αυτή ήταν και η κεντρική ιδέα για την ανάπτυξη της μεθόδου Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (PSO) [5.6].

Πρόδρομος της PSO υπήρξε ένας εξομοιωτής κοινωνικής συμπεριφοράς, ο οποίος αναπτύχθηκε από τους Eberhart και Kennedy για την προσομοίωση της κίνησης σμήνων σωματιδίων. Στην πορεία αναπτύχθηκαν πολλές παραλλαγές του εξομοιωτή, οι οποίες ενσωμάτωναν ιδέες όπως η επιτάχυνση από απόσταση και ο συντονισμός ταχυτήτων μεταξύ άμεσα γειτνιαζόντων μελών του σμήνους [5.6], [5.8]. Σκοπός των προσομοιώσεων ήταν η μελέτη της κίνησης του σμήνους προς συγκεκριμένες θέσεις-στόχους. Όταν έγινε αντιληπτό ότι το μοντέλο κίνησης που είχε αναπτυχθεί θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική βελτιστοποίησης, ξεκίνησε μια μεγάλη διαδικασία προσθαφαιρέσεως ιδεών και παραμέτρων του μοντέλου ώσπου παρουσιάστηκε η πρώτη (απλή) έκδοση της μεθόδου PSO για προβλήματα αριθμητικής βελτιστοποίησης [5.6].

Η PSO παρουσιάζει πολλά κοινά με τους ΕΑ. Πρόκειται για μια στοχαστική μέθοδο, που χρησιμοποιεί πληθυσμούς για την αναζήτηση λύσεων εντός του χώρου αναζήτησης. Ωστόσο, μια μεγάλη διαφορά με τους ΕΑ είναι η κίνηση κάθε μέλους του πληθυσμού με μια προσαρμόσιμη ταχύτητα (adaptable velocity) στον χώρο αναζήτησης. Επιπλέον, κάθε μέλος του πληθυσμού έχει μια μνήμη στην οποία διατηρεί την καλύτερη θέση που επισκέφτηκε ποτέ. Σε προβλήματα ελαχιστοποίησης αυτή η θέση είναι το σημείο του χώρου με την μικρότερη συναρτησιακή τιμή που έχει επισκεφτεί ποτέ το μέλος του πληθυσμού [5.6]. Επιπλέον, τα μέλη του πληθυσμού ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορία σχετικά με την καλύτερη θέση (μνήμη) που έχει το καθένα. Έτσι, ορίζοντας γειτονιές μεταξύ των μελών του πληθυσμού, υπάρχει ροή πληροφορίας μεταξύ των μελών που τις απαρτίζουν και η κίνηση του σμήνους είναι απόρροια της στοχαστικής επιτάχυνσης των μελών του προς τις προσωπικές καλύτερες θέσεις τους και προς τις καλύτερες θέσεις των γειτόνων τους. Αυτή η έννοια της «επιτάχυνσης» η οποία χρησιμοποιούταν ιδιαίτερα σε συστήματα σωματιδίων της Σωματιδιακής Φυσικής [5.9] έδωσε την ιδέα στους Eberhart και Kennedy να ονομάσουν τα μέλη του πληθυσμού σωματίδια (particles). Επίσης, ο πληθυσμός ονομάστηκε σμήνος (swarm) λόγω της έμπνευσης που προήλθε από το εξομοιωτή σμήνους που αναφέραμε παραπάνω. Έτσι, η μέθοδος ονομάστηκε Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) [5.8].

Η ιδέα των «γειτονιών» μεταξύ των σωματιδίων του σμήνους οδήγησε στην ανάπτυξη δύο βασικών παραλλαγών της PSO, την PSO με ολική γειτονιά (global neighborhood) ή ολική PSO, και την PSO με τοπική γειτονιά (local neighborhood) ή τοπική PSO, οι οποίες στη βιβλιογραφία συχνά συμβολίζονται και ως gbest και lbest, αντίστοιχα. Σύμφωνα με την ολική παραλλαγή, όλο το σμήνος θεωρείται ως η γειτονιά καθενός σωματιδίου. Άρα κάθε σωματίδιο, εκτός από την προσωπική του καλύτερη θέση, γνωρίζει και την καλύτερη θέση που έχει ποτέ επισκεφτεί οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο του σμήνους, δηλαδή την καλύτερη λύση που έχει βρεθεί μέχρι εκείνη την στιγμή στον χώρο αναζήτησης. Στην τοπική παραλλαγή, ένας αριθμός σωματιδίων (συνήθως μικρός) ορίζονται ως γειτονιά ενός σωματιδίου και το σωματίδιο αυτό, εκτός από την προσωπική του καλύτερη θέση, γνωρίζει την καλύτερη θέση που έχει ποτέ επισκεφτεί οποιοδήποτε άλλο σωματίδιο της γειτονιάς του. Προφανώς, η ολική παραλλαγή αποτελεί ειδική περίπτωση της τοπικής, αλλά αντιμετωπίζονται σαν ξεχωριστές περιπτώσεις λόγω των έντονων διαφορών που παρουσιάζονται στις ιδιότητες του αλγορίθμου [5.6].

Έστω $f : S \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

Η αντικειμενική συνάρτηση και

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$$

Ένα σμήνος αποτελούμενο από N σωματίδια. Για να είμαστε συμβατοί με την συνήθη σημειολογία της PSO θα συμβολίζουμε διαφορετικά ορισμένες παραμέτρους της μεθόδου. Έτσι, το σμήνος θα συμβολίζεται με S αντί του P που συμβόλιζε τον πληθυσμό στους ΕΑ και, αντί για m , το μέγεθος του σμήνους θα συμβολίζεται με N . Προφανώς, κάθε σωματίδιο είναι ένα n -διάστατο διάνυσμα,

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in S \quad i = 1, \dots, N$$

Η ταχύτητα του i -οστού σωματιδίου είναι επίσης ένα n -διάστατο διάνυσμα

$$u_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})^T$$

όπως και η καλύτερη θέση του,

$$p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})^T \in S$$

Υποθέτουμε ότι g_i είναι ο δείκτης του καλύτερου σωματιδίου στη γειτονιά του x_i (υπενθυμίζεται ότι στην ολική παραλλαγή η γειτονιά αυτή είναι όλο το σμήνος) και θεωρούμε t τον μετρητή επαναλήψεων του αλγορίθμου. Τότε, σύμφωνα με την πρώτη έκδοση της PSO, σε κάθε επανάληψη το σμήνος ανανεώνεται σύμφωνα με τις σχέσεις [5.6],

$$u_i(t+1) = u_i(t) + cr_1(p_i(t) - x_i(t)) + cr_2(p_{g_i}(t) - x_i(t)) \quad (5.1)$$

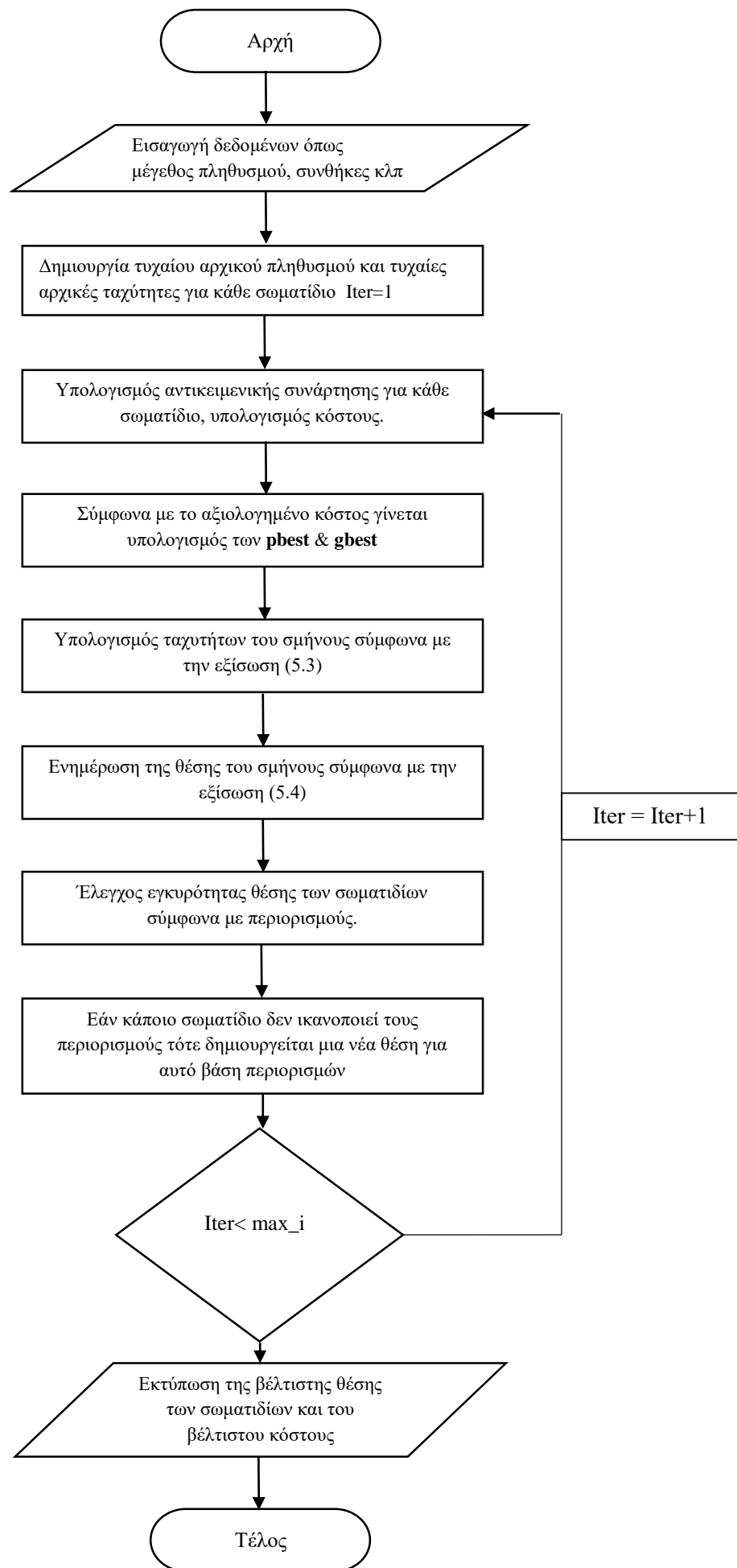
$$x_i(t+1) = x_i(t) + u_i(t+1) \quad (5.2)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, N$, c μια θετική σταθερά επιτάχυνσης (acceleration constant) και r_1, r_2 διανύσματα τυχαίων αριθμών, ομοιόμορφα κατανομημένων εντός του $[0, 1]$. Όλες οι πράξεις μεταξύ διανυσμάτων στις Σχέσεις (5.1) και (5.2) γίνονται κατά συνιστώσες. Για μεγαλύτερη ευελιξία του συστήματος, αντί μιας σταθεράς c και στους δύο όρους των παρενθέσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές σταθερές, c_1 και c_2 .

Οι Σχέσεις (5.1) και (5.2) αντιστοιχούν στην πρώτη έκδοση της PSO. Παρά τα καλά αποτελέσματα σε κάποια προβλήματα [5.8], η έκδοση αυτή δεν συμπεριλάμβανε κάποιο μηχανισμό ελέγχου των ταχυτήτων των σωματιδίων, με αποτέλεσμα την μειωμένη απόδοση της PSO σε σχέση με τους υπόλοιπους ΕΑ. Πιο συγκεκριμένα, ενώ η περιοχή του ολικού ελαχίστου εντοπιζόταν πολύ γρήγορα, οι ταχύτητες μπορούσαν να πάρουν αυθαίρετα μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα την απόκλιση του σμήνους και κατά συνέπεια την αδυναμία επίτευξης ικανοποιητικής ακρίβειας στην εύρεση λύσης [5.10]. Η πρώτη σκέψη για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα ήταν η εισαγωγή μιας νέας παραμέτρου, V_{\max} , ως φράγμα στην απόλυτη τιμή της ταχύτητας ενός σωματιδίου. Έτσι, μετά τον καθορισμό της ταχύτητας, u_i , του σωματιδίου, γίνεται ο έλεγχος.

$$u_{ij} = \begin{cases} V_{\max}, & u_{ij} > V_{\max} \\ -V_{\max}, & u_{ij} < -V_{\max} \\ u_{ij} & \end{cases}$$

Με αυτό τον τρόπο περιορίζονται δραστικά οι ταχύτητες και αποφεύγονται οι εκρήξεις του σμήνους (swarm explosions) που οδηγούν σε απόκλιση.



Διάγραμμα ροής αλγορίθμου PSO [5.12]

Η PSO υπακούει στις πέντε βασικές αρχές της ΝΣ, όπως ορίστηκαν από τον Millonas [5.6], [5.11]

(α) Γειτνίαση (proximity): η ικανότητα του σμήνους να πραγματοποιεί απλούς χρονικούς και χωρικούς υπολογισμούς.

(β) Ποιότητα (quality): η ικανότητα του σμήνους να αντιδρά σε ποιοτικούς παράγοντες του περιβάλλοντος.

(γ) Ποικιλία αντιδράσεων (diverse response): το σμήνος πρέπει να έχει ευρύ φάσμα αντιδράσεων.

(δ) Ευστάθεια (stability): το σμήνος δεν πρέπει να αλλάζει την συμπεριφορά του με μια αμελητέα αλλαγή στο περιβάλλον.

(ε) Προσαρμοστικότητα (adaptability): το σμήνος πρέπει να αλλάζει την συμπεριφορά του όταν το κόστος δεν είναι απαγορευτικό.

Πράγματι, το σμήνος της PSO πραγματοποιεί χωρικούς και χρονικούς υπολογισμούς με την πάροδο του χρόνου (επαναλήψεις). Επίσης, αντιδρά σε ποιοτικούς παράγοντες που υπαγορεύονται από την καλύτερη θέση κάθε σωματιδίου και από το καλύτερο σωματίδιο της γειτονιάς του με δράσεις που εξασφαλίζουν ποικιλότητα. Τέλος, η συμπεριφορά του (κατάσταση του σμήνους) αλλάζει μόνο όταν αλλάζει το καλύτερο σωματίδιο του σμήνους ή της γειτονιάς, διασφαλίζοντας ευστάθεια και προσαρμοστικότητα [5.6]. Γι' αυτό τον λόγο η PSO κατατάχθηκε στην κατηγορία των αλγορίθμων ΝΣ.

5.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η μέθοδος αυτή έχει ένα πλήθος πλεονεκτημάτων που συνοψίζονται παρακάτω:

- Χρησιμοποιεί πιθανοκρατικούς και όχι ντετερμινιστικούς κανόνες μετάβασης και έτσι είναι ένα είδος στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης ο οποίος μπορεί να ψάχνει λύση σε μία πολύπλοκη περιοχή. Αυτό προσδίδει στην PSO μεγαλύτερη ευελιξία από τις συμβατικές μεθόδους.
- Χρησιμοποιεί έναν πληθυσμό ο οποίος ψάχνει για τη λύση. Επομένως η αναζήτηση της λύσης από μία ομάδα ατόμων προσφέρει μεγαλύτερο εύρος από την αναζήτηση της λύσης από ένα μοναδικό σημείο και καθιστά τη μέθοδο λιγότερο ευαίσθητη στο να εγκλωβίζεται σε τοπικά ελάχιστα.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε μη παραγωγίσιμα προβλήματα διότι δεν χρησιμοποιείται η ευαισθησία της συνάρτησης (function sensitivity-gradient).
- Διαθέτει ένα πλήθος παραμέτρων οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εφαρμόζεται σε ποικίλα προβλήματα. Είναι προφανές ότι η επιλογή των παραμέτρων είναι εξαιρετικής σημασίας τόσο για την ταχύτητα όσο και για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου.
- Η ποιότητα της λύσης δεν εξαρτάται από τον αρχικό πληθυσμό αλλά ξεκινώντας από οποιοδήποτε σημείο στο χώρο, η μέθοδος εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση.
- Αντίθετα από τους γενετικούς και τους άλλους ευρετικούς αλγορίθμους, η PSO διαθέτει την ευελιξία να ελέγχει την ισορροπία ανάμεσα στην ολική και την τοπική εξερεύνηση του εξεταζόμενου χώρου. Έτσι ξεπερνάει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης και διευρύνεται η ικανότητα αναζήτησης της λύσης

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] Swarm behavior from. Wikipedia, the free encyclopedia
http://en.Wikipedia.org/wiki/Swarm_behavior
- [5.2] J. Kennedy and R. C. Eberhart. Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.
- [5.3] E. Bonabeau, M. Dorigo, and G. Theraulaz. From Natural to Artificial Swarm Intelligence. Oxford University Press, New York, 1999.
- [5.4] F. Heppner and U. Grenander. A stochastic nonlinear model for coordinate bird flocks. In S. Krasner, editor, The Ubiquity of Chaos. AAAS Publications, 1990.
- [5.5] C. W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. Computer Graphics, 21(4):25–34, 1987.
- [5.6] R. C. Eberhart, P. Simpson, and R. Dobbins. Computational Intelligence PC Tools. Academic Press, 1996.
- [5.7] E. O. Wilson. Sociobiology: The New Synthesis. Belknap Press, Cambridge, MA, 1975.
- [5.8] J. Kennedy and R. C. Eberhart. Particle swarm optimization. In Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, volume IV, pages 1942–1948, Piscataway, NJ, 1995. IEEE Service Center.
- [5.9] W. T. Reeves. Particle systems—a technique for modelling a class of fuzzy objects. ACM Transactions on Graphics, 2(2):91–108, 1983.
- [5.10] P. J. Angeline. Evolutionary optimization versus particle swarm optimization: Philosophy and performance differences. In V. W. Porto, N. Saravanan, D. Waagen, and A. E. Eiben, editors, Evolutionary Programming, volume VII, pages 601–610. Springer, 1998.
- [5.11] M. M. Millonas. Swarms, phase transitions, and collective intelligence. In M. Palaniswami, Y. Attikiouzel, R. Marks, D. Fogel, and T. Fukuda, editors, Computational Intelligence: A Dynamic System Perspective, pages 137–151. IEEE Press, Piscataway, NJ, 1994.
- [5.12] Optimal Sizing and Placement of Generator Units in Distributed Generation System by Particle Swarm Optimization (PSO) Techniques A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Degree of Master of Engineering in Power Engineering By SAJJAN KUMAR Examination Roll No. – M4POW12-07 Registration No. – 113566 of 2010-11 Jadavpur University

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ PSO – ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει γίνει κατανοητό από προηγούμενες παραγράφους ο κρισιμότερος παράγοντας για την βέλτιστη λειτουργία και εγκατάσταση συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διεσπαρμένη παραγωγή, είναι η κατάλληλη τοποθέτηση των μονάδων. Άναρχη τοποθέτηση των μονάδων επιφέρει περισσότερα μειονεκτήματα από την περίπτωση μη εγκατάστασής τους, για το λόγο αυτό η τοποθέτηση των μονάδων αυτών θα πρέπει να γίνεται βάση κάποιων περιορισμών. Στη συγκεκριμένη διπλωματική οι περιορισμοί που τέθηκαν αφορούν τις απώλειες και τις τάσεις. Το εκάστοτε δίκτυο έχει δικές του απώλειες και τάσεις οι οποίες υπολογίζονται μέσω της ροής φορτίου. Η ανάλυση της ροής φορτίου επιτυγχάνεται με τη χρήση του υπολογιστικού πακέτου mat power σε Matlab. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Στην περίπτωση που οι απώλειες και τα μέτρα των τάσεων αποκλίνουν από τις επιθυμητές τιμές πραγματοποιείται τεχνηέντως μια αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ώστε να απορριφθεί σαν λύση μέσω του αλγορίθμου PSO. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6 ο αλγόριθμος PSO είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης σωματιδίων τα οποία κινούνται μέσα στο χώρο λύσεων με σκοπό την εύρεση βέλτιστης λύσης βάση περιορισμών. Τα σωματίδια αυτά αποτελούν κάθε ένα ξεχωριστά μία λύση και αναπαρίστανται από ένα διάνυσμα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου πραγματοποιείται μια αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας.

6.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

6.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΚΤΥΟΥ MATPOWER

Για την πραγματοποίηση της μελέτης εγκατάστασης μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής απαιτείται η αναφορά σε ένα δίκτυο στο οποίο θα γίνει η εγκατάσταση. Για την πραγματοποίηση της εγκατάστασης και των δοκιμών σχετικά με το μέγεθος και τη διαστασιολόγηση των μονάδων είναι απαραίτητη η ανάλυση της ροής φορτίου. Η ανάλυση αυτή όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 3 μας δίνει κρίσιμα στοιχεία σχετικά, με τις απώλειες του δικτύου για μια δεδομένη διαστασιολόγηση των μονάδων, όπως επίσης και τις τάσεις.

Στο πρόβλημα που επιλύουμε χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο matpower. Είναι ένα πακέτο στη γλώσσα προγραμματισμού matlab με m-αρχεία για την επίλυση προβλημάτων ροής ισχύος και βέλτιστης ροής ισχύος. Χρησιμοποιεί ως εργαλείο προσομοίωσης για ερευνητές και εκπαιδευτικούς. Το matpower έχει σχεδιαστεί για να δώσει την καλύτερη δυνατή απόδοση, διατηρώντας παράλληλα τον κώδικα απλό αναφορικά με την κατανόηση και τροποποίηση του.

Το matpower έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί και να εκφράζει τον αριθμό των ζυγών με διάφορες περιπτώσεις (cases). Στη συνέχεια γίνεται αναφορά σε εγκατάσταση μονάδων ΔΠ σε 69 ζυγούς (case69). Τα δεδομένα εισόδου του matpower καθορίζονται από πίνακες δεδομένων, δομημένα στη matlab και συμβολίζονται με τη μεταβλητή mpc. Η δομή αυτή ορίζεται τυπικά σε ένα case αρχείο ή μια συνάρτηση σε m αρχείο που η επιστρεφόμενη τιμή είναι η δομή mpc ή ένα αρχείο MAT που ορίζει τη μεταβλητή mpc σε ισχύ.

Τα πεδία αυτής της δομής είναι τα **baseMVA**, **bus**, **branch**, **gen** και προαιρετικά **gencost**.

Το **baseMVA** είναι αριθμός, ενώ τα υπόλοιπα είναι πίνακες. Κάθε γραμμή των πινάκων αντιστοιχεί σε ένα ζυγό, ένα κλάδο ή μια γεννήτρια αντίστοιχα, ενώ κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε στοιχεία σύμφωνα με τις προδιαγραφές του IEEE και των Power Technologies International (PTI) προτύπων όπως απεικονίζεται παρακάτω.[6.1]

Δεδομένα ζυγών (mpc.bus)

Όνομα	Στήλη	Περιγραφή
BUS I	1	bus number (positive integer)
BUS TYPE	2	bus type (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated)
PD	3	real power demand (MW)
QD	4	reactive power demand (MVar)
GS	5	shunt conductance (MW demanded at V = 1.0 p.u.)
BS	6	shunt susceptance (MVar injected at V = 1.0 p.u.)
BUS AREA	7	area number (positive integer)
VM	8	voltage magnitude (p.u.)

VA	9	voltage angle (degrees)
BASE KV	10	base voltage (kV)
ZONE	11	loss zone (positive integer)
VMAX	12	maximum voltage magnitude (p.u.)
VMIN	13	minimum voltage magnitude (p.u.)
LAM P [†]	14	Lagrange multiplier on real power mismatch (u/MW)
LAM Q [†]	15	Lagrange multiplier on reactive power mismatch (u/MVAr)
MU VMAX [†]	16	Kuhn-Tucker multiplier on upper voltage limit (u/p.u.)
MU VMIN [†]	17	Kuhn-Tucker multiplier on lower voltage limit (u/p.u.)

Δεδομένα γεννητριών (mpc.gen)

<u>Όνομα</u>	<u>Στήλη</u>	<u>Περιγραφή</u>
GEN BUS	1	bus number
PG	2	real power output (MW)
QG	3	reactive power output (MVAr)
QMAX	4	maximum reactive power output (MVAr)
QMIN	5	minimum reactive power output (MVAr)
VG	6	voltage magnitude setpoint (p.u.)
MBASE	7	total MVA base of machine, defaults to baseMVA
		> 0 = machine in-service
GEN STATUS	8	machine status
		≤ 0 = machine out-of-service
PMAX	9	maximum real power output (MW)
PMIN	10	minimum real power output (MW)
PC1*	11	lower real power output of PQ capability curve (MW)
PC2*	12	upper real power output of PQ capability curve (MW)
QC1MIN*	13	minimum reactive power output at PC1 (MVAr)
QC1MAX*	14	maximum reactive power output at PC1 (MVAr)
QC2MIN*	15	minimum reactive power output at PC2 (MVAr)

QC2MAX*	16	maximum reactive power output at PC2 (MVar)
RAMP AGC*	17	ramp rate for load following/AGC (MW/min)
RAMP 10*	18	ramp rate for 10 minute reserves (MW)
RAMP 30*	19	ramp rate for 30 minute reserves (MW)
RAMP Q*	20	ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVar/min)
APF*	21	area participation factor
MU PMAX [†]	22	Kuhn-Tucker multiplier on upper Pg limit (u/MW)
MU PMIN [†]	23	Kuhn-Tucker multiplier on lower Pg limit (u/MW)
MU QMAX [†]	24	Kuhn-Tucker multiplier on upper Qg limit (u/MVar)
MU QMIN [†]	25	Kuhn-Tucker multiplier on lower Qg limit (u/MVar)

Δεδομένα κλάδων (mpc.branch)

<u>Όνομα</u>	<u>Στήλη</u>	<u>Περιγραφή</u>
F BUS	1	“from” bus number
T BUS	2	“to” bus number
BR R	3	resistance (p.u.)
BR X	4	reactance (p.u.)
BR B	5	total line charging susceptance (p.u.)
RATE_A	6	MVA rating A (long term rating)
RATE_B	7	MVA rating B (short term rating)
RATE_C	8	MVA rating C (emergency rating)
TAP	9	transformer off nominal turns ratio, (taps at “from” bus, impedance at “to” bus, i.e. if $r = x = 0$, $tap = \frac{ V_f }{ V_t }$)
SHIFT	10	transformer phase shift angle (degrees), positive \Rightarrow delay
BR STATUS	11	initial branch status, 1 = in-service, 0 = out-of-service
ANGMIN*	12	minimum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
ANGMAX*	13	maximum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
PF [†]	14	real power injected at “from” bus end (MW)

QF^\dagger	15	reactive power injected at “from” bus end (MVA _r)
PT^\dagger	16	real power injected at “to” bus end (MW)
QT^\dagger	17	reactive power injected at “to” bus end (MVA _r)
$MU\ SF^\ddagger$	18	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “from” bus (u/MVA)
$MU\ ST^\ddagger$	19	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “to” bus (u/MVA)
$MU\ ANGMIN^\ddagger$	20	Kuhn-Tucker multiplier lower angle difference limit (u/degree)
$MU\ ANGMAX^\ddagger$	21	Kuhn-Tucker multiplier upper angle difference limit (u/degree)

6.2.2 ΔΙΑΝΥΣΜΑ PSO ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ

Κατά την διαδικασία εύρεσης βέλτιστης λύσης παράγεται κάθε φορά ένα νέο διάνυσμα που εμπεριέχει κρίσιμα στοιχεία σχετικά με το δίκτυο και τις μονάδες που πρόκειται να εγκατασταθούν. Πιο αναλυτικά ο αλγόριθμος PSO παράγει αυτό το διάνυσμα επαναληπτικά μέσω του οποίου γίνεται αλλαγή του δικτύου σύμφωνα με τις τιμές των στοιχείων του. Το πρώτο στοιχείο του διανύσματος αναφέρει το πόσες μονάδες θα εγκατασταθούν στο δίκτυο. Τα επόμενα στοιχεία επαναλαμβάνονται ανά πεντάδες με κάθε πεντάδα να αντιπροσωπεύει στοιχεία της κάθε μονάδας προς εγκατάσταση, όπως είναι:

- Ο ζυγός τοποθέτησης της μονάδας (διαστασιολόγηση) (BUS_I)
- Ο τύπος του ζυγού (BUS_TYPE)
- Ο τύπος της γεννήτριας
- Η ενεργός ισχύς (P)
- Η άεργος ισχύς (Q)

Η άεργος ισχύς Q που δίνεται από το διάνυσμα δεν υπεισέρχεται σαν μεταβλητή στο πρόβλημά μας, παρόλα αυτά εξήχθη για πιθανή περεταίρω ανάλυση σε επέκταση του προβλήματος.

$$VV_i = [vn_1, vn_2, vn_3, \dots, vn_n] \quad , \quad n = (vn_1 \times 5) + 1 \quad (6.1)$$

n : δηλώνει το μέγεθος του διανύσματος με βάση το πρώτο στοιχείο.

Στην περίπτωση που ο ζυγός είναι τύπου 1 τότε οι μονάδες ΔΠ που εγκαθίστανται στο σύστημα προσθέτονται στη στήλη των φορτίων στον πίνακα των ζυγών `mprc.bus` σαν αρνητικά φορτία. Ενώ στην περίπτωση που ο ζυγός είναι τύπου 2 ενημερώνεται ο πίνακας των γεννητριών `mprc.gen`, σε αυτή τη περίπτωση στο ζυγό μπορεί να γίνεται ρύθμιση της τάσης.

Στην περίπτωση ζυγού τύπου 1 έχουμε για την ενεργό ισχύ και για i από 2 έως $(vn(1) * 4 + 1)$

$$mpc.bus(vv(i), 3) = mpc.bus(vv(i), 3) - vv(i + 3) \quad (6.2)$$

Στην περίπτωση ζυγού τύπου 2 και για i από 3 έως $(vv(1)*4+1)$ για j από 1 έως 3 έχουμε την ενημέρωση του πίνακα `mpc.gen` όπως φαίνεται παρακάτω

$$\begin{aligned} mpc.gen(2, j) &= vv(i - j) \\ mpc.gen(3, j) &= vv(i - j) \\ mpc.gen(4, j) &= vv(i - j) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Ξεκινώντας από το δεύτερο στοιχείο του πίνακα των ζυγών `mpc.bus` όπου μας δίνει την ενεργό ισχύ της μονάδας ΔΠ το στοιχείο $vv(i)$ μας δίνει την πληροφορία σχετικά με τον αριθμό του ζυγού που πρόκειται να τοποθετηθεί η μονάδα ΔΠ με αρνητικό φορτίο $vv(i + 3)$.

6.2.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Πρόκειται για τη συνάρτηση στην οποία πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση. Ανάλογα με τον τύπο του ζυγού αλλά και το είδος της μονάδας ΔΠ που πρόκειται να εγκατασταθεί τοποθετείται ένα κόστος σε €. Αυτό το κόστος πολλαπλασιάζεται με το στοιχείο του διανύσματος που προέκυψε από τον PSO που εκφράζει την εγκατεστημένη ισχύ P σε kw. Το άθροισμα όλων των γινομένων διαιρεμένο με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ σύμφωνα με το διάνυσμα, μας δίνει το συνολικό κόστος εγκατεστημένης ισχύος σε €/kw το οποίο συμβολίζεται με **obj**. Το πηλίκο `obj/2310` μας δίνει το **L** όπου 2310 είναι το μεγαλύτερο κόστος €/kw εγκατεστημένης ισχύος. Μια άλλη παράμετρος ορίζεται ως **K=P/Pd_tot** που είναι ο λόγος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος P προς την συνολική ισχύ ζήτησης Pd_tot σε kw.

Οπότε και η αντικειμενική συνάρτηση παίρνει την παρακάτω τελική μορφή

$$Finalcost = (L/K) * Pen1 * Pen2 * Pen3 * Pen4 * Pen5 \quad (6.4)$$

$$P = \sum_{i=1}^k p_i \quad (6.4.1)$$

$$Pd_tot = \sum_{i=1}^m pd_i \quad (6.4.2)$$

Όπου **k** ο μέγιστος αριθμός των εγκατεστημένων μονάδων και **m** ο αριθμός των ζυγών

- **p_i** η εγκατεστημένη ισχύς της μονάδας i
- **pd_i** η ζήτηση σε φορτίο στον ζυγό i

Η σχέση (6.4) τίθεται προς ελαχιστοποίηση με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση της μονάδας L/K άρα και μεγιστοποίηση του παράγοντα K , δηλαδή αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος P σε σχέση με το σύνολο P_{tot} , ενώ ταυτόχρονα μείωση του παράγοντα L δηλαδή του κόστους εγκατεστημένης ισχύος €/kw. Τα $Pen1, Pen2, Pen3, Pen4, Pen5$ είναι πολλαπλασιαστικές σταθερές και αναλύονται παρακάτω.

Μετά την αλλαγή του δικτύου πραγματοποιείται ανάλυση της ροής φορτίου μέσω του `matpower`. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες για το νέο δίκτυο όπως είναι οι συνολικές απώλειες, οι τάσεις στους ζυγούς κ.α.

Κατά την ανάλυση του προβλήματος τίθενται ορισμένοι περιορισμοί, αυτοί έχουν να κάνουν με τις απώλειες και με τα όρια των τάσεων στους ζυγούς. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα έχει τεθεί ένας περιορισμός σχετικά με τις απώλειες οι οποίες στο σύνολό τους δε θα πρέπει να ξεπερνούν το 5% της εγκατεστημένης ισχύος. Οι συνολικές απώλειες προέρχονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου και είναι το άθροισμα της εισερχόμενης ενεργού ισχύος **Pin** και της εξερχόμενης **Pout** στον **N** κλάδο.

$$total_losses = \sum_{i=1}^N Pin(i) + Pout(i) \quad (6.5)$$

$$(total_losses * 100 / P) < 5 \quad (6.6)$$

Στην περίπτωση που δεν ισχύει η σχέση (6.6) θέτουμε ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα (penalty) **Pen1=5** ο οποίος αυξάνει τη συνολική τιμή της αντικειμενικής οπότε και απορρίπτεται σαν λύση οτιδήποτε υπερβαίνει το 5% της παραγωγής.

Ο δεύτερος περιορισμός έχει να κάνει με τα όρια των τάσεων στους ζυγούς. Έχει τεθεί ο περιορισμός της σχέσης (4.3) ο οποίος γίνεται:

$$0.9 \leq V_i \leq 1.1 \quad (6.7)$$

Η πιο αναλυτικά αν

$$\text{για } i \text{ από } 1 \text{ έως } m, \quad \min V_i < 0.9 \quad (6.8)$$

$$\max V_i > 1.1 \quad (6.9)$$

τότε αυτό σημαίνει πως κάποιες/α από τις τάσεις **V_i** στους ζυγούς **m** αποκλίνουν των ορίων, έτσι τίθενται ένας δεύτερος πολλαπλασιαστικός παράγοντας **Pen2=5** ο οποίος αυξάνει τη συνολική τιμή της αντικειμενικής οπότε και απορρίπτεται σαν λύση.

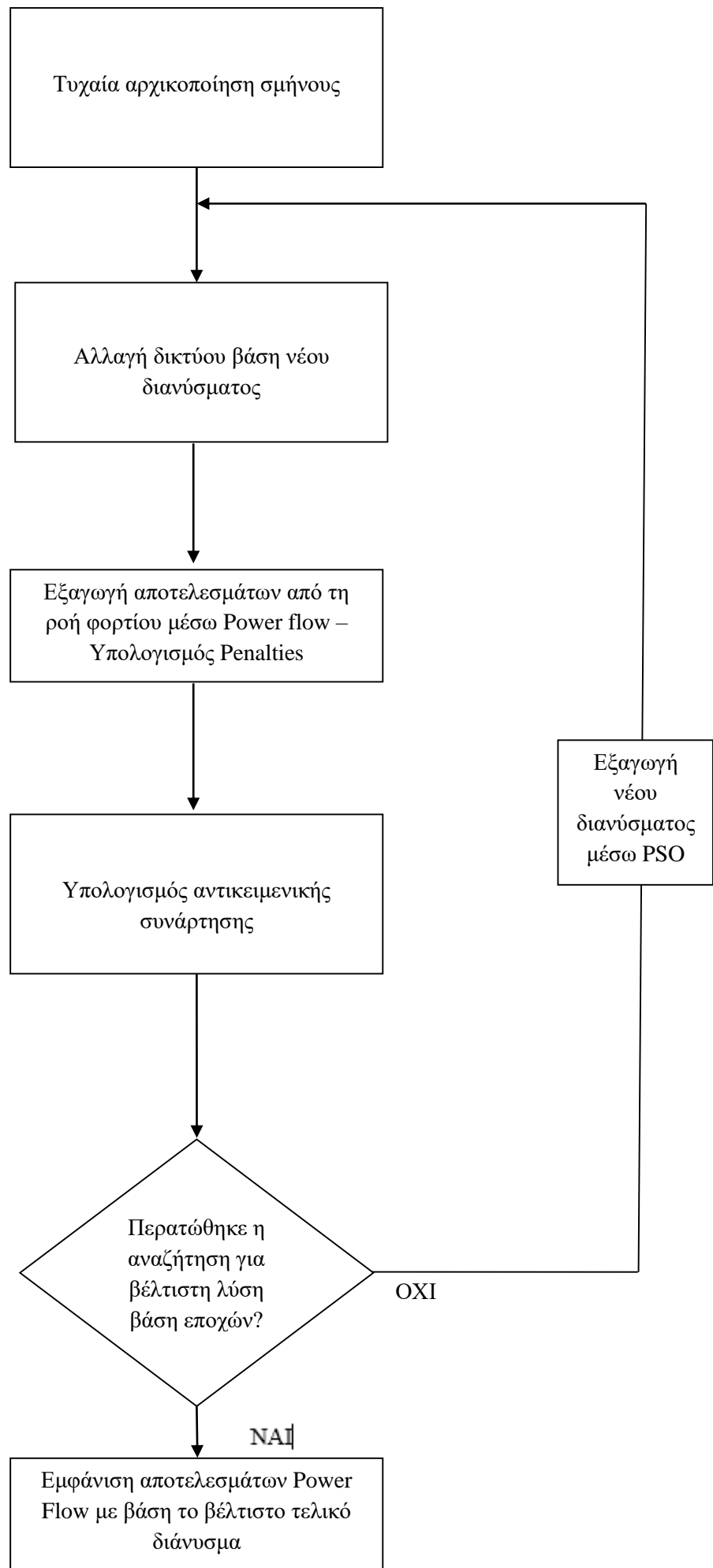
Στην τελική φάση εάν το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι βέλτιστο αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της ροής φορτίου όπως και της βέλτιστης και κατάλληλης θέσης των μονάδων και της ισχύς τους. Σε διαφορετική περίπτωση εξάγεται ένα νέο διάνυσμα με τη βοήθεια του αλγορίθμου PSO.

Για την επίτευξη καλής διασποράς των μονάδων στο δίκτυο λειτουργούν τρεις επιπλέον περιορισμοί. Όταν το άθροισμα της εγκατεστημένης ισχύς από Φ/Β, Α/Γ και Μικροτουρμπίνα ξεχωριστά ξεπεράσει ή είναι χαμηλότερο από το 50% ή 15% αντίστοιχα τότε τίθενται ορισμένα penalties στην αντικειμενική συνάρτηση με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη και ομοιογενέστερη διασπορά των μονάδων μέσα στο δίκτυο. Όταν δεν ισχύουν οι παρακάτω ανισοτικές σχέσεις τότε η αντικ. συνάρτηση πολ/ζεται με **Pen3=Pen4=Pen5=5** αντίστοιχα για κάθε σχέση.

$$P_{tot_Φ/Β} = \sum_{i=1}^k P_{(Φ/Β)i} \quad 15 < P_{tot_Φ/Β} / P * 100 < 50 \quad (6.10)$$

$$P_{tot_Α/Γ} = \sum_{i=1}^k P_{(Α/Γ)i} \quad 15 < P_{tot_Α/Γ} / P * 100 < 50 \quad (6.11)$$

$$P_{tot_fuel} = \sum_{i=1}^k P_{(fuel)i} \quad 15 < P_{tot_fuel} / P * 100 < 50 \quad (6.12)$$



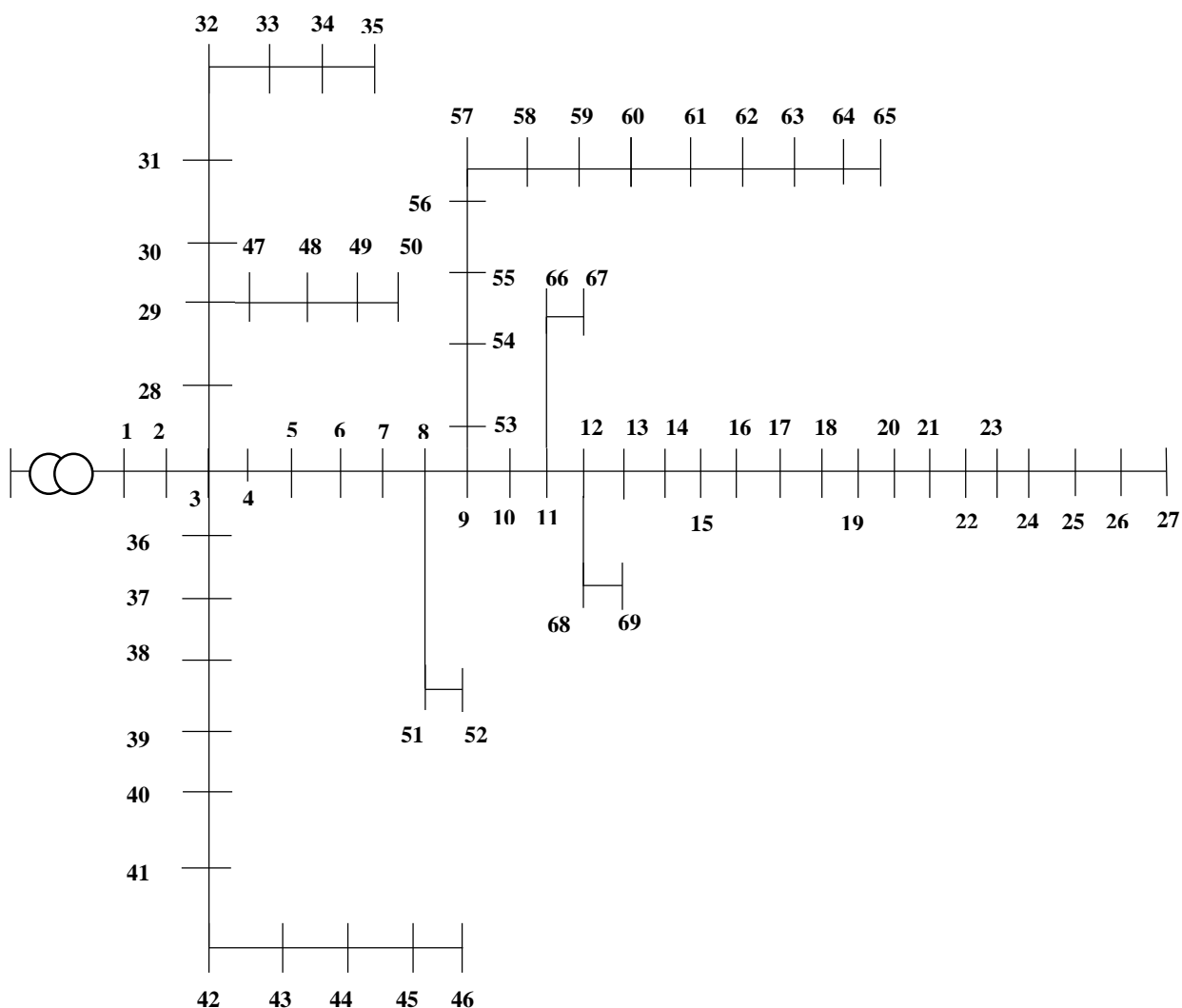
6.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] Matpower 4.1 User's Manual Ray D. Zimmerman Carlos E. Murillo-Sanchez December 14, 2011©

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΠ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση ακτινικού δικτύου 69 ζυγών. Πραγματοποιείται εφαρμογή των όσων περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά απεικονίζεται το δίκτυο γραφικά στο σχήμα (7.1) και στον πίνακα δεδομένων (7.1) με εμφανείς τις συνδέσεις των κόμβων, τους κλάδους. Παρουσιάζονται αριθμητικά οι αντιστάσεις και οι επαγωγικές αντιδράσεις μεταξύ των κλάδων, η ενεργός και η άεργος ισχύς για κάθε ζυγό άφιξης. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων και παρουσίαση του δικτύου με τις μονάδες ΔΠ στο βέλτιστο μέγεθος και θέση τους. Εξάγονται σημαντικά γραφήματα, τάσεων και τιμές σχετικές με το κόστος εγκατάστασης των μονάδων, τις απώλειες κλπ.



Σχήμα (7.1) Ακτινικό δίκτυο διανομής 69 ζυγών της IEEE

7.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ 69 ΖΥΓΩΝ

Στο ζυγό 1 βρίσκεται υποσταθμός YT/MT και ως εκ τούτου θεωρείται ζυγός ταλάντωσης ($V=1$, $\delta=0$). Οι υπόλοιποι ζυγοί του δικτύου είναι ζυγοί φορτίου (PQ) και τα δεδομένα του δικτύου φαίνονται στον Πίνακα 7.1. Το συνολικό εγκατεστημένο φορτίο του δικτύου είναι $P=3,801.89$ kW και $Q=2,684.1$ kVAr, η ονομαστική τάση του δικτύου, που θεωρείται και βασική τάση, είναι $V_N=V_{BASE}=12.66$ kV και η βασική ισχύς είναι $S_{BASE}=10$ MVA.

Πίνακας δεδομένων δικτύου 69 ζυγών (7.1)

Γραμμή	Ζυγός αναχώρησης	Ζυγός άφιξης	R (Ω)	X(Ω)	P ζυγού άφιξης (MW)	Q ζυγού άφιξης (MVar)
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	0.381	0.1941	0.0404	0.03
7	7	8	0.0922	0.047	0.075	0.054
8	8	9	0.0493	0.0251	0.03	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	0.005
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	0.03
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	0.005	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	26	27	0.3089	0.1021	0.014	0.01
26	27	28	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	0.232	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

Πίνακας (7.1) συνέχεια

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
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	1.59	0.5337	0	0
57	57	58	0.7837	0.263	0	0
58	58	59	0.3042	0.1006	0.1	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	0.02
68	68	69	0.0047	0.0016	0.028	0.02
				Σύνολο	3.80189	2.6941

Στο παραπάνω δίκτυο πρόκειται να διασυνδεθούν ΜΔΠ τριών τύπων, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά και μικροτουρμπίνες μικρής ισχύος. Η τοποθέτηση θα γίνει σε συγκεκριμένους ζυγούς, σύμφωνα με το σενάριο που παρατίθεται στον Πίνακα 7.2 και απεικονίζεται στο Σχήμα 7.2 Αυτό έχει σα στόχο τη βελτίωση της τάσης του δικτύου, την καλύτερη εξυπηρέτηση των φορτίων, τη μείωση της ροής ισχύος στις γραμμές διανομής και βελτίωση στις συνολικές απώλειες του δικτύου. Τα αποτελέσματα σχετικά με το ζυγό τοποθέτησης, το μέγεθος και τον τύπο των μονάδων έχουν επέλθει από την διαδικασία βελτιστοποίησης που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 6.

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟ ΔΙΑΝΥΣΜΑ

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 6 η βελτιστοποίηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός διανύσματος που εμπεριέχει πληροφορίες και χαρακτηριστικά ως προς τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση. Κατά την εξαγωγή του τελικού διανύσματος γίνονται πλέον γνωστές οι θέσεις των μονάδων η ισχύ που πρόκειται να εγκατασταθεί στους συγκεκριμένους ζυγούς, ο τύπος του ζυγού όπως και το είδος της μονάδας προς εγκατάσταση. Τμήμα του διανύσματος αυτού παρατίθεται στον πίνακα 7.2.

Η πρώτη γραμμή υποδεικνύει τον αριθμό των ΜΔΠ που θα τοποθετηθούν στο δίκτυο. Στη συνέχεια ακολουθούν 16 5άδες που δηλώνουν τα στοιχεία των μονάδων. Στην προκειμένη περίπτωση η πρώτη σειρά των 5 αριθμών δηλώνουν ότι θα γίνει εγκατάσταση στον 5ό ζυγό ο οποίος είναι τύπου 2 πράγμα που σημαίνει ότι σε αυτό το ζυγό μπορεί να γίνεται ρύθμιση της τάσης. Το είδος της ΜΔΠ είναι τύπου 2 που σημαίνει εγκατάσταση Φ/Β με ενεργό και άεργο ισχύ 0.0915 και -0.1001 αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα στοιχεία του διανύσματος εμπεριέχουν τα ίδια χαρακτηριστικά. Με τον τρόπο αυτό έχουμε τις πληροφορίες για την εγκατάσταση που πρόκειται να λάβει χώρα στο δίκτυο. Στη συνέχεια γίνεται η ενημέρωση του δικτύου και η ανάλυση της ροής φορτίου που μας δίνει τα αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα 7.3 φαίνονται οι εγκαταστάσεις των μονάδων στο δίκτυο.

Ο ζυγός 1 Ζυγός Ταλαντώσεως ή Αναφοράς (slack bus), είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμοποιούμενος για να αντισταθμίζει τις απώλειες του δικτύου, που δεν είναι γνωστές από την αρχή και για άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Στο ζυγό αυτό επιβάλλεται σταθερή τάση κατά μέτρο και γωνία και προσδιορίζονται οι ισχύεις παραγωγής.

Πίνακας (7.2) Τμήμα βέλτιστου διανύσματος

	bus	bus	Res	P	Q	bus	bus	Res	P	Q	bus	bus	Res	P	Q
	type	type	type			type	type	type			type	type	type		
16	5	2	2	0,0915	-0,1001	30	1	2	1,9606	0,5243	37	2	3	0,2787	-0,3291

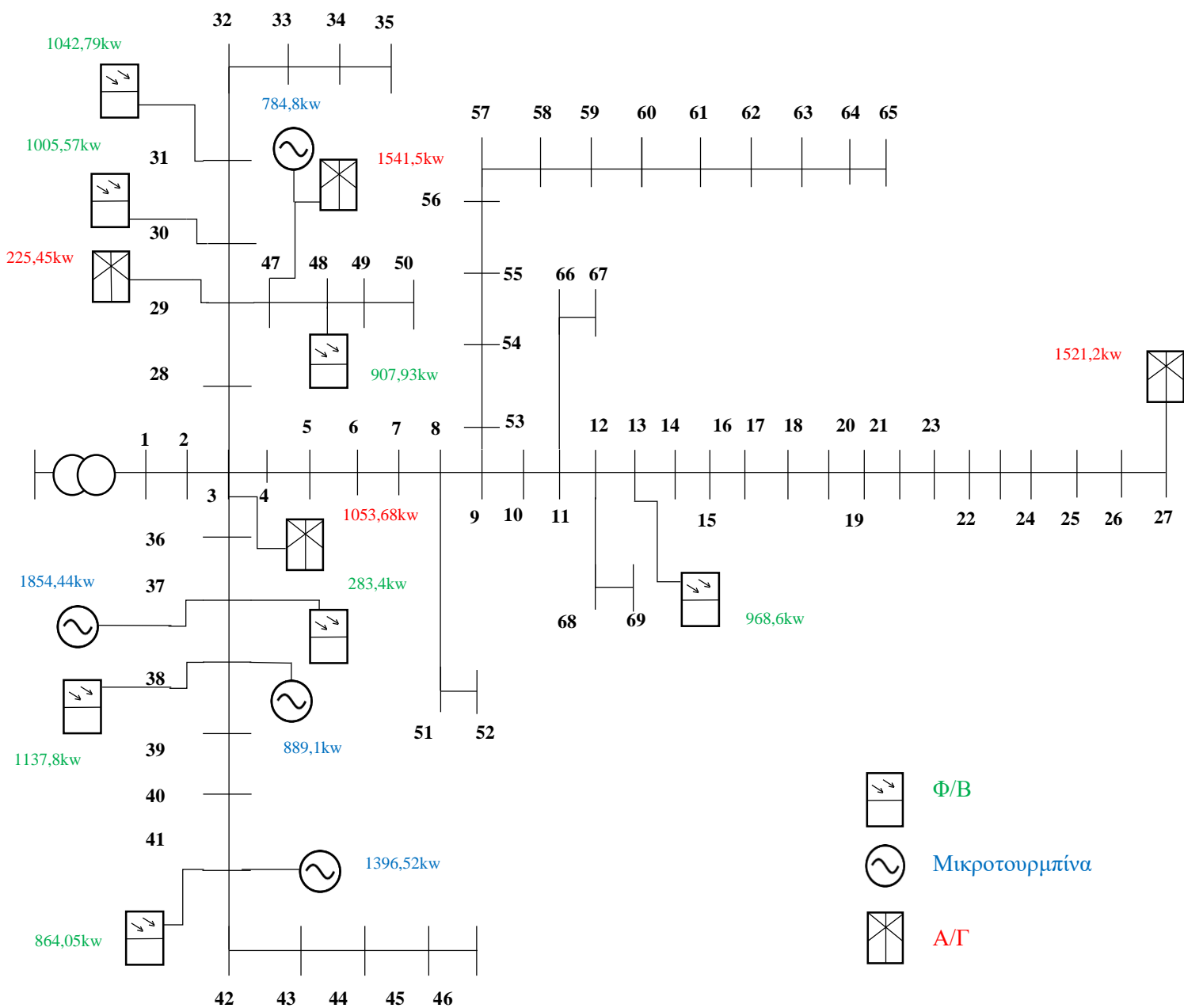
7.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Ζυγός	Εγκατεστημένη ισχύς P (kw)	Αεργή ισχύς Q ΜΔΠ (MVA)	Τύπος ΜΔΠ	Τύπος ζυγού	Κόστος εγκατάστασης (€/kw)	Κόστος εγκατάστασης (€)
1				3		
38	889,1	-1,6077	Μικροτουρμπίνα	2	1850	1644835
48	907,93	0,5793	Φ/Β	2	1650	1498084,5
3	1053,68	0,97046	Α/Γ	2	2310	2434000,8
29	225,45	5,0811	Α/Γ	2	2310	520789,5
41	864,05	-0,8817	Φ/Β	2	1650	1425682,5
37	1854,44	1,0350	Μικροτουρμπίνα	2	1850	3430714
41	1396,52	-0,8817	Μικροτουρμπίνα	2	1850	2583562
31	1042,79	-0,2747	Φ/Β	2	1650	1720603,5
30	1005,57	-5,6148	Φ/Β	2	1650	1659190,5
37	283,4	0	Φ/Β	1	1500	425100
47	1541,5	0	Α/Γ	1	2100	3237150
38	1137,8	0	Φ/Β	1	1500	1706700
47	784,8	0	Μικροτουρμπίνα	1	1700	1334160
27	1521,2	0	Α/Γ	1	2100	3194520
13	968,6	0	Φ/Β	1	1500	1452900
ΣΥΝΟΛΟ:	15.476,83				27.170	28.267.992,3

Πίνακας 7.3 : Τοποθέτηση μονάδων ΔΠ σύμφωνα με το βέλτιστο τελικό διάγραμμα

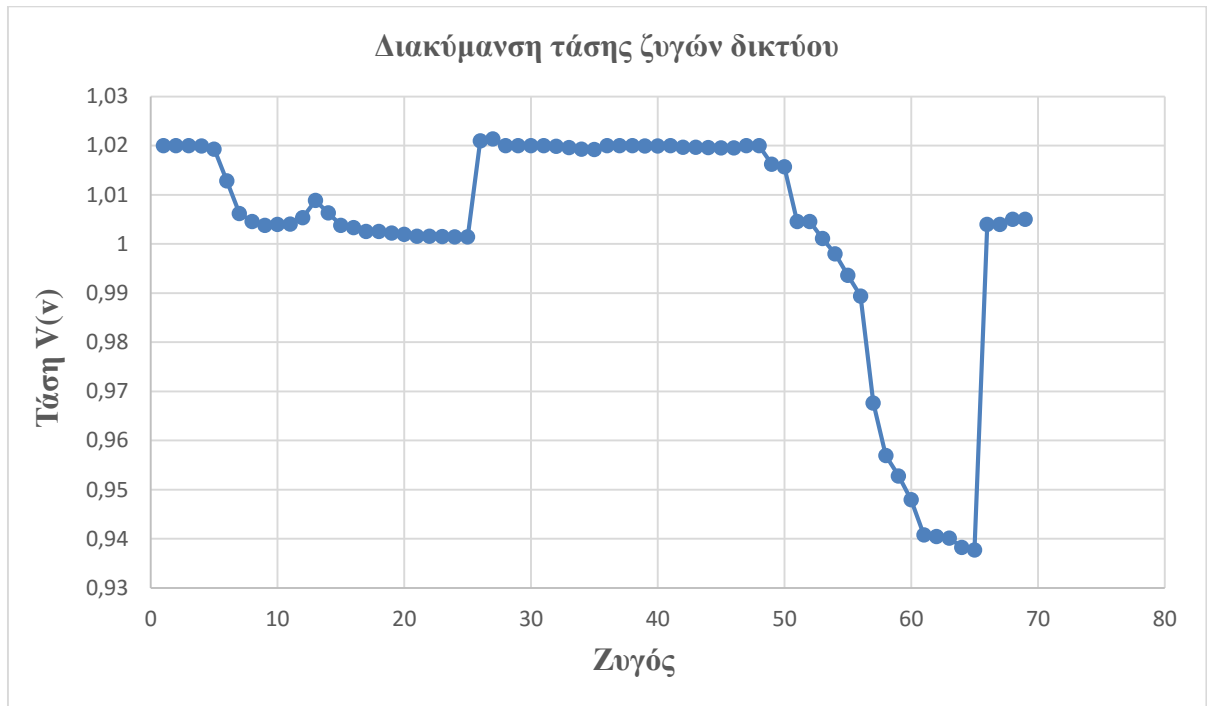
Ζυγός	Μικροτουρμπίνα		Α/Γ		Φ/Β	
	Εγκατεστημένη ισχύς P (kw)	Κόστος εγκατάστασης (€)	Εγκατεστημένη ισχύς P (kw)	Κόστος εγκατάστασης (€)	Εγκατεστημένη ισχύς P (kw)	Κόστος εγκατάστασης (€)
38	889,1	1644835				
37	1854,44	3430714				
41	1396,52	2583562				
47	784,8	1334160				
3			1053,68	2434000,8		
29			225,45	520789,5		
47			1541,5	3237150		
27			1521,2	3194520		
48					907,93	1498084,5
41					864,05	1425682,5
31					1042,79	1720603,5
30					1005,57	1659190,5
37					283,4	425100
38					1137,8	1706700
13					968,6	1452900
ΣΥΝΟΛΟ:	4.924,86	8.993.271	4.341,83	9.386.460,3	6.210,14	9.888.261
Ποσοστό επι της συνολικής παραγωγής P	31,80%		28,06%		40,14%	

Πίνακας (7.4) Κατανομή τεχνολογιών μονάδων – ποσοστό διείσδυσης επί συνολικού P



Σχήμα (7.2) Θέση εγκατάστασης ΜΔΠ στο δίκτυο των 69 ζυγών.

7.3.3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ



Σχήμα 7.1 Διακύμανση τάσης ζυγών δικτύου 69 ζυγών της IEEE



Σχήμα 7.2 Εξερχόμενη ροή ισχύος γραμμών δικτύου 69 ζυγών της IEEE

Σκοπός της εργασίας ήταν η βέλτιστη διαστασιολόγηση με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής με το λιγότερο δυνατό κόστος εγκατάστασης. Για την επίτευξη αυτού, στόχος ήταν η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, σχέση (6.4), με μια σειρά από επαναλήψεις εντός περιορισμών στις τάσεις και στις απώλειες. Ο αλγόριθμος επιτυχώς συνέκλινε στην βέλτιστη λύση με τα εξής αποτελέσματα.

- Ο παράγοντας $K=P/Pd_{tot}$ είναι ο παρονομαστής στο κλάσμα της αντικειμενικής και θα περιμέναμε να μεγιστοποιηθεί. Η μεγιστοποίηση αυτή μεταφράζεται σε αύξηση του P δηλαδή της εγκατεστημένης ισχύος σε kw. Με $K = 3,392$ έχουμε μέγιστο $P = 15.476\text{kw}$ δηλαδή μέγιστη συνολική εγκατεστημένη ισχύς.
- Ο παράγοντας $L=obj/2310$ τίθεται προς ελαχιστοποίηση με ελαχιστοποίηση του obj με τιμή $obj = 1826 \text{ €/kw}$ που είναι η βέλτιστη μέση τιμή εγκατάστασης ΜΔΠ.
- Οι απώλειες κυμάνθηκαν εντός ορίων, στο 2.26% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.
- Οι τάσεις σε όλους του ζυγούς όπως φαίνεται και στο σχήμα (7.1), επιτυχώς κυμάνθηκαν μεταξύ των ορίων 0.9 και 1.1 V
- Από το σχήμα (7.2) φαίνεται πως οι ροές διατηρούνται εντός ορίων αντοχής των γραμμών.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα (7.4) παρατηρείται καλή διασπορά των τεχνολογιών των μονάδων με μεγαλύτερο ποσοστό διείσδυσης να συναντάται στα Φ/Β τιμή 40,14% επι της συνολικής εγκατάστασης. Επίσης γίνεται εμφανές ότι τηρήθηκαν τα όρια στους περιορισμούς και όλες οι μονάδες βρίσκονται μεταξύ 15 και 50 %.

7.4 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παραπάνω ανάλυση και μελέτη πραγματοποιήθηκε βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής μέσω βελτιστοποίησης μιας αντικειμενικής συνάρτησης με διάφορα κριτήρια. Τα κριτήρια που έλαβαν χώρα ήταν η μεγιστοποίηση της διείσδυσης των μονάδων με ταυτόχρονη μείωση του κόστους εγκατάστασης €/kw σύμφωνα με ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αναφέρονται στα όρια των τάσεων στους ζυγούς, στον περιορισμό των απωλειών στους κλάδους σύμφωνα με κάποιο ανεκτό όριο σε σχέση με την συνολική ζήτηση και τέλος στη διανομή των μονάδων αναφορικά με το είδος τους, ώστε να υπάρχει ποικιλία τεχνολογίας.

Μια σημαντική τροποποίηση που θα μπορούσε να δώσει περισσότερο ρεαλιστικά αποτελέσματα θα ήταν να λαμβάνονταν υπόψιν αβεβαιότητες αναφορικά με τις μονάδες ΑΠΕ. Ως γνωστόν οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από ένα επίπεδο στοχαστικότητας, ορισμένες φορές και αρκετά υψηλό, οφειλόμενο σε εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως είναι ο καιρός. Υψηλή/χαμηλή ηλιοφάνεια ή ισχυροί/ασθενείς άνεμοι είναι χαρακτηριστικά που μεταβάλλουν την παραγόμενη ισχύ των μονάδων. Ως εκ τούτου, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν εργαλεία στατιστικής και πιθανοτήτων για την πρόβλεψη της κατάστασης του δικτύου σε κάθε στιγμή.