



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

Επέκταση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Α. Ορφανός

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006



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

Επέκταση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιώργος Α. Ορφανός

Επιβλέπων : Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Σεπτεμβρίου 2006

.....
Ευάγγελος Διαλυνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταυρούλα Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006

.....
Γιώργος Α. Ορφανός

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

Copyright © Γιώργος Ορφανός 2006

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός προγράμματος για την επέκταση συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου αποσύνθεσης Benders. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόστηκε στα πειραματικά δίκτυα του Garver και των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE.

Στην πορεία της εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα βελτιστοποίησης με έμφαση στο γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό, η θεμελίωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, η μέθοδος αποσύνθεσης Benders και κάποιες από τις σύγχρονες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων επέκτασης δικτύων μεταφοράς. Στη συνέχεια αναλύεται το πρόγραμμα που κατασκευάστηκε και γίνεται αναφορά στα σενάρια που προσομοιώθηκαν.

Εξετάστηκαν οι επεκτάσεις που προκύπτουν στο σύστημα μεταφοράς του μοντέλου του Garver καθώς και του τροποποιημένου δικτύου των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE. Τα στοιχεία του δικτύου αυτού, βασίστηκαν στο Ελληνικό Σύστημα. Αρχικά θεωρήθηκε ενίσχυση της απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής, στη συνέχεια υποτέθηκε εγκατάσταση μεγάλης μονάδας παραγωγής κοντά στο συγκεντρωμένο φορτίο και τέλος εξετάστηκε το σενάριο εγκατάστασης μεγάλης διεσπαρμένης παραγωγής.

Η σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του προγράμματος οδήγησε στην αξιολόγηση του αλγορίθμου αλλά και στη διατύπωση ορισμένων προτάσεων για την οικονομικότερη, ως προς το σύστημα μεταφοράς, επέκταση του συστήματος παραγωγής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύστημα Μεταφοράς, μέθοδος αποσύνθεσης Benders, γραμμικοποιημένη ροή ισχύος, γραμμικός προγραμματισμός, διεσπαρμένη παραγωγή

ABSTRACT

The scope of this thesis is the development of a transmission expansion planning program using the Benders decomposition technique. This program was applied to Garver and IEEE 14-bus experimental networks.

The Greek Electrical Energy System, the optimization problem techniques, with emphasis on linear and integer programming, the mathematical formulation of an Electrical Energy System development problem, the Benders decomposition technique and some of the modern solution methods on transmission expansion problems are thoroughly presented during the analysis of the thesis. The program developed and the scenarios simulated are also analyzed.

The transmission system expansion plans that derived from the Garver model, as long with those from the modified IEEE 14-bus system have been examined. The data for the later network were based on the Greek System. At the first scenario simulated, a remote conventional generation expansion was regarded. Afterwards the establishment of a big generation unit near the concentrated load was assumed and finally a scenario of wide distributed generation was examined.

The comparison of the corresponding program results has led to the algorithm evaluation and to some suggestions on the most economical, regarding the transmission system, expansion of the generation system.

KEY WORDS

Transmission System, Benders decomposition technique, DC power flow, linear programming, distributed generation

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Η εκπόνησή της ξεκίνησε την Άνοιξη του 2006 και ολοκληρώθηκε με τη σύνταξη του παρόντος κειμένου, υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου και του Υποψήφιου Διδάκτορα Σκοτεινού Ηρακλή.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της εργασίας μου αυτής και ιδιαίτερα τον καθηγητή μου και τον Ηρακλή Σκοτεινό για τις πολύτιμες συμβουλές και παρεμβάσεις τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	7
3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	9
4. ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	15
5. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΙΧΜΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	15
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	19
i. Ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής	19
ii. Αύξηση του φορτίου	20
iii. Ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	24
2. ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	24
i. Θεμελίωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης	24
ii. Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Βελτιστοποίησης	25
3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	27
i. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χωρίς περιορισμούς	27
ii. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς	27
A. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς ισότητας	27
B. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς ανισότητας	29
4. ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	29
i. Γραφική λύση	31
ii. Η μέθοδος simplex	32
5. ΑΚΕΡΑΙΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	37
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	37
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Σ.Η.Ε.	39
3. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS	47
4. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ - GENETIC ALGORITHMS	50
3. ΑΠΛΗΣΤΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ – GRASP	53
4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ – SIMULATING ANNEALING	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	57
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	57
2. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	58
i. Μοντέλα αναπαράστασης δικτύων	58
A. Το μοντέλο μεταφοράς	58
B. Η DC ροή φορτίου	59
ii. Επίλυση υποπροβλήματος λειτουργίας	60
3. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	65
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	65
2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ GARVER	65
3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ 14 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ	79
i. Σενάριο ενίσχυσης απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής	82
ii. Σενάριο εγκατάστασης μεγάλης συμβατικής μονάδας παραγωγής κοντά στο φορτίο	85
iii. Σενάριο εγκατάστασης μεγάλης διεσπαρμένης παραγωγής	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	94
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	94
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	94
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	96
i. Συμπεράσματα για το μοντέλο του Garver και τη λειτουργία του προγράμματος	97
ii. Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα στο δίκτυο των 14 ζυγών της ΙΕΕΕ	100
4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	105
A. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	107
A.1. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	107
A.1.α. Θερμικοί σταθμοί παραγωγής	107
A.1.β. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής (ισχύς μεγαλύτερη από 10 MW)	107
A.1.γ.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	108
A.2. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	111
A.2.α. Πετρελαϊκοί σταθμοί παραγωγής	111
A.2.β.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	112
B. ΧΑΡΤΕΣ	115
B.1 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	115

B.2 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	116
B.3 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΒΟΙΑΣ.....	117
B.4 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗ ΘΡΑΚΗ.....	117
B.5 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ.....	118
B.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ	119
B.7 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Ε.Δ.Σ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ Μ.Α.Σ.Μ. 2006	120
Γ. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤLAB	121
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	139
ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ	140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

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 συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz (50Hz για την Ελλάδα), χρησιμοποιούνται όμως σε ειδικές περιπτώσεις και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης έχουν επιπλέον και ουδέτερο αγωγό. Η τάση λειτουργίας παραμένει, με μικρές διακυμάνσεις, γύρω από μια δεδομένη για κάθε μέρος του συστήματος τιμή.

Η δομή και το μέγεθος του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ωρου και από τη χωροταξική της κατανομή, καθώς όπως είναι γνωστό η ηλεκτρική ενέργεια δε μπορεί ακόμα να αποθηκευτεί σε μεγάλες και επαρκείς ποσότητες. Έτσι, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος αυτό αυξάνεται προοδευτικά από την παραγωγή προς τη διανομή, καθώς μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις. Το κόστος καταβάλλεται από τους καταναλωτές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησής τους (οικιακό, αγροτικό, βιομηχανικό φορτίο), αλλά και με την τάση με την οποία συνδέονται (υψηλή, με την οποία συνδέονται πολύ μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές, μέση, όπου βρίσκονται μεγάλοι και μεσαίου μεγέθους καταναλωτές, ή χαμηλή, όπου συνδέονται οικιακοί καταναλωτές, εμπορικοί καταναλωτές, κλπ) [1].

Η παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του εξήντα γινόταν αποκλειστικά από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπως οι κλασικοί λιγνιτικοί και πετρελαϊκοί σταθμοί, καθώς και από μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς όπου αυτό ήταν εφικτό, χωρίς όμως να έχει γίνει κάποια σημαντική προσπάθεια, τουλάχιστον σε επίπεδο μαζικής παραγωγής, για την εύρεση εναλλακτικών μορφών ενέργειας πλην της πυρηνικής. Μετά το 1973 και την πρώτη παγκόσμια πετρελαϊκή κρίση αναθερμάνθηκε το ενδιαφέρον για τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το ενδιαφέρον άρχισε να γίνεται εντονότερο τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των δυσμενών προβλέψεων για τα αποθέματα πρώτων υλών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, αλλά και μετά τη Διάσκεψη του Ρίο και τη διακήρυξη του Κιότο. Πλέον

αποτελεί παγκόσμιο περιβαλλοντολογικό στόχο η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν οι δυσμενείς συνέπειες από τη φωτοχημική ρύπανση στο περιβάλλον και να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η Ελλάδα είναι συγκριτικά με άλλες ευρωπαϊκές χώρες φτωχή σε φυσικές πρώτες ύλες (λιγνίτη και πετρέλαιο), ενώ υπάρχει μόνο λιγνίτης χαμηλής θερμογόνου δύναμης ο οποίος παρόλα αυτά συνεισφέρει κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στην ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας. Κατά συνέπεια, η ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας μας στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό σε εισαγόμενες πρώτες ύλες, όπως το πετρέλαιο και τα τελευταία χρόνια το φυσικό αέριο (από το 1998), των οποίων οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις παγκόσμιες συγκυρίες.

Από την άλλη πλευρά η Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικό αιολικό δυναμικό, ιδιαίτερα στις ανατολικές και παράκτιες περιοχές του ηπειρωτικού συγκροτήματός της (Ανατολική Θράκη και Εύβοια, Λακωνία και Μαγνησία) καθώς και στα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική την εκμετάλλευσή του με τη βοήθεια ανεμογεννητριών σε Αιολικά πάρκα. Συν τοις άλλοις η έντονη ηλιοφάνεια, η μεγαλύτερη στην Ευρώπη σε μεγάλες περιόδους του έτους, καθιστά αρκετά ελκυστική και την εκμετάλλευση της Ηλιακής Ενέργειας μέσω Φωτοβολταϊκών Γεννητριών.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διάφορων επιπέδων τάσεων που μπορεί να χρησιμοποιούνται σε αυτό. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή τάση και οι τάσεις των τριών ζυγών να βρίσκονται σε ισορροπία. Η μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής.

Το Ελληνικό σύστημα μεταφοράς αποτελείται από εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150kV), από εναέριες γραμμές υπερυψηλής τάσης (400kV), από Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (KYT) όπου γίνεται η σύνδεση της υπερυψηλής με την υψηλή τάση, από πυκνωτές αντιστάθμισης της άεργου ισχύος που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής και από υποσταθμούς υποβιβασμού 150kV/MT με τους οποίους το σύστημα μεταφοράς συνδέεται με το σύστημα διανομής. Το υπάρχον δίκτυο είναι εν μέρει πεπαλαιωμένο και χρειάζεται αρκετές επεκτάσεις καθώς και συντήρηση. Αυτές οι επεκτάσεις θα βοηθήσουν στην αύξηση της αξιοπιστίας του συνολικού συστήματος αλλά και στη σύνδεση με το Ελληνικό σύστημα νέων μονάδων παραγωγής, από συμβατικές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που καθορίζει τη λειτουργία του Ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ταχεία αύξηση της αιχμής του συστήματος ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες καθώς και η παράλληλη αύξηση της συνολικής ζήτησης σε ενέργεια. Επομένως επιβάλλεται μια σωστή και λεπτομερής μελέτη επέκτασης του συστήματος μεταφοράς του Ελληνικού συστήματος αλλά και ίσως ένα αποδοτικό πρόγραμμα διαχείρισης του φορτίου (DSM) ώστε η εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής να γίνει όταν και όπου πραγματικά υπάρχει ανάγκη.

Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και για αυτόν το λόγο ο τεχνικός και οικονομικός σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των κύριων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών πρέπει να είναι ενιαίος. Τα τελευταία χρόνια όμως, με την πλήρη απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας εντός και εκτός συνόρων, το σύστημα μεταφοράς κατέχει ένα πιο ξεχωριστό ρόλο. Οι αποφάσεις

που λαμβάνονται για την ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής δε συνάδουν πάντα με την πιο οικονομικά συμφέρουσα επέκταση του συστήματος μεταφοράς. Η διαδικασία μελέτης επέκτασης ενός δικτύου μεταφοράς συνήθως ακολουθεί τις αποφάσεις επέκτασης του συστήματος παραγωγής. Σε κάθε περίπτωση όμως, η προτεινόμενη επέκταση του συστήματος παραγωγής πρέπει να λαμβάνει υπόψη πέρα από τα λειτουργικά οφέλη που πιθανόν να έχει η εγκατάσταση κάποιων νέων σταθμών παραγωγής στο σύστημα, και την οικονομική επιβάρυνση του συστήματος μεταφοράς για την καλύτερη εξυπηρέτηση αυτής της παραγωγής.

Έχοντας αυτά ως κύριο γνώμονα η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί τη διεξοδική ανάλυση και επίλυση του προβλήματος επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders. Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Matlab. Μέσα από αυτό επιχειρήθηκε η επαλήθευση της ορθότητας της χρησιμοποίησης της μεθόδου Benders σε προβλήματα επέκτασης δικτύου μεταφοράς, καθώς και η εύρεση της οικονομικότερης επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς υπό δεδομένες επεκτάσεις του συστήματος παραγωγής του συγκεκριμένου δικτύου.

Η πορεία της διπλωματικής εργασίας συνοπτικά, όπως αυτή παρουσιάζεται στο παρόν σύγγραμμα, είναι η εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, του διασυνδεδεμένου αλλά και του νησιωτικού δικτύου, με αναφορές στο σύστημα παραγωγής, στο σύστημα μεταφοράς, στο δίκτυο διανομής, στις διασυνδέσεις με συστήματα γειτονικών χωρών και στην εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας και της αιχμής του φορτίου, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται και μία πρόβλεψη ανάπτυξης του.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται διάφορες μαθηματικές τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης. Έμφαση δίνεται στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό αφού σε επιλύσεις τέτοιου είδους προβλημάτων καταλήγουμε στην εφαρμογή της μεθόδου αποσύνθεσης Benders για το πρόβλημα της επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και η παρουσίαση της μεθόδου αποσύνθεσης Benders με την οποία μπορεί να επιλυθεί ένα τέτοιο πρόβλημα. Επίσης αναλύονται κάποιες από τις σύγχρονες τεχνικές αναζήτησης και προσέγγισης λύσεων προβλημάτων ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, η τεχνική της προσομοιωμένης απόκτησης και οι άπληστοι αλγόριθμοι αναζήτησης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται αναλυτικά το πρόγραμμα επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που υλοποιήθηκε για τους σκοπούς αυτής της διπλωματικής εργασίας, με όλες τις παραδοχές και τις τροποποιήσεις που απαιτούνταν για την εφαρμογή της μεθόδου αποσύνθεσης Benders.

Το Κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του προγράμματος για την επέκταση του συστήματος μεταφοράς στο μοντέλο του Garver και στο δίκτυο των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE για τα διάφορα σενάρια επέκτασης του συστήματος παραγωγής που προσομοιώθηκαν στα εξεταζόμενα μοντέλα.

Στο Κεφάλαιο 7 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των ιδιοτήτων του αλγορίθμου και σχολιασμός των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

Τέλος παρατίθεται Παράρτημα όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του Ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικές μονάδες και μονάδες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 –ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Α.Π.Ε.), χάρτες με την παρούσα αλλά και την πιθανή μελλοντική κατάσταση του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς, καθώς και ο κώδικας του προγράμματος επέκτασης δικτύου μεταφοράς που υλοποιήθηκε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Ελληνικό ενεργειακό σύστημα βρίσκεται την τελευταία δεκαετία σε διαδικασία σημαντικών αλλαγών. Η διείσδυση του φυσικού αερίου, η κατασκευή των διευρωπαϊκών δικτύων, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας και τέλος η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τα νέα δεδομένα του.

Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των νέων αυτών δεδομένων στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, στη μείωση της εξάρτησης της από το εισαγόμενο πετρέλαιο, με όλα τα συνεπαγόμενα οφέλη στην εθνική οικονομία, στην εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

Πριν από την ίδρυση της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) το 1950, συστηματική παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν μόνο στις μεγάλες πόλεις και κυρίως στην περιοχή της πρωτεύουσας. Η ΔΕΗ με τον ιδρυτικό νόμο (1468/1950) πήρε το αποκλειστικό προνόμιο της παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ η διανομή παρέμεινε στις υφιστάμενες τότε δημοτικές, κοινοτικές ή ιδιωτικές εκμεταλλεύσεις. Το 1956 με το νομοθετικό διάταγμα (3525) πήρε και το αποκλειστικό προνόμιο της διανομής σε όλη τη χώρα. Ο νόμος (2244/94) για τη ρύθμιση των θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμβατικά καύσιμα, επιτρέπει κάτω από ορισμένες συνθήκες την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς που ανήκουν σε φυσικά ή νομικά πρόσωπα.

Η 19^η Φεβρουαρίου του 1999 σηματοδότησε την απαρχή του ανοίγματος των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας των κρατών μελών και τη δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στη χώρα μας λόγω των ιδιόμορφων χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού συστήματος (καθώς και στην Ιρλανδία και το Βέλγιο) δόθηκε παράταση της προθεσμίας απελευθέρωσης της αγοράς, οπότε η εφαρμογή αυτού του σχεδίου ξεκίνησε στις 19 Φεβρουαρίου του 2001. Οι λόγοι που ώθησαν στη δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ήταν οι εξής:

- i. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας ως προς τη χρησιμοποίηση και την κατανομή των οικονομικών πόρων με την είσοδο του ανταγωνισμού στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
- ii. Η στήριξη της ανταγωνιστικότητας της ευρωπαϊκής βιομηχανίας στο διεθνοποιημένο περιβάλλον μέσα από ανταγωνιστικές τιμές ενέργειας.
- iii. Η ανταγωνιστικότητα της αγοράς, που συμβάλλει θετικά σε δύο ακόμα άξονες της ενεργειακής πολιτικής, που είναι το περιβάλλον και η ασφάλεια τροφοδοσίας.

- iv. Η διαπίστωση ότι η διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων οδηγεί σε μικρότερα περιθώρια εφεδρείας και φυσικά στη μείωση του κόστους.
- v. Η βελτίωση των προσφερόμενων υπηρεσιών εκ μέρους των παραγωγών, που δίνει τη δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέγουν τον προμηθευτή τους.
- vi. Ο ανταγωνισμός, που θα οδηγήσει σε μείωση των τιμών.

Σύμφωνα με το νόμο αυτό για την απελευθέρωση της ενέργειας, προβλέπονται τα ακόλουθα:

- i. Απελευθέρωση (από τη 19^η Φεβρουαρίου 2001) του 30% της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας του διασυνδεδεμένου συστήματος, δηλαδή περίπου 450 μεγάλοι καταναλωτές με ετήσια κατανάλωση πάνω από 2 GWh/έτος μπορούν να επιλέξουν τον προμηθευτή τους. Στα νησιά, λόγω των ιδιόμορφων συνθηκών, η απελευθέρωση περιορίζεται μόνο στο άνοιγμα της παραγωγής στον ανταγωνισμό. Δηλαδή εκτός από τη ΔΕΗ μπορεί να παράγει και κάποιος άλλος ανεξάρτητος παραγωγός, όμως την παραγωγή θα την πουλάει αποκλειστικά στη ΔΕΗ και δεν θα μπορεί να διατεθεί σε τρίτους.
- ii. Δημιουργείται ανεξάρτητη διοικητική αρχή με την επωνυμία Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.) με κύριες αρμοδιότητες να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία της αγοράς και να γνωμοδοτεί τη χορήγηση αδειών που προβλέπονται από τις διατάξεις του νόμου.
- iii. Δημιουργείται ανώνυμη εταιρία με την επωνυμία Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.) με κύριες αρμοδιότητες τη λειτουργία, την εκμετάλλευση, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς καθώς και των διασυνδέσεων.
- iv. Η κυριότητα και η διαχείριση του Δικτύου Διανομής ανήκει αποκλειστικά στη ΔΕΗ[2].

Η ΔΕΗ Α.Ε. είναι σήμερα η μεγαλύτερη εταιρία παραγωγής και η μοναδική εταιρία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, η οποία παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε 7,1 εκατομμύρια πελάτες Χαμηλής Τάσης και 8,5 χιλιάδες πελάτες Μέσης και Υψηλής Τάσης περίπου. Επίσης κατέχει το 49% του ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. Παράγει το 96% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Ελλάδα, η οποία προέρχεται από λιγνιτικές, πετρελαϊκές και υδροηλεκτρικές μονάδες, μονάδες φυσικού αερίου, καθώς και από αιολικά και ηλιακά πάρκα. Συγχρόνως κατέχει τα δύο μεγάλα λιγνιτωρυχεία της χώρας στην Πτολεμαΐδα και στη Μεγαλόπολη, από όπου παράγεται το 64% περίπου της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας (2^η μεγαλύτερη παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση) [3].

Τα τελευταία χρόνια πολλές εταιρίες έχουν δραστηριοποιηθεί στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ιδιαίτερα στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Επίσης ήδη λειτουργούν και είναι συνδεδεμένες ή αναμένεται να συνδεθούν στο Σύστημα της Ελλάδας ιδιωτικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές ενέργειας (Ενεργειακή Θεσσαλονίκης Α.Ε., ΗΡΩΝ Θερμοηλεκτρική Α.Ε.) ενώ επίκειται διαγωνισμός και για άλλες τέτοιες θερμικές μονάδες οι οποίες και θα αντικαταστήσουν ορισμένες πεπαλαιωμένες μονάδες του συστήματος αλλά και θα αυξήσουν την συνολική εγκατεστημένη του ισχύ.

2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής αποτελείται από το διασυνδεδεμένο σύστημα παραγωγής της ηπειρωτικής χώρας με τα προς αυτό διασυνδεδεμένα νησιά και τα ανεξάρτητα συστήματα παραγωγής της Κρήτης, της Ρόδου και των υπολοίπων μικρότερων νησιών. Αποτελείται από θερμικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς καθώς επίσης και από ένα μικρό ποσοστό μονάδων, οι οποίες χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το διασυνδεδεμένο σύστημα παραγωγής της ηπειρωτικής χώρας περιλαμβάνει κυρίως λιγνιτικούς σταθμούς, που αποτελούν τη βάση του συστήματος. Επιπλέον, υπάρχουν σταθμοί φυσικού αερίου, πετρελαϊκοί και υδροηλεκτρικοί σταθμοί καθώς και μερικά αιολικά πάρκα κυρίως στην περιοχή της Εύβοιας και της Θράκης.

Στη Βόρεια Ελλάδα και συγκεκριμένα στη Δυτική Μακεδονία, (Πτολεμαΐδα, Καρδιά, Άγιος Δημήτριος, Αμύνταιο) βρίσκεται το κυριότερο ενεργειακό - λιγνιτικό κέντρο της χώρας. Αποτελείται από 17 λιγνιτικές μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 4438 MW. Το νότιο ενεργειακό - λιγνιτικό κέντρο βρίσκεται στο κέντρο της Πελοποννήσου κοντά στη πόλη της Μεγαλόπολης και αποτελείται από τέσσερις μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 850MW. Στην Κεντρική Ελλάδα είναι εγκατεστημένοι τρεις θερμικοί σταθμοί. Ο πρώτος σταθμός είναι πετρελαϊκός και βρίσκεται στο Αλιβέρι της Εύβοιας με τέσσερις μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 300MW. Ο δεύτερος βρίσκεται στο Λαύριο και αποτελείται από δύο πετρελαϊκές μονάδες ισχύος 450MW καθώς επίσης και από δύο μονάδες συνδυασμένου κύκλου: το "Μικρό Λαύριο" εγκατεστημένης ισχύος 180MW, που έχει τη δυνατότητα καύσης φυσικού αερίου ή πετρελαίου και το "Μεγάλο Λαύριο" εγκατεστημένης ισχύος 560MW. Ο τρίτος σταθμός βρίσκεται στον Άγιο Γεώργιο στο Κερατσίνι και παρέμεινε εκτός λειτουργίας για πολλά χρόνια για περιβαλλοντικούς λόγους. Ξεκίνησε ξανά την εμπορική του λειτουργία με τις μονάδες Νο 8 και Νο 9 εγκατεστημένης ισχύος 160MW και 200MW αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το φυσικό αέριο μετά τη μετατροπή τους από πετρελαϊκές. Τέλος λειτουργεί στην Κομοτηνή μια νέα μονάδα συνδυασμένου κύκλου συνολικής ισχύος 495MW. Όλοι οι παραπάνω σταθμοί ανήκουν στη ΔΕΗ Α.Ε. Από τις αρχές του 2006 λειτουργεί πλέον και η πρώτη ιδιωτική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου η οποία ανήκει στη εταιρεία Ενεργειακή Θεσσαλονίκης Α.Ε. και είναι εγκατεστημένης ισχύος 390MW. Το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των θερμικών σταθμών παραγωγής που είναι συνδεδεμένοι στο διασυνδεδεμένο σύστημα ανέρχεται στα 8175,8MW [4].

Οι μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής είναι κυρίως εγκατεστημένες στην ενδοχώρα και κοντά σε μεγάλους ποταμούς. Τα τελευταία χρόνια, με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας και την απόκτηση μεγαλύτερης τεχνογνωσίας, χτίζονται υδροηλεκτρικοί σταθμοί και κοντά σε μικρότερα ποτάμια με μικρότερη βέβαια εγκατεστημένη ισχύ. Μερικά από τα υδροηλεκτρικά αυτά λειτουργούν και ως αντλιοστάσια κατά τις περιόδους χαμηλής ζήτησης φορτίου έτσι ώστε να εξοικονομούνται ποσότητες νερού που θα χρησιμοποιηθούν κατά τις αιχμές της ζήτησης. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών σταθμών φτάνει τα 3058,5 MW [4].

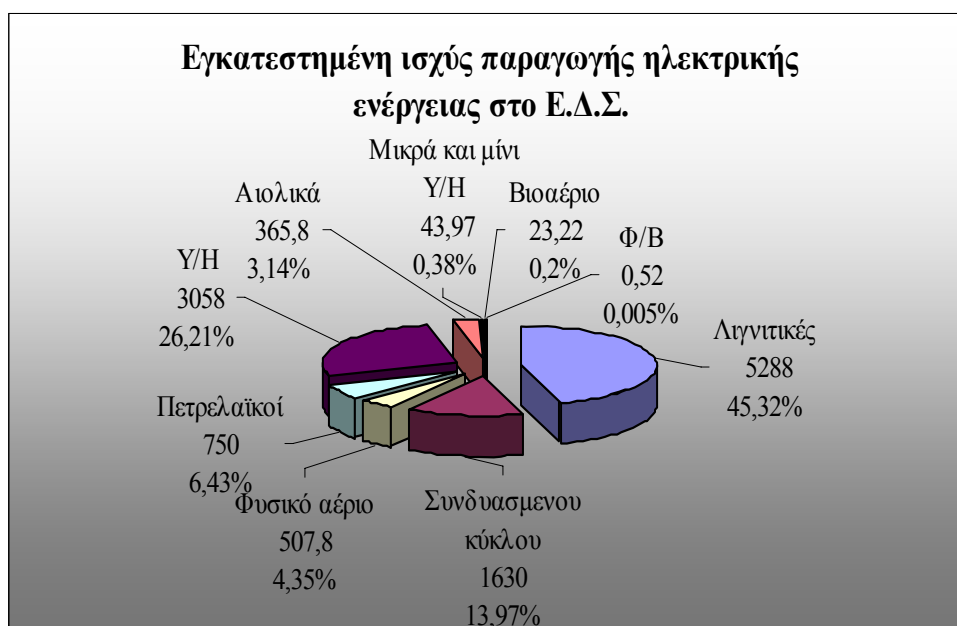
Το τελευταίο διάστημα αυξάνονται και οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και ήδη έχουν αδειοδοτηθεί πολλές ακόμα που αναμένεται να αυξήσουν το συνολικό ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, σύμφωνα και με τις δεσμεύσεις της Ελλάδας προς την Ε.Ε και το πρωτόκολλο του Κιότο. Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων (Α/Π) στο διασυνδεδεμένο σύστημα που λειτουργούν ή αναμένεται να λειτουργήσουν το προσεχές διάστημα είναι περίπου 366MW,

τα φωτοβολταϊκά πάνελ που λειτουργούν είναι περίπου 520kWp, οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν εγκατεστημένη ισχύ 44MW ενώ από τους σταθμούς παραγωγής που χρησιμοποιούν βιομάζα παράγεται ισχύς μέχρι 23,2MW περίπου. Τέλος η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων συμπαραγωγής είναι 231,9MW από τα οποία συμβάσεις αγοραπωλησίας με το σύστημα υπάρχουν μόνο για 32,3MW[4].

Έτσι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ηπειρωτικό δίκτυο από συμβατικές μονάδες παραγωγής (συνυπολογίζοντας και τους μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς) είναι 11.234,3MW (96,17 %).

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ηπειρωτικό δίκτυο από ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής (αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά), εγκαταστάσεις βιοαερίου και συμπαραγωγής, οι οποίες ως επί το πλείστον ανήκουν σε ιδιώτες ή ανεξάρτητες εταιρίες, είναι περίπου 465,75MW (3,83%). Το ποσοστό αυτό βέβαια προβλέπεται ότι θα αυξηθεί κατακόρυφα τα επόμενα χρόνια και ως το 2010.

Τα προηγούμενα στοιχεία για την εγκατεστημένη ισχύ των σταθμών παραγωγής του Εθνικού Διασυνδεδεμένου Δικτύου παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Εγκατεστημένη ισχύς σταθμών παραγωγής του Ε.Δ.Σ.

Για το νησιωτικό σύστημα, το ανεξάρτητο σύστημα παραγωγής της Κρήτης αποτελείται από τρεις αυτόνομους πετρελαϊκούς σταθμούς παραγωγής στα Λινοπεράματα, στα Χανιά και στον Αθρινόλακκο συνολικής ισχύος 730MW περίπου ενώ υπάρχουν περίπου 68MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Η Ρόδος εξυπηρετείται κυρίως από τον ανεξάρτητο σταθμό της Σορώνης εγκατεστημένης ισχύος 234MW ενώ τα υπόλοιπα νησιά τροφοδοτούνται είτε αυτόνομα είτε συνδεδεμένα με γειτονικά νησιά από μικρής ισχύος πετρελαϊκούς σταθμούς παραγωγής που υποστηρίζονται από αιολικά πάρκα τα οποία έχουν εγκατασταθεί στα πλούσια σε αιολικό δυναμικό νησιά του Αιγαίου κυρίως. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των πετρελαϊκών σταθμών παραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά είναι 1.560MW περίπου.

Στο Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικότερα όλοι οι σταθμοί παραγωγής του ηπειρωτικού και νησιωτικού δικτύου, καθώς και χάρτης με τις σημερινές εγκατεστημένες μονάδες του συστήματος.

3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Κύριο χαρακτηριστικό του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος είναι η μεγάλη συγκέντρωση σταθμών παραγωγής στο βόρειο τμήμα της χώρας (Δυτική Μακεδονία) ενώ το κύριο κέντρο κατανάλωσης βρίσκεται στο νότο (περιοχή Αττικής-Πελοποννήσου). Δεδομένου ότι και οι διεθνείς διασυνδέσεις (με Βουλγαρία, ΠΓΔΜ και Αλβανία) είναι στο βορρά υπάρχει μεγάλη ανισορροπία παραγωγής και φορτίου. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ισχύος κατά το γεωγραφικό άξονα βορρά-νότου, η οποία εξυπηρετείται κυρίως από έναν κεντρικό κορμό 400kV αποτελούμενο από τρεις γραμμές μεταφοράς 400kV διπλού κυκλώματος. Οι γραμμές αυτές συνδέουν το κύριο κέντρο παραγωγής με τα ΚΥΤ (Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης) που βρίσκονται πέριξ της ευρύτερης περιοχής της πρωτεύουσας. Αυτή η γεωγραφική ανισορροπία έχει σα συνέπεια την εμφάνιση προβλημάτων ασφαλείας και κυρίως αστάθειας τάσεων και συνακόλουθων δυσκολιών στη διατήρηση ικανοποιητικών επιπέδων τάσεων στο Νότιο Σύστημα σε περιόδους μειωμένης διαθεσιμότητας παραγωγής στο Νότιο Σύστημα ή μεγάλων διαταραχών κατά τις ώρες υψηλού φορτίου.

Οι περιοχές της Αττικής και της Πελοποννήσου είναι οι πιο κρίσιμες περιοχές του διασυνδεδεμένου συστήματος από πλευράς ευστάθειας τάσεως. Η περιοχή της Πελοποννήσου, συνδέεται με την περιοχή της Αττικής μέσω τριών γραμμών μεταφοράς 150kV, δύο εκ των οποίων είναι διπλού κυκλώματος, και με τη Δυτική Ελλάδα μέσω δύο υποβρυχίων καλωδίων στο στενό Ρίου-Αντιρρίου. Πιο αναλυτικά:

Α) Στο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι σήμερα εγκατεστημένοι 192 υποσταθμοί (Υ/Σ) υποβιβασμού 150kV/MT της ΔΕΗ, από τους οποίους οι 187 εξυπηρετούν τις ανάγκες του Δικτύου Διανομής (14 στην περιοχή της Αττικής), 4 χρησιμοποιούνται για την τροφοδότηση των φορτίων ορυχείων λιγνίτη στη Δ.Μακεδονία και ένας εξυπηρετεί τις ανάγκες άντλησης του ΥΗΣ Πολυφύτου. Επίσης λειτουργούν 11 ακόμα Υ/Σ για την υποδοχή της ισχύος που παράγεται στα μεγάλα αιολικά πάρκα (Α/Π) και 27 Υ/Σ υποβιβασμού 150kV/MT που εξυπηρετούν τις εγκαταστάσεις πελατών υψηλής τάσης (Υ.Τ.). Στους υποσταθμούς αυτούς, οι οποίοι αναφέρονται μερικές φορές και ως Κέντρα Διανομής, λειτουργούν μετασχηματιστές (Μ/Σ) υποβιβασμού 150kV/MT με ισχύ 20/25MVA, 40/50MVA, 60/66MVA, 50MVA κ.α. η οποία εξαρτάται εν πολλοίς και από τον τρόπο με τον οποίο ψύχονται (τεχνητό ή φυσικό). Είναι δυνατόν στον ίδιο υποσταθμό να λειτουργούν παραπάνω από ένας μετασχηματιστές. Επίσης διακρίνονται σε ανοικτού και κλειστού τύπου ανάλογα με τον αν στους διακόπτες ισχύος, στους αποξέυκτες, στις διασυνδετικές γραμμές κλπ., χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό ο αέρας ή το αέριο SF₆.

Στους σταθμούς παραγωγής της ΔΕΗ αλλά και στους ιδιωτικούς, υπάρχουν Υ/Σ ανυψώσεως που συνδέουν τις μονάδες παραγωγής είτε με την υπερυψηλή τάση, μέσω Μ/Σ ανυψώσεως MT/400kV, είτε με την υψηλή, μέσω Μ/Σ ανυψώσεως MT/150kV, ανάλογα με την τοπολογία του συστήματος μεταφοράς στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού.

Β) Τα ΚΥΤ αποτελούν τα σημεία σύνδεσης του συστήματος των 400kV με το σύστημα των 150 kV και εξυπηρετούν ανάγκες απομάστευσης ισχύος προς το σύστημα 150 kV. Πρόκειται για 13 ΚΥΤ (5 στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής) τα οποία περιλαμβάνουν έναν ή περισσότερους αυτομετασχηματιστές (ΑΜ/Σ) τριών τυλιγμάτων 400kV/150kV/30kV. Επιπλέον υπάρχουν 5 ΚΥΤ (Αμυνταίου, Αγ.Δημητρίου, Καρδιάς, Λαυρίου, Μελίτης) τα οποία είναι εγκατεστημένα πλησίον των ομώνυμων σταθμών παραγωγής της ΔΕΗ και εξυπηρετούν παράλληλα ανάγκες ανύψωσης τάσης από τις μονάδες παραγωγής προς το σύστημα 400kV.

Γ) Το σύστημα των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα μεγάλα αστικά κέντρα και τις μεγάλες ηλεκτροβόρες βιομηχανίες, αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, 150kV και 66kV, και υπερυψηλής τάσης 400kV. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται το μήκος του δικτύου μεταφοράς του διασυνδεδεμένου συστήματος ανά τάση (σε km):

Γραμμές μεταφοράς	400kV	150kV	66kV	Σύνολο
Εναέριες	4005	10765	40	14810
Υπόγειες/ Υποβρύχιες	-	177	13,5	190,5
Υπόγειες ⁽¹⁾	-	190	-	190
Σύνολο	4005	11132	53,5	15190,5

(1) Υπόγεια καλώδια για τη μεταφορά ισχύος εντός των πυκνοκατοικημένων περιοχών της Πρωτεύουσας και της Θεσσαλονίκης

Πίνακας 2.1: Μήκος του δικτύου μεταφοράς ανά επίπεδο τάσης σε km.

Εκτός των ανωτέρω στο σύστημα υπάρχουν ακόμα 106km εναέριας γραμμής και 160km υποβρύχιου καλωδίου 400kV Σ.Ρ. για τη διασύνδεση με την Ιταλία.

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί με μία γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης αυτής. Επομένως με τη χρήση υψηλών και κυρίως υπερυψηλών τάσεων επιτυγχάνεται η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ισχύος με μειωμένες απώλειες που καθιστούν οικονομικότερη τη λειτουργία με τις τάσεις αυτές. Μέρος όμως της επιτευχθείσας οικονομίας στο κόστος λόγω εφαρμογής υψηλότερης τάσης χάνεται από τις αυξημένες διηλεκτρικές απώλειες στον περιβάλλοντα αέρα και από το αυξημένο κόστος μονωτήρων, μετασχηματιστών, διακοπών κτλ. Υπάρχει δηλαδή κάποια μέγιστη τιμή τάσης πάνω από την οποία γίνεται αντιοικονομική μια δεδομένη μεταφορά ισχύος και αντίστροφα, το κόστος μεταφοράς αυξάνεται όταν από μια γραμμή με μεγάλη ικανότητα μεταφοράς περνάει μικρή ποσότητα ισχύος.

Τα υλικά που γενικά χρησιμοποιούνται στους αγωγούς των γραμμών μεταφοράς είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ένας σύνθετος αγωγός, το ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced) αποτελείται από κλώνους αλουμινίου, τοποθετημένους γύρω από ένα χαλύβδινο κεντρικό πυρήνα, ο οποίος παρέχει μηχανική αντοχή στον αγωγό. Η απαιτούμενη διατομή ενός αγωγού καθορίζεται από το ρεύμα που τον διαρρέει, αφού η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του αγωγού. Σε υψηλές θερμοκρασίες η μηχανική αντοχή του αγωγού μειώνεται και έτσι η αυξημένη θερμοκρασία του λόγω των ωμικών απωλειών δε πρέπει να ξεπερνάει ένα ορισμένο όριο. Το αντίστοιχο ρεύμα, το οποίο

προκαλεί αυτήν την αύξηση της θερμοκρασίας ονομάζεται ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του αγωγού.

Οι αγωγοί υψηλής τάσης των εναέριων γραμμών μεταφοράς αναρτώνται από τους πυλώνες ή πύργους της γραμμής διαμέσου μονωτήρων, ο καθένας από τους οποίους αποτελείται από μια αλυσσο δίσκων από πορσελάνη ή γυαλί. Η αύξηση της μόνωσης για υψηλότερες τάσεις μεταφοράς αντιμετωπίζεται με την προσθήκη περισσότερων δίσκων στους αλυσσοειδείς μονωτήρες. Η μόνωση μεταξύ των αγωγών και μεταξύ αγωγών και γης αποτελείται από τον αέρα που υπάρχει μεταξύ τους [5].

Τα τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί [4]:

Επίπεδο τάσης (kV)	Κύκλωμα	Χαρακτηρισμός Γ.Μ.	Αριθμός & διατομή αγωγών ανά φάση (Τύπος ACSR)		Θερμικό όριο υπό ονομαστικές συνθήκες (MVA)	Θερμικό όριο υπό δυσμενείς συνθήκες (MVA)*
			(MCM)	(mm ²)		
66	Απλό	E/66	1x336,4	1x170	60,5	36
150	Απλό	E/150	1x336,4	1x170	138	117
150	Απλό	B/150	1x636,0	1x322	202	169
150	Διπλό	2B/150	1x636,0	1x322	2x202	2x169
400	Απλό	B'B'/400	2x954,0	2x483	1400	1100
400	Διπλό	2B'B'/400	2x954,0	2x483	2x1400	2x1100
400	Απλό	B'B'B'/400	3x954,0	3x483	2000	1600

*Μείωση του ονομαστικού ορίου κατά 20% περίπου σε περίπτωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος 40°C και πλήρους άπνοιας

Πίνακας 2.2: Τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών μεταφοράς

Ο χαρακτηρισμός μιας γραμμής αφορά τον τύπο της γραμμής (ελαφρού ή βαρέος ή υπερβαρέος τύπου, E, B και B' αντίστοιχα), τον αριθμό των κυκλωμάτων (το 2 υποδηλώνει γραμμή διπλού κυκλώματος) ενώ το B'B' στις γραμμές των 400kV αναφέρεται στη χρησιμοποίηση 2 αγωγών, στερεωμένων σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ανά φάση (και κύκλωμα). Όλοι οι αγωγοί είναι τύπου ACSR και οι διατομές των αγωγών μεταφοράς εκφράζονται σε mil circular mils (MCM) σύμφωνα με την αμερικανική τυποποίηση (1 MCM=0,5067mm²).

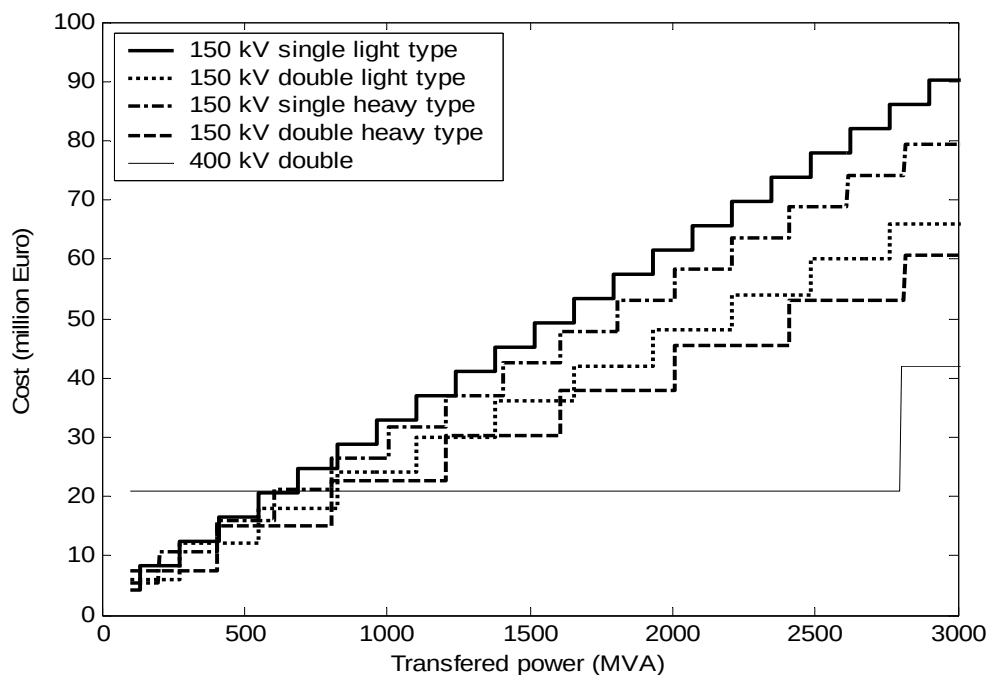
Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς έχουν όπως είναι φυσικό οι γραμμές απλού κυκλώματος, όταν δηλαδή οι ζώνες διελεύσεως των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση. Όπου όμως είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελεύσεως, όπως οι διαδρομές ορεινού χαρακτήρα ή και για λόγους μικρότερου κόστους μεταφοράς, εις βάρος όμως της αξιοπιστίας, χρησιμοποιούνται γραμμές διπλού κυκλώματος, στις οποίες δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα φέρονται σε κοινούς πυλώνες. Η χρησιμοποίηση δύο ή και τριών αγωγών ανά φάση γίνεται στην υπερυψηλή τάση για τη μεταφορά ακόμα μεγαλύτερων ποσοτήτων ισχύος από την ίδια οδό διέλευσης.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των γραμμών καθώς και το προσεγγιστικό κόστος εγκατάστασης τους παρατίθενται στον επόμενο πίνακα:

Τύπος γραμμής	R (Ω/km)	X (Ω/km)	b ($\mu\text{S}/\text{km}$)	I _{max} (A)	Κόστος (κ€/km)
E/150kV	0,183	0,446	2,584	530	41
B/150kV	0,097	0,422	2,738	775	53
2B/150kV	0,194	0,391	2,919	1550	38
B'B'/400kV	0,033	0,318	3,570	2020	103

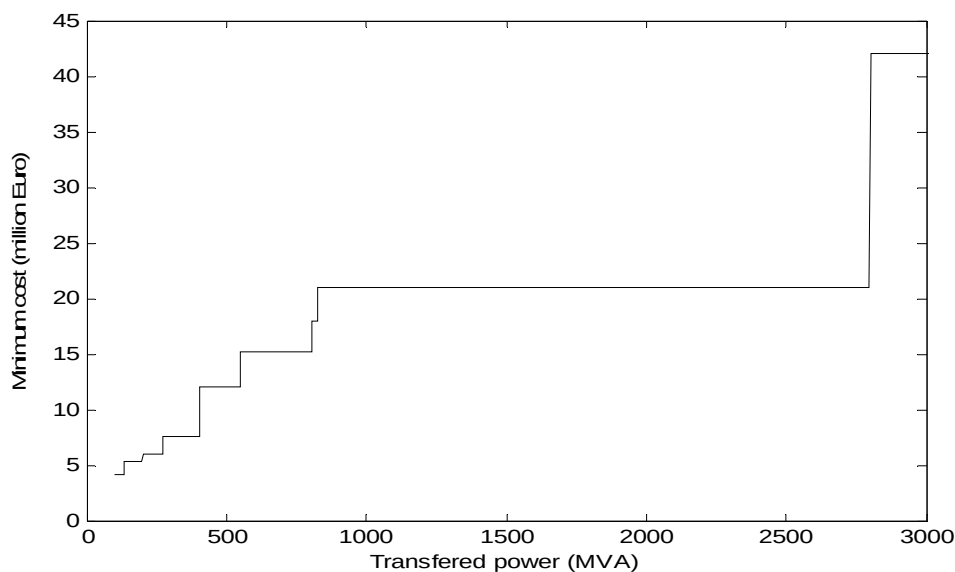
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών μεταφοράς

Η γραφική παράσταση του κόστους για κάθε τύπο γραμμής σε συνάρτηση με τη μεταφερόμενη ισχύ για 100 km, φαίνεται στο σχήμα 2.1:



Σχήμα 2.2: Κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ

Οπότε το ελάχιστο κόστος συναρτήσεται της μεταφερόμενης ισχύος όπως προκύπτει και από το παραπάνω σχήμα, φαίνεται ακολούθως:



Σχήμα 2.3: Ελάχιστο κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ

Στο σύστημα μεταφοράς της Ελλάδας υπάρχουν οι παρακάτω τύποι υπογείων καλωδίων 150kV για τη μεταφορά ισχύος μέσα στις κατοικημένες περιοχές της Πρωτεύουσας και της Θεσσαλονίκης [4]:

- Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 310mm² χαλκού, ισχύος 125MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 250mm² χαλκού, τριφασική ισχύος 125MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 400mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 125MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 650mm² χαλκού, τριφασική ισχύος 200MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 500mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 200MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 600mm² αλουμινίου, τριφασικής ισχύος 200MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 700mm² αλουμινίου, τριφασικής ισχύος 200MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 800mm² αλουμινίου, τριφασικής ισχύος 200MVA

Επίσης για τη σύνδεση του ηπειρωτικού συστήματος με διάφορα κοντινά νησιά ή για τη σύνδεση γειτονικών νήσων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι υποβρυχίων καλωδίων Υ.Τ.:

- Τριπολικά καλώδια 66kV, διατομής 300mm² χαλκού, ισχύος 60MVA
- Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 240mm² χαλκού, ισχύος 125MVA
- Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 310mm² χαλκού, ισχύος 135MVA
- Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 630mm² χαλκού, ισχύος 175MVA
- Μονοπολικά καλώδια 66kV, διατομής 150mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 35MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 250mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 125MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 145MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA
- Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 400mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA

Δ) Οι ανάγκες για αντιστάθμιση άεργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων. Για την τοπική στήριξη των τάσεων στους Υ/Σ 150kV/MT εγκαθίστανται στατοί πυκνωτές κυρίως στους ζυγούς Μέσης Τάσης. Τα τελευταία χρόνια έχουν εγκατασταθεί συστοιχίες πυκνωτών 150kV σε διάφορα KYT (Αγ. Στέφανο, Παλλήνη, Αχαρνών κτλ). Επίσης έχουν εγκατασταθεί πηνία στην πλευρά 150kV σε Υ/Σ 150kV/MT (σε εκείνους στους οποίους συνδέονται υποβρύχια καλώδια) καθώς και στο τριτεύον τύλιγμα των ΑΜ/Σ των KYT, για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου [4].

Ε) Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το σύστημα της UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité) μέσω των τριών κύριων διασυνδεδειγμένων γραμμών μεταφοράς 400kV που συνδέουν το Ελληνικό Σύστημα με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας και της ΠΓΔΜ. Επίσης υφίστανται και δύο διασυνδεδειγμένες γραμμές 150kV με Αλβανία και ΠΓΔΜ, ελάχιστος όμως σημασίας. Επιπλέον το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος 400kV και ασύγχρονη σύνδεση AC-DC-AC) με την Ιταλία. Αναλυτικά:

- Με το Σύστημα της Αλβανίας συνδέεται μέσω:

- μιας γραμμής 400kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Καρδιάς και Elbasan (Αλβανία). Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος μέσω της γραμμής αυτής περιορίζεται σημαντικά λόγω περιορισμών στο Αλβανικό σύστημα.
- μιας γραμμής 150kV ελαφρού τύπου μεταξύ Υ/Σ Μούρτσου και ΥΗΣ Bistrica στην Αλβανία, ονομαστικής ικανότητας μεταφοράς 100MW περίπου.

- Με το Σύστημα της ΠΓΔΜ η Ελλάδα συνδέεται μέσω:

- μιας γραμμής 400kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Duprovo (Negotino) στην ΠΓΔΜ.
- μιας γραμμής 150kV απλού κυκλώματος ελαφρού τύπου μεταξύ KYT Αμυνταίου και Bitola στην ΠΓΔΜ.

- Με το Βουλγάρικο Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω μιας Γ.Μ. 400kV (τύπου Β'Β') μεταξύ KYT Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad στην Βουλγαρία

- Η διασύνδεση με την Ιταλία περιλαμβάνει δύο σταθμούς μετατροπής ΥΤΣΡ (Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος, HVDC) μονοπολικού τύπου 400kV ικανότητας 500MW στο KYT Αράχθου και στον Υ/Σ Galatina Ιταλίας, εναέριες γραμμές DC 400kV και ένα υποβρύχιο καλώδιο DC 400kV ισχύος 500MW.

Με βάση αποτελέσματα ανάλυσης που συνέταξε ο ΔΕΣΜΗΕ [4] συμπεραίνεται ότι για λόγους ασφάλειας του Ελληνικού συστήματος, η Συνολική Ικανότητα Μεταφοράς από και προς τις κύριες βόρειες διασυνδέσεις (με Βουλγαρία και ΠΓΔΜ) είναι της τάξεως των 800MW ενώ από και προς Ιταλία είναι 500MW. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής 100-120MW από την Αλβανία υπό πολύ ειδικές συνθήκες όμως. Οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται κυρίως για οικονομικούς λόγους, αφού κοστίζουν φθηνότερα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πετρελαϊκές μονάδες, παρά από αδυναμία κάλυψης της ζήτησης από το σύστημα παραγωγής. Εισαγωγές και εξαγωγές προς κάποια ή κάποιες γειτονικές διασυνδέσεις γίνονται τις χρονικές στιγμές που ο διαχειριστής του συστήματος κρίνει ότι είναι οικονομικά συμφέρον αυτές να γίνουν και σύμφωνα πάντα με τα συμφωνηθέντα συμβόλαια και το προκαθορισμένο πρόγραμμα μεταξύ των συμβαλλομένων χωρών.

Το σύστημα μεταφοράς στο νησιωτικό σύστημα της Ελλάδας είναι πολύ μικρό και αποτελείται κυρίως από γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος 150kV που συνδέουν τους ανεξάρτητους σταθμούς παραγωγής με τους Υ/Σ 150kV/MT. Επίσης εάν υπάρχει διασύνδεση μεταξύ γειτονικών νησιών τότε αυτή γίνεται κυρίως με υποβρύχια καλώδια 150kV.

4. ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης και ανήκει αποκλειστικά στο διαχειριστή του συστήματος (ΔΕΗ). Το συνολικό μήκος των γραμμών του δικτύου διανομής, ξεπερνά τα 200.000km. Η μέση τάση έχει γραμμές των 22kV, 20kV, 15kV και 6.6kV. Η χαμηλή τάση περιλαμβάνει γραμμές στα 380/220V ή 400/230V. Αντίστοιχα υπάρχουν Μ/Σ υποβιβασμού 22kV/6.6kV, 20kV/400V, 6.6kV/400V κλπ. η ισχύς των οποίων κυμαίνεται από 50kVA μέχρι και 1000kVA. Ανάλογα με το αν οι υποσταθμοί είναι εναέριοι ή τοποθετημένοι σε υπόγεια και περιορισμένου χώρου μέρη (πυκνοκατοικημένες περιοχές), οι διακόπτες φορτίου, οι αποζεύκτες, οι ασφάλειες κλπ. χρησιμοποιούν ως μονωτικό υλικό τον αέρα ή το αέριο SF₆. Οι Υ/Σ με ισχύ μεγαλύτερη των 800KVA είναι πάντα υπόγειοι και διαθέτουν και διακόπτη ισχύος. Το μήκος των γραμμών του δικτύου ανά τάση και είδος τοποθέτησης των καλωδίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.13 [3].

Τύποι	Μέση τάση	Χαμηλή τάση	Σύνολο
Εναέριες	89706	98738	188444
Υπόγειες	7715	10082	17797
Υποβρύχιες	1056	2	1058
Σύνολο	98477	108822	207299

Πίνακας 2.4: Μήκος γραμμών διανομής σε km

5. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΙΧΜΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα μαζί με το ισοζύγιο εισαγωγών-εξαγωγών με τις γειτονικές χώρες έφτασε το 2005 στις 53,4TWh σημειώνοντας αύξηση 3,24% έναντι του 2004 ενώ στο νησιωτικό σύστημα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 4,625TWh μη συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής των συνδεδεμένων με αυτό ιδιωτικών αιολικών πάρκων.

Ηλεκτρικό σύστημα	Κατανάλωση (TWh)		Ποσοστό (%)
Έτος	2004	2005	2005
Διασυνδεδεμένο	51,722	53,4	92,1
Νησιά*	4,472	4,625	7,9
Σύνολο	56,194	58,025	100,0

*Δε συμπεριλαμβάνονται η παραγωγή από ΑΠΕ

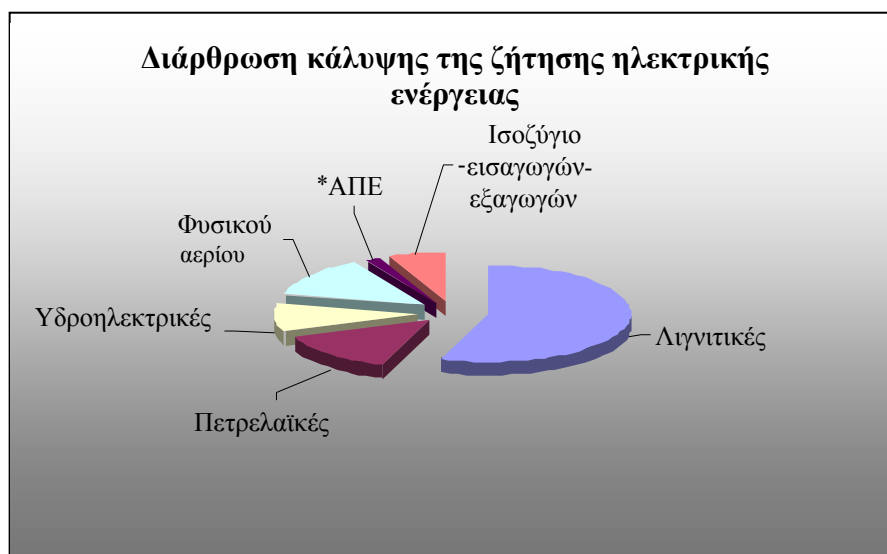
Πίνακας 2.5: Διάρθρωση της κατανάλωσης ενέργειας

Στον Πίνακα 2.6 και στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η διάρθρωση της παραγωγής από κάθε πηγή το 2005:

Τύπος μονάδων	TWh	Ποσοστό (%)
Λιγνιτικές	32,057	55,29
Πετρελαϊκές	7,864	13,55
Υδροηλεκτρικές	5,422	9,43
Φυσικού αερίου	7,945	13,69
ΑΠΕ*	0,867	1,5
Εισαγωγές	5,616	9,68
Εξαγωγές	-1,836	-3,16
Σύνολο	58,025	100,0

*Δε συμπεριλαμβάνονται η παραγωγή από ΑΠΕ των μη διασυνδεδεμένων νήσων

Πίνακας 2.6: Διάρθρωση της παραγωγής και ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών ενέργειας

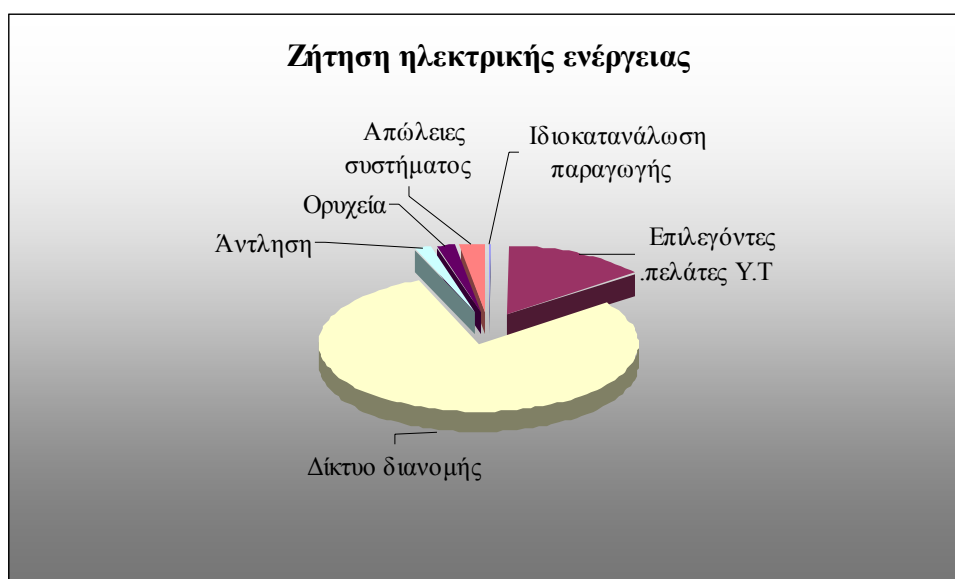


Σχήμα 2.4: Διάρθρωση της κάλυψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κατηγορία στο διασυνδεδεμένο σύστημα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.7:

Χρήση	2004 (TWh)	2005 (TWh)	2005 (%)
Ιδιοκατανάλωση παραγωγής	0,086	0,098	0,18
Επιλεγόντες πελάτες Υ.Τ.	7,392	7,722	14,46
Δίκτυο διανομής	41,141	42,285	79,19
Αντληση	0,768	0,847	1,59
Ορυχεία	1,015	1,084	2,03
Απώλειες συστήματος	1,32	1,363	2,55
Σύνολο	51,722	53,4	100,0

Πίνακας 2.7: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά χρήση.



Σχήμα 2.5: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

Οι ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας που πραγματοποιήθηκαν το 2005 με τα γειτονικά μας συστήματα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.8:

Χώρα	Εισαγωγές (GWh)	Εξαγωγές (GWh)	Ισοζύγιο (GWh)
Αλβανία	14,941	1056,302	-1041,361
ΠΓΔΜ	794,578	69,605	724,973
Βουλγαρία	4543,572	0	4543,572
Ιταλία	263,335	709,607	-449,272
Σύνολο	5616,426	1835,514	3780,912

Πίνακας 2.8: Ισοζύγιο εισαγωγών-εξαγωγών ενέργειας ανά χώρα.

Στον Πίνακα 2.9 καθώς και στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η εξέλιξη της ετήσιας αιχμής ζήτησης (μέση ωριαία τιμή) ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα κατά την τελευταία 10ετία.

Έτος	Ετήσια αιχμή (MW) ⁽¹⁾	Διαφορά από προηγούμενο έτος (%)	Μέση ποσοστιαία μεταβολή		
			Δεκαετία 1995-2005	Πενταετία 2000-2005	Τριετία 2003-2005
1995	6063		5,2%		
1996	6503	7,26			
1997	6703	3,08			
1998	7370	9,95			
1999	7364	-0,08			
2000	8529	15,82			
2001	8598	0,81		5,9%	6,6%
2002	8924 9100 ⁽²⁾	5,84			
2003	9042 9112 ⁽²⁾	0,13			
2004	9370 ⁽³⁾ 9500 ⁽⁴⁾	5,36			
2005	9635 9800 ⁽⁵⁾	2,08			

(1) Συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες Μεταφοράς

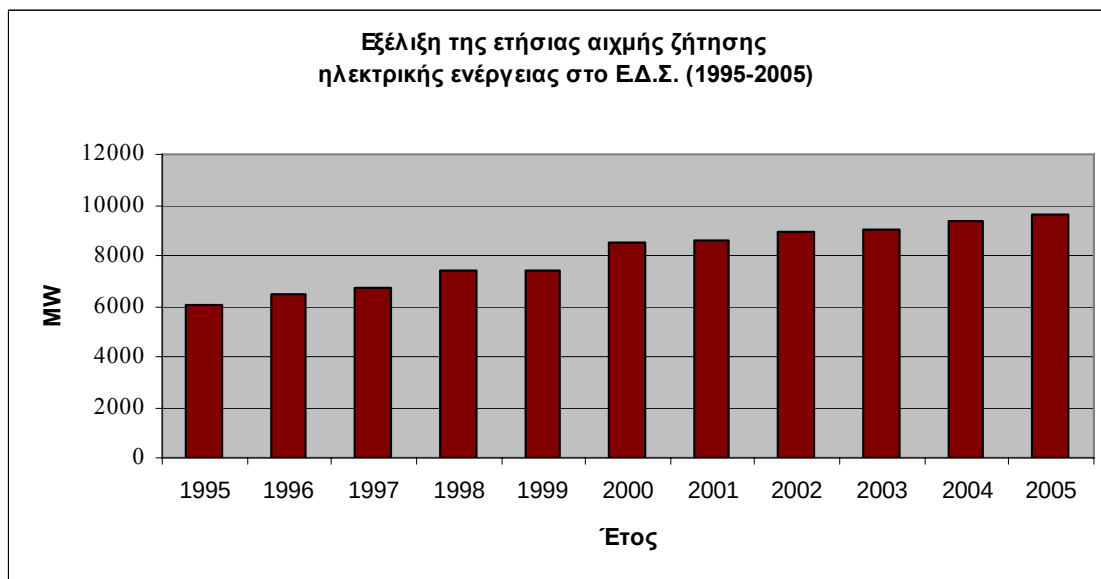
(2) Έγιναν συμφωνημένες περικοπές τουλάχιστον 150 MW το 2002 και 70 MW το 2003

(3) Αναφέρεται στην ώρα του Black-Out στις 12/7/2004, 12:39 μμ

(4) Εκτίμηση ΔΕΣΜΗΕ για την αιχμή του 2004 αν δεν συνέβαινε το Black-Out

(5) Εκτίμηση ΔΕΣΜΗΕ για την αιχμή του 2005 χωρίς τις συμφωνημένες περικοπές

Πίνακας 2.9: Εξέλιξη ετήσιας αιχμής ζήτησης



Σχήμα 2.6: Εξέλιξη της ετήσιας αιχμής του ΕΔΣ

6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Κάθε χρόνο ο διαχειριστής του διασυνδεδεμένου συστήματος, ο ΔΕΣΜΗΕ, εκπονεί μια Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς, ΜΑΣΜ στην οποία και αναλύει διεξοδικά τα έργα που θα πρέπει να γίνουν στο σύστημα μεταφοράς την επόμενη πενταετία. Επίσης κάνει και μία πρόβλεψη για την εξέλιξη της ζήτησης ενέργειας και ισχύος στο εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα (ΕΔΣ).

ι. Ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής

Σύμφωνα λοιπόν με τη ΜΑΣΜ 2006-2010 [4] είναι αναγκαία η ένταξη στο ΕΔΣ νέας παραγωγής στο νότιο Σύστημα η οποία θα μειώσει σημαντικά τις απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος στο Εθνικό Σύστημα, καθώς περιορίζεται σημαντικά η μεταφερόμενη ισχύς από Βορρά προς Νότο.

Ήδη ως το Δεκέμβριο του 2005 στο Νότιο Σύστημα είχαν αδειοδοτηθεί μονάδες παραγωγής συνολικής ισχύος περίπου 2670MW. Υπό κατασκευή βρίσκονται οι νέες μονάδες παραγωγής συνδυασμένου κύκλου της ΔΕΗ στο Λαύριο, ενώ σε προχωρημένο επίπεδο βρίσκονται οι νέες μονάδες συμπαραγωγής της «Αλουμίνιον της Ελλάδος», οι οποίες θα εξυπηρετούν κυρίως ανάγκες ιδιοκατανάλωσης στον ομώνυμο Υ/Σ.

Νέες διασυνδέσεις με τις γείτονες χώρες έχουν προγραμματισθεί ή είναι υπό εξέταση. Μερικές από αυτές είναι:

- Διασύνδεση με την ΠΓΔΜ (μέσω Γ.Μ. 400 kV KYT Μελίτης – Bitola), με εκτιμώμενη ικανότητα μεταφοράς 200MW.

- Διασύνδεση με την Τουρκία (μέσω Γ.Μ. 400kV KYT N. Σάντας – Babaeski), με εκτιμώμενη ικανότητα μεταφοράς 400MW. Με αυτόν τον τρόπο και το Σ.Η.Ε της Τουρκίας θα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το σύστημα της UCTE
- Διασύνδεση με τη Βουλγαρία (μέσω Γ.Μ. 400kV KYT N. Σάντας – Maritsa), με εκτιμώμενη ικανότητα μεταφοράς 300MW.
- Νέα διασύνδεση ΣΡ με την Ιταλία, με ικανότητα μεταφοράς 500MW. Η διασύνδεση αυτή θα μελετηθεί όσον αφορά την τεχνικοοικονομική της σκοπιμότητα, σε συνεννόηση με το διαχειριστή του Ιταλικού Συστήματος.

ii. Αύξηση του φορτίου

Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα σε μεσο-μακροπρόθεσμη βάση είναι: α) η οικονομική ανάπτυξη της χώρας (με δείκτη μέτρησης το ΑΕΠ), β) οι αλλαγές στις καταναλωτικές συνήθειες (κλιματισμός, χρήση ηλεκτρισμού στις μεταφορές, χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, κ.λ.π.) λόγω βελτίωσης βιοτικού επιπέδου, αλλά και η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης συγκεκριμένων πληθυσμιακών ομάδων (π.χ. οικονομικοί μετανάστες), γ) η γενικότερη κατάσταση του ενεργειακού τομέα και της αγοράς ηλεκτρισμού (επίπεδο τιμών kWh, ανταγωνισμός με Φυσικό Αέριο, κ.λ.π.), δ) ειδικές συνθήκες (π.χ. υλοποίηση έργων Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης), ε) διάφορα μέτρα εξειδίκευσης (όπως εξοικονόμηση ενέργειας, περιβαλλοντικοί περιορισμοί), κ.λ.π.

Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα κατά την τελευταία 10-ετία.

Έτος	Φορτίο Ζήτησης-YT (MWh)	Διαφορά από προηγούμενο έτος (%)	Μέση ποσοστιαία μεταβολή		
			Δεκαετία 1995-2004	Πενταετία 2000-2004	Τριετία 2002-2004
1994	33.976.754		4,3%		
1995	35.159.317	3,48%			
1996	36.587.704	4,06%			
1997	38.066.842	4,04%			
1998	39.861.786	4,72%			
1999	41.060.463	3,01%			
2000	44.108.220	7,42%		4,74%	4,06%
2001	45.914.430	4,09%			
2002	46.973.998	2,31%			
2003	49.732.133	5,87%			
2004	51.721.559	4%			

Πίνακας 2.10: Εξέλιξη ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζονται οι προβλέψεις για την εξέλιξη του ΑΕΠ της χώρας για την επόμενη πενταετία σύμφωνα με το ΥΠ.ΕΘ.Ο (έως το 2007) και οι εκτιμήσεις του ΔΕΣΜΗΕ για τα έτη 2008 έως και 2010. Παρουσιάζονται τρία σενάρια, ένα σενάριο βάσης, ένα λιγότερο αισιόδοξο, που προβλέπει μικρότερη ετήσια άνοδο του ΑΕΠ κατά 0.7% και ένα

απαισιόδοξο. Με βάση τις τρέχουσες εκτιμήσεις της Τράπεζας της Ελλάδος, ως ρεαλιστικό σενάριο εξέλιξης του ΑΕΠ θεωρείται το λιγότερο αισιόδοξο σενάριο του ΥΠΕΘΟ, το οποίο υιοθετείται για τους σκοπούς αυτής της μελέτης, ως σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Πρέπει να τονιστεί ότι τα τελευταία χρόνια, ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης ενέργειας στο ΕΔΣ εμφανίζεται να παρακολουθεί το ρυθμό αύξησης του ΑΕΠ της χώρας.

2005	2006	2007	2008	2009	2010
3.9	4.0	4.2	(4.0)	(4.0)	(4.0)
3.3	3.3	3.3	(3.3)	(3.3)	(3.3)
2.9	3.0	3.0	(3.0)	(3.0)	(3.0)

Πίνακας 2.11: Πρόβλεψη για την εξέλιξη του ΑΕΠ στην Ελλάδα

Το σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ του ΔΕΣΜΗΕ αναπτύχθηκε με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις:

1. Ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης να μην είναι μικρότερος του ρυθμού αύξησης του αντίστοιχου σεναρίου Αναφοράς για το ΑΕΠ.

Ο κανόνας αυτός υιοθετείται καθώς δεν έχει ακόμη διαπιστωθεί τάση η οποία να δείχνει ότι ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης υπολείπεται του ρυθμού αύξησης του ΑΕΠ. Επιπλέον, δεν θεωρείται ότι στον ορίζοντα της μελέτης υιοθετούνται, σε έντονο βαθμό και σε γενικευμένη έκταση, πρακτικές και τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας. Ο ρυθμός αυτός λειτουργεί σαν κάτω όριο στο σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

2. Ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης δεν είναι μεγαλύτερος από την τάση της τελευταίας δεκαετίας (4.0%).

Ο κανόνας αυτός υιοθετείται καθώς δεν διαφαίνεται στον ορίζοντα μελέτης διαρθρωτική αλλαγή στον τομέα της ενέργειας ή της οικονομίας που να δικαιολογεί σημαντική απόκλιση από την τρέχουσα τάση. Λειτουργεί σαν άνω όριο στο σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Έτσι στο σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ προβλέπεται ετήσιος ρυθμός αύξησης της ζήτησης ίσος με 3,5% στο διασυνδεδεμένο σύστημα.

Έτος	Ζήτηση (GWh)	Ετήσιος ρυθμός αύξησης (%)	Ετήσια Αύξηση (GWh)
2005	52741	3,5	1769
2006	54586	3,5	1845
2007	56496	3,5	1910
2008	58473	3,5	1977
2009	60519	3,5	2046
2010	62636	3,5	2117

Πίνακας 2.12: Σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ του ΔΕΣΜΗΕ για την αύξηση της ζήτησης ενέργειας στο ΕΔΣ

Η πρόβλεψη της αιχμής παρουσιάζει εν γένει πολύ μεγαλύτερη αβεβαιότητα από την πρόβλεψη της ζήτησης ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ζήτηση ισχύος, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, οπότε εμφανίζεται η μέγιστη ετήσια αιχμή (Ιούλιος), εξαρτάται

πολύ έντονα από τον καιρό και κυρίως από τη θερμοκρασία. Η εν λόγω εξάρτηση φαίνεται να εντείνεται συνεχώς. Δεδομένου του έντονου στοχαστικού χαρακτήρα της θερμοκρασίας, τα μοντέλα αυτά εξάγονται με βάση ιστορικά στοιχεία και τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να λαμβάνουν υπόψη την αυξανόμενη εξάρτηση της ζήτησης ισχύος από τη θερμοκρασία. Για την πρόβλεψη της ετήσιας αιχμής χρησιμοποιείται πιθανοτική ανάλυση με χρήση μοντέλων φορτίου - καιρού.

Στον Πίνακα 2.13 φαίνεται η πρόβλεψη της μέσης τιμής της ετήσιας αιχμής φορτίου για την περίοδο 2006-2010 και μέγιστες αναμενόμενες τιμές με πιθανότητα μη υπέρβασης 90%, 97,7% και 99,86%. Στις πιο πάνω τιμές συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες μεταφοράς.

Έτος	Μέση Τιμή (MW)	Μέγιστη τιμή (MW), πιθανότητα υπέρβασης 10% (1,3σ)	Μέγιστη τιμή (MW), πιθανότητα υπέρβασης 2,28% (2σ)	Μέγιστη τιμή (MW), πιθανότητα υπέρβασης 0,14% (3σ)
2006	9580	9940	10130	10400
2007	9930	10300	10500	10790
2008	10280	10670	10880	11180
2009	10640	11050	11270	11590
2010	11000	11430	11660	12000

Πίνακας 2.13: Πρόβλεψη ετήσιας αιχμής φορτίου στο ΕΔΣ

Τα τελικά σενάρια για την πρόβλεψη της ζήτησης ισχύος και ενέργειας τα οποία λαμβάνονται υπόψη για τη Μελέτη Ανάπτυξης του Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ) και τη Μελέτη Επάρκειας Παραγωγικού Δυναμικού για την περίοδο 2006-2010 διαμορφώνονται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.14:

Σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ			
Έτος	Ενέργεια (GWh)	Αιχμή (MW)	ΣΦ (%)
2006	54586	10130	61,51
2007	56496	10500	61,42
2008	58473	10880	61,18
2009	60519	11270	61,30
2010	62636	11660	61,32

Πίνακας 2.14: Τελική πρόβλεψη για το σενάριο ΑΝΑΦΟΡΑΣ του ΔΕΣΜΗΕ

iii. Ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς

Πριν την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ο προγραμματισμός ανάπτυξης του συστήματος μεταφοράς εκπονείτο στα πλαίσια των καθετοποιημένων επιχειρήσεων ηλεκτρισμού από κοινού με τον προγραμματισμό ανάπτυξης νέων μονάδων παραγωγής. Στο νέο περιβάλλον της απελευθερωμένης αγοράς, η ανάπτυξη νέου δυναμικού παραγωγής παρουσιάζει αβεβαιότητες όσον αφορά την χωροθέτηση, τον χρονικό προγραμματισμό κατασκευής, την ισχύ και τον τρόπο σύνδεσης των νέων μονάδων παραγωγής με το σύστημα μεταφοράς. Το γεγονός αυτό οδηγεί πολλές φορές σε περιορισμούς μεταφοράς (συνωστισμός-congestion) οι οποίοι αυξάνουν το κόστος εξυπηρέτησης της ζήτησης εξαιτίας της ένταξης πιο ακριβών μονάδων στις περιοχές όπου εμφανίζεται συνωστισμός.

Κύριος στόχος του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς στον Ελλαδικό χώρο για τα επόμενα χρόνια είναι η ανάπτυξη του συστήματος των 400kV. Δηλαδή η κατά το δυνατόν αύξηση των ποσοτήτων ισχύος που διακινούνται από το δίκτυο 400kV, με σκοπό τη μείωση των απωλειών μεταφοράς και την αύξηση της ασφάλειας τροφοδοσίας με διατήρηση της αξιοπιστίας εξυπηρέτησης των φορτίων σύμφωνα με τα κριτήρια N-1 και N-2. Ο σχεδιασμός της ανάπτυξης του δικτύου των 400kV γίνεται και με βάση την απαιτούμενη μείωση των ωρών κατά τις οποίες εμφανίζονται προβλήματα συνωστισμού και κατά συνέπεια τη συμβολή στην ομαλή λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και με απώτερο σκοπό τη σταδιακή μείωση των προβλημάτων ευστάθειας τάσης, ειδικά στο νότιο σύστημα της χώρας.

Έτσι, σύμφωνα και με τα παραπάνω, εξετάζεται για την περιοχή της Πελοποννήσου η επέκταση του συστήματος 400 kV προς Πελοπόννησο με τη δημιουργία 3 νέων KYT και το κλείσιμο του βρόχου 400kV KYT Κουμουνδούρου – Κόρινθος – Μεγαλόπολη – Πάτρα, κατασκευή 2 KYT στο Αλιβέρι και στο Σχηματάρι που θα συνδέουν ουσιαστικά το σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου με το KYT Αγ.Στεφάνου και θα δίνει νέες δυνατότητες απορρόφησης ισχύος από ΑΠΕ στην ευρύτερη περιοχή της Εύβοιας καθώς και κατασκευή στην Αττική του KYT Ρουφ που θα βελτιώσει σημαντικά τα επίπεδα τάσης των ζυγών 150kV της Αττικής και θα δώσει τη δυνατότητα εγκατάστασης μονάδων παραγωγής στο νότιο σύστημα οι οποίες θα συνδέονται με το συγκεκριμένο KYT.

Για το δίκτυο 150kV προβλέπεται ενίσχυσή του ανά γεωγραφικό τομέα με την οποία θα μπορέσει να αντιμετωπιστεί μερικώς η αύξηση της ζήτησης. Επίσης δίνεται σαφής προτεραιότητα στη σύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων στην υψηλή τάση. Στο παράρτημα (B) υπάρχει ένας χάρτης με το υπάρχον και το μελλοντικό σύστημα μεταφοράς της Ελλάδας αλλά και χάρτες με τα νέα έργα που πρόκειται να γίνουν σε αυτό, ανά περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τεχνικές βελτιστοποίησης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πριν γίνει η ανάλυση του κύριου προβλήματος αυτής της διπλωματικής εργασίας που αφορά την επέκταση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, θα ήταν σκόπιμο να γίνει αναφορά στις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται γενικά στα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης ενός προβλήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς. Στόχος μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους ή της διεργασίας που πρέπει να καταβληθεί για μία προσπάθεια, είτε η μεγιστοποίηση της ωφέλειας που μπορούμε να έχουμε από μία διαδικασία. Η απαιτούμενη προσπάθεια ή το επιθυμητό όφελος ενός έργου μπορεί να προσεγγισθεί από την *αντικειμενική συνάρτηση* του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τότε μπορεί να οριστεί ως η εύρεση του μέγιστου ή του ελάχιστου αυτής της συγκεκριμένης συνάρτησης που περιγράφει το πρόβλημα με κάποιες συγκεκριμένες μεταβλητές απόφασης.

Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς η εύρεση του ελάχιστου μίας συνάρτησης υπό κάποιους περιορισμούς απαιτεί μαθηματικές τεχνικές. Για προβλήματα βελτιστοποίησης με στοχαστικό χαρακτήρα χρησιμοποιούνται στοχαστικές ανελίξεις, όπως για παράδειγμα οι αλυσίδες Markov, ενώ οι στατιστικές μέθοδοι βοηθούν στην εύρεση εμπειρικών μοντέλων για πειραματικά και στατιστικά μεγέθη.

2. ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

ι. Θεμελίωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως η εύρεση ενός διανύσματος:

$$X = \left\{ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} \right\}$$

το οποίο ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f(X)$ υπό τους περιορισμούς:

$$g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$$

$$l_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, p$$

όπου το διάνυσμα X είναι ένα διάνυσμα διαστάσεων n , η $f(X)$ είναι η *Αντικειμενική Συνάρτηση* και $g_j(x)$, $l_j(x)$ είναι οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας αντίστοιχα. Ένα τέτοιο πρόβλημα λέγεται πρόβλημα υπό περιορισμούς.

Αν προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $f(X)$ χωρίς τις ισότητες και τις ανισότητες, τότε το πρόβλημα λέγεται χωρίς περιορισμούς. Το διάνυσμα X λέγεται και διάνυσμα σχεδιασμού και έχει τέτοια διάσταση όσες και οι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους. Οι εξισώσεις περιορισμών του προβλήματος εισάγονται για να μας δώσουν είτε τους περιορισμούς σχεδιασμού, είτε τους γεωμετρικούς περιορισμούς.

Η αντικειμενική συνάρτηση $f(X)$, που μπορεί να είναι και το άθροισμα επιμέρους συναρτήσεων $f_1(X)$ και $f_2(X)$, είναι η συνάρτηση η οποία εκφράζει το μέγεθος το οποίο θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε συναρτήσει των παραμέτρων απόφασης. Συχνά το μέγεθος προς βελτιστοποίηση είναι το κόστος, και οι μεταβλητές του διανύσματος σχεδιασμού αποτελούν τις παραμέτρους που συμβάλλουν στο κόστος. Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει πάρα πολύ μεγάλη σημασία για την εκλογή ασφαλών συμπερασμάτων και για την επίλυση του προβλήματος. Συχνά επίσης μπορούν να χρησιμοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες να προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν περισσότερα από ένα διαφορετικά κριτήρια.

ii. Κατηγοριοποίηση Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Τα προβλήματα Βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν με βάση διάφορα κριτήρια σε κάποιες κατηγορίες, οι κυριότερες εκ των οποίων είναι οι ακόλουθες:

1. Ανάλογα με την ύπαρξη ή μη περιορισμών διακρίνονται σε *προβλήματα περιορισμών* ή *προβλήματα χωρίς περιορισμούς*.
2. Ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών σχεδιασμού μπορούμε να τα διακρίνουμε σε *στατικής* και *δυναμικής βελτιστοποίησης* προβλήματα. Τα προβλήματα της πρώτης κατηγορίας αρκούνται στην εύρεση τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού ενώ της δεύτερης προσπαθούν να εκφράσουν τις μεταβλητές σχεδιασμού συναρτήσει μίας τρίτης παραμέτρου ως προς την οποία γίνεται η βελτιστοποίηση.
3. Ανάλογα με τη φυσική δομή του προβλήματος διακρίνονται σε *προβλήματα βέλτιστου ελέγχου* και *προβλήματα μη βέλτιστου ελέγχου*. Τα πρώτα αποτελούνται από στάδια τα οποία προκύπτουν το ένα από το άλλο με καθορισμένο τρόπο. Σε αυτά οι μεταβλητές σχεδιασμού διακρίνονται σε *μεταβλητές ελέγχου* που καθορίζουν τη ροή από το ένα στάδιο στο άλλο και *μεταβλητές κατάστασης* που δίνουν την κατάσταση σε οποιοδήποτε στάδιο.

Ανάλογα με τη φύση των εξισώσεων τα προβλήματα βελτιστοποίησης διακρίνονται και στις ακόλουθες υποκατηγορίες :

1. *Μη γραμμικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί είναι μη γραμμικές συναρτήσεις. Οι υπόλοιπες κατηγορίες είναι ειδικές περιπτώσεις του παραπάνω προβλήματος.

2. *Γεωμετρικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα στα οποία οι συναρτήσεις είναι αθροίσματα γινομένων δυνάμεων των μεταβλητών σχεδιασμού. Δηλαδή είναι της μορφής:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_0} c_i \left(\prod_{j=1}^n x_j^{p_{ij}} \right) \text{ με } c_i > 0 \text{ και } x_j > 0$$

3. *Τετραγωνικού προγραμματισμού* είναι τα προβλήματα όπου έχουμε ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού στο οποίο οι περιορισμοί είναι γραμμικοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική. Τέτοιο πρόβλημα έχει τη μορφή:

$$F(X) = c + \sum_{i=1}^n q_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} x_i x_j$$

Η επίλυση ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, που συναντάται συνήθως σε προβλήματα σύνδεσης μονάδων παραγωγής στο σύστημα (unit commitment), περιλαμβάνει την εύρεση για την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση του βέλτιστου διανύσματος X υπό τους περιορισμούς :

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

όπου c, q_i, Q_{ij}, a_j και b_j είναι σταθερές

4. *Γραμμικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις του x .

Επίσης στα προβλήματα βελτιστοποίησης υπάρχουν και οι ακόλουθοι διαχωρισμοί:

- Ανάλογα με την επιτρεπτότητα των τιμών διακρίνονται σε *προβλήματα ακεραίου και συνεχών τιμών προγραμματισμού*.
- Σε *ντετερμινιστικά και στοχαστικά* προβλήματα ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών.
- Ανάλογα με τη *διαχωρισιμότητα* ή μη των συναρτήσεων, των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Δηλαδή αν η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί περιλαμβάνουν άλλες συναρτήσεις.

Από τις παραπάνω κατηγοριοποιήσεις είναι προφανές ότι ένα πρόβλημα μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες [6].

3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

i. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χωρίς περιορισμούς

Είναι γνωστό από την ανάλυση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών ότι τα ακρότατα μίας συνάρτησης $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ προκύπτουν από την μελέτη των μερικών παραγώγων της f :

$$\left. \frac{\partial f}{\partial X_k} \right|_{k=1..n} \quad \text{και} \quad \left. \frac{\partial^2 f}{\partial X_k \partial X_j} \right|_{\substack{k=1..n, \\ j=1..n}}$$

Στα σημεία μηδενισμού της πρώτης παραγώγου και ανάλογα με το πρόσημο της δεύτερης παραγώγου προκύπτουν τα μέγιστα και τα ελάχιστα της συνάρτησης.

ii. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς

Στην περίπτωση αυτή μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός του βέλτιστου σημείου για την αντικειμενική συνάρτηση στην περιοχή του χώρου που ορίζουν οι περιορισμοί του προβλήματος. Για την εύρεση του βέλτιστου σημείου έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού ανάλογα με τη φύση των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης.

A. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς ισότητας

Η μορφή ενός τέτοιου προβλήματος περιλαμβάνει την εύρεση ενός διανύσματος:

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix}$$

το οποίο ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f=f(X)$ υπό τους περιορισμούς :

$$g_j(X) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

Διάφορες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, όπως η απευθείας αντικατάσταση, η περιορισμένη διακύμανση και η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange. Η μέθοδος της απευθείας αντικατάστασης εφαρμόζεται σε περιπτώσεις απλών προβλημάτων και στοχεύει στην έκφραση m μεταβλητών συναρτήσεων των υπολοίπων $n-m$ μεταβλητών. Έτσι προκύπτει πρόβλημα βελτιστοποίησης $n-m$ μεταβλητών χωρίς περιορισμούς.

Η μέθοδος της διακύμανσης περιορισμών στοχεύει στην εύρεση μίας κλειστής μορφής για την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης $f(df)$ σε όλα τα σημεία στα οποία ικανοποιούνται οι εξισώσεις περιορισμών. Τα επιθυμητά σημεία βέλτιστου λαμβάνονται αν

τεθεί το διαφορικό df ίσο με το μηδέν. Η δυσκολία της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι απαιτείται ο υπολογισμός μερικών παραγώγων δευτέρας τάξης στα σημεία μεταβολής των περιορισμών $g(x)$. Για μεγάλο αριθμό περιορισμών αυτός ο υπολογισμός είναι εξαιρετικά επίπονος σε σημείο που να γίνεται απαγορευτικός. Οι ορίζουσες που πρέπει να υπολογιστούν είναι της τάξης $m+1$ με αποτέλεσμα η εφαρμογή αυτής της μεθόδου για αριθμό περιορισμών άνω του 3 να γίνεται ιδιαίτερα επίπονη.

Η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange μετατρέπει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης n μεταβλητών με m περιορισμούς σε πρόβλημα βελτιστοποίησης $n+m$ μεταβλητών χωρίς περιορισμούς. Ο τρόπος μετατροπής του προβλήματος είναι ο ακόλουθος:

Έστω η συνάρτηση $f(x_1, x_2)$ την οποία και επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Έστω $g(x_1, x_2)=0$ ο περιορισμός της συνάρτησης. Για να έχει η f ακρότατο σε ένα σημείο (x_1^*, x_2^*) θα πρέπει να ισχύει η σχέση :

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} - \frac{\partial f / \partial x_2}{\partial g / \partial x_2} \cdot \frac{\partial g}{\partial x_1} \right) \bigg|_{(x_1^*, x_2^*)} = 0$$

Ορίζεται ως πολλαπλασιαστής Lagrange η ποσότητα:

$$\lambda = \left(- \frac{\partial f / \partial x_2}{\partial g / \partial x_2} \right) \bigg|_{(x_1^*, x_2^*)}$$

οπότε ισοδύναμα η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_1} \right) \bigg|_{(x_1^*, x_2^*)} = 0$$

Συνήθως σε αυτές τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται οι συντελεστές Lagrange εισάγεται η έννοια της συνάρτησης Lagrange η οποία έχει τη μορφή :

$$L(x_1, x_2, \lambda) = f(x_1, x_2) + \lambda g(x_1, x_2)$$

Έτσι η αναγκαία συνθήκη για να υπάρχει ελάχιστο είναι :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1}(x_1, x_2, \lambda) &= \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1, x_2) + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_1}(x_1, x_2) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x_2}(x_1, x_2, \lambda) &= \frac{\partial f}{\partial x_2}(x_1, x_2) + \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x_2}(x_1, x_2) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda}(x_1, x_2, \lambda) &= g(x_1, x_2) = 0 \end{aligned}$$

Οπότε το πρόβλημα, από πρόβλημα βελτιστοποίησης 2 μεταβλητών με 1 περιορισμό μετατράπηκε σε πρόβλημα βελτιστοποίησης 3 μεταβλητών χωρίς περιορισμούς [6].

B. Βελτιστοποίηση συναρτήσεων πολλών μεταβλητών με περιορισμούς ανισότητας.

Η μορφή ενός τέτοιου προβλήματος περιλαμβάνει την εύρεση ενός διανύσματος:

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{Bmatrix}$$

το οποίο να ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f=f(X)$ υπό τους περιορισμούς

$$g_j(X) \leq 0 \quad j=1,2,\dots,m$$

Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος των πολλαπλασιαστών Lagrange τροποποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι συνθήκες προς ικανοποίηση σε ένα σημείο X^* υπό περιορισμούς ανισότητας να εκφραστεί με τις συνθήκες Kuhn-Tucker ως εξής:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{j \in J_1} \lambda_j \cdot \frac{\partial g_j}{\partial x_i} = 0 \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\lambda_j > 0 \quad j \in J_1$$

όπου $j \in J_1$ το σύνολο των ενεργών περιορισμών του προβλήματος .

Επειδή συνήθως οι ενεργοί περιορισμοί δεν είναι γνωστοί οι παραπάνω συνθήκες τροποποιούνται σε :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{\partial g_j}{\partial x_i} = 0 \quad i=1,2,\dots,n$$

$$\lambda_j \cdot g_j = 0 \quad j=1,2,\dots,m$$

$$g_j \leq 0 \quad j=1,2,\dots,m$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j=1,2,\dots,m$$

4. ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο γραμμικός προγραμματισμός (ΓΠ) είναι το πιο διαδεδομένο από τα μοντέλα μαθηματικού προγραμματισμού και έχει ευρύτερα εφαρμοσθεί σε πραγματικά προβλήματα. Η επιτυχία του στηρίχθηκε και στην επιτυχή επίλυσή του με τον αλγόριθμο simplex από τον G.Dantzig του Πανεπιστημίου του Stanford στις ΗΠΑ.

Στο γραμμικό προγραμματισμό, η αντικειμενική συνάρτηση και όλοι οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Η μορφή ενός τέτοιου προβλήματος περιλαμβάνει την εύρεση ενός διανύσματος (μεταβλητές απόφασης):

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \end{Bmatrix}$$

το οποίο να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση $f=f(X)$ υπό τους περιορισμούς

$$g(X) \leq b \quad \text{και} \quad X \geq 0$$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής:

$$f(X) = z = c_i \cdot x_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ενώ οι περιορισμοί:

$$g(X) = a_{ji} \cdot x_i \leq b_j \quad \text{ή} \quad a_{ji} \cdot x_i = b_j \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{και} \\ x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Οι περιορισμοί προσήμου των μεταβλητών απόφασης (μη αρνητικές τιμές), μαζί με τους περιορισμούς που έχουν την μορφή ανισοτήτων ή ισοτήτων προσδιορίζουν το χώρο των εφικτών λύσεων του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού. Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζει το όφελος (ή τη ζημία σε περίπτωση ελαχιστοποίησης) που έχουμε από μια συγκεκριμένη τιμή των μεταβλητών απόφασης. Οι παράμετροι c_i που υπεισέρχονται στην αντικειμενική συνάρτηση εκφράζουν τη συνεισφορά κάθε μεταβλητής απόφασης στο συνολικό όφελος. Επειδή η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική, συμπεραίνουμε ότι η συνεισφορά κάθε μεταβλητής απόφασης στο συνολικό όφελος είναι ευθέως ανάλογη της τιμής της μεταβλητής και ο συντελεστής αναλογίας είναι η τιμή c_i . Επίσης λόγω της γραμμικότητας της αντικειμενικής συνάρτησης η συνεισφορά μιας μεταβλητής απόφασης στο συνολικό όφελος είναι ανεξάρτητη της συνεισφοράς των άλλων μεταβλητών απόφασης. Για τους παραπάνω λόγους οι παράμετροι c_i λέγονται *συντελεστές οφέλους ή κέρδους* στα προβλήματα μεγιστοποίησης και *συντελεστές ζημίας ή κόστους* στα προβλήματα ελαχιστοποίησης. Πιο αυστηρά, η συνεισφορά των μεταβλητών απόφασης στην αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται σαν η μερική παράγωγος της συνάρτησης ως προς την μεταβλητή απόφασης:

$$\frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} = c_i$$

Οι παράμετροι a_{ji} ονομάζονται τεχνικοί συντελεστές και εκφράζουν τη συνεισφορά της μεταβλητής απόφασης j στον περιορισμό i . Η συνεισφορά αυτή είναι ευθέως ανάλογη της τιμής της μεταβλητής και είναι ανεξάρτητη της συνεισφοράς των άλλων μεταβλητών. Πιο αναλυτικά η συνεισφορά των μεταβλητών απόφασης στο αριστερό μέλος των περιορισμών ορίζεται σαν η μερική παράγωγος της συνάρτησης που εκφράζεται στο αριστερό μέλος του περιορισμού ως προς την μεταβλητή απόφασης και λέγεται *οριακή συνεισφορά (ή οριακό κόστος)*.

Οι παράμετροι b ονομάζονται *δεξιά μέλη* των περιορισμών (right hand side) και συχνά παριστάνουν τη μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα κάποιου πόρου.

Όπως αναφέρθηκε, οι περιορισμοί προσδιορίζουν ένα χώρο που ονομάζεται χώρος των εφικτών λύσεων. Κάθε τιμή του διανύσματος X που ανήκει στο χώρο αυτό λέγεται εφικτή. Μία ή περισσότερες τιμές του X , που ανήκουν στο σύνολο των εφικτών λύσεων, θα βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση. Η τιμή ή οι τιμές αυτές λέγονται βέλτιστες τιμές του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού και σε αυτές αντιστοιχεί η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ο χώρος των εφικτών λύσεων μπορεί να μην περιορίζεται σε πεπερασμένες τιμές από όλες τις διαστάσεις του (που είναι όσες και οι μεταβλητές απόφασης). Σε αυτήν την περίπτωση ο εφικτός χώρος λέγεται απεριόριστος (unbounded). Σε αντίθετη περίπτωση λέγεται περιορισμένος (bounded).

Όταν οι μεταβλητές απόφασης λάβουν τη βέλτιστη τιμή τους, τότε ορισμένοι περιορισμοί θα ισχύουν με ισότητα (δηλαδή στη βέλτιστη λύση θα εξαντλούμε όλη τη ποσότητα του πόρου που προσδιορίζεται από το δεξί μέλος του περιορισμού) και άλλοι περιορισμοί θα ισχύουν με ανισότητα. Οι περιορισμοί που ικανοποιούνται με ισότητα από τη βέλτιστη λύση είναι αυτοί που πραγματικά περιορίζουν την ενδεχόμενη παραπέρα βελτίωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης και γι' αυτό ονομάζονται *περιοριστικοί* (binding). Οι περιορισμοί που ικανοποιούνται μόνο με ανισότητα λέγονται *μη-περιοριστικοί* (non binding).

Αν για τη βέλτιστη λύση με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ίση με z , κάποιος περιορισμός i (με δεξί μέλος b_i) προκύψει ότι είναι περιοριστικός, τότε θα επιθυμούσαμε να διαθέταμε ακόμα λίγη ποσότητα πόρου Δb_i ώστε να βελτιώναμε παραπέρα την αντικειμενική συνάρτηση κατά Δz . Το οριακό όφελος, εκφρασμένο σε μονάδα “χαλάρωσης” του περιορισμού i , δηλαδή ο λόγος $\Delta z / \Delta b_i$ λέγεται *σκιώδης τιμή ή δυαδική τιμή* του περιορισμού i . Η σκιώδης τιμή του περιορισμού i παριστάνει πόσο μπορούμε να βελτιώσουμε την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αν αυξήσουμε κατά μία μονάδα το όριο (δεξί μέλος) του περιορισμού i . Είναι φανερό ότι αν ο περιορισμός είναι μη-περιοριστικός τότε η σκιώδης τιμή του είναι ίση με μηδέν [7].

Για την επίλυση των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι: i) η γραφική λύση, ii) η μέθοδος simplex και iii) η “αλλαγμένη” μέθοδος simplex (revised simplex method). Η revised simplex method είναι μια παραλλαγή της απλής simplex και γι' αυτό στη συνέχεια θα αναφερθούμε μόνο στην επίλυση των προβλημάτων Γ.Π. με τη γραφική μέθοδο και την απλή simplex την οποία και θα χρησιμοποιήσουμε στο πρόγραμμα βελτιστοποίησης που θα παρουσιάσουμε στα επόμενα κεφάλαια.

i. Γραφική λύση

Η γραφική αναπαράσταση του μοντέλου ΓΠ, γίνεται με άξονες συντεταγμένων τις μεταβλητές απόφασης. Σε αυτές τις συντεταγμένες αναπαριστούμε το χώρο των εφικτών λύσεων, ο οποίος έχει τόσες διαστάσεις όσες και οι μεταβλητές απόφασης. Κάθε περιορισμός που έχει τη μορφή ανισότητας προσδιορίζει ένα ημιχώρο στο χώρο των μεταβλητών απόφασης ενώ κάθε περιορισμός ισότητας προσδιορίζει ένα υπερεπίπεδο. Η τομή των ημιχώρων (υπερεπίπεδων) αυτών, αποτελεί το χώρο των εφικτών λύσεων. Αν η τομή αυτή είναι το κενό σύνολο, το πρόβλημα είναι ανέφικτο.

Αν n είναι ο αριθμός των μεταβλητών απόφασης τότε η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης $z=f(x)$ βρίσκεται στο χώρο $n+1$ διαστάσεων. Για δεδομένη

σταθερή τιμή της z , έστω z^* , η συνάρτηση $z^*=f(x)$ βρίσκεται στο χώρο n διαστάσεων και αποτελεί την προβολή της αντικειμενικής συνάρτησης πάνω στο χώρο των μεταβλητών απόφασης. Η καμπύλη που δημιουργείται λέγεται *ισοϋψής καμπύλη*. Εφόσον η αντικειμενική συνάρτηση είναι γραμμική, η ισοϋψής καμπύλη θα είναι υπερεπίπεδο (ευθεία στο διδιάστατο χώρο) στο χώρο των μεταβλητών απόφασης. Μεταβαλλόμενης της σταθερής τιμής z^* της αντικειμενικής συνάρτησης, έχουμε μια οικογένεια ισοϋψών καμπύλων. Το διάνυσμα των μερικών παραγώγων $grad[f(x)]$, θα είναι σταθερό και ίσο με τους συντελεστές οφέλους c_i . Όμως το διάνυσμα των παραγώγων είναι κάθετο προς τις ισοϋψείς και δεικνύει την κατεύθυνση αύξησης της συνάρτησης. Επομένως η κατεύθυνση αύξησης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι κάθετη προς τις ισοϋψείς και με κατεύθυνση μοναδική, ανεξάρτητα από την τιμή των μεταβλητών απόφασης.

Το σύνολο των εφικτών λύσεων κάθε μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού είναι ένας κυρτός χώρος. Δηλαδή πρόκειται για ένα πολύεδρο που περικλείεται από ακμές που προσδιορίζονται από τους γραμμικούς περιορισμούς του μοντέλου ΓΠ. Αν το πρόβλημα έχει μία μόνο βέλτιστη λύση, τότε αυτή θα βρίσκεται σε ακρότατο σημείο του χώρου εφικτών λύσεων. Άρα η μοναδική βέλτιστη λύση θα βρίσκεται σε μία από τις γωνίες του σχηματιζόμενου πολυέδρου. Αν τώρα το πρόβλημα έχει πολλές βέλτιστες λύσεις, τότε θα έχει άπειρες βέλτιστες λύσεις που θα βρίσκονται πάνω σε τμήμα του χώρου εφικτών λύσεων που συνδέει ακρότατα σημεία του (ακμή πολυέδρου).

Κάθε ακμή του πολυέδρου είναι η ακριβής (με ισότητα) ικανοποίηση ενός περιορισμού. Επομένως οι περιορισμοί που αντιστοιχούν στις ακμές εκείνες των οποίων η τομή αποτελεί τη βέλτιστη λύση, θα είναι *περιοριστικοί περιορισμοί*. Οι υπόλοιποι που δε συμμετέχουν στον προσδιορισμό του ακροτάτου σημείου θα είναι *μη περιοριστικοί*.

Άρα τελικά για να βρούμε γραφικά τη λύση για ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, αρκεί να σχεδιάσουμε (αν αυτό είναι δυνατόν) το χώρο των εφικτών λύσεων, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, να βρούμε την κατεύθυνση αύξησης της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στο χώρο αυτό, δηλαδή το διάνυσμα $grad[f(x)]$ και στη συνέχεια να βρούμε το ακρότατο σημείο του χώρου των εφικτών λύσεων πέρα από το οποίο κάθε μετακίνηση της ισοϋψής καμπύλης προς την κατεύθυνση του διανύσματος των μερικών παραγώγων να οδηγεί στο να βρεθεί η ισοϋψής εντελώς έξω από το χώρο των εφικτών λύσεων. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο σημείο αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Υπάρχει ενδεχόμενο η ισοϋψής καμπύλη να είναι παράλληλη με κάποια από τις ακμές του πολυέδρου. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε άπειρες λύσεις, όσα και τα σημεία της ακμής αυτής. Αν μετακινώντας την ισοϋψή προς τη σωστή κατεύθυνση δε συναντάμε ακρότατα σημεία του χώρου των εφικτών λύσεων, τότε ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι απεριόριστος και η βέλτιστη λύση απειρίζεται [7].

ii. Η μέθοδος simplex

Ο αλγόριθμος simplex εφαρμόζεται στη λεγόμενη κανονική μορφή μοντέλων ΓΠ στην οποία όλα τα μοντέλα ΓΠ μπορούν να αναχθούν. Έτσι το πρώτο βήμα εφαρμογής του αλγορίθμου είναι η μετατροπή του μοντέλου ΓΠ σε κανονική μορφή. Σε αυτήν εισάγουμε νέες μεταβλητές απόφασης που λέγονται *μεταβλητές απόκλισης (slack variables)* με σκοπό να μετατρέψουμε τις ανισότητες των περιορισμών σε ισότητες, προσθέτοντας ή αφαιρώντας τις στο αριστερό μέλος των περιορισμών. Οι μεταβλητές αυτές παριστάνουν τις μη χρησιμοποιούμενες ποσότητες του πόρου, το όριο του οποίου εκφράζεται στα δεξιά μέλη των

ανισοτήτων. Στη βέλτιστη λύση θα βρούμε όχι μόνο τιμές των αρχικών μεταβλητών απόφασης αλλά και των μεταβλητών απόκλισης. Εισάγουμε τόσες μεταβλητές απόκλισης s_j όσες είναι και ο αριθμός των περιορισμών. Οι μεταβλητές αυτές θα πρέπει να είναι θετικές ή μηδέν ώστε να μην παραβιασθούν οι περιορισμοί. Αν στη λύση κάποια μεταβλητή απόκλισης είναι μηδέν, τότε ο αντίστοιχος περιορισμός είναι περιοριστικός.

Θεωρούμε το γενικό μοντέλο ΓΠ που έχει n μεταβλητές απόφασης και m περιορισμούς μορφής μικρότερου ή ίσου. Η κανονική του μορφή είναι:

$$\begin{aligned} \max \quad & z = c_i \cdot x_i & i = 1, 2, \dots, n \\ \text{υ.π.} \quad & a_{ji} \cdot x_i + s_j \leq b_j & i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \\ & x_i \geq 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ & s_j \geq 0 & j = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

Το μοντέλο αυτό έχει $n+m$ άγνωστες μεταβλητές και m περιορισμούς. Όποτε πρέπει να θέσουμε αυθαίρετες τιμές στις n μεταβλητές και να λύσουμε ως προς τις υπόλοιπες m . Έστω ότι δίνουμε σε αυτές αυθαίρετες τιμές ίσες με το μηδέν. Τότε οι εναπομένουσες m μεταβλητές προς επίλυση ονομάζονται *βασικές μεταβλητές* και η λύση *βασική λύση*. Το σύνολο των βασικών μεταβλητών ονομάζεται *βάση* του μοντέλου ΓΠ. Μία βασική λύση λέγεται *βασική εφικτή λύση* όταν η λύση είναι βασική και επιπλέον στη λύση αυτή όλες οι μεταβλητές είναι θετικές ή μηδέν. Σε σύγκριση και με τη γραφική μέθοδο, κάθε βασική εφικτή λύση είναι ένα ακρότατο σημείο του χώρου των εφικτών λύσεων. Τέλος δύο βασικές εφικτές λύσεις λέγονται *γειτονικές*, όταν τα σύνολα των βασικών μεταβλητών των δύο λύσεων έχουν $m-1$ κοινές μεταβλητές.

Σε αυτήν ακριβώς την τελευταία ιδιότητα στηρίζεται ο αλγόριθμός *simplex*. Έχοντας μία βασική εφικτή λύση αρκεί να διαλέξουμε μία βασική μεταβλητή την οποία να βγάλουμε εκτός βάσης και να βάλουμε στη θέση της μία μη βασική μεταβλητή. Η επιλογή της μεταβλητής που θα βγει εκτός βάσης και αυτής που θα μπει στη βάση πρέπει να γίνει έτσι ώστε να βελτιώσουμε όσο μπορούμε περισσότερο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η πιο απλή βασική εφικτή λύση από την οποία μπορούμε να ξεκινήσουμε είναι να θεωρήσουμε όλες τις μεταβλητές απόκλισης σαν βασικές μεταβλητές και όλες τις μεταβλητές απόφασης σαν μη βασικές, δηλαδή ίσες με μηδέν. Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε σε μία γειτονική βασική εφικτή λύση. Το κριτήριο για να εισάγουμε μια μεταβλητή στη βάση είναι η συνεισφορά στην αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (προβλήματα μεγιστοποίησης). Η επιλογή της καλύτερης μεταβλητής εισαγωγής x_i γίνεται με το κριτήριο του οριακού οφέλους: $\max \partial z / \partial x_i = c_i$

Ο υπολογισμός του πόσο μπορούμε να αυξήσουμε την τιμή της μεταβλητής αυτής x_i ώστε να μεγιστοποιήσουμε το όφελος για την αντικειμενική συνάρτηση αλλά και να μην παραβιάσουμε κανένα περιορισμό είναι ο εξής:

$$\text{Min}_i \{b_j/a_{ji} \mid a_{ji} \neq 0 \text{ και } b_j/a_{ji} > 0\}$$

Ο περιορισμός στον οποίο αντιστοιχεί η μεγαλύτερη αύξηση της μεταβλητής εισαγωγής (δηλαδή ο j που παρουσίασε το μικρότερο λόγο που υπολογίσαμε πιο πάνω) λέγεται *νικητής*. Επομένως επιλέγουμε σα βασική μεταβλητή που θα βγει από τη βάση εκείνη που αντιστοιχεί στον περιορισμό νικητή. Αυτή η μεταβλητή λέγεται *pivot*. Έχοντας διαλέξει μεταβλητή εισαγωγής και μεταβλητή εξόδου από τη βάση “στριφογυρίζουμε” γύρω από το *pivot*, δηλαδή κάνουμε στοιχειώδεις μετασχηματισμούς ώστε να καταλήξουμε σε διαγωνοποίηση του επαυξημένου πίνακα $A|b$ και επομένως να βρούμε τη νέα βασική λύση. Εάν δεν υπάρχει καμία υποψήφια μεταβλητή για να μπει ή να βγει από τη βάση τότε έχουμε βρει τη βέλτιστη

εφικτή λύση του προβλήματος. Οι μεταβλητές απόφασης που είναι τελικά στη βάση του μοντέλου, έχουν ως τελική τιμή την τιμή που αντιστοιχεί σε αυτές στο δεξί μέλος του επαυξημένου τελικού πίνακα ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές που βρέθηκαν εκτός βάσης ισούνται τελικά με μηδέν. Αντίστοιχα όταν μία μεταβλητή απόκλισης είναι στην τελική βάση, τότε στη βέλτιστη λύση ο αντίστοιχος περιορισμός δεν είναι περιοριστικός. Όταν η μεταβλητή απόκλισης όμως δεν είναι στη βάση τότε ο περιορισμός είναι περιοριστικός και η μεταβλητή απόκλισης του περιορισμού ισούται με μηδέν αφού ο περιορισμός ικανοποιείται με ισότητα [7].

Αυτός είναι σε πολύ γενικές γραμμές η μέθοδος και ο αλγόριθμος της simplex. Μέσα από το συγκεκριμένο αλγόριθμο υπάρχει η δυνατότητα να επιλυθούν και περιπτώσεις που εμφανίζονται άπειρες βέλτιστες λύσεις ή που το πρόβλημα ΓΠ είναι απεριορίστο και η λύση απειρίζεται. Υπάρχουν όμως και διάφορες άλλες επεκτάσεις του αλγόριθμου, ώστε να μπορεί να επιλύει προβλήματα ΓΠ που διαθέτουν περιορισμούς με φορά μεγαλύτερου ή ίσου ή ακόμα και περιορισμούς ισότητας. Στο τελικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, εφαρμόζεται μια επέκταση της μεθόδου simplex με αντικειμενική συνάρτηση εύρεσης ελαχίστου και περιορισμούς ανισότητας και ισότητας.

Η επέκταση αυτή της simplex λέγεται μέθοδος δύο φάσεων και χρησιμοποιείται όταν οι γραμμικοί περιορισμοί του προβλήματος μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε μορφή (μορφή μεγαλύτερου ή ίσου, μικρότερου ή ίσου και ισότητας). Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι προγραμματίζεται ευκολότερα από άλλες μεθόδους (μέθοδος του μεγάλου M) στον υπολογιστή.

Αρχικά πολλαπλασιάζουμε με -1 και τα δύο μέλη των περιορισμών εκείνων που έχουν το δεξί μέλος τους αρνητικό. Στη συνέχεια γίνεται εισαγωγή μεταβλητών τύπου s ($s \geq 0$) σε όσους περιορισμούς έχουν μορφή μικρότερο ή ίσο και μεταβλητών τύπου e ($e \geq 0$) στους περιορισμούς της μορφής μεγαλύτερο ή ίσο. Επιπλέον, εισάγουμε τεχνητές μεταβλητές $a(a \geq 0)$ σε όσους περιορισμούς είναι τύπου μεγαλύτερο ή ίσο ή είναι ισότητες. Έπειτα, λύνουμε δύο ξεχωριστά προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού.

Στο πρόβλημα 1^{ης} φάσης αντικαθιστούμε την αντικειμενική συνάρτηση από το άθροισμα των τεχνητών μεταβλητών και επιδιώκουμε την ελαχιστοποίησή του (τόσο σε προβλήματα ελαχιστοποίησης όσο και σε προβλήματα μεγιστοποίησης): $Min \quad w = \sum_i a_i$. Το γραμμικό αυτό πρόβλημα λέγεται πρόβλημα 1^{ης} φάσης. Εφόσον οι τεχνητές μεταβλητές είναι θετικές ή μηδέν και επιδιώκουμε την ελαχιστοποίηση του αθροίσματός τους θα έχουμε δύο περιπτώσεις:

1. Αν στη βέλτιστη λύση του προβλήματος της 1^{ης} φάσης κάποια τεχνητή μεταβλητή παραμένει θετική και διάφορη του μηδενός, δηλαδή $w > 0$, τότε το αρχικό πρόβλημα ΓΠ είναι ανέφικτο και ο αλγόριθμος σταματάει.
2. Αν στη βέλτιστη λύση του προβλήματος 1^{ης} φάσης, όλες οι τεχνητές μεταβλητές είναι μηδέν, δηλαδή $w = 0$, τότε το αρχικό πρόβλημα ΓΠ έχει λύση. Υπάρχουν όμως πάλι δύο υποπεριπτώσεις:
 - 2.1. Αν όλες οι τεχνητές μεταβλητές στο βέλτιστο πίνακα της 1^{ης} φάσης είναι εκτός βάσης, τότε αρχικά διαγράφουμε όλες τις στήλες που αντιστοιχούν στις τεχνητές μεταβλητές και εισάγουμε την αρχική αντικειμενική συνάρτηση (χωρίς τεχνητές μεταβλητές) διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες γραμμές του πίνακα ως έχουν. Έτσι, έχοντας μία αρχική βέλτιστη εφικτή λύση εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο της simplex.

2.2. Αν μία τουλάχιστον μηδενική τεχνητή μεταβλητή είναι στη βάση του βέλτιστου πίνακα της 1^{ης} φάσης τότε για να μπορέσουμε να βρούμε λύση στο αρχικό πρόβλημα ΓΠ, πρέπει από αυτόν τον πίνακα να διαγράψουμε αρχικά όλες τις τεχνητές μεταβλητές και όσες μεταβλητές του αρχικού προβλήματος έχουν συντελεστή αρνητικό στη γραμμή 0. Στη συνέχεια εισάγουμε την αρχική αντικειμενική συνάρτηση, διατηρώντας τις υπόλοιπες γραμμές του βέλτιστου πίνακα της 1^{ης} φάσης όπως είναι και εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο της simplex με αρχική βέλτιστη εφικτή λύση την τρέχουσα.

Το πρόβλημα που λύνουμε και στις δύο υποπεριπτώσεις ονομάζεται πρόβλημα 2^{ης} φάσης και με αυτό οδηγούμαστε στην τελική λύση του αρχικού μας προβλήματος [7].

Ο κώδικας της μεθόδου των δύο φάσεων υλοποιημένος σε περιβάλλον Matlab, παρουσιάζεται στο παράρτημα.

5. ΑΚΕΡΑΙΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο ακέραιος και ο μεικτός ακέραιος προγραμματισμός είναι ειδικές περιπτώσεις του γραμμικού προγραμματισμού όπου όλες ή μερικές από τις μεταβλητές απόφασης πρέπει να παίρνουν ακέραιες τιμές. Όταν από ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού αφαιρεθούν όλοι οι περιορισμοί που επιβάλλουν ακέραιες τιμές στις μεταβλητές απόφασης, τότε το προκύπτον πρόβλημα λέγεται απαλλαγμένο (relaxed) πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με τις εξής ιδιότητες:

- 1) Η περιοχή εφικτών λύσεων του ακέραιου προγραμματισμού είναι υποσύνολο του αντίστοιχου απαλλαγμένου γραμμικού προγράμματος.
- 2) Η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του απαλλαγμένου γραμμικού προγράμματος είναι πάντοτε μεγαλύτερη ή ίση της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του αντίστοιχου ακέραιου προγράμματος.
- 3) Αν κατά σύμπτωση η λύση του απαλλαγμένου προβλήματος είναι ακέραια (όχι προσεγγιστικά) τότε η λύση αυτή είναι και λύση του αντίστοιχου ακέραιου προβλήματος. Αν όμως γίνει προσέγγιση στην πλησιέστερη ακέραια λύση, δεν είναι απαραίτητο αυτή να είναι λύση ή ακόμα περισσότερο η βέλτιστη λύση του ακέραιου προβλήματος.

Η εξέλιξη των αλγορίθμων ώστε να αντιμετωπιστούν μεγάλης κλίμακας ακέραιου ή μεικτού ακέραιου προγραμματιστικά προβλήματα εξακολουθεί να είναι ενεργή. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων είναι η τεχνική *branch-and-bound* (πιάνομαι και περιορίζω) και ανάλογες παραλλαγές της.

Η τεχνική αυτή απαριθμεί με ένα αποτελεσματικό τρόπο μέρος των εφικτών λύσεων, οι οποίες αποτελούνται από συνδυασμούς ακεραίων τιμών των αγνώστων μεταβλητών. Ξεκινά λύνοντας το απαλλαγμένο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Αν βρει ακέραια λύση, σταματά. Αν η λύση είναι δεκαδική, τότε διαλέγει μία από τις μεταβλητές, για την οποία το αποτέλεσμα είναι δεκαδικό και δημιουργεί δύο νέα υποπροβλήματα προσθέτοντας περιορισμούς άνω και κάτω ορίου σύμφωνα με τις ακέραιες τιμές της μεταβλητής αυτής κοντά στη λύση του απαλλαγμένου προβλήματος. Προχωρά με παρόμοιο τρόπο κατασκευάζοντας έτσι ένα δέντρο από επιμέρους προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού έως ότου εξαντληθούν οι δυνατές περιπτώσεις. Στην κατάληξη κάποιας από τις διαδρομές του δέντρου θα υπάρχει και η λύση του ακέραιου προβλήματος.

Το βασικό σημείο της τεχνικής είναι το γεγονός ότι η διακλάδωση στο δέντρο προβλημάτων σταματά σε ένα πρόβλημα, σε μία από τις εξής δύο περιπτώσεις:

- α) το πρόβλημα είναι ανέφικτο
- β) το πρόβλημα έχει ακέραια λύση.

Στην τελευταία περίπτωση, αν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη (σε προβλήματα μεγιστοποίησης) του τρέχοντος κάτω ορίου της αντικειμενικής συνάρτησης του αρχικού προβλήματος, τότε η λύση αυτή δεν θεωρείται υπονήφια. Αν όμως είναι μεγαλύτερη του τρέχοντος κάτω ορίου, τότε θεωρείται ως νέο τρέχον κάτω όριο και η αντίστοιχη λύση θεωρείται υπονήφια.

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές της τεχνικής branch-and-bound χωρίς όμως κάποια από αυτές να υπερέχει σαφώς των άλλων. Οι παραλλαγές αφορούν κυρίως στον κανόνα απόφασης σχετικά με το ποιο πρόβλημα πρέπει να λυθεί από τα εναπομένοντα προς λύση.

Στον μεικτό ακέραιο προγραμματισμό μόνο μερικές από τις μεταβλητές απόφασης παίρνουν ακέραιες τιμές. Η τεχνική branch-and-bound εφαρμόζεται και σε αυτήν την περίπτωση, με τις εξής διαφορές:

- Όταν σε κάποιο βήμα του αλγορίθμου πρέπει να “πιαστούμε” (branch) από μία μεταβλητή, δηλαδή να επιλεγεί μία για να προσδιορίσει τη διακλάδωση του δέντρου, αυτή η μεταβλητή πρέπει να είναι ακέραια.
- Μία λύση θα θεωρηθεί υπονήφια όταν οι μεταβλητές που πρέπει να είναι ακέραιες παίρνουν στη λύση ακέραιες τιμές [7].

Το πρόβλημα της μελέτης επέκτασης δικτύου μεταφοράς με χρήση της μεθόδου αποσύνθεσης Benders, είναι ένα κατεξοχήν πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Ως μέθοδος επίλυσης του ακέραιου μέρους του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται συνήθως η τεχνική branch-and-bound με διάφορες κάθε φορά παραλλαγές ως προς τα κριτήρια επιλογής των βέλτιστων λύσεων. Αναλυτική περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται στο κεφάλαιο 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι επέκτασης δικτύου μεταφοράς

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν βασικό μέρος των σύγχρονων μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξή τους μεγαλώνει συνεχώς λόγω της αυξανόμενης μεταφοράς ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, της αύξησης των τάσεων μεταφοράς σε εξαιρετικά υψηλές τιμές καθώς και των συνεχώς εκτεινόμενων διασυνδέσεων διαφόρων συστημάτων. Για πολλές δεκαετίες στο παρελθόν η επέκταση του δικτύου μεταφοράς δεν συμπεριλαμβανόταν στις μελέτες ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής. Η συνήθης παραδοχή που γινόταν ήταν ότι η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς-διανομής θα ήταν τέτοια ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στην αντίστοιχη ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής. Ένας από τους λόγους για την παραδοχή αυτή ήταν η έμφυτη πολυπλοκότητα της ανάπτυξης του δικτύου μεταφοράς. Η παραπάνω παραδοχή απέκλειε το γεγονός να αντιμετωπιστεί η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς-διανομής και του συσχετιζόμενου εξοπλισμού ως εναλλακτική λύση για την αύξηση της παραγωγής. Πράγματι, η ενδυνάμωση ενός συστήματος μεταφοράς μπορεί να σημαίνει μείωση της ανάγκης για τη δημιουργία ενός απομακρυσμένου σταθμού παραγωγής ή να καθίσταται αναγκαία για να διευκολύνει την αγορά ισχύος από ένα γειτονικό σύστημα ενέργειας ή ακόμα και από ανεξάρτητους παραγωγούς. Τέλος, η ολοένα και αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα στο χώρο της ενέργειας καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη του δικτύου μεταφοράς και διανομής κατά τέτοιο τρόπο ώστε να βοηθά την ύπαρξη υγιούς ανταγωνισμού ανάμεσα σε υποψήφιους παραγωγούς ενεργού και άεργου ισχύος.

Η μελέτη ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως αντιμετωπίζεται σε επιμέρους προβλήματα με διαφορετικά κριτήρια το κάθε ένα. Τα συστήματα παραγωγής συνήθως σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν μία ικανοποιητική συνολική αξιοπιστία του συστήματος, δείκτες της οποίας συχνά είναι η πιθανότητα απόρριψης φορτίου (Loss Of Load Probability - LOLP) ή/και η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια (Expected Unserved Energy – EUE) με ελαχιστοποίηση τόσο του λειτουργικού κόστους όσο και της αρχικής επένδυσης. Τα συστήματα μεταφοράς σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται στους περιορισμούς διατήρησης των ορίων τάσης και ευστάθειας του συστήματος τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Τα συστήματα διανομής υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς με αυτούς των συστημάτων μεταφοράς με ιδιαίτερη μνεία στην εξισορρόπηση του κόστους των απωλειών σε σχέση με το κόστος μίας νέας εγκατάστασης.

Κατά το σχεδιασμό συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν τρεις βασικοί πρώτιστοι στόχοι:

- Η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος το οποίο εμπεριέχει το κόστος επένδυσης για νέες μονάδες παραγωγής ισχύος και γραμμές μεταφοράς-διανομής, το κόστος προγραμμάτων διαχείρισης φορτίου, το λειτουργικό κόστος του υπάρχοντος

συστήματος και άλλα κόστη (όπως π.χ. απόκτηση δικαιώματος εκπομπής περισσότερων ρύπων).

- Η μεγιστοποίηση της ποιότητας παροχής υπηρεσιών προς τους καταναλωτές.
- Η ικανοποιητική αξιοπιστία παροχής υπηρεσιών, λαμβάνοντας υπόψη τα τυχαία καιρικά φαινόμενα, την κατάσταση λειτουργίας του εξοπλισμού καθώς και άλλες διαταραχές του συστήματος.

Σύμφωνα με αυτούς τους στόχους διαμορφώνονται δύο εναλλακτικές πολιτικές για το σχεδιασμό συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη πολιτική σχετίζεται με τη *“μεγιστοποίηση της προσδοκώμενης κοινωνικής ευημερίας”* και έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους τόσο από την πλευρά του καταναλωτή όσο και από την πλευρά του παραγωγού. Η πολιτική αυτή θεωρεί γνωστές τις συναρτήσεις ζήτησης ενεργού και άεργου ισχύος και ότι οι τιμές με τις οποίες χρεώνονται οι καταναλωτές διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στα εναλλακτικά σχέδια ανάπτυξης του συστήματος.

Στόχος της δεύτερης πολιτικής είναι η *“ελαχιστοποίηση όλων των κριτηρίων κόστους”* όπως αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και του κόστους διακοπής των υπηρεσιών προς τους καταναλωτές. Σε αντίθεση με την πρώτη πολιτική, οι συναρτήσεις ζήτησης ενεργού και άεργου ισχύος σχετίζονται άμεσα με το σχέδιο ανάπτυξης που θα ακολουθηθεί [8].

Ο σχεδιασμός επέκτασης συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σχετίζεται με το πρόβλημα της επέκτασης και της ενίσχυσης ενός υπάρχοντος συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να εξυπηρετεί κατά βέλτιστο τρόπο μία συνεχώς αναπτυσσόμενη και αυξανόμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ικανοποιώντας παράλληλα ένα σύνολο τεχνικών και οικονομικών περιορισμών. Τα πρόσφατα blackout που έχουν προκύψει σε διάφορες χώρες σε ολόκληρο τον πλανήτη καταδεικνύουν την ανάγκη για ενίσχυση της δομής του δικτύου ώστε να δημιουργηθούν επιτυχείς απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας [9].

Έως σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος ανάπτυξης δικτύου μεταφοράς, όπως η Branch and Bound, η ανάλυση ευαισθησίας-αξιοπιστίας (Sensitivity Analysis), η διαδικασία αποσύνθεσης Benders (Benders Decomposition), η προσομοιωμένη απόπτηση (Simulated Annealing), οι γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η μέθοδος Tabu Search, καθώς και η άπληστη τυχαία προσαρμοστική αναζήτηση (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure). Οι πρώτες τρεις μέθοδοι αναπτύσσουν στατικά μοντέλα και έναν καθαρά μαθηματικό τρόπο προσέγγισης στο πρόβλημα δίνοντας τη βέλτιστη λύση για ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων και για προκαθορισμένο χρονικό ορίζοντα. Τα τελευταία χρόνια όμως το βάρος των μελετών έχει μετατοπιστεί από το πεδίο της εύρεσης βέλτιστης λύσης προς το πεδίο της εύρεσης της οικονομικότερης λύσης. Η ανάπτυξη πολυκριτηριακών τεχνικών μπορεί να παρέχει κατά τη σχεδίαση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πολλές πιθανές ικανοποιητικές λύσεις αντί για μια μοναδική βέλτιστη λύση.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αρχικά θα παρουσιαστεί η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και θα ακολουθήσει η παρουσίαση της μεθόδου αποσύνθεσης Benders. Ακολούθως θα αναπτυχθούν μερικώς τρεις από τις σύγχρονες τεχνικές αναζήτησης και προσέγγισης λύσεων προβλημάτων ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς: οι γενετικοί αλγόριθμοι, οι άπληστοι αλγόριθμοι αναζήτησης και η τεχνική της προσομοιωμένης απόπτησης.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Σ.Η.Ε.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί καθαρά με την επέκταση του δικτύου μεταφοράς και καθόλου με το προγραμματισμό νέων έργων μονάδων παραγωγής. Παρόλα αυτά στη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος που θα ακολουθήσει θα αναφερθούμε στο σύνολο του σχεδιασμού και προγραμματισμού επέκτασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [8]. Ο προγραμματισμός αυτός περιλαμβάνει:

1. Εγκατάσταση νέων γεννητριών και σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ήδη υπάρχοντες ή νέους ζυγούς του συστήματος.
2. Σύνδεση των νέων ζυγών με νέες γραμμές μεταφοράς ή ενδυνάμωση του ήδη υπάρχοντος δικτύου μεταφοράς είτε χρησιμοποιώντας διπλούς αγωγούς ανά φάση είτε συνδέοντας τους ζυγούς με διπλό ή και τριπλό κύκλωμα. Οι καινούριες γραμμές μεταφοράς θα έχουν φυσικά και μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος.
3. Εγκατάσταση όπου χρειάζεται νέων μετασχηματιστών ή αντικατάσταση παλαιών μικρής ισχύος.
4. Υλοποίηση και λειτουργία προγραμμάτων διαχείρισης φορτίου.
5. Προμήθεια και λειτουργία τεχνολογιών ελέγχου ρυθών.

Το πρόβλημα είναι ένας συνδυασμός μη γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού το οποίο μπορεί να διαχωριστεί σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα (λειτουργία του συστήματος) και σε ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού (πιθανές επενδύσεις του συστήματος). Το σύστημα αναπαρίσταται από ένα μοντέλο AC ροής φορτίου κατά τη διάρκεια όλων των ωρών και οι περιορισμοί του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς αναπαρίστανται από τα όρια παραγωγής και μεταφοράς ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα.

Αρχικά παρουσιάζονται όλα τα σύμβολα που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια:

Σύμβολα

I, J	:Το σύνολο των ζυγών του ηλεκτρικού συστήματος.
T	:Το σύνολο των ωρών που συνιστούν τον ορίζοντα σχεδιασμού.
Y	:Το σύνολο των χρόνων που συνιστούν τον ορίζοντα σχεδιασμού.
T_y	:Το σύνολο των ωρών που συνιστούν ένα χρόνο.
W	:Σύνολο τύπων ημέρας που συνιστούν μία εποχή.
S'	:Σύνολο εποχών που συνιστούν ένα χρόνο.
CL	:Το σύνολο των κατηγοριών πελατών.
NSA	:Το σύνολο των ρύπων (NO_x, SO_x κτλ.).
NM_i	:Το σύνολο των νέων υπό εξέταση μονάδων παραγωγής στο ζυγό i .
PM_i	:Το σύνολο των μονάδων παραγωγής στο ζυγό i στις οποίες εξετάζεται η προσθήκη τεχνολογίας ελέγχου ρύπων.
M_i	:Το σύνολο των ήδη υπάρχουσων μονάδων παραγωγής στο ζυγό i .
CR	:Το σύνολο των κλάδων του συστήματος μεταφοράς.

EL_c	:Το σύνολο των ήδη υπάρχουσων γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών στον κλάδο c.
NL_c	:Το σύνολο των νέων γραμμών μεταφοράς και των νέων μετασχηματιστών που εξετάζονται για τον κλάδο c.
PT	:Το σύνολο των τεχνολογιών ελέγχου ρύπων.
S	:Το σύνολο των πιθανών καταστάσεων του συστήματος.
D	:Το σύνολο των προγραμμάτων διαχείρισης φορτίου.

Παράμετροι

P_{it}^d	:Ζήτηση ενεργού ισχύος στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t.
Q_{it}^d	:Ζήτηση άεργου ισχύος στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t.
G_{cl}	:Το πραγματικό μέρος της αγωγιμότητας της γραμμής l του κλάδου c(i,j).
B_{cl}	:Το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας της γραμμής l του κλάδου c(i,j).
β_{cl}	:Εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής l του κλάδου c(i,j).
σ_y	:Συντελεστής παρούσας αξίας για το χρόνο y.
$HRS_{ys'd''peak''}$	:Σύνολο ωρών που εμφανίζεται τύπος ημέρας d_{peak} , στην εποχή s' κατά τη διάρκεια ενός χρόνου y.
$HRS_{ys'd''base''}$	:Σύνολο ωρών που εμφανίζεται τύπος ημέρας d_{base} , στην εποχή s' κατά τη διάρκεια ενός χρόνου y.
$q_{ic't}^u$	:Λόγος της $Q_{ic'ts}^u$ με την $P_{ic'ts}^u$ (συντελεστής ισχύος του φορτίου)
a_{imts}	:Διαθεσιμότητα της μονάδας m στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s του συστήματος.
b_{clts}	:Η διαθεσιμότητα της γραμμής l του κλάδου c(i,j) τη χρονική στιγμή t κατά την κατάσταση s του συστήματος.
a_b	:Συντελεστής που δίνει το λόγο της ενέργειας που δεν εξυπηρετείται στην “αιχμή” με την ενέργεια που πρέπει να επιστραφεί κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης μέσω προγράμματος διαχείρισης φορτίου b.
T_{cl}	:Μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος της γραμμής l του κλάδου c(i,j).
K_{ib}^D	:Συμφωνημένη απόρριψη ισχύος σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης στο ζυγό i, μέσω προγράμματος διαχείρισης φορτίου b.
K_{im}^P	:Μέγιστη ικανότητα παραγωγής ενεργούς ισχύος της μονάδας m στο ζυγό i.
K_{im}^{mq}	:Μέγιστη κατανάλωση άεργου ισχύος (επαγωγική λειτουργία) μονάδας m στο ζυγό i.

K_{im}^{Mq}	:Μέγιστη παραγωγή άεργου ισχύος (χωρητική λειτουργία) μονάδας m στο ζυγό i.
e_{nim}	:Εκπομπή ρύπου n ανά μονάδα παραγωγής της μονάδας m στο ζυγό i.
η_{nimwt}	:Μείωση της e_{nim} σε χρόνο t ανά μονάδα επένδυσης σε τεχνολογία ελέγχου ρύπων w.
HA_{nt}	:Ωριαία όρια εκπομπής ρύπου n για όλο το σύστημα για χρόνο t.
$CLP_{ic'}$	:Κλάσμα του φορτίου στο ζυγό i που ανήκει στην κατηγορία πελατών c'.
BD_y	:Προϋπολογισμός εξόδων κεφαλαίου για το χρόνο y.

Μεταβλητές υποπροβλήματος λειτουργίας

$P_{ic' ts}^u$	:Μη εξυπηρετούμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό i σε καταναλωτή κατηγορίας c' τη χρονική στιγμή t όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση s.
P_{imts}^g	:Παραγωγή ενεργούς ισχύος από τη μονάδα m στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s.
Q_{imts}^g	:Παραγωγή άεργου ισχύος από τη μονάδα m στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s.
P_{ibts}^D	:Απόρριψη ενεργού ισχύος στο ζυγό i μέσω προγράμματος διαχείρισης φορτίου b τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s.
A_{nts}	:Δικαίωμα αγοράς ή πώλησης ρύπου n τη χρονική στιγμή t στη κατάσταση s του συστήματος.
P_{ijlts}^f	:Ροή ενεργούς ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j μέσω της γραμμής μεταφοράς ή του μετασχηματιστή l τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s.
Q_{ijlts}^f	:Ροή άεργου ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j μέσω της γραμμής μεταφοράς ή του μετασχηματιστή l τη χρονική στιγμή t στην κατάσταση s.
$P_{ibys'd'peak"s}^D$	:Απόρριψη ενεργού ισχύος στο ζυγό i σε μέρα “αιχμής” $d_{peak} \in W$, εποχής $s' \in S'$, κατά το χρόνο y, μέσω προγράμματος διαχείρισης φορτίου b όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση s.
$P_{ibys'd'base"s}^D$	:Επιστρεφόμενη ισχύς στο ζυγό i σε μέρα “βάσης” $d_{base} \in W$, εποχής $s' \in S'$, κατά το χρόνο y, μέσω προγράμματος διαχείρισης φορτίου b όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση s.
V_{its}	:Το μέτρο της τάσης στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t κατά την κατάσταση s του συστήματος.

d_{its} :Η γωνία της τάσης στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t κατά την κατάσταση s του συστήματος.

Μεταβλητές κύριου προβλήματος επένδυσης

U_{im} :Μεταβλητή απόφασης επένδυσης για μονάδα παραγωγής m στο ζυγό i .
 ε_{imw} :Μεταβλητή απόφασης επένδυσης για εγκατάσταση τεχνολογίας ελέγχου ρύπων w στη μονάδα m στο ζυγό i .
 F_{cl} :Μεταβλητή απόφασης επένδυσης για γραμμή μεταφοράς ή μετασχηματιστή l στον κλάδο c .
 D_b :Μεταβλητή απόφασης επένδυσης για πρόγραμμα διαχείρισης φορτίου b .
 ε_{imw} :Μεταβλητή απόφασης επένδυσης για τεχνολογία ελέγχου ρύπων w στη μονάδα m στο ζυγό i .

Παράμετροι κόστους

CC_{im} :Η παρούσα αξία του κόστους κατασκευής μονάδας παραγωγής m στο ζυγό i .
 EC_{imw} :Παρούσα αξία του κόστους ελέγχου των ρύπων, τεχνολογίας w για τη μονάδα m στο ζυγό i .
 TC_{cl} :Παρούσα αξία του κόστους γραμμής μεταφοράς ή μετασχηματιστή l στον κλάδο c .
 DSM_b :Παρούσα αξία του κόστους εφαρμογής προγράμματος διαχείρισης φορτίου b .
 $OC_{ic't}$:Το κόστος διακοπής καταναλωτή κατηγορίας c' στο ζυγό i τη χρονική στιγμή t .
 PC_{im} :Κόστος παραγωγής μονάδας m στο ζυγό i .
 AC_{ny} :Τιμή αγοράς ή πώλησης δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων n το χρόνο y .
 CC_{yim} :Έξοδα κεφαλαίου για το χρόνο y για μονάδα παραγωγής m στο ζυγό i .
 EC_{yimw} :Έξοδα κεφαλαίου για το χρόνο y για τεχνολογία ελέγχου ρύπων w στη μονάδα m στο ζυγό i .
 TC_{ycl} :Έξοδα κεφαλαίου για το χρόνο y για γραμμή μεταφοράς ή μετασχηματιστή l στον κλάδο c .
 DSM_{yb} :Έξοδα κεφαλαίου για το χρόνο y για εφαρμογή προγράμματος διαχείρισης φορτίου b .

Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού κόστους το οποίο ορίζεται ως ακολούθως:

$[Συνολικό\ κόστος] = Παρούσα\ αξία\ του\ κόστους\ επένδυσης\ σε\ \{ [σταθμούς\ παραγωγής] + [τεχνολογίες\ ελέγχου\ ρύπων] + [γραμμές\ μεταφοράς] + [προγράμματα\ διαχείρισης\ φορτίου] \} + Παρούσα\ αξία\ του\ αναμενόμενου\ \{ [κόστους\ διακοπής\ καταναλωτή] + [κόστους\ παραγωγής] + [αγοράς\ ή\ πώλησης\ δικαιωμάτων\ εκπομπής\ ρύπων] \}$

$$MinC = \sum_{i \in I} \sum_{m \in NM_i} CC_{im} U_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} EC_{imw} \varepsilon_{imw} + \sum_{c \in CRI \in NL_C} TC_{cl} F_{cl} + \sum_{b \in D} DSM_b D_b$$

$$+ \sum_y \sigma_y \left[\sum_{t \in T_y} E \sum_{i \in I} \left(\sum_{c \in CL} OC_{ic't} P_{ic'ts}^u + \sum_{m \in M_i} PC_{im} P_{imts}^g + \sum_{n \in NSA} AC_{ny} A_{nts} \right) \right] \quad (4.1)$$

Οι περιορισμοί που πρέπει να τηρούνται παράλληλα για να είναι αποδεκτή η τελική λύση του προβλήματος είναι οι ακόλουθοι:

1. Περιορισμός προϋπολογισμού για κάθε χρόνο y που ανήκει στο χρονικό ορίζοντα της μελέτης Y .

$Εξοδα\ κεφαλαίου\ κατά\ το\ χρόνο\ y\ σε\ \{ [σταθμούς\ παραγωγής] + [τεχνολογίες\ ελέγχου\ ρύπων] + [γραμμές\ μεταφοράς] + [προγράμματα\ διαχείρισης\ φορτίου] \} \leq [Προϋπολογισμού\ για\ το\ χρόνο\ y]$

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in NM_i} CC_{yim} U_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} EC_{yimw} \varepsilon_{imw} + \sum_{c \in CRI \in NL_C} TC_{ycl} F_{cl} + \sum_{b \in D} DSM_{yb} D_b \leq BD_y \quad (4.2)$$

2. Ισοζύγιο ενεργού ισχύος για κάθε ζυγό i του συστήματος.

$[παραγόμενη\ ενεργός\ ισχύς] + [μη\ εξυπηρετούμενη\ ενεργός\ ισχύς] - [ροή\ ενεργού\ ισχύος] = [ζήτηση\ ενεργού\ ισχύος]$

$$\forall i \in I \ [όπου\ c = c(i, j)], \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\sum_{m \in M_i} P_{imts}^g + \sum_{c' \in CL} P_{ic'ts}^u - \sum_{j \in J} \sum_{l \in EL_C} P_{ijlts}^f - \sum_{j \in J} \sum_{l \in NL_C} P_{ijlts}^f F_{cl} = P_{it}^d \quad (4.3)$$

3. Ισοζύγιο άεργου ισχύος για κάθε ζυγό i του συστήματος.

$[παραγόμενη\ άεργος\ ισχύς] + [μη\ εξυπηρετούμενη\ άεργος\ ισχύς] - [ροή\ άεργου\ ισχύος] = [ζήτηση\ άεργου\ ισχύος]$

$$\forall i \in I \text{ [όπου } c = c(i, j)], \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\sum_{m \in M_i} Q_{imts}^g + \sum_{c' \in CL} q_{ic't}^u P_{ic'ts}^u - \sum_{j \in J} \sum_{l \in EL_C} Q_{ijlts}^f - \sum_{j \in J} \sum_{l \in NL_C} Q_{ijlts}^f F_{cl} = Q_{it}^d \quad (4.4)$$

4. Όρια παραγωγής ενεργού ισχύος για τις ήδη υπάρχουσες μονάδες σε κάθε ζυγό i του συστήματος.

$$0 \leq [\text{παραγωγή ενεργού ισχύος}] \leq [\text{ονομαστική ισχύ μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}]$$

$$\forall i \in I, \forall m \in M_i, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$0 \leq P_{imts}^g \leq K_{im}^P a_{imts} \quad (4.5)$$

5. Όρια παραγωγής ενεργού ισχύος για τις υπό ένταξη μονάδες σε κάθε ζυγό i του συστήματος.

$$0 \leq [\text{παραγωγή ενεργού ισχύος}] \leq [\text{ονομαστική ισχύ μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}] * [\text{μεταβλητή απόφασης ένταξης}]$$

$$\forall i \in I, \forall m \in NM_i, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$0 \leq P_{imts}^g \leq K_{im}^P a_{imts} U_{im} \quad (4.6)$$

6. Όρια παραγωγής και κατανάλωσης άεργου ισχύος για τις ήδη υπάρχουσες μονάδες σε κάθε ζυγό i του συστήματος.

$$[\text{μέγιστη κατανάλωση άεργου ισχύος μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}] \leq [\text{παραγωγή ή κατανάλωση άεργου ισχύος}] \leq [\text{μέγιστη παραγωγή άεργου ισχύος μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}]$$

$$\forall i \in I, \forall m \in M_i, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$K_{im}^{mq} a_{imts} \leq Q_{imts}^g \leq K_{im}^{Mq} a_{imts} \quad (4.7)$$

7. Όρια παραγωγής και κατανάλωσης άεργού ισχύος για τις υπό ένταξη μονάδες σε κάθε ζυγό i του συστήματος.

$$[\text{μέγιστη κατανάλωση άεργου ισχύος μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}] * [\text{μεταβλητή απόφασης ένταξης}] \leq [\text{παραγωγή ή κατανάλωση άεργου ισχύος}] \leq [\text{μέγιστη παραγωγή άεργου ισχύος μονάδας}] * [\text{διαθεσιμότητα μονάδας}] * [\text{μεταβλητή απόφασης ένταξης}]$$

$$\forall i \in I, \forall m \in NM_i, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$K_{im}^{mq} a_{imts} U_{im} \leq Q_{imts}^g \leq K_{im}^{Mq} a_{imts} U_{im} \quad (4.8)$$

8. Περιορισμός προσυμφωνημένης απόρριψης ισχύος σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης.

$$0 \leq [\text{απόρριψη ισχύος}] \leq [\text{μέγιστη προσυμφωνημένη απόρριψη ισχύος}]$$

$$\forall i \in I, \forall b \in D, \forall t \in T \ni h = \text{"peak"}, \forall s \in S$$

$$0 \leq P_{ibts}^D \leq K_{ib}^D D_b \quad (4.9)$$

9. Ισοζύγιο ενέργειας για προγράμματα διαχείρισης φορτίου.

$$[\text{μη εξυπηρετούμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια αιχμών}] = [\text{επιστρεφόμενη ενέργεια κατά τη διάρκεια χαμηλού φορτίου}]$$

$$\forall i \in I, \forall b \in D, \forall y \in Y, \forall s \in S, \forall d \in W, \forall s' \in S'$$

$$P_{ibys'd'peak"s}^D HRS_{ys'd'peak"} = a_b P_{ibys'd'base"s}^D HRS_{ys'd'base"} \quad (4.10)$$

10. Ισοζύγιο ροής ενεργού ισχύος στις γραμμές.

$$[\text{έκφραση AC ροής ενεργού ισχύος}] * [\text{διαθεσιμότητα}] = [\text{ροή ενεργού ισχύος κατά μήκος της γραμμής}]$$

$$[\forall i \in I, \forall j \in J \ni c(i, j) \in CR], \forall l \in EL_C, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\{V_{its} V_{jts} [-G_{cl} \cos(d_{its} - d_{jts}) + B_{cl} \sin(d_{its} - d_{jts})] + (V_{its})^2 G_{cl}\} b_{clts} = P_{ijlts}^f \quad (4.11)$$

11. Ισοζύγιο ροής άεργου ισχύος στις γραμμές.

$$[\text{έκφραση AC ροής άεργου ισχύος}] * [\text{διαθεσιμότητα}] = [\text{ροή άεργου ισχύος κατά μήκος της γραμμής}]$$

$$[\forall i \in I, \forall j \in J \ni c(i, j) \in CR], \forall l \in EL_C, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\{-V_{its} V_{jts} [G_{cl} \sin(d_{its} - d_{jts}) + B_{cl} \cos(d_{its} - d_{jts})] + (V_{its})^2 (B_{cl} - b_{cl} / 2)\} b_{clts} = Q_{ijlts}^f \quad (4.12)$$

12. Περιορισμός ροής ισχύος για ήδη υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς.

$$[\text{μεταφορά ισχύος μέσω γραμμής}] \leq [\text{όριο μεταφοράς ισχύος γραμμής}] * [\text{διαθεσιμότητα}]$$

$$[\forall i \in I, \forall j \in J \ni c(i, j) \in CR], \forall l \in EL_C, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\sqrt{(P_{ijlts}^f)^2 + (Q_{ijlts}^f)^2} \leq T_{cl} b_{clts} \quad (4.13)$$

13. Περιορισμός ροής ισχύος για τις υπό ένταξη γραμμές μεταφοράς.

$$[\text{μεταφορά ισχύος μέσω γραμμής}] \leq [\text{όριο μεταφοράς ισχύος γραμμής}] * [\text{διαθεσιμότητα}] * [\text{μεταβλητή απόφασης ένταξης}]$$

$$[\forall i \in I, \forall j \in J \ni c(i, j) \in CR], \forall l \in NL_C, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\sqrt{(P_{ijlts}^f)^2 + (Q_{ijlts}^f)^2} \leq T_{cl} b_{clts} F_{cl} \quad (4.14)$$

14. Περιορισμός τάσης για κάθε ζυγό i του συστήματος.

$$[\text{μικρότερη αποδεκτή τιμή τάσης}] \leq [\text{τάση στο ζυγό i}] \leq [\text{μεγαλύτερη αποδεκτή τιμή τάσης}]$$

$$\forall i \in I, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$V_i^{\min} \leq V_{its} \leq V_i^{\max} \quad (4.15)$$

15. Περιορισμός ωριαίων εκπομπών ρύπων για όλες τις μονάδες του συστήματος.

$$[\text{ωριαία εκπομπή ρύπων συστήματος}] \leq [\text{όριο ωριαίας εκπομπής ρύπων συστήματος}] + [\text{άδεια εκπομπής ρύπων που πουλήθηκε ή αγοράστηκε}]$$

$$\forall n \in NSA, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{m \in M_i} e_{nim} P_{imts}^g - \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} \eta_{nimwt} \varepsilon_{imw} P_{imts}^g \right) \leq HA_{nt} + A_{nts} \quad (4.16)$$

16. Περιορισμός μη εξυπηρετούμενης ισχύος για κάθε ζυγό i.

$$0 \leq [\text{μη εξυπηρετούμενη ισχύς στο ζυγό i}] \leq [\text{ζήτηση ισχύος στο ζυγό i}]$$

$$\forall i \in I, \forall c' \in CL, \forall t \in T, \forall s \in S$$

$$0 \leq P_{ic'ts}^u \leq CLP_{ic'} P_{it}^d \quad (4.17)$$

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου θεμελίωσης του προβλήματος είναι:

1. Αποτελεί μια ακριβή περιγραφή του συστήματος. Οι ροές ισχύος περιγράφονται με τις εξισώσεις της AC ροής φορτίου και οι περιορισμοί μεταφοράς ισχύος περιγράφονται από τα όρια μεταφοράς.
2. Οι ήδη υπάρχοντες αλγόριθμοι βέλτιστης ροής φορτίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λύση του υποπροβλήματος λειτουργίας του συστήματος.

Τα μειονεκτήματά του είναι τα εξής:

1. Αποτελεί ένα συνδυασμό μη γραμμικού και μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, ενώ το υποπρόβλημα λειτουργίας είναι πάντα μη γραμμικό και μη κυρτό, ακόμα και όταν οι μεταβλητές απόφασης είναι δεδομένες.
2. Η λύση του υποπροβλήματος της βέλτιστης AC ροής φορτίου είναι δύσκολη και αρκετά χρονοβόρα για να επιλυθεί.

3. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS

Όπως αναφέραμε παραπάνω, το πρόβλημα μπορεί να διαχωριστεί σε ένα ωριαίο υποπρόβλημα λειτουργίας με συνεχείς μεταβλητές και σε ένα κύριο πρόβλημα επένδυσης με ακέραιες μεταβλητές απόφασης [8].

Ορίζουμε ως:

$y = (U, e, F, D, ND)$ το διάνυσμα των μεταβλητών επένδυσης και ως

$x = (P^g, Q^g, P^D, P^u, d, V, A)$ το διάνυσμα των μεταβλητών λειτουργίας

$c(y)$ = κεφαλαιουχικό κόστος της επένδυσης

$d(x)$ = λειτουργικό κόστος του συστήματος και κόστος μη εξυπηρέτησης πελατών

$f(y) \geq a$: επενδυτικοί περιορισμοί

$g(y) + h(x) \geq b$: περιορισμοί λειτουργίας συστήματος

Το αρχικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης (Π1) μπορεί να διατυπωθεί με μαθηματικές σχέσεις ως εξής:

$$\begin{aligned}
 (\Pi 1) \quad & \text{Min } z = c(y) + d(x) \\
 & \text{v.π. } f(y) \geq a \\
 & g(y) + h(x) \geq b
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Η διαδικασία της αποσύνθεσης βασίζεται στην επόμενη αιτιολόγηση:

i) Το ελάχιστο λειτουργικό κόστος για ένα συγκεκριμένο σχέδιο ανάπτυξης $d[x^*(y)]$, όπου το x^* είναι η βέλτιστη λύση για το διάνυσμα των μεταβλητών λειτουργίας του προηγούμενου προβλήματος για μία συγκεκριμένη τιμή του διανύσματος y , μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του δεδομένου διανύσματος των μεταβλητών επένδυσης (Π2):

$$\begin{aligned}
 (\Pi 2) \quad & D(y) = \text{Min } d(x) \\
 & \text{v.π. } h(x) \geq b - g(y)
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

ii) Τότε το αρχικό πρόβλημα (Π1) μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση μόνο των μεταβλητών επένδυσης ως εξής (Π3):

$$\begin{aligned}
 (\Pi 3) \quad & \text{Min } c(y) + D(y) \\
 & \text{v.π. } f(y) \geq a
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

Η επίλυση του τελικού προβλήματος (Π3) μέσω του αλγόριθμου επίλυσης της αποσύνθεσης Benders (Generalized Benders Decomposition Algorithm), επιτυγχάνεται με προσέγγιση της συνάρτησης $D(y)$, του ελάχιστου δηλαδή λειτουργικού κόστους, ως συνάρτηση του προβλήματος επένδυσης. Οι προσεγγίσεις της συνάρτησης $D(y)$, που ονομάζονται “Benders cuts”, βασίζονται στη λύση του υποπροβλήματος λειτουργίας (Π2) και προέρχονται από τις δυαδικές μεταβλητές του λειτουργικού υποπροβλήματος αφού αυτές δείχνουν την επίδραση που μπορεί να έχει μια αλλαγή στις μεταβλητές του συστήματος στο λειτουργικό κόστος και στο κόστος μη εξυπηρέτησης πελατών.

Το κύριο πρόβλημα επένδυσης (Investment Master Problem, IMP), του αλγορίθμου της αποσύνθεσης Benders έχει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{aligned}
 (\text{IMP}) \quad & \text{Min } z \\
 & \text{v.π. } z \geq c(y) + D^k + \pi^k (y^k - y) \quad , \quad k=1,2,\dots,K \\
 & f(y) \geq a
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

όπου

k :δείκτης των επαναλήψεων της διαδικασίας προσέγγισης της συνάρτησης $D(y)$, δηλαδή της εύρεσης των “Benders cuts”.

D^k : η βέλτιστη τιμή της αντικειμενική συνάρτησης του υποπροβλήματος λειτουργίας στην k επανάληψη.

π^k : τιμή των δυαδικών μεταβλητών του υποπροβλήματος λειτουργίας στην k επίλυσή του

y^k : μεταβλητές απόφασης επένδυσης στην k επανάληψη

Οι τιμές των y^k και π^k βρίσκονται από την επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας (Operation SubProblem, OSP) κατά την k επανάληψη.

$$\begin{aligned} \text{(OSP)} \quad D^k &= \text{Min } d(x) & (4.22) \\ \text{υ.π.} \quad h(x) &\geq b - g(y^k) \end{aligned}$$

Ο αναλυτικός αλγόριθμος της μεθόδου αποσύνθεσης Benders αλλά και το διάγραμμα ροής της, παρατίθενται ακολούθως:

Αλγόριθμος της μεθόδου αποσύνθεσης Benders

Βήμα 1^ο : Αρχικοποιούμε το πρόβλημα επένδυσης (IMP) χωρίς “Benders cuts”. $k=1$.

Βήμα 2^ο : Λύνουμε το IMP και βρίσκουμε τη βέλτιστη λύση (z^0, y^0) .

Η τιμή z^0 αποτελεί το κάτω όριο της τελικής βέλτιστης λύσης του προβλήματος.

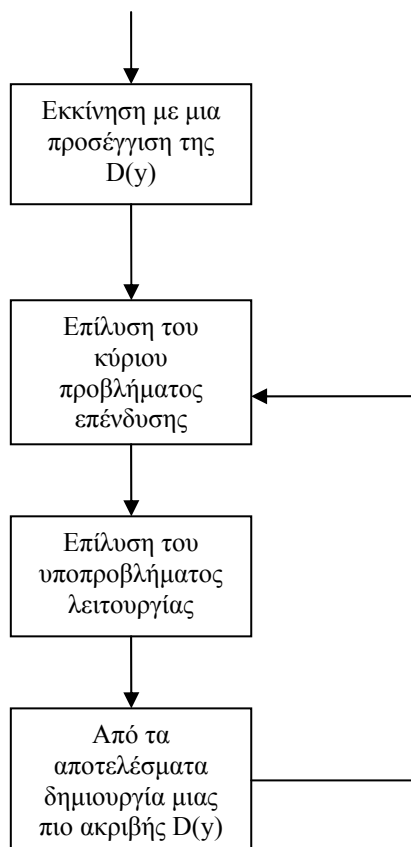
Βήμα 3^ο : Λύνουμε το OSP (για δεδομένο y^0 από το βήμα 2) και βρίσκουμε τα (D^k, x^k, π^k) .

Η λύση (y^0, x^k) είναι μια εφικτή λύση του προβλήματος σχεδιασμού. Για αυτό η τιμή $c(y^0) + D^k$ είναι το άνω όριο της βέλτιστης λύσης του προβλήματος.

3α : Αν $c(y^0) + D^k - z^0 \leq \text{’όριο ανοχής’}$, τότε το πρόβλημα έχει λυθεί και η βέλτιστη λύση του είναι η (y^0, x^k) . Τέλος.

3β : Διαφορετικά μπαίνει ο ακόλουθος περιορισμός στο IMP:

$$z \geq c(y) + D^k + \pi^k (y^k - y). \quad k=k+1. \text{ Επιστροφή στο βήμα 2.}$$



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής της μεθόδου αποσύνθεσης Benders

Είναι φανερό ότι τα δύο προβλήματα μπορούν να λυθούν ανεξάρτητα. Το μεν υποπρόβλημα λειτουργίας μπορεί να λυθεί από κάποιο πρόγραμμα επίλυσης δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το δε πρόβλημα επένδυσης από κάποιο πρόγραμμα εύρεσης βέλτιστης λύσης. Ο μεγάλος αριθμός των εξισώσεων και των μεταβλητών, λειτουργίας και επένδυσης, του προβλήματος αυξάνει την πολυπλοκότητα αλλά και τη δυσκολία του. Εξάλλου, η θεωρία της αποσύνθεσης Benders δεν εφαρμόζεται πάντα με ακρίβεια σε μοντέλα που χρησιμοποιούν AC ροές φορτίου. Επίσης είναι δύσκολο να ληφθεί η βέλτιστη λύση ενός σύνθετου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάζοντας τις γεννήτριες και τις γραμμές μεταφοράς ταυτοχρόνως. Σε ένα πραγματικό σύστημα ο σχεδιασμός ανάπτυξης και επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται συνήθως μετά από το σχεδιασμό επέκτασης του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

4. ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ - GENETIC ALGORITHMS

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν τεχνικές βελτιστοποίησης και αναζήτησης που βασίζονται στη φυσική εξέλιξη. Συνίστανται από ένα πληθυσμό συμβολοακολουθιών (string) δυαδικών ψηφίων (bits) που μετασχηματίζονται σύμφωνα με τρεις βασικούς τελεστές: επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη. Κάθε συμβολοακολουθία, που ονομάζεται χρωμόσωμα, αντιπροσωπεύει μία πιθανή λύση που μπορεί να βελτιστοποιηθεί και κάθε bit

αντιπροσωπεύει μία μεταβλητή του προβλήματος που ονομάζεται γονίδιο. Οι λύσεις αυτές ταξινομούνται σύμφωνα με μία συνάρτηση εκτίμησης η οποία τους δίνει καλύτερες τιμές και τις τοποθετεί προς μία κατεύθυνση βέλτιστων λύσεων, η οποία ονομάζεται και συνάρτηση προσαρμογής [10].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι που θα εξετάσουμε στη συνέχεια είναι οι κανονικοποιημένοι αλγόριθμοι, κατά τους οποίους η διαδικασία επίλυσης βασίζεται και στους τρεις βασικούς τελεστές (επιλογή, διασταύρωση και μετάλλαξη), καθώς και σε γραμμικά, δυαδικά προσαρμοσμένου μήκους χρωμοσώματα. Κάθε νέα γενιά δημιουργείται από τον τελεστή της επιλογής και διαφοροποιείται περαιτέρω με τους τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Ο πρώτος πληθυσμός δημιουργείται τυχαία.

Ο τελεστής της επιλογής δημιουργεί ένα νέο πληθυσμό επιλέγοντας άτομα από τον παλαιότερο πληθυσμό, με γνώμονα τη βέλτιστη εξέλιξη του πληθυσμού. Αυτό σημαίνει ότι ουσιαστικά υπάρχουν περισσότερες αναπαραγωγές των καλών ατόμων, αλλά και μερικές των κακών. Ο τελεστής αυτός μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με μία τεχνική που ονομάζεται Στοχαστικός Διαγωνισμός. Κάθε φορά που πρέπει να επιλεγεί ένα άτομο για αναπαραγωγή, επιλέγουμε δύο τυχαία και το καλύτερο “κερδίζει” με μία σταθερή μεγάλη πιθανότητα (π.χ. 0.8). Αυτή η διαδικασία μπορεί να γενικευθεί χρησιμοποιώντας και περισσότερα από ένα άτομα και όπως γίνεται κατά το Διαγωνισμό Boltzmann [11].

Ο τελεστής της διασταύρωσης είναι ο κύριος γενετικός τελεστής και λειτουργεί αλλάζοντας αμοιβαία τμήματα των χρωμοσωμάτων δύο ατόμων. Η απλούστερη μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται αυτό είναι η τυχαία επιλογή ενός σημείου διασταύρωσης σε ένα χρωμόσωμα και η αμοιβαία εναλλαγή των γονιδίων που βρίσκονται ανάμεσα στο σημείο εναλλαγής και το τέλος των δύο χρωμοσωμάτων που πρόκειται να διασταυρωθούν. Ο τελεστής αυτός δεν εφαρμόζεται σε όλα τα χρωμοσώματα αλλά η συχνότητα εφαρμογής του εξαρτάται από τη Συχνότητα Διασταύρωσης, η οποία συνήθως λαμβάνει μεγάλες τιμές (π.χ. 0.8).

Τέλος ο τελεστής της μετάλλαξης λειτουργεί διαφοροποιώντας ένα τυχαίο bit σε ένα άτομο. Ο τελεστής αυτός χρησιμοποιείται με μεγάλη προσοχή με μικρή πιθανότητα στα άτομα του πληθυσμού (π.χ. 0.001). Σκοπός του τελεστή αυτού είναι να διατηρεί ορισμένα σημαντικά ίσως χαρακτηριστικά των ατόμων τα οποία ενδέχεται να χαθούν με τη διαδικασία της επιλογής.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν την ικανότητα να επιλέγουν από τον αρχικό πληθυσμό άτομα με χαρακτηριστικά τα οποία είναι ικανοποιητικά για το πρόγραμμα και να τα συνδυάζουν προκειμένου να δημιουργούνται ακόμα καλύτερες λύσεις. Η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος γενετικών αλγορίθμων είναι της τάξης του $O(N^3)$, όπου N το μέγεθος του πληθυσμού. Η απλοποιημένη μορφή ενός προγράμματος γενετικών αλγορίθμων δίνεται ακολούθως σε μορφή ψευδοκώδικα.

```
main()
{
  int gen;
  generate(oldpop);
  for(gen = 0; gen < MAXGEN; gen++)
  {
    evaluate(oldpop);
    newpop = select(oldpop);
```

```

crossover(newpop);
mutation(newpop);
oldpop = newpop;
}
}

```

Κατά τη θεμελίωση ενός προγράμματος που χρησιμοποιεί τη τεχνική των γενετικών αλγορίθμων για την πραγματοποίηση του σχεδιασμού ενός συστήματος μεταφοράς-διανομής λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες [12]:

1. Λειτουργία του συστήματος σε ακτινική μορφή
2. Διατήρηση των ορίων τάσης σε κάθε ζυγό
3. Τα χαρακτηριστικά της ζήτησης
4. Η ικανότητα των γραμμών για μεταφορά ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη τα θερμικά όρια των γραμμών
5. Πιθανές θέσεις εγκατάστασης των υποσταθμών και των γραμμών και κόστη εγκατάστασής τους.
6. Η περίοδος ανάπτυξης χωρίζεται σε στάδια, για παράδειγμα σε χρονικά έτη. Ο σκοπός του προγραμματισμού είναι να έχουν πραγματοποιηθεί σε κάθε στάδιο ένα σύνολο επενδύσεων.
7. Η στρατηγική επέκτασης που θα προσδιοριστεί, εξαρτάται από την ανάπτυξη του φορτίου ζήτησης. Κάθε στάδιο της επέκτασης προσδιορίζεται με βάση το φορτίο αιχμής.

Οι γενικοί σκοποί που ακολουθούνται κατά την επέκταση του δικτύου διανομής με βάση την τεχνική που παρουσιάζεται είναι οι ακόλουθοι:

1. Ένα σύνολο μεταβλητών επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αντιπροσωπεύει μία λύση για την ανάπτυξη κάθε σταδίου. Οι μεταβλητές αυτές κωδικοποιούνται σε ένα χρωμόσωμα.
2. Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται σε μία οικογένεια λύσεων δημιουργώντας έτσι νέους πληθυσμούς.
3. Κάθε λύση που βρίσκεται σε κάθε νέο πληθυσμό εκτιμάται μέσω μιας συνάρτησης προσαρμογής η οποία εμπεριέχει τα κόστη επένδυσης, το κόστος απωλειών ισχύος, τις διακυμάνσεις της τάσης, την αξιοπιστία του συστήματος.
4. Στο τέλος της διαδικασίας μία οικογένεια καλά προσαρμοσμένων σχεδίων ανάπτυξης είναι διαθέσιμη.

Η συνάρτηση προσαρμογής πρέπει να εμπεριέχει τόσο τις επιθυμητές όσο και τις μη επιθυμητές ιδιότητες μιας λύσης, δίνοντας μεγαλύτερη βαρύτητα στις πρώτες σε σχέση με τις δεύτερες. Για παράδειγμα επιθυμητές ιδιότητες είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αξιοπιστία, ενώ οι μη επιθυμητές είναι η παραβίαση του θερμικού ορίου των γραμμών, η παραβίαση των ορίων των τάσεων και η μη ακτινική ανάπτυξη του δικτύου.

3. ΑΠΛΗΣΤΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗΣ – GRASP

Οι άπληστοι αλγόριθμοι αναζήτησης αποτελούν μία ευρετική μέθοδο η οποία έχει αποδειχθεί πολύ ισχυρή κατά την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων και βασίζεται στην τεχνική της διαδικασίας άπληστης τυχαίας προσαρμοστικής αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP).

Η GRASP αποτελεί μία επαναληπτική μέθοδο η οποία αποτελείται από δύο στάδια που σχετίζονται με κάθε επανάληψη. Το πρώτο στάδιο ονομάζεται *στάδιο κατασκευής*, όπου εφικτές λύσεις δημιουργούνται με την τεχνική της τυχαίας δειγματοληψίας, ενώ το δεύτερο στάδιο ονομάζεται *στάδιο τοπικής αναζήτησης*, το οποίο ξεκινώντας από τη λύση του σταδίου κατασκευής, αναζητεί τοπικά βέλτιστα σε συγκεκριμένη γειτονιά αναζήτησης λύσεων. Η καλύτερη από όλες τις λύσεις που έχουν βρεθεί επιλέγεται ως το τελικό αποτέλεσμα. Εφόσον κάθε στάδιο αναζήτησης βασίζεται αποκλειστικά στη λύση του σταδίου κατασκευής και όχι στις λύσεις των άλλων σταδίων, μπορεί να λειτουργήσει και σε περιβάλλοντα παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων αυξημένων δυνατοτήτων δίνοντας ταχύτερα αποτελέσματα [13].

Η βασική δομή της GRASP δίνεται ακολούθως σε μορφή ψευδοκώδικα:

Procedure GRASP

input of data;

repeat

 Construction greedy random solution;

 Local search;

 Update best solution;

until stopping rule is satisfied;

return with best solution;

end.

Κατά το στάδιο της κατασκευής, ένας επαναληπτικός αλγόριθμος δημιουργεί μία εφικτή λύση προσθέτοντας μία μεταβλητή σε κάθε επανάληψη, π.χ. θέτοντας την τιμή της ίση με 1. Προκειμένου να επιλεγεί αυτή η μεταβλητή, η GRASP ενεργοποιεί μία άπληστη συνάρτηση η οποία υπολογίζει το όφελος της προσθήκης κάθε νέας μεταβλητής. Στη συνέχεια κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, η επιλογή της επόμενης μεταβλητής που θα λάβει την τιμή 1 γίνεται τυχαία από μία υποψήφια λίστα η οποία απαρτίζεται από τις “περισσότερα υποσχόμενες” μεταβλητές που έχουν ταξινομηθεί από την άπληστη συνάρτηση. Η τεχνική της τυχαίας επιλογής επιτρέπει την απόκτηση διαφορετικών λύσεων σε κάθε επανάληψη. Το στάδιο της κατασκευής ολοκληρώνεται όταν όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος ικανοποιούνται, δηλαδή όταν αποκτάται μία εφικτή λύση. Η διαδικασία αυτή φαίνεται ακολούθως:

Procedure construction

solution = $\emptyset$;

repeat

```

    evaluate the greedy function;
    build the CL;
    s=element selected randomly from CL;
    solution= $\cup$  s;
until a feasible solution is obtained;
return with feasible solution.

```

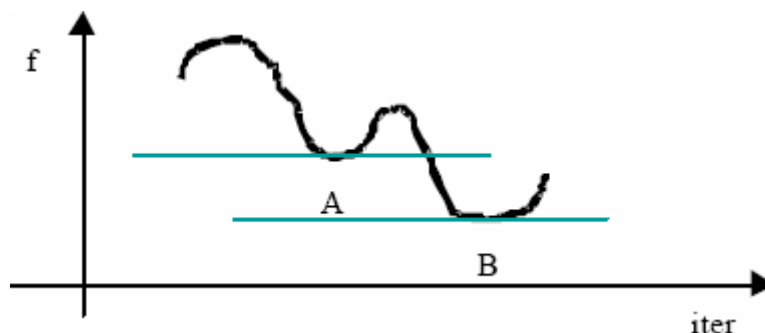
Οι λύσεις του σταδίου κατασκευής δεν είναι αναγκαστικά οι τοπικά βέλτιστες για τη δεδομένη γειτονιά, για αυτό το λόγο εισάγεται το στάδιο τοπικής αναζήτησης του οποίου ο ρόλος είναι η αντικατάσταση της εκάστοτε τρέχουσας λύσης με μία καλύτερη γειτονική λύση. Η διαδικασία σταματά όταν παύουν να υπάρχουν καλύτερες γειτονικές λύσεις. Η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι εκθετική, αλλά παρόλα αυτά η σωστή επιλογή δομών δεδομένων μπορεί να μειώσει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

Όσον αφορά τη μελέτη ανάπτυξης ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο GRASP, κατά τη διάρκεια του σταδίου κατασκευής επιλέγεται τυχαία ένα στοιχείο σε κάθε επανάληψη με τυχαία δειγματοληψία από την υποψήφια λίστα υποσταθμών, ζυγών και γραμμών που κατασκευάζεται από μία άπληστη προσαρμοστική συνάρτηση. Το πλαίσιο λειτουργίας για το δίκτυο μεταφοράς είναι το ελάχιστο μη εξυπηρετούμενο φορτίο, δηλαδή η ελάχιστη αποκοπή φορτίου που απαιτείται για την ελαχιστοποίηση όλων των περιορισμών λειτουργίας όπως τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, τα όρια τάσης των ζυγών, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής των γεννητριών κλπ. Έτσι το στάδιο κατασκευής της GRASP επιτυγχάνει μία λύση όταν παύουν να υπάρχουν λειτουργικοί περιορισμοί. Παρόλα αυτά, αυτή η λύση μπορεί να έχει άχρηστες προσθήκες, τις οποίες προκειμένου να εξαλείψουμε, ταξινομούμε τις προσθήκες ανάλογα με το κόστος και αφαιρούμε αυτές για τις οποίες δεν υπάρχουν λειτουργικοί περιορισμοί. Εάν το στάδιο κατασκευής δεν επιτύχει καμία λύση, η τρέχουσα επανάληψη της GRASP απορρίπτεται και δεν πραγματοποιείται το στάδιο τοπικής αναζήτησης για αυτή την επανάληψη [14].

Η GRASP κατά τη διάρκεια του σταδίου τοπικής αναζήτησης εκκινεί από την εφικτή λύση του σταδίου κατασκευής και προσπαθεί να φτάσει σε μια καλύτερη λύση μέσα σε μια συγκεκριμένη γειτονιά. Ο όρος γειτονιά αποτελεί ένα γράφο του οποίου το σύνολο κόμβων αποτελείται από όλες τις πιθανές τοπολογίες του δικτύου. Προκειμένου να γίνει αυτό, το στάδιο τοπικής αναζήτησης βασίζεται σε αλλαγές του δικτύου, δηλαδή, διαφοροποιώντας τις προσθήκες που επιλέχθηκαν κατά το στάδιο κατασκευής με άλλες. Επειδή ο αριθμός των κόμβων που πρέπει να αναλυθεί αυξάνεται γραμμικά με τον αριθμό των υποψηφίων λύσεων και για μεγάλα προβλήματα η διαδικασία καταμέτρησης είναι απαγορευτική, είναι απαραίτητο μέσα στο πρόγραμμα να προστεθούν αποκοπτικές τεχνικές προκειμένου να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Όταν η τοπική αναζήτηση εντοπίσει τη βέλτιστη λύση σε κάθε γειτονιά, τότε η κάθε επανάληψη τερματίζεται και με αυτό τον τρόπο λαμβάνουμε την καλύτερη ανάπτυξη του συνολικού δικτύου κατά τη συμπλήρωση όλων των επαναλήψεων.

4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗ ΑΝΟΠΤΗΣΗ – SIMULATING ANNEALING

Η τεχνική της προσομοιωμένης ανόπτης αναπτύχθηκε από τον Kirkpatrick, βασισμένη στον προγενέστερο αλγόριθμο metropolis του 1953. Είναι μία διαδικασία αναζήτησης μέσα στην οποία υπάρχει ενσωματωμένη η πιθανότητα της αποδοχής μιας χειρότερης λύσης από την τρέχουσα. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου βασίζεται στην εκκίνηση με μία αρχική λύση x_1 , συνεχίζει με την εκτίμηση της λύσης μέσω μιας συνάρτησης εκτίμησης $f(x_1)$ και κατασκευάζει μία νέα λύση με τη μέθοδο της δειγματοληψίας στη γειτονιά της αρχικής λύσης x_1 . Εάν αυτή η λύση βελτιώνει τη συνάρτηση f , τότε είναι αποδεκτή. Εάν η νέα λύση είναι χειρότερη από την αρχική, μπορεί να γίνει αποδεκτή ανάλογα με τη λεγόμενη πιθανότητα της αποδοχής χειρότερης λύσης. Αυτός ο μηχανισμός επιτρέπει στην επαναληπτική διαδικασία να αποφεύγει τα τοπικά βέλτιστα (σημείο A) όπως φαίνεται στο σχήμα 1 και να συνεχίζει προς το ολικό βέλτιστο (σημείο B).



Σχήμα 4.2: Γραφική απεικόνιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης με τοπικά ελάχιστα

Ο αλγόριθμος της προσομοιωμένης ανόπτης μπορεί να περιγραφεί με τα ακόλουθα βήματα [15]:

1. Αρχικοποίηση: Επέλεξε μία αρχική λύση x_1 από το σύνολο λύσεων και εκτίμησε τη λύση αυτή μέσω της συνάρτησης f .
2. Ανέθεσε τη x_1 στο x^* και την $f(x_1)$ στην $f(x^*)$, όπου το σύμβολο $*$ υποδηλώνει την καλύτερη λύση μέχρι αυτό το βήμα.
3. Βήμα $n=1, 2, \dots, n$. Δεδομένης της λύσης x_n της n -οστής επανάληψης υπολόγισε μία νέα λύση στη γειτονιά της x_n χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της δειγματοληψίας.
4. Έλεγχος: Εάν $f(x) \leq f(x_n)$ τότε ανέθεσε τη x στην x_{n+1} και εάν $f(x) > f(x^*)$ τότε ανέθεσε τη x στη x^* και την $f(x)$ στην $f(x^*)$. Διαφορετικά, επέλεξε εάν τυχαίο νούμερο $p \in [0, 1]$ και εκτίμησε την πιθανότητα της αποδοχής μιας χειρότερης λύσης κατά τη n -οστή επανάληψη σύμφωνα με τον τύπο:

$$p(n) = e^{-\frac{f(x_n) - f(x^*)}{K \text{Temperature}}}, \text{ όπου } K \text{ είναι η σταθερά του Boltzmann.}$$

Εάν $p \leq p(n)$ τότε ανέθεσε τη x στην x_{n+1} .

5. Τέλος έλεγξε εάν ικανοποιείται η συνθήκη τερματισμού, αλλιώς επέστρεψε στο βήμα 3.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η λύση ενός συνδυαστικού προβλήματος έχει μία καθαρή αναλογία με τη διαδικασία ψύξης ενός θερμοδυναμικού συστήματος, όπου η συνάρτηση f αντιστοιχεί στην ενέργεια του συστήματος και η θερμοκρασία στον έλεγχο της διαδικασίας ψύξης. Τα θερμοδυναμικά συστήματα πρέπει να ψύχονται αργά, οπότε αντιστοίχως να επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα λύσης. Επίσης, η παράμετρος της θερμοκρασίας μειώνεται σε βήματα τα οποία αντιστοιχούν στις επαναλήψεις της διαδικασίας αναζήτησης. Κατά την πρόοδο της διαδικασίας, είναι λιγότερο πιθανό να γίνουν αποδεκτές χειρότερες λύσεις σε αντίθεση με την αρχή της. Τέλος, η διαδικασία σταματάει όταν σε ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων δεν υπάρχουν αισθητές βελτιώσεις της λύσης.

Το πρόβλημα της μελέτης επέκτασης ενός δικτύου μεταφοράς θεμελιώνεται με βάση την ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους, δηλαδή του λειτουργικού κόστους και του κόστους επενδύσεων για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Οι επενδύσεις επιλέγονται ανάμεσα σε μία λίστα πιθανών εγκαταστάσεων (γραμμές μεταφοράς και μετασχηματιστές ισχύος) για έναν αριθμό χρονικών περιόδων. Για τις περιόδους αυτές θεωρείται γνωστή η εξέλιξη του φορτίου και υπάρχει η δυνατότητα είτε της προσθήκης νέων εγκαταστάσεων είτε της κατάργησης μερικών από τις ήδη υπάρχουσες.

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής της προσομοιωμένης ανόπτησης, η διαδικασία εκκινεί από μία αρχική τοπολογία του συστήματος και συνεχίζει χτίζοντας ένα σχέδιο επέκτασης ενσωματώνοντας ή αφαιρώντας εγκαταστάσεις σε κάθε χρονική περίοδο. Κάθε νέα τοπολογία εκτιμάται με βάση το συνολικό κόστος για όλο το χρονικό ορίζοντα της μελέτης και λαμβάνεται η απόφαση για την αποδοχή της ή μη [16].

Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε τελικά στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια παραλλαγή της μεθόδου αποσύνθεσης Benders που αναλύσαμε σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται όλες οι απλοποιήσεις και οι παραδοχές που κάναμε αλλά και οι μεταβλητές που εν τέλει χρησιμοποιήσαμε στο πρόγραμμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Το πρόγραμμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί αναλυτικά το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για την επέκταση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόγραμμα είναι μια παραλλαγή της μεθόδου αποσύνθεσης Benders που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, καθώς η εργασία αυτή θα ασχοληθεί καθαρά με την επέκταση του δικτύου μεταφοράς και όχι με το σχεδιασμό ανάπτυξης νέων μονάδων παραγωγής ή εγκατάστασης τεχνολογιών ελέγχου ρύπων. Η γλώσσα προγραμματισμού στην οποία αναπτύχθηκε ήταν η Matlab. Η τελευταία προσφέρει μεγάλη ευκολία στη δημιουργία πινάκων, ενώ και οι πράξεις μεταξύ πινάκων είναι αρκετά γρήγορες. Όπως θα δειχθεί παρακάτω, στο τελικό πρόγραμμα υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί πίνακες διαφόρων διαστάσεων.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφέρθηκε πως το μακροπρόθεσμο πρόβλημα σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζεται σε δύο μέρη: 1) στον καθορισμό των βέλτιστων αποφάσεων επένδυσης πάνω στο σύστημα και 2) στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και του κόστους μη εξυπηρετούμενης ισχύος σύμφωνα με αυτές τις αποφάσεις επένδυσης. Έτσι το πρόβλημα της επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ισοδυναμεί ουσιαστικά με την επίλυση δύο ξεχωριστών αλλά αλληλένδετων προβλημάτων: του κύριου προβλήματος επένδυσης, το οποίο ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών (ακέραιες ή συνεχείς) μπορεί εύκολα να λυθεί με τη βοήθεια τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού και του υποπροβλήματος λειτουργίας, που επιλύεται από προγράμματα βέλτιστης ροής ισχύος και προσφέρει νέες μεταβλητές εισόδου στο κύριο πρόβλημα. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ικανοποίηση κάποιου περιορισμού οπότε και καταλήγουμε στην τελική τοπολογία του δικτύου. Ο αλγόριθμος της διαδικασίας αποσύνθεσης Benders παρουσιάστηκε διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, από τις σχέσεις (4.18) ως (4.22) και στο σχήμα 4.1.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, από τις εξισώσεις (4.1) ως (4.17). Παρόλα αυτά, στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρατεθεί η μαθηματική διατύπωση του υποπροβλήματος λειτουργίας και του κύριου προβλήματος επένδυσης που χρησιμοποιήθηκε για το πρόγραμμά, το κάθε ένα ξεχωριστά. Η επαναδιατύπωση αυτή θεωρείται απαραίτητη καθώς στο τελικό πρόγραμμα δε συμπεριλήφθηκαν οι εκπομπές ρύπων, οι μεταβλητές επένδυσης για τους σταθμούς παραγωγής και ο χρονικός ορίζοντας της επένδυσης, ενώ για την επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε τελικά η dc ροή ισχύος. Συνεπώς, θα ακολουθήσει η παρουσίαση και η διαδικασία επίλυσης των δύο υποπροβλημάτων με τροποποιημένα σύμβολα, έτσι ώστε να ταιριάζουν με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα. Ο συνολικός κώδικας που αναπτύχθηκε στην γλώσσα MATLAB επισυνάπτεται στο παράρτημα (Γ).

2. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

i Μοντέλα αναπαράστασης δικτύων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, στην παρούσα διπλωματική εργασία η επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας δε θα γίνει με χρήση της AC ροής φορτίου. Εναλλακτικά επομένως, ένα δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί είτε με το μοντέλο μεταφοράς (transportation model), όπου εφαρμόζεται μόνο ο πρώτος νόμος του Kirchhoff, είτε με το μοντέλο γραμμικοποιημένης ροής ισχύος (DC power flow). Τα δύο αυτά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη την επίδραση της άεργου ισχύος και την ύπαρξη απωλειών. Η DC ροή φορτίου είναι η δημοφιλέστερη χρησιμοποιούμενη μέθοδος και είναι γενικά αποδεκτή σε μελέτες μακροπρόθεσμων σχεδίων ανάπτυξης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [14,17,18,20] ενώ παρέχει τη δυνατότητα, με κάποιες προσθήκες, να συνυπολογίζονται και οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς [19].

A. Το μοντέλο μεταφοράς

Στο μοντέλο μεταφοράς η ροή της ενεργούς ισχύος στο δίκτυο ικανοποιεί μόνο τον πρώτο νόμο του Kirchhoff. Δηλαδή, το αλγεβρικό άθροισμα της ροής ισχύος που εισέρχεται ή εξέρχεται από κάθε ζυγό ισούται με τη διαφορά του φορτίου από την παραγωγή στο συγκεκριμένο ζυγό. Το ισοζύγιο της ενεργούς ισχύος για κάθε ζυγό k , που αντιστοιχεί στη σχέση (4.3), φαίνεται στη εξίσωση που ακολουθεί [17]:

$$\sum_{l \in \Omega_k} f_{kl} + g_k + r_k = d_k \quad k=1,2,\dots,N \quad (5.1)$$

όπου f_{kl} :η ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των ζυγών k και l ,

g_k :η παραγωγή στο ζυγό k ,

d_k :η ζήτηση στο ζυγό k ,

r_k :η μη εξυπηρετούμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό k ,

Ω_k :το σύνολο των ζυγών που συνδέονται κατευθείαν με το ζυγό k ,

N :ο αριθμός των ζυγών στο δίκτυο.

Οι περιορισμοί λειτουργίας που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (4.5), (4.13) και (4.17) είναι:

$$|f_{kl}| \leq \bar{f}_{kl} \quad k=1,2,\dots,N, \forall l \in \Omega_k$$

$$0 \leq g_k \leq \bar{g}_k \quad k=1,2,\dots,N$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad k=1,2,\dots,N$$

όπου $\bar{f}_{kl}$: η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος της γραμμής k-l, που καθορίζεται από τα θερμικά όρια της γραμμής,

$\bar{g}_k$: η μέγιστη ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο ζυγό k.

B. Η DC ροή φορτίου

Στο μοντέλο αυτό, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, η ροή της ενεργούς ισχύος ικανοποιεί και τους δύο νόμους του Kirchoff [6,17]. Όμως, δεδομένου ότι η αντίσταση των γραμμών μεταφοράς είναι μάλλον μικρή συγκρινόμενη με την αντίδρασή τους, οι αντιστάσεις μπορούν να αμεληθούν χάριν απλοποίησης και η ροή ισχύος πάνω σε μια γραμμή με αντίδραση X_{kl} που συνδέει δύο ζυγούς k-l θα είναι:

$$f_{kl} = \frac{V_k V_l}{X_{kl}} \sin \Theta_{kl} \quad (5.2)$$

όπου V_k : η τάση στο ζυγό k και

Θ_{kl} : η διαφορά φάσης (σε rad) των τάσεων στους ζυγούς k και l.

Για μικρές γωνίες ισχύει: $\sin \Theta_{kl} \cong \Theta_{kl}$ οπότε η σχέση (5.2) γίνεται:

$$f_{kl} = \frac{V_k V_l}{X_{kl}} \Theta_{kl}$$

$$\Theta_{kl} = \Theta_k - \Theta_l \quad (5.3)$$

Το μέτρο της τάσης στους ζυγούς του δικτύου μεταφοράς είναι πάντα πολύ κοντά στο 1αμ. Άρα τελικά θα έχουμε:

$$f_{kl} = \frac{\Theta_{kl}}{X_{kl}} = (\Theta_k - \Theta_l) Y_{kl} \quad (5.4)$$

όπου Y_{kl} : η αγωγιμότητα της γραμμής k-l.

Επομένως σε κάθε ζυγό k του δικτύου θα ισχύει:

$$\sum_{l \in \Omega_k} b_{kl} \Theta_{kl} + g_k + r_k = d_k \quad k, l = 1, 2, \dots, N \quad (5.5)$$

όπου $b_{kl} = Y_{kl} = \frac{1}{X_{kl}}$ εάν $k \neq l$

$$b_{kk} = \sum_{l \in \Omega_k} (-Y_{kl})$$

Οι περιορισμοί λειτουργίας θα είναι:

$$|f_{kl}| \leq \bar{f}_{kl} \quad k=1,2,\dots,N, \forall l \in \Omega_k \quad (5.6)$$

$$0 \leq g_k \leq \bar{g}_k \quad k=1,2,\dots,N \quad (5.7)$$

$$0 \leq r_k \leq d_k \quad k=1,2,\dots,N \quad (5.8)$$

Από τη σχέση (5.4) ο περιορισμός της ροής ισχύος (5.6) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$|f_{kl}| \leq \bar{f}_{kl} \Rightarrow |\Theta_k - \Theta_l| \leq \frac{\bar{f}_{kl}}{Y_{kl}} \Rightarrow$$

$$|\Theta_k - \Theta_l| \leq \bar{\psi}_{kl} \quad (5.9)$$

όπου $\bar{\psi}_{kl}$:το όριο διαφοράς φάσης μεταξύ των κλάδων k-l.

Σε μορφή πινάκων οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται:

$$B\Theta + g + r = d$$

$$0 \leq r \leq d$$

$$0 \leq g \leq \bar{g} \quad (5.10)$$

$$|S\Theta| \leq \bar{\psi}$$

όπου S :η μήτρα της τοπολογίας του δικτύου (υποδεικνύει ποιοι ζυγοί συνδέονται μεταξύ τους).

Αν q το σύνολο των ζυγών του δικτύου τότε οι πίνακες B και S είναι πίνακες διαστάσεων qxq , ενώ οι πίνακες Θ , g , d , r , $\bar{g}$ και $\bar{\psi}$ είναι $qx1$.

ii. Επίλυση υποπροβλήματος λειτουργίας

Σκοπός του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους διακοπής παροχής ισχύος στον καταναλωτή και του κόστους παραγωγής, σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος λειτουργίας, που παρουσιάζεται στην εξίσωση (4.1). Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία δε λαμβάνει υπόψη το κόστος παραγωγής εφόσον απώτερος στόχος είναι η επέκταση του δικτύου μεταφοράς μέσα σε μια απελευθερωμένη αγορά ενέργειας στην οποία πρέπει η παραγωγή και η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας να είναι αμιγώς διαχωρισμένες. Συνεπώς, ως υποπρόβλημα λειτουργίας στο πρόγραμμα θεωρήθηκε η ελαχιστοποίηση της συνολικής μη εξυπηρετούμενης ισχύος r στο δίκτυο με μεταβλητές τις διαφορές φάσεων Θ μεταξύ των ζυγών του δικτύου και την ισχύ r . Η μη εξυπηρετούμενη ισχύς καθώς και οι διαφορές

φάσεων μεταξύ των ζυγών μπορούν να βρεθούν από την επίλυση του ακόλουθου γραμμικού προβλήματος [17]:

$$\begin{aligned} \text{Min } w &= \sum_{k=1}^N r_k \\ \text{υ.π. } B\Theta + r &= d - g \\ 0 &\leq r \leq d \\ |S\Theta| &\leq \bar{\psi} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Σε αντιστοιχία με τον τύπο (4.22) του κεφαλαίου 4, το διάνυσμα των μεταβλητών λειτουργίας x αποτελείται από τις μεταβλητές-διανύσματα Θ και r , ενώ στο διάνυσμα των δεδομένων τιμών για τις μεταβλητές επένδυσης στην k -οστή επανάληψη y^k αντιστοιχεί το διάνυσμα $\bar{\psi}$ και κατά επέκταση το διάνυσμα $\bar{f}$.

Με τον παραπάνω τρόπο, έγινε δυνατή η μετατροπή ενός μη γραμμικού και σχετικά πολύπλοκου προβλήματος όπως είναι η εύρεση της ροής ισχύος σε ένα δίκτυο, σε γραμμικό, το οποίο μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί με τη βοήθεια προγραμμάτων επίλυσης γραμμικού προγραμματισμού όπως, για παράδειγμα, η μέθοδος δύο φάσεων της *simplex* που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Από τη μελέτη του αλγορίθμου της *simplex* είναι φανερό ότι οι βέλτιστες λύσεις του προβλήματος βρίσκονται πάντα σε κάποιο από τα ακρότατα του χώρου των εφικτών λύσεων. Έτσι η *simplex*, όπως φαίνεται από τον τρίτο περιορισμό, προσπαθεί να εξαντλήσει τα περιθώρια μεταφοράς ισχύος μεταξύ των ζυγών. Η ροή της ισχύος που υπολογίζεται τελικά δεν είναι η βέλτιστη, αφού δε συμπεριλαμβάνει το κόστος παραγωγής των εκάστοτε σταθμών παραγωγής καθώς και τις απώλειες ισχύος πάνω στις γραμμές μεταφοράς. Στην υπολογιζόμενη με αυτήν τη μέθοδο όμως ροή, ελαχιστοποιείται ή μηδενίζεται η μη εξυπηρετούμενη ισχύς. Οι γραμμές των οποίων η ικανότητα μεταφοράς σε ισχύ κατά την τελική ροή επιλέγεται να εξαντληθεί, είναι αυτές που τελικά το δίκτυο έχει ανάγκη να επεκτείνει ή να εγκαταστήσει.

Πιο αναλυτικά, το πρόγραμμα του υποπροβλήματος λειτουργίας ξεκινάει με τη δημιουργία πινάκων εισόδου, όπως είναι ο πίνακας S της τοπολογίας του δικτύου και οι πίνακες με τις αντιδράσεις, τα μήκη και την ικανότητα μεταφοράς ισχύος των ήδη υπαρχουσών γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο. Στους πίνακες με τις αντιδράσεις και τα μήκη των γραμμών εμπεριέχονται και οι τιμές εκείνες των γραμμών που δεν έχουν κατασκευαστεί ακόμα στο δίκτυο, αλλά είναι δυνατόν να εγκατασταθούν σε αυτό αν θεωρηθεί απαραίτητο κατά την επίλυση του προβλήματος. Στη συνέχεια, εισάγονται τα διανύσματα της παραγωγής και της ζήτησης ισχύος στους ζυγούς, τα οποία αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής και το φορτίο αντίστοιχα για κάποια στιγμή του έτους. Ακολουθεί η δημιουργία ενός πίνακα που περιλαμβάνει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος των υποψήφιων προς εγκατάσταση νέων γραμμών μεταφοράς. Με τη χρήση κάποιων βοηθητικών πινάκων για την αποφυγή ύπαρξης μηδενικών μεταβλητών αλλά και για τη σωστή εισαγωγή των δεδομένων στον αλγόριθμο της *simplex*, φτιάχνουμε τους πίνακες a , b και c που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος. Ο πίνακας a της *simplex* περιέχει τα αριστερά μέλη των περιορισμών ισότητας και ανισότητας του προβλήματος (5.11), ο πίνακας b τα δεξιά μέλη αυτών ενώ με τον πίνακα c καταstrώνεται η αντικειμενική συνάρτηση. Με αυτούς τους τρεις

πίνακες καθώς και δηλώνοντας τον αριθμό των περιορισμών ισότητας και ανισότητας του προβλήματος μπορούμε να εκτελέσουμε τη μέθοδο simplex.

Είναι φανερό ότι το κρίσιμο σημείο του αλγορίθμου είναι η εύρεση των Benders cuts. Από το κεφάλαιο 4 και από τα δεδομένα του δικού μας προγράμματος που παρατέθηκαν στις παραπάνω παραγράφους, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η συνάρτηση $D(y)$ των Benders cuts αποτελείται από ένα σύνολο πολλαπλασιαστών Lagrange που μετράνε τις αλλαγές στο κόστος διακοπής καταναλωτή που προκαλούνται από οριακές αλλαγές στην ικανότητα μεταφοράς ισχύος των γραμμών. Αυτοί οι πολλαπλασιαστές αντιστοιχούν στις δυαδικές τιμές των μεταβλητών της βέλτιστης λύσης του προβλήματος (5.11). Δηλαδή αν μία γραμμή $k-l$ είναι κορεσμένη (ο περιορισμός μεταφοράς ισχύος που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη γραμμή είναι περιοριστικός), τότε η δυαδική τιμή που αντιστοιχεί στη μεταβλητή Θ_{kl} (ή Θ_{lk}) θα είναι ίση με 1 και θα χρησιμοποιηθεί σαν μεταβλητή εισόδου στο πρόβλημα επένδυσης. Επίσης αν σε κάποιους από τους ζυγούς σύνδεσης μιας υποψήφιας προς εγκατάσταση γραμμής $k-l$ υπάρχει περίσσεια ισχύος και το πρόγραμμα θέσει την αντίστοιχη μεταβλητή της διαφοράς φάσης Θ_{kl} (ή Θ_{lk}) στη βάση της τελικής λύσης της simplex, τότε πάλι η δυαδική τιμή που αντιστοιχεί στη μεταβλητή αυτή θα είναι ίση με 1. Το σύνολο των δυαδικών μεταβλητών που αντιστοιχούν στο διάνυσμα των μεταβλητών Θ της βέλτιστης λύσης του προβλήματος συγκροτούν το διάνυσμα π_Θ .

Από τον τελικό πίνακα της simplex αναζητούμε τις βασικές μεταβλητές της τελικής λύσης και τις τελικές τιμές αυτών. Μόνο οι βασικές μεταβλητές έχουν μη μηδενικές τιμές στην τελική λύση της simplex (βλέπε κεφάλαιο 3.4). Έτσι μέσω της αναζήτησης των βασικών μεταβλητών στα διανύσματα των μεταβλητών r και Θ μπορεί να υπολογιστεί η μη εξυπηρετούμενη ισχύ σε κάθε ζυγό αλλά και η ροή ισχύος πάνω στις γραμμές. Τέλος, υπολογίζεται το άνω όριο της βέλτιστης λύσης του προβλήματος για την επανάληψη που εκτελείται. Το άνω αυτό όριο αντιστοιχεί στο τελικό λειτουργικό κόστος του δικτύου συν το κόστος επένδυσης που προκύπτει από το προηγούμενο πρόβλημα επένδυσης.

Όπως αναφέρθηκε, ως λειτουργικό κόστος λαμβάνεται μόνο το κόστος μη εξυπηρετούμενης ισχύος καταναλωτών. Επομένως πολλαπλασιάζοντας τις μη μηδενικές μεταβλητές του διανύσματος r με το κόστος μη παρεχόμενης ισχύος ανά μονάδα ισχύος και προσθέτοντάς τες, βρίσκουμε το τελικό κόστος λειτουργίας. Μπορούμε επίσης να πολλαπλασιάσουμε τη μη εξυπηρετούμενη ισχύ κάποιων ζυγών με διαφορετικό κόστος μη παρεχόμενης ισχύος ανά μονάδα ισχύος, θεωρώντας ότι το μη εξυπηρετούμενο φορτίο σε αυτούς τους ζυγούς είναι διαφορετικής φύσεως (αγροτικό, βιομηχανικό, οικιακό κλπ.). Το άνω αυτό όριο του κόστους το συγκρίνουμε με το κάτω όριο που βρίσκουμε από τη λύση του υποπροβλήματος επένδυσης. Αν η διαφορά τους προκύψει μικρότερη από ένα όριο, το “όριο ανοχής”, τότε η διαδικασία επίλυσης του συνολικού προβλήματος τερματίζεται και η βέλτιστη λύση είναι αυτή που έχουμε ήδη βρει από την προηγούμενη λύση του υποπροβλήματος επένδυσης. Αν είναι μεγαλύτερη από αυτό το όριο, τότε ακολουθεί η επίλυση του νέου υποπροβλήματος επένδυσης.

3. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Η αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος επένδυσης, σύμφωνα και με την εξίσωση (4.1), είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης σε σταθμούς παραγωγής, τεχνολογίες ελέγχου ρύπων, γραμμές μεταφοράς και προγράμματα διαχείρισης φορτίου. Στην

παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με το κόστος των γραμμών. Το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που προκύπτει είναι το εξής [17]:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & c_f \cdot x_f \\ \text{υ.π.} \quad & \pi_{\Theta}^k \cdot \bar{f} \cdot x_f = w^k \\ & x_f \leq N_f \end{aligned} \quad (5.12)$$

όπου c_f :το διάνυσμα του κόστους επένδυσης για τις γραμμές μεταφοράς,

x_f :το διάνυσμα των μεταβλητών που αναπαριστά τον αριθμό των γραμμών μεταφοράς που εγκαθίστανται σε κάθε κλάδο,

$\bar{f}$:το διάνυσμα που μας δίνει τις ικανότητες μεταφοράς ισχύος των υποψήφιων νέων γραμμών μεταφοράς,

w^k :η συνολικά μη εξυπηρετούμενη ισχύς κατά την k-οστή επανάληψη,

N_f :το διάνυσμα που μας δίνει το μέγιστο αριθμό γραμμών μεταφοράς που μπορούν να κατασκευαστούν ανά κλάδο.

Οι μεταβλητές επένδυσης x_f μπορούν να λάβουν είτε συνεχείς είτε ακέραιες τιμές. Στην πρώτη περίπτωση το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα απλό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ενώ στη δεύτερη περίπτωση προκύπτει ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού. Είναι δεδομένο ότι το πρόβλημα εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς είναι από μόνο του ένα ακέραιο πρόβλημα. Αν θεωρήσουμε ότι οι μεταβλητές επένδυσης λαμβάνουν συνεχείς τιμές, τότε στην τελική βέλτιστη λύση του προβλήματος θα πρέπει να στρογγυλοποιηθούν όλες οι τελικές τιμές των μεταβλητών προς τα πάνω. Έτσι το τελικό κόστος της επένδυσης αυξάνεται ραγδαία σε σχέση με το κόστος που υπολόγισε η simplex καθώς πολλές από τις νέες εγκατεστημένες γραμμές ουσιαστικά δε χρειάζονται.

Όπως παρουσιάστηκε στην εξίσωση (4.21) του προηγούμενου κεφαλαίου και συνάγεται από τη διατύπωση του προβλήματος (5.12), το διάνυσμα π_{Θ}^k , που αντιστοιχεί στα Bender cuts που προκύπτουν από το υποπρόβλημα λειτουργίας, βοηθάει στο να επιλεγούν εκείνες οι γραμμές που, σύμφωνα με τη νέα ικανότητα μεταφοράς ισχύος τους, θα μηδενίζουν τη μη εξυπηρετούμενη ισχύ στους ζυγούς w^k η οποία προέκυψε από την k-οστή επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας. Επειδή είναι πολύ δύσκολο οι λύσεις που προκύπτουν από τη επίλυση της simplex να είναι ακέραιες από μόνες τους, μετατρέπουμε το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού σε πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

- Αν κατά την k-οστή εκτέλεση του προβλήματος επένδυσης προκύψει τελικά μία μόνο λύση και αυτή είναι μη ακέραια, τότε τη στρογγυλοποιούμε προς τα πάνω και βρίσκουμε το νέο κόστος εγκατάστασής της.
- Αν προκύψουν πάνω από μία λύσεις, τότε βρίσκουμε, αν υπάρχει, τη μεγαλύτερη ακέραια λύση και επιλέγουμε αυτήν σα μοναδική λύση του υποπροβλήματος

επένδυσης. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το νέο κόστος εγκατάστασής της. Η επιλογή αυτή γίνεται επειδή το δίκτυο κατά τη συγκεκριμένη επανάληψη έχει πιο πολύ ανάγκη τη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς.

- Αν δεν υπάρχει καμία ακέραια λύση στη τελικές τιμές των μεταβλητών, τότε επιλέγουμε τη μεγαλύτερη μη ακέραια λύση και τη στρογγυλοποιούμε προς τον πλησιέστερο προς τα πάνω ακέραιο.

Έχοντας βρει τις νέες γραμμές μεταφοράς που πρόκειται να εισαχθούν στο δίκτυό μας προσθέτουμε στη μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου τις νέες αγωγιμότητες των γραμμών αυτών. Επίσης προσθέτουμε στις παλιές ικανότητες μεταφοράς ισχύος των γραμμών τις καινούριες που προκύπτουν από τις νέες γραμμές και αφαιρούμε από το διάνυσμα N_f τις γραμμές που εγκαταστήσαμε στην παρούσα λύση. Υπολογίζοντας το κόστος εγκατάστασης των νέων γραμμών, το οποίο αποτελεί το κάτω όριο του κόστους για αυτήν την επανάληψη, προχωράμε στην επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας.

Η δομή του προγράμματος που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι αυτή που παρουσιάστηκε κατά την ανάλυση αυτού του κεφαλαίου. Στο Παράρτημα (Γ) παρατίθεται ο συνολικός κώδικας που αναπτύχθηκε στο MATLAB 6.5 με τα απαραίτητα σχόλια για τους πίνακες και τις υπορουτίνες που χρησιμοποιήθηκαν για καλύτερη κατανόηση της υλοποίησης. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε αναλυτικά τα σενάρια που προσομοιώθηκαν για την εξακρίβωση της ορθότητας της μεθόδου αλλά και τα αποτελέσματα του προγράμματος για διάφορα σενάρια αύξησης της παραγωγής σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Τα σενάρια κατά την εκτέλεση του προγράμματος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

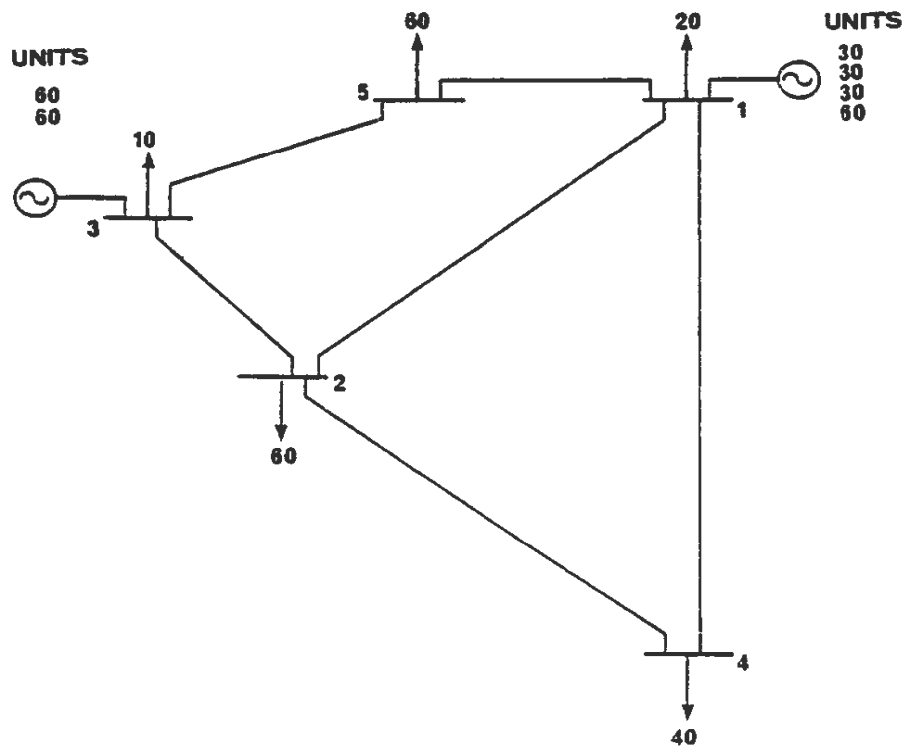
Σκοπός της υλοποίησης του συγκεκριμένου προγράμματος επέκτασης δικτύου μεταφοράς με τη χρήση της μεθόδου Benders ήταν αφενός η επαλήθευση της ορθότητας της μεθόδου και αφετέρου η εξακρίβωση της δυνατότητα χρησιμοποίησής του σε μεγάλα και ρεαλιστικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο αυξάνονται οι ζυγοί και οι υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς του δικτύου τόσο αυξάνεται το μέγεθος των πινάκων εισόδου αλλά και φυσικά η πολυπλοκότητα του προγράμματος. Ο χρόνος επίλυσης του συνολικού προβλήματος μεγαλώνει όσο αυξάνεται το δίκτυο, με το χρόνο επίλυσης των υποπροβλημάτων λειτουργίας να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού χρόνου εκτέλεσης του προγράμματος.

Για να εξακριβωθεί η ορθότητα του προγράμματος και της μεθόδου γενικά, επιλέχθηκε να εφαρμοστεί αρχικά το πρόγραμμα στο ευρέως διαδεδομένο για μελέτες ανάπτυξης δικτύων μεταφοράς, μοντέλο των 6 ζυγών του Garver. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά εύχρηστο και μπορεί να μας καταδείξει τις δυνατότητες αλλά και τα ελαττώματα του προγράμματός μας. Στη συνέχεια, θέλοντας να δοκιμαστεί το πρόγραμμα σε μεγαλύτερο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE με κάποιες τροποποιήσεις ώστε αυτό να έρθει όσο το δυνατόν πιο κοντά στα δεδομένα των γραμμών του Ελληνικού συστήματος. Το δίκτυο των 14 ζυγών προτιμήθηκε από κάποιο μεγαλύτερο δίκτυο για να μην αυξηθεί πολύ η πολυπλοκότητα και ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Η παραγωγή ισχύος σε κάθε ζυγό αντιπροσωπεύει την πραγματική μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος των γεννητριών που βρίσκονται εγκατεστημένες εκεί, ενώ οι τιμές του φορτίου προέρχονται από την πρόβλεψη της αιχμής κάθε έτους. Η θεώρηση της αιχμής του φορτίου στις μελέτες ανάπτυξης και επέκτασης δικτύου μεταφοράς είναι η πρακτική που συναντάται συχνότερα στις μέρες μας σε δημοσιεύσεις, στη βιβλιογραφία αλλά και σε πραγματικές μελέτες συστημάτων [4]. Τέλος η ενασχόληση με την αξιοπιστία των δικτύων δε θα είναι λεπτομερής καθώς κάτι τέτοιο θα ξέφευγε από τις προθέσεις αυτής της διπλωματικής.

2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ GARVER

Το μοντέλο του Garver αποτελεί ένα πειραματικό σύστημα έξι ζυγών που χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία για εφαρμογή τεχνικών ανάπτυξης δικτύων. Στην αρχική κατάστασή του, το σύστημα για το μοντέλο αυτό αποτελείται από πέντε ζυγούς, έξι κλάδους, παραγωγή στους ζυγούς 1 και 3 καθώς και φορτία στους πέντε αρχικούς ζυγούς του προβλήματος. Για την ανάπτυξη του συστήματος θεωρείται προσθήκη νέου ζυγού παραγωγής, ο οποίος καλείται να συνδεθεί στο σύστημα κατά τον οικονομικότερο εφικτό

τρόπο. Η αρχική του μορφή του μοντέλου πριν από τις επεκτάσεις που πρόκειται να πραγματοποιηθούν σε αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί [14,18,20,21]:



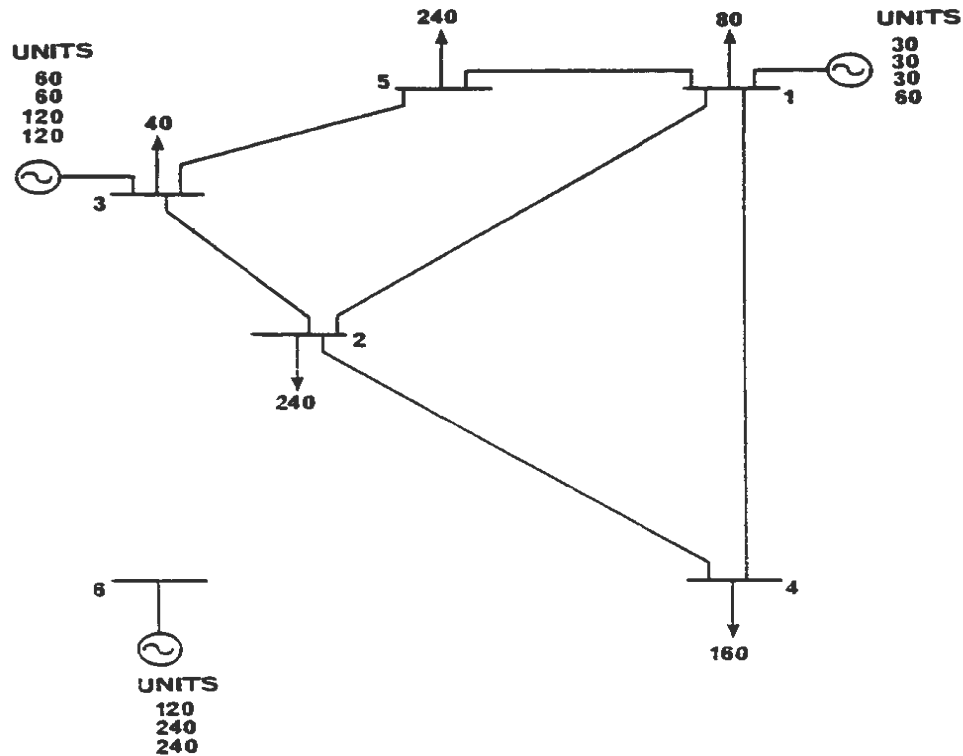
Σχήμα 6.1: Αρχική μορφή του μοντέλου των 6 ζυγών

Το σύστημα αποτελείται από 3 ζυγούς φορτίου: το ζυγό 2 με μέγιστο φορτίο 60MW, το ζυγό 4 με φορτίο 40 MW και το ζυγό 5 με μέγιστη ζήτηση 60 MW. Υπάρχουν επίσης 2 ζυγοί παραγωγής: ο ζυγός 1 με δυνατότητα παραγωγής 150 MW ενεργούς ισχύος και τοπικό φορτίο 20 MW και ο ζυγός 3 με ικανότητα παραγωγής 120 MW και τοπικό φορτίο 10 MW. Οι τριφασικές γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος που υπάρχουν ήδη στο δίκτυο και συνδέουν τους ζυγούς μεταξύ τους είναι οι: 1-2, 1-4, 1-5, 2-3, 2-4 και 3-5.

Τα δεδομένα της μελλοντικής μορφής του μοντέλου του Garver, του οποίου η επέκταση των γραμμών μεταφοράς θα υπολογιστεί από τον αλγόριθμο της διπλωματικής αυτής εργασίας, φαίνονται στο σχήμα 6.2. Σε αυτό, για ένα διάστημα πρόβλεψης δεκαπέντε ετών, έχει θεωρηθεί αύξηση του υπάρχοντος φορτίου σε κάθε ζυγό κατά 4 φορές, ενώ δύο νέες μονάδες παραγωγής 120MW η καθεμία έχουν προστεθεί στο ζυγό 3. Τέλος στο σύστημα έχει προστεθεί και ένας νέος ζυγός παραγωγής, ο ζυγός 6, με συνολική ικανότητα παραγωγής 600MW.

Στον πίνακα 6.1 παρατίθενται τα δεδομένα των κλάδων του δικτύου μας [18,19]. Σε αυτά συγκαταλέγονται το μήκος των υπάρχουσων και των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς, η ανά μονάδα τιμή της αντίστασης και της αντίδρασής τους (σε βάση ισχύος $S_B=100\text{MW}$ και βάση τάσης $V_B=100\text{kV}$), το κόστος εγκατάστασής τους και η μέγιστη ικανότητά τους στη μεταφορά ενεργού ισχύος. Είναι φανερό ότι τα δεδομένα αυτά είναι πειραματικά και δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά δίκτυα, αλλά μας βοηθούν στην εύκολη επεξεργασία τους, καθώς το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για την επαλήθευση της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Επομένως για τις ανάγκες αυτής της προσομοίωσης σύμφωνα με τα αρχικά

δεδομένα του πειραματικού συστήματος, έχει θεωρηθεί αντίδραση γραμμών $X=1\Omega/\text{km}$ και κόστος εγκατάστασης $C=1\text{k€}/\text{km}$. Παρόλα αυτά στη συνέχεια της ανάλυσης, θα εφαρμοσθεί το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε πάνω στο μοντέλο του Garver με ρεαλιστικά στοιχεία για τις γραμμές μεταφοράς, προκειμένου να παρουσιαστούν και να συγκριθούν τα τελικά αποτελέσματα.



Σχήμα 6.2: Μελλοντικές συνθήκες του μοντέλου των 6 ζυγών

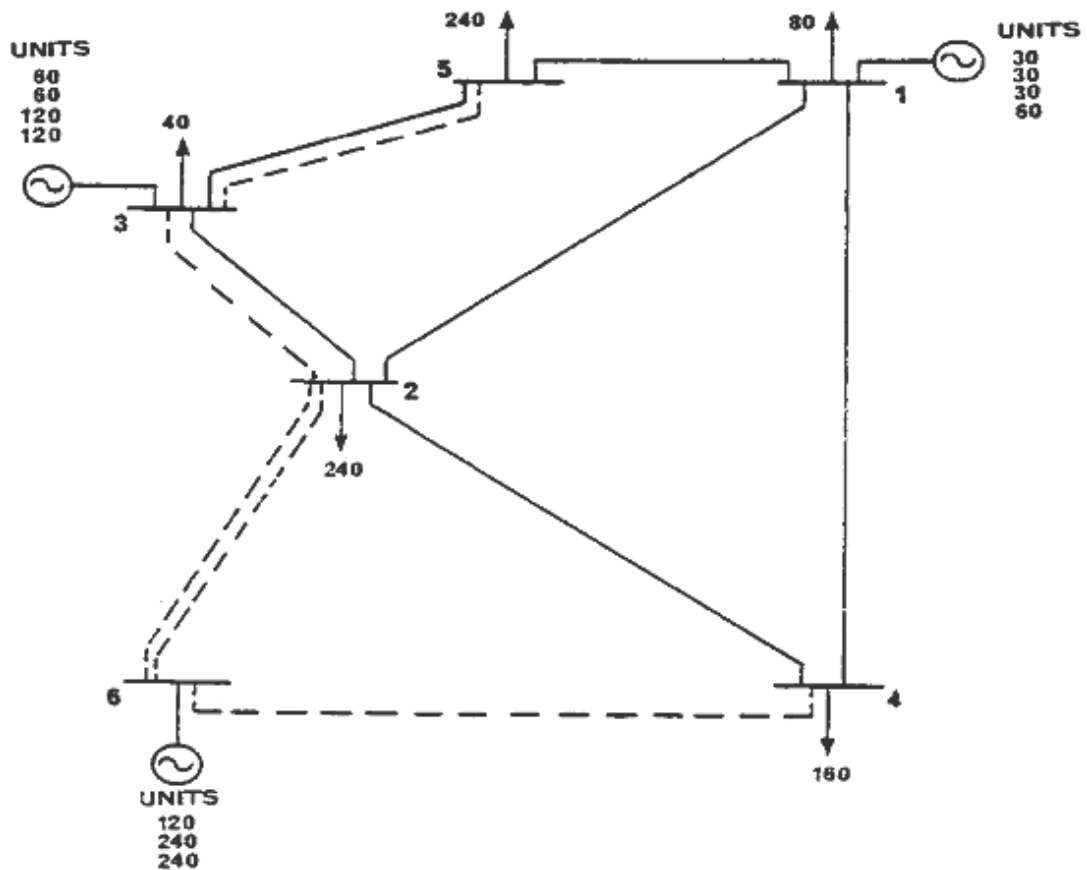
Κλάδος	Μήκος (km)	R (p.u.)	X (p.u.)	Κόστος επένδυσης (k€)	Ικανότητα μεταφοράς ισχύος (MW)
1-2	40	0,10	0,4	40	100
1-3	38	0,09	0,38	38	100
1-4	60	0,15	0,6	60	80
1-5	20	0,05	0,2	20	100
1-6	68	0,17	0,68	68	70
2-3	20	0,05	0,2	20	100
2-4	40	0,10	0,4	40	100
2-5	31	0,08	0,31	31	100
2-6	30	0,08	0,3	30	100
3-4	59	0,15	0,59	59	82
3-5	20	0,05	0,2	20	100
3-6	48	0,12	0,48	48	100
4-5	63	0,16	0,63	63	75
4-6	30	0,08	0,3	30	100
5-6	61	0,15	0,61	61	78

Πίνακας 6.1: Δεδομένα των γραμμών μεταφοράς για το μοντέλο του Garver

Με βάση το σχήμα 6.2 και τον πίνακα 6.1, υλοποιούνται οι πίνακες εισόδου του αλγορίθμου και στη συνέχεια εκτελείται το πρόγραμμα το οποίο παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 5. Τα τελικά αποτελέσματα της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς φαίνονται στους πίνακες 6.2 και στο σχήμα 6.3 και είναι αρκετά όμοια με τα αποτελέσματα άλλων τεχνικών επέκτασης δικτύου μεταφοράς [18,19,20]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για λόγους αξιοπιστίας του συστήματος, στο πρόγραμμα επιτράπηκε η ύπαρξη μέχρι δύο το πολύ παράλληλων συνδέσεων μεταξύ των ζυγών. Αυτή θεωρήθηκε ότι είναι και η πιο συνηθισμένη πολιτική για μικρά δίκτυα. Αν δύο ζυγοί συνδεθούν με παραπάνω από δύο γραμμές και συμβεί ταυτόχρονη βλάβη σε αυτές, και αν δεν υπάρχουν επαρκείς άλλες συνδέσεις που να μπορούν να εξυπηρετήσουν το υπόλοιπο δίκτυο (με κάποια φυσικά ύπαρξη μη εξυπηρετούμενης ισχύος), το σύστημα είναι πολύ πιθανόν να καταρρεύσει. Επομένως, με τη διατήρηση του αριθμού των πιθανών επεκτάσεων των γραμμών σε χαμηλά επίπεδα, έγινε προσπάθεια να μη δημιουργηθούν αποκλειστικοί δρόμοι διέλευσης της ισχύος από την παραγωγή στο εκάστοτε φορτίο, να μη δημιουργηθούν δηλαδή πολύ ισχυροί κλάδοι. Στον πίνακα 6.3 παρουσιάζεται η τελική ροή ισχύος στο δίκτυο όπως αυτή προκύπτει από τη λύση της simplex στο τελευταίο υποπρόβλημα λειτουργίας του αλγορίθμου, για μηδενική συνολικά μη εξυπηρετούμενη ισχύ στο σύστημα..

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
1-2	0
1-3	0
1-4	0
1-5	0
1-6	0
2-3	1
2-4	0
2-5	0
2-6	2
3-4	0
3-5	1
3-6	0
4-5	0
4-6	1
5-6	0
Συνολικό κόστος	130.000€

Πίνακας 6.2: Λύση για το αρχικό μοντέλο του Garver



Σχήμα 6.3: Βέλτιστη λύση για το αρχικό σύστημα των 6 ζυγών του Garver

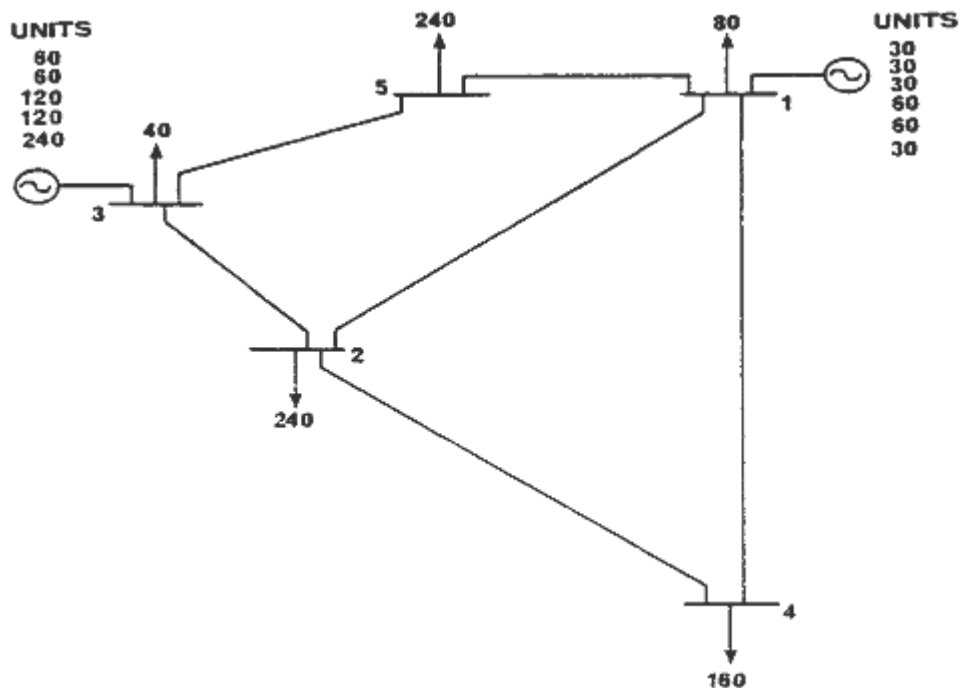
Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	5	70
2	4	60
3	2	150
3	5	170
6	2	150
6	4	100

Πίνακας 6.3: Ροή ισχύος στο δίκτυο κατά τη βέλτιστη λύση του μοντέλου του Garver

Σα μια παραλλαγή του μοντέλου των 6 ζυγών του Garver επιλέχθηκε η εφαρμογή του μοντέλου αυτού στο πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής χωρίς την ύπαρξη της μεγάλης παραγωγής στο ζυγό 6. Πρόκειται δηλαδή για ένα δίκτυο 5 ζυγών όπου η αναγκαία επιπλέον παραγόμενη ισχύς καλύπτεται με αυξήσεις στις ικανότητες παραγωγής των ζυγών 1 και 3. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να παρατηρηθεί, σε μια πρώιμη φάση βέβαια, η επέκταση του δικτύου μεταφοράς ενός συστήματος όταν αυξάνεται μόνο η κεντρική και ήδη υπάρχουσα παραγωγή του εν αντιθέσει με τις επεκτάσεις που πραγματοποιούνται στο δίκτυο

όταν εγκαθίσταται μια μεγάλη μονάδα παραγωγής πιο κοντά στο φορτίο. Πιο αναλυτικά και με περισσότερους ζυγούς θα δειχθεί αυτό στη συνέχεια του κεφαλαίου.

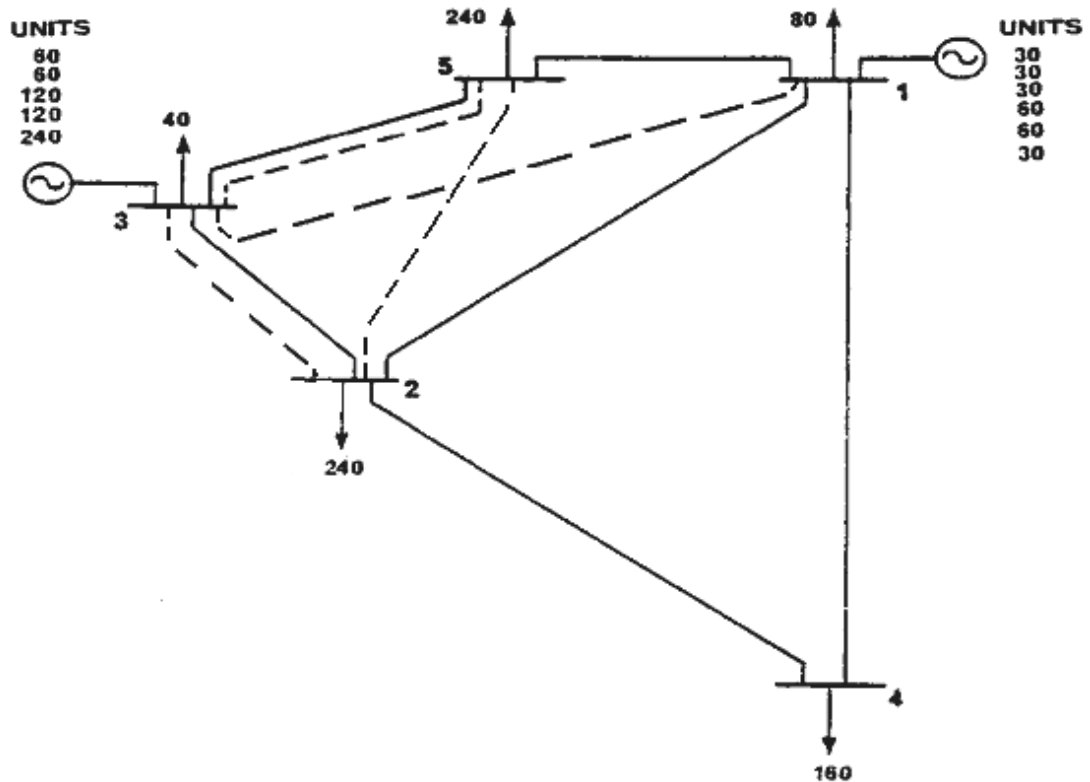
Η παραγωγή ισχύος και τα φορτία στους ζυγούς για την προαναφερθείσα περίπτωση φαίνονται στο σχήμα 6.4 που ακολουθεί. Στη συνέχεια ακολουθεί η λύση για τη συγκεκριμένη παραλλαγή του δικτύου του Garver στους πίνακες 6.4 και 6.5 και στο σχήμα 6.5



Σχήμα 6.4: Αρχική κατάσταση της παραλλαγής του μοντέλου του Garver

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
1-2	0
1-3	1
1-4	0
1-5	0
2-3	1
2-4	0
2-5	1
3-4	0
3-5	1
4-5	0
Συνολικό κόστος	109.000€

Πίνακας 6.4: Λύση για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver



Σχήμα 6.5: Βέλτιστη λύση για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	2	80
1	4	60
1	5	100
2	4	100
3	1	80
3	2	200
3	5	200
5	2	60

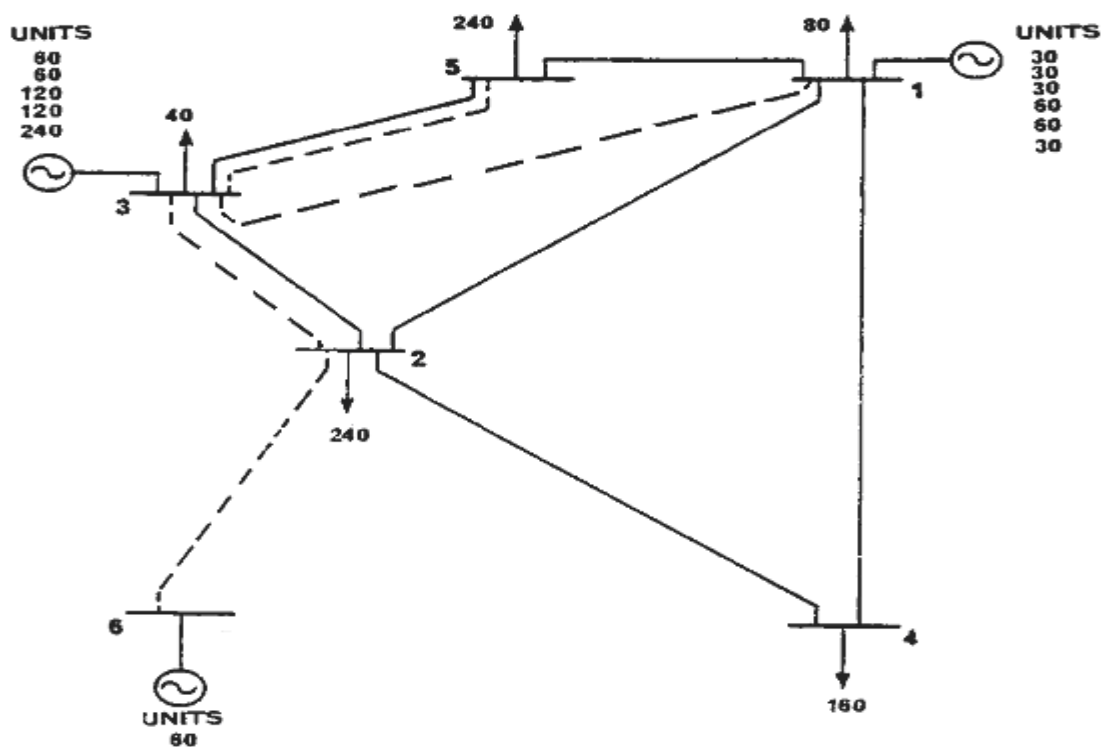
Πίνακας 6.5: Ροή ισχύος στο δίκτυο κατά τη βέλτιστη λύση της παραλλαγής του μοντέλου του Garver

Παρατηρείται ότι στη λύση της παραλλαγής του προβλήματος του Garver προκύπτει μια πιο οικονομική λύση, με κατασκευή τεσσάρων αντί πέντε συνολικά νέων γραμμών μεταφοράς. Φυσικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στις λύσεις που προκύπτουν από το πρόγραμμα επέκτασης γραμμών μεταφοράς δε συνυπολογίζεται καθόλου το κόστος εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής και νέων ζυγών ή το κόστος λειτουργίας αυτών, καθώς θεωρήθηκε η ύπαρξη μιας πλήρως απελευθερωμένης αγοράς παραγωγής ηλεκτρικής

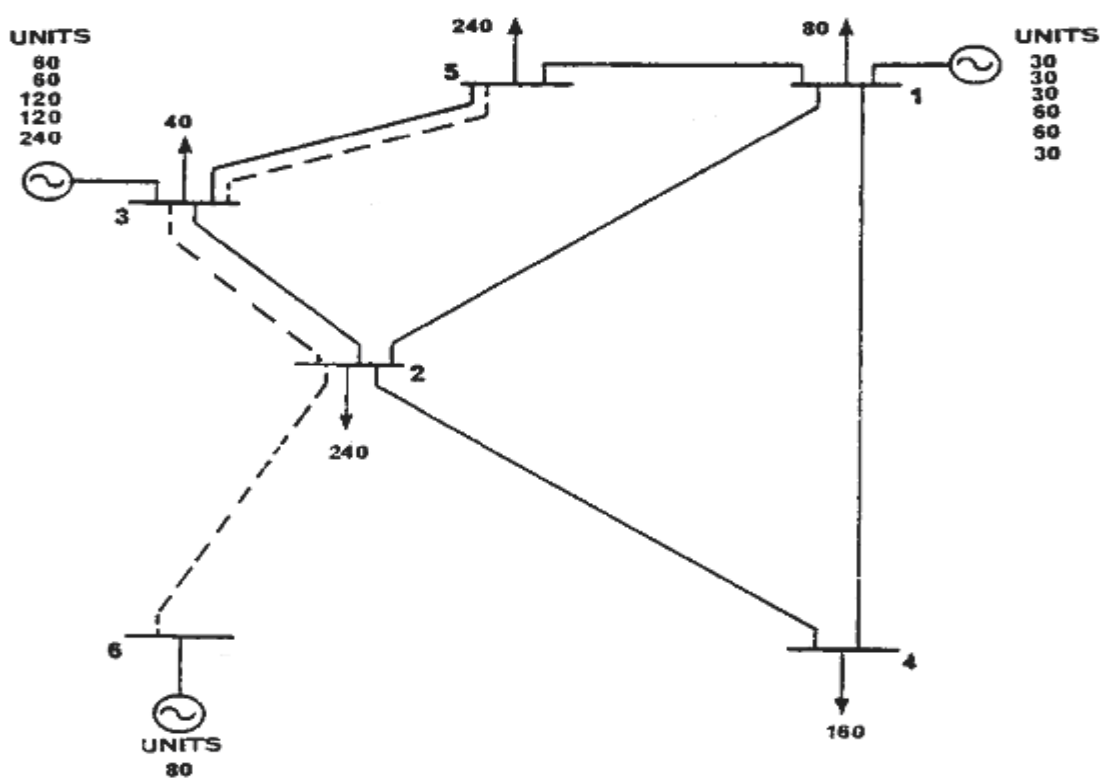
ενέργειας όπου ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς πρέπει να λαμβάνει υπόψιν του όλες τις μονάδες παραγωγής κατά τη σχεδίαση της επέκτασης του δικτύου. Έτσι βλέπουμε ότι μπορεί πράγματι να προκύπτει μια πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση αλλά η λειτουργία του συστήματος συνολικά εξαρτάται άμεσα από τους δύο μεγάλους σταθμούς παραγωγής, μόνο δηλαδή από τους ζυγούς 1 και 3. Θα ήταν ίσως σκόπιμο να υπάρχει και άλλος ένας ζυγός παραγωγής στο σύστημα. Γι' αυτό στη συνέχεια το πρόγραμμά μας θα εφαρμοσθεί και πάλι στην παραλλαγή του μοντέλου του Garver, με εγκατεστημένη πλέον μια μικρή παραγωγή στο ζυγό 6, επιπλέον της ήδη υπάρχουσας εγκατεστημένης παραγωγής. Αρχικά η παραγωγή αυτή στο ζυγό 6 είναι της τάξης των 60MW ενώ στη συνέχεια αυξάνεται στα 80MW. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους πίνακες και στα σχήματα που ακολουθούν:

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο με εγκατεστημένη παραγωγή στο ζυγό 6	
	60MW	80MW
1-2	0	0
1-3	1	0
1-4	0	0
1-5	0	0
1-6	0	0
2-3	1	1
2-4	0	0
2-5	0	0
2-6	1	1
3-4	0	0
3-5	1	1
3-6	0	0
4-5	0	0
4-6	0	0
5-6	0	0
Συνολικό κόστος	108.000€	70.000€

Πίνακας 6.6: Λύσεις για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver με μικρή παραγωγή στο ζυγό 6



Σχήμα 6.6: Βέλτιστη λύση για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver με παραγωγή 60MW στο ζυγό 6



Σχήμα 6.7: Βέλτιστη λύση για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver με παραγωγή 80MW στο ζυγό 6

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)	
		G ₆ =60MW	G ₆ =80MW
1	2	80	60
1	4	60	60
1	5	40	40
2	4	100	100
3	1	20	-
3	2	200	200
3	5	200	200
6	2	60	80

Πίνακας 6.7: Ροή ισχύος στο δίκτυο κατά τη βέλτιστη λύση της παραλλαγής του μοντέλου του Garver για μικρή παραγωγή στο ζυγό 6

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι κατά την παραλλαγή του μοντέλου του Garver, αυξάνοντας τη μικρή παραγωγή στο ζυγό 6, μειώνεται το κόστος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς (μη συνυπολογίζοντας το κόστος κατασκευής του ζυγού 6) αφού χρειάζονται να εγκατασταθούν λιγότερες γραμμές στο δίκτυο ώστε να μην υπάρχει σε αυτό μη εξυπηρετούμενη ισχύς στα φορτία. Παρόλα αυτά, η μικρή παραγωγή στο ζυγό 6, που μπορεί να προέρχεται από κάποιου είδους ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και άρα η ισχύς της να μην είναι πάντα δεδομένη, και οι κατ'επέκταση λίγες γραμμές που μπήκαν στο δίκτυο μπορεί να προκαλέσουν σε αυτό ζητήματα αξιοπιστίας, των οποίων όμως η μελέτη ξεφεύγει από τις προθέσεις αυτής της διπλωματικής. Περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων και της συμπεριφοράς του προγράμματος στα διαφορετικά δεδομένα εισόδου θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, όπως ειπώθηκε στη αρχή του κεφαλαίου θα εξεταστεί η απόκριση του προγράμματός μας στο μοντέλο του Garver με πιο ρεαλιστικά δεδομένα για τις γραμμές μεταφοράς. Θα χρησιμοποιηθούν λοιπόν τα δεδομένα για εναέριες γραμμές μεταφοράς 150kV βαρέος τύπου απλού κυκλώματος που χρησιμοποιούνται στο Ελληνικό Σύστημα και που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 2.2 και 2.3 του κεφαλαίου 2. Έτσι η γραμμή μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου είναι η εξής:

ΤΥΠΟΣ ΓΡΑΜΜΗΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ & ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΓΩΓΩΝ ΑΝΑ ΦΑΣΗ (ΤΥΠΟΣ ACSR) (mm ²)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (k€/km)*	ΘΕΡΜΙΚΟ ΟΡΙΟ (MW)
B/150	1x322	0,1	0,4	53 ή 72	200

* ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι άλλης παράλληλης γραμμής μεταφοράς

Πίνακας 6.8: Δεδομένα της γραμμής μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια

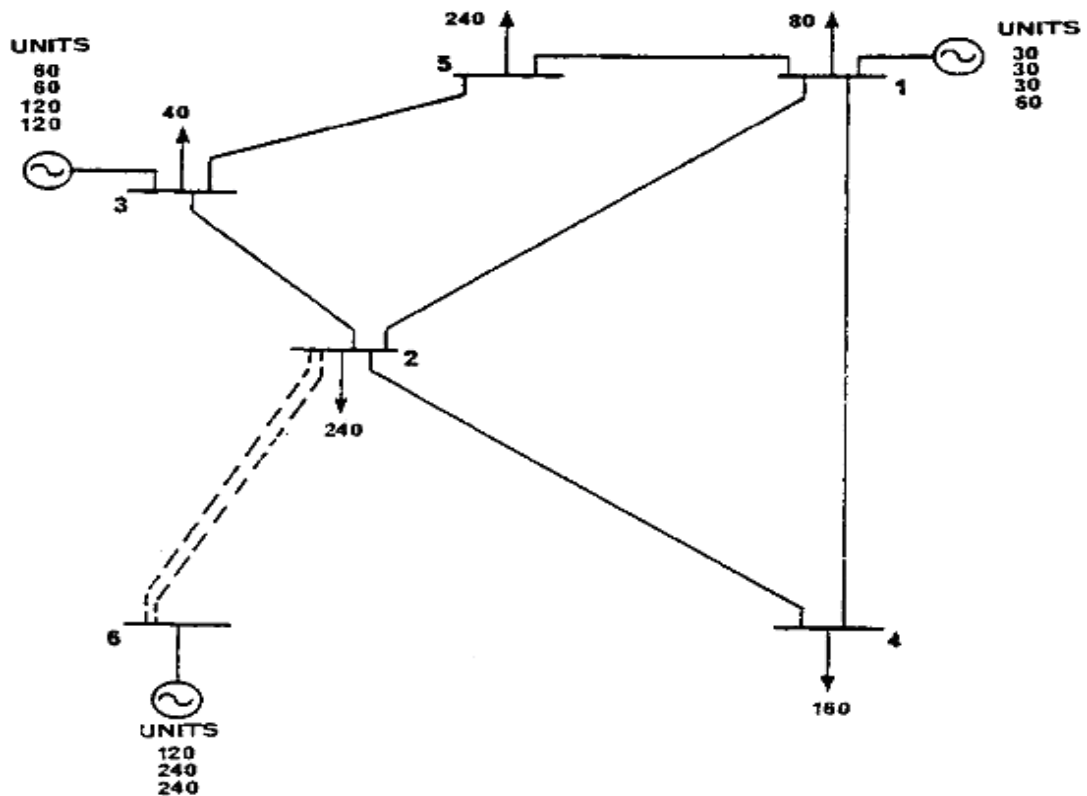
Σε σχέση με τις τιμές του κεφαλαίου 2 υπάρχουν κάποιες μικρές διαφορές που πραγματοποιήθηκαν για χάριν ευκολίας. Η αντίδραση της γραμμής θεωρήθηκε ίση με

0,4Ω/km και όχι 0,422Ω/km ενώ το θερμικό όριο μεταφοράς ισχύος, τέθηκε στα 200MW. Εφόσον τα φορτία τα επεξεργαζόμαστε με βάση τις τιμές των αιχμών τους, θα έπρεπε τουλάχιστον για το Ελληνικό Σύστημα να ληφθεί σαν μέγιστη ικανότητα μεταφοράς το θερμικό όριο υπό δυσμενείς συνθήκες της γραμμής, που είναι 169MVA σε περίπτωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος 40°C και πλήρους άπνοιας. Επειδή όμως πρόκειται ουσιαστικά για μοντελοποίηση του προβλήματος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς και επειδή ούτε και στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με πραγματικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, το κύριο ενδιαφέρον μας δεν αποσπούν τα ακριβή αποτελέσματα του προγράμματος αλλά η γενικότερη συμπεριφορά του δικτύου και η φιλοσοφία των αποτελεσμάτων. Γι' αυτό επιλέχθηκαν τελικά τα 200MW σα γενική ικανότητα μεταφοράς ενεργούς πια ισχύος της γραμμής. Τέλος το κόστος εγκατάστασης της συγκεκριμένης γραμμής μεταφοράς θεωρήθηκε πως είναι 53k€/km αν υπάρχει ήδη συνδεδεμένη ανάμεσα στους ζυγούς που πρόκειται να εγκατασταθεί άλλη γραμμή μεταφοράς και 72k€/km αν πρόκειται να ενωθούν δύο μη συνδεδεμένοι μέχρι πρότινος ζυγοί. Αυτή η αύξηση οφείλεται στα επιπλέον έξοδα ενοικίας ή αγοράς νέου δρόμου γης για τους καινούριους πυλώνες.

Στη συνέχεια ακολουθεί η λύση που προκύπτει για το αρχικό μοντέλο του Garver χρησιμοποιώντας τη γραμμή μεταφοράς που παρουσιάστηκε προηγουμένως, σε όλους τους υπάρχοντες ή νέους κλάδους του δικτύου. Όπως είναι αναμενόμενο σαν τάση βάσης πλέον θεωρούμε την τιμή: $V_B=150\text{kV}$ ενώ η βάση ισχύος παρέμεινε όπως πριν: $S_B=100\text{MW}$.

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
1-2	0
1-3	0
1-4	0
1-5	0
1-6	0
2-3	0
2-4	0
2-5	0
2-6	2
3-4	0
3-5	0
3-6	0
4-5	0
4-6	0
5-6	0
Συνολικό κόστος	2.160k€

Πίνακας 6.9: Λύση για το αρχικό μοντέλο του Garver με τη νέα γραμμή μεταφοράς



Σχήμα 6.8: Βέλτιστη λύση για το αρχικό μοντέλο του Garver χρησιμοποιώντας γραμμές με μεγαλύτερη χωρητικότητα

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	5	70
2	4	160
3	5	170
6	2	400

Πίνακας 6.10: Ροή ισχύος στο δίκτυο κατά τη βέλτιστη λύση του τροποποιημένου αρχικού μοντέλου του Garver

Όπως εύκολα μπορεί κάποιος να παρατηρήσει, χρησιμοποιώντας γραμμές μεταφοράς με μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος και με τα δεδομένα παραγωγής και ζήτησης του αρχικού μοντέλου του Garver, η λύση που προκύπτει είναι εντελώς διαφορετική από αυτήν που υπολογίστηκε στην αρχή της παραγράφου, αφού τελικά εγκαθίστανται από το πρόγραμμα μόνο δύο νέες γραμμές, και αυτές μεταξύ των ζυγών 2 και 6. Αυτό έγινε γιατί με τις νέες μεγαλύτερες χωρητικότητες των γραμμών, το πρόγραμμα μπόρεσε να μεταφέρει τη μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος που χρειαζόταν να μεταφερθεί στο αρχικό μοντέλο του Garver ώστε να εξυπηρετηθεί όλο το φορτίο, χωρίς την εγκατάσταση πολλών νέων γραμμών.

Για αυτόν ακριβώς το λόγο και για να συγκριθούν καλύτερα τα αποτελέσματα του προγράμματος όταν χρησιμοποιείται η νέα γραμμή μεταφοράς με τα αρχικά αποτελέσματα

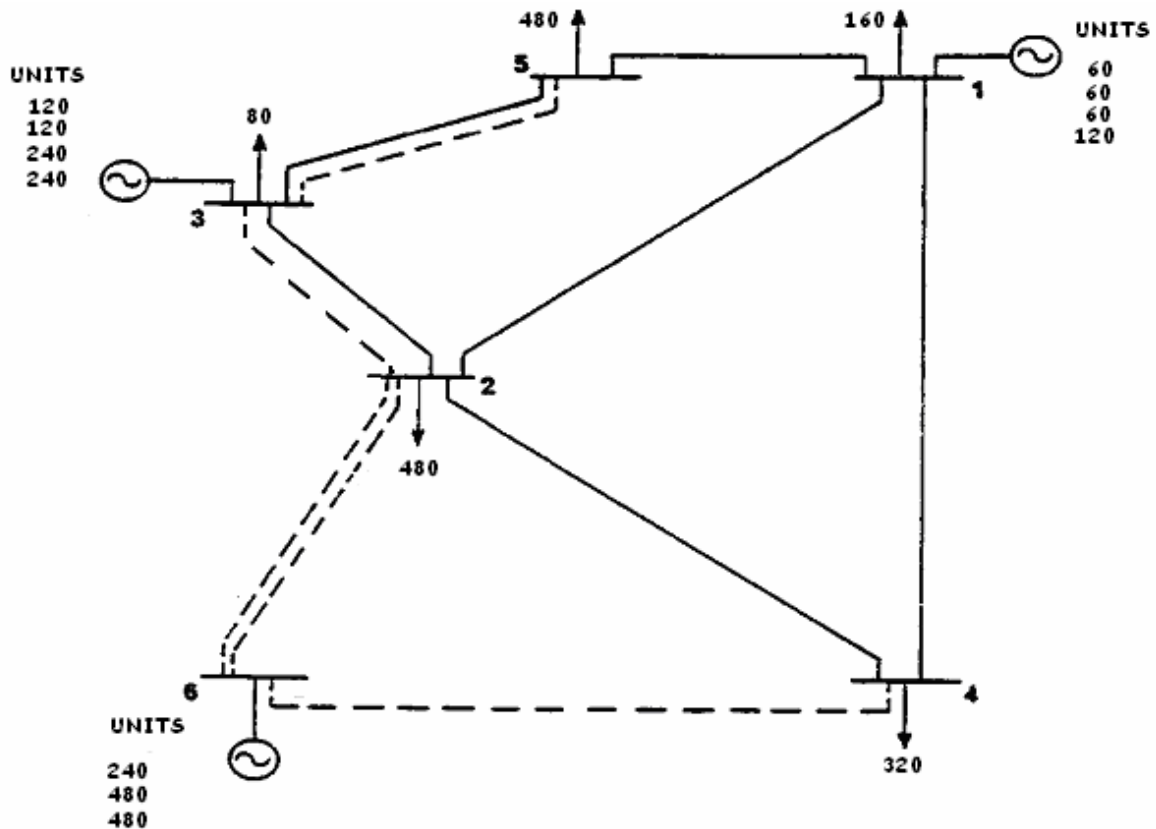
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

των πινάκων 6.2, 6.3 και του σχήματος 6.3, όλες τις τιμές παραγωγής και ζήτησης στους ζυγούς του δικτύου διπλασιάζονται, αφού η χωρητικότητα της νέας γραμμής είναι σχεδόν διπλάσια από τη χωρητικότητα των υπάρχουσων γραμμών του αρχικού μοντέλου.

Τα αποτελέσματα του προγράμματος προκύπτουν ακριβώς ίδια με αυτά του αρχικού μοντέλου, όσον αφορά τις νέες γραμμές μεταφοράς που μπήκαν στο δίκτυο και παρουσιάστηκαν στον πίνακα 6.2 και παρατίθενται ξανά στον πίνακα 6.11. Στο σχήμα 6.9 και στον πίνακα 6.12 φαίνονται η νέα τοπολογία του δικτύου αλλά και η ροή ισχύος που προκύπτει από το τελευταίο τρέξιμο της simplex του προγράμματός μας για ύπαρξη μηδενικής μη εξυπηρετούμενης ισχύος.

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
1-2	0
1-3	0
1-4	0
1-5	0
1-6	0
2-3	1
2-4	0
2-5	0
2-6	2
3-4	0
3-5	1
3-6	0
4-5	0
4-6	1
5-6	0
Συνολικό κόστος	6.440k€

Πίνακας 6.11: Λύση για το “διπλασιασμένο” αρχικό μοντέλο του Garver



Σχήμα 6.9: Βέλτιστη λύση για το “διπλασιασμένο” αρχικό μοντέλο του Garver

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	5	80
2	4	120
3	2	240
3	5	400
6	2	360
6	4	200

Πίνακας 6.12: Ροή ισχύος στο δίκτυο κατά τη βέλτιστη λύση του “διπλασιασμένου” μοντέλου του Garver

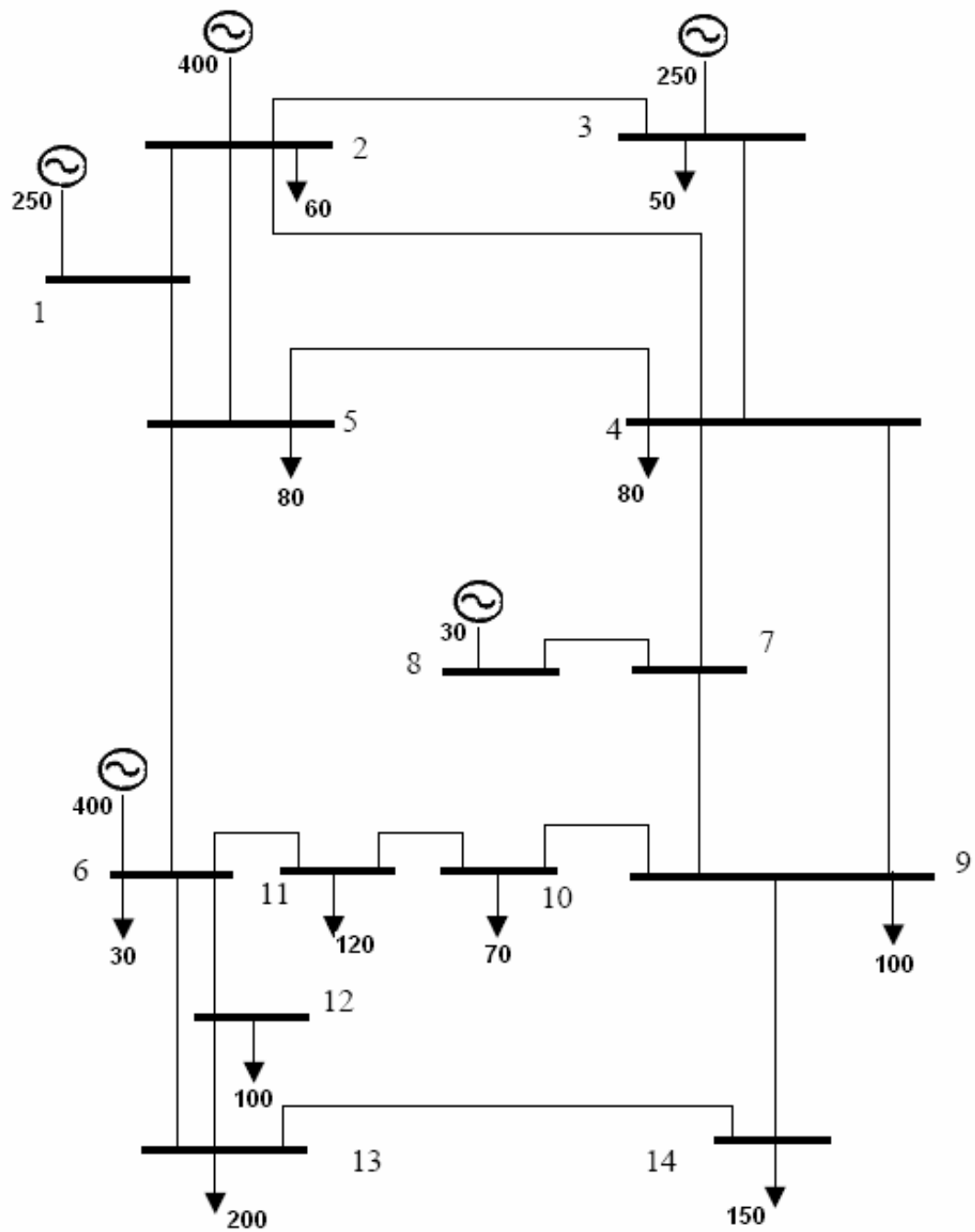
Με αυτόν τον τρόπο βλέπουμε πως η χρησιμοποίηση ενός πιο ρεαλιστικού τύπου γραμμής μεταφοράς, ανάλογου με αυτόν που χρησιμοποιείται στο Ελληνικό σύστημα μεταφοράς, δεν αλλάζει τα τελικά αποτελέσματα του προγράμματος (με μια μικρή παραδοχή στις τελικές αυξήσεις της παραγωγής και του φορτίου στο δίκτυο). Αυτός ο τύπος γραμμής είναι αυτός που θα χρησιμοποιηθεί στα σενάρια και στις εκτελέσεις του προγράμματος που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια του κεφαλαίου για το πειραματικό δίκτυο των δεκατεσσάρων ζυγών.

3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ 14 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ IEEE

Το μοντέλο των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE χρησιμοποιείται πολύ συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία για διάφορες μελέτες [22,23]. Πρόκειται για ένα μεσαίου μεγέθους δίκτυο με ικανοποιητικό δείκτη αξιοπιστίας. Η συμπεριφορά και τα αποτελέσματα της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς του δικτύου αυτού εκτελώντας το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, εξετάστηκαν με τροποποιημένα δεδομένα παραγωγής και φορτίου χρησιμοποιώντας γραμμές μεταφοράς όπως αυτές που χρησιμοποιήσαμε στο τέλος του προηγούμενου υποκεφαλαίου. Η εύρεση και η καταγραφή των νέων αυτών δεδομένων του δικτύου βασίστηκε στο υπάρχον Ελληνικό Σύστημα. Έτσι θεωρήθηκε ότι η πλειονότητα του φορτίου βρίσκεται στο νότιο μέρος του δικτύου, η παραγωγή ισχύος είναι συγκεντρωμένη κυρίως στο βόρειο τμήμα του και η σύνδεσή τους γίνεται με μακριές γραμμές μεταφοράς. Σε όλα τα σενάρια χρησιμοποιήθηκαν μεγέθη με τιμές ανά μονάδα και επομένως στο δίκτυο δε χρειάζεται να αναπαρασταθούν τυχόν μετασχηματιστές αφού αυτοί αντικαθίστανται από την αντίδραση μιας γραμμής μεταφοράς. Οι τιμές βάσης είναι $V_B=150\text{kV}$ για την τάση και $S_B=100\text{kV}$ για την ισχύ.

Το υπάρχον σύστημα, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 6.10, αποτελείται από 5 σταθμούς παραγωγής στους ζυγούς 1,2,3,6 και 8 [23]. Ο σταθμός στο ζυγό 6 είναι πολύ σημαντικός στην ευστάθεια του συστήματος αφού είναι ο μόνος μεγάλος σταθμός που βρίσκεται πολύ κοντά στη μεγάλη ζήτηση των ζυγών 11,12,13 και 14. Η παραγωγή στο ζυγό 8 είναι πολύ μικρή καθώς θεωρήθηκε ότι αυτή προέρχεται είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε από οποιαδήποτε άλλη μικρή συμβατική μονάδα παραγωγής. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές που αναγράφονται δίπλα στους ζυγούς παραγωγής αντιστοιχούν στην πραγματική μέγιστη παραγόμενη ισχύς, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οποιοδήποτε πιθανοτικό κριτήριο παραγωγής. Το φορτίο του κάθε ζυγού αντιστοιχεί στην πρόβλεψη της αιχμής του για το χρονικό ορίζοντα που γίνεται η μελέτη. Η επαρκής κάλυψη των αιχμών όλων των ζυγών οδηγεί στην ασφαλή λειτουργία του δικτύου ανεξαρτήτως τελικώς εμφανιζόμενου φορτίου. Όλες οι τιμές είναι της τάξης των MW.

Στον πίνακα 6.13 καταγράφονται οι αποστάσεις μεταξύ των υπαρχόντων κλάδων του δικτύου καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών 2-12 και 1-6 μεταξύ των οποίων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν νέες συνδέσεις ζυγών. Για την αγωγιμότητα και την ικανότητα μεταφοράς ισχύος των εγκατεστημένων γραμμών μεταφοράς καθώς και για τα δεδομένα των υπό εξέταση νέων γραμμών, ισχύουν οι τιμές που αναφέρονται στον πίνακα 6.8 για τον τύπο γραμμής μεταφοράς B/150 που χρησιμοποιείται συνήθως στον Ελληνικό χώρο. Επομένως, για τη δεδομένη χρονική στιγμή, η συνολική ικανότητα παραγωγής του συστήματος είναι 1330MW ενώ η συνολική αιχμή του φορτίου είναι 1040MW. Η μη εξυπηρετούμενη ισχύς είναι μηδενική, με τη ροή ενεργού ισχύος πάνω στις γραμμές, όπως αυτή προκύπτει από την dc ροή φορτίου που πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια της simplex, να φαίνεται στον πίνακα 6.14.



Σχήμα 6.10: Το υπάρχον δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Κλάδος	Μήκος (km)
1-2	28
1-5	94
1-6	160
2-3	84
2-4	71
2-5	70
2-12	170
3-4	76
4-5	17
4-7	60
4-9	60
5-6	60
6-11	51
6-12	59
6-13	30
7-8	46
7-9	26
9-10	23
9-14	64
10-11	45
12-13	51
13-14	100

Πίνακας 6.13: Οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών του δικτύου

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	2	60
2	4	200
2	5	200
3	4	100
4	7	170
4	9	170
5	4	120
6	11	70
6	12	100
6	13	200
7	9	200
8	7	30
9	10	120
9	14	150
10	11	50

Πίνακας 6.14: Ροή ισχύος στο αρχικό δίκτυο των 14 ζυγών

Αμέσως μετά θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα των 3 σεναρίων που θεωρήθηκαν για τη μελλοντική ανάπτυξη της παραγωγής και της ζήτησης στο σύστημα. Στο 1^ο σενάριο, η αναγκαία αύξηση της παραγωγής για την εξυπηρέτηση των αυξημένων αιχμών του φορτίου, υλοποιήθηκε στους ήδη υπάρχοντες σταθμούς παραγωγής. Στο σενάριο 2, η αύξηση αυτή της παραγωγής πραγματοποιήθηκε με την εγκατάσταση νέας μεγάλης μονάδας παραγωγής κοντά στο υψηλό φορτίο του δικτύου. Τέλος στο 3^ο σενάριο υποτέθηκε σχέδιο εγκατάστασης μεγάλης διεσπαρμένης παραγωγής, σε πολλούς από τους ζυγούς του δικτύου.

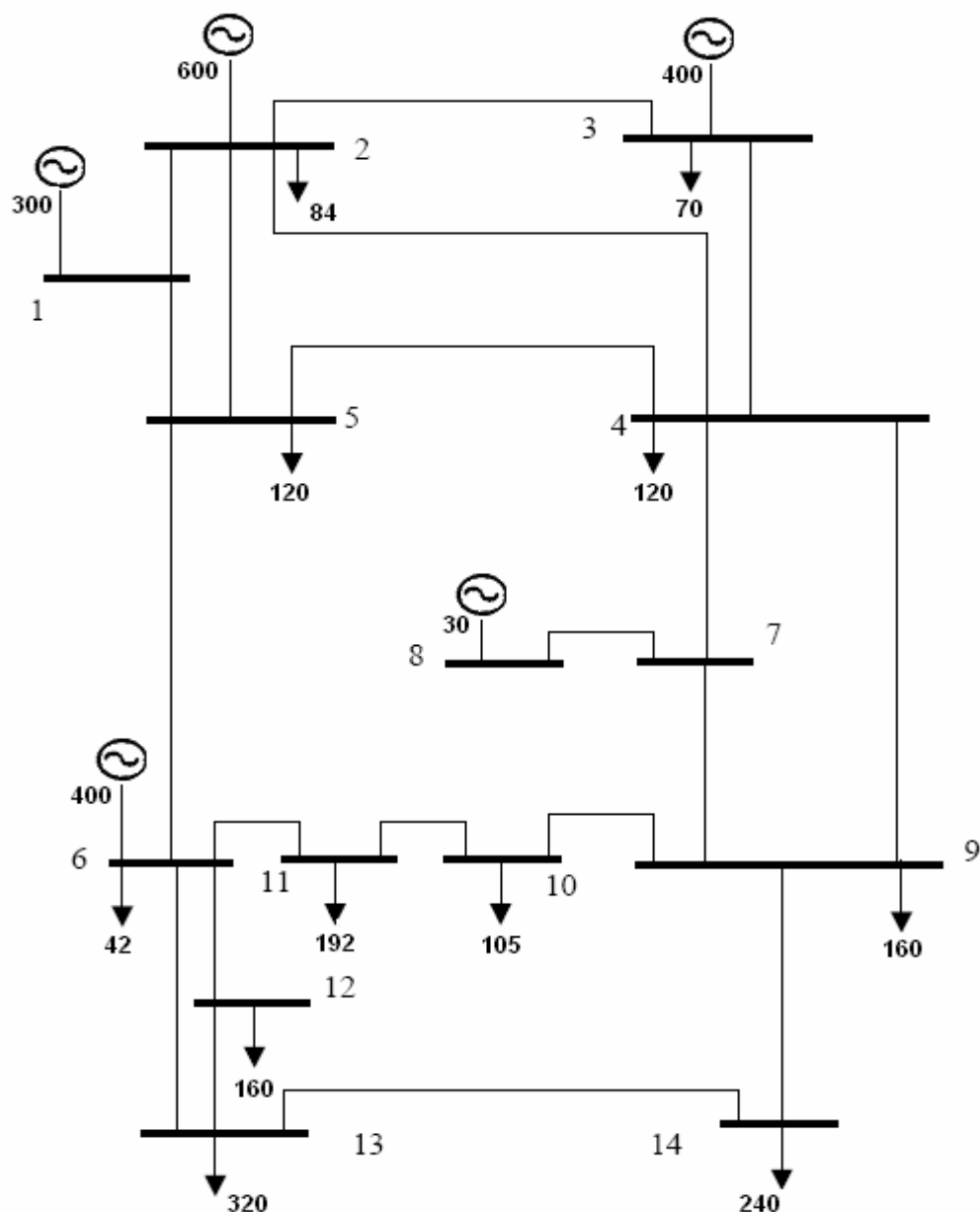
i. Σενάριο ενίσχυσης απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής

Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι όλη η μελλοντική αύξηση του φορτίου θα καλυφθεί από ενισχύσεις στην απομακρυσμένη συμβατική παραγωγή των ζυγών 1,2 και 3 αφού στο ζυγό 6 δεν υπάρχουν περιθώρια για τυχόν άλλες επεκτάσεις ενώ η παραγωγή στο ζυγό 8 δε συμπεριλήφθηκε ως συμβατική παραγωγή.

Για τη πρόβλεψη ζήτησης και τη μελλοντική αιχμή του φορτίου του συστήματος υποτέθηκε διαφορετική αύξηση στους εκάστοτε ζυγούς, θεωρώντας ότι κάποιοι από αυτούς τους ζυγούς ανήκουν σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές, όποτε η αύξηση θα είναι μεγάλη, ενώ άλλοι βρίσκονται κοντά σε αγροτικές και ημιαστικές περιοχές. Έτσι, βασιζόμενοι σε άλλες μελέτες επέκτασης δικτύου μεταφοράς [4], στους ζυγούς 9,11,12,13 και 14 που βρίσκονται στο νότιο μέρος του δικτύου και έχουν αρχικά αρκετά μεγάλη αιχμή φορτίου συγκρινόμενη με τους υπόλοιπους ζυγούς (σχήμα 6.10), θεωρήθηκε μελλοντική αύξηση φορτίου κατά 60%. Στους ζυγούς 4,5 και 10 που έχουν λίγο μικρότερο αρχικό φορτίο, η αύξηση είναι 50% ενώ στους ζυγούς παραγωγής με κάποιο αρχικό φορτίο (2,3 και 6) θεωρήθηκε αύξηση 40%. Το συνολικό φορτίο για το σύστημα προκύπτει πλέον ίσο με 1613MW και οι τελικές τιμές του ανά ζυγό φαίνονται στο σχήμα 6.11.

Η κάλυψη της αύξησης αυτής του φορτίου κατά την εκτέλεση του σεναρίου 1, πραγματοποιήθηκε με ενίσχυση της παραγωγής στους ζυγούς 1,2 και 3. Η απόφαση αυτή δεν ανήκει φυσικά στο διαχειριστή του συστήματος. Υποτέθηκε ότι μόνο εκεί υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Όπως φαίνεται και από τη ροή ισχύος του πίνακα 6.14, οι πιο σημαντικοί ζυγοί παραγωγής είναι οι 2 και 6, ακολουθούμενοι από το ζυγό 3. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος, ο ζυγός 1 δε χρησιμοποιήθηκε κατά το μέγιστο της δυνατότητας παραγωγής του. Επομένως η μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος στο ζυγό 2 αυξάνεται στα 600MW, στο ζυγό 3 γίνεται 400MW ενώ στο ζυγό 1 η αύξηση είναι μικρότερη και η τελική τιμή της παραγωγής είναι 300MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής του συστήματος ανέρχεται πλέον στα 1730MW για το χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται το πρόβλημα.

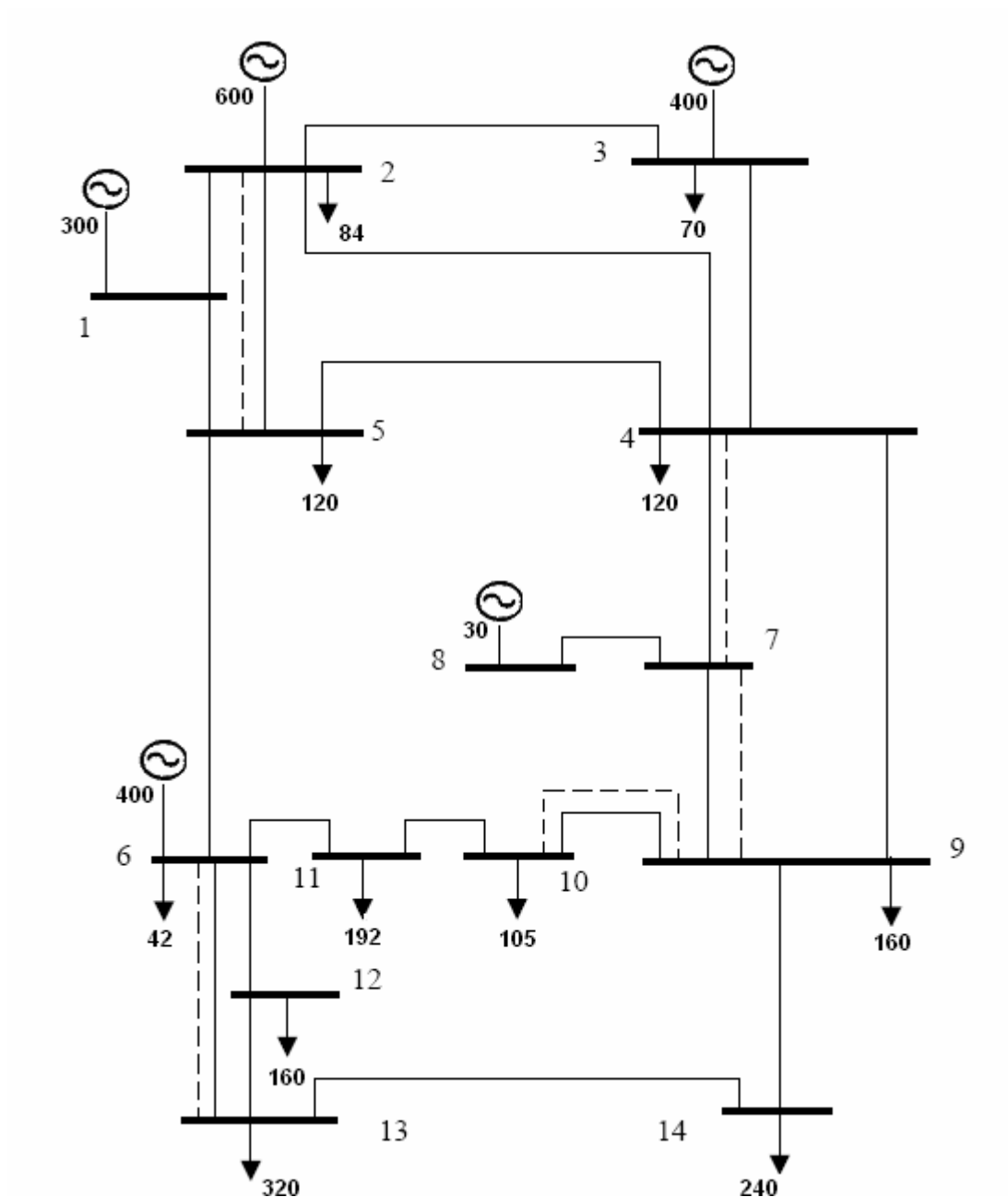
Υλοποιώντας τους πίνακες εισόδου του αλγορίθμου, που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 5, εκτελούμε το πρόγραμμα με τα προαναφερθέντα δεδομένα. Τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν ύστερα από 6 επαναλήψεις του αλγορίθμου (δηλαδή ύστερα από 6 επλύσεις των υποπροβλημάτων επένδυσης και λειτουργίας) και παρουσιάζονται στους πίνακες 6.15 και 6.16 καθώς και γραφικά στο σχήμα 6.12:



Σχήμα 6.11: Μελλοντικές συνθήκες του μοντέλου των 14 ζυγών της IEEE κατά το σενάριο 1

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
2-5	1
4-7	1
6-13	1
7-9	1
9-10	1
Συνολικό κόστος	11.077k€

Πίνακας 6.15: Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση του σεναρίου 1 για το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE



Σχήμα 6.12: Βέλτιστη λύση σεναρίου 1

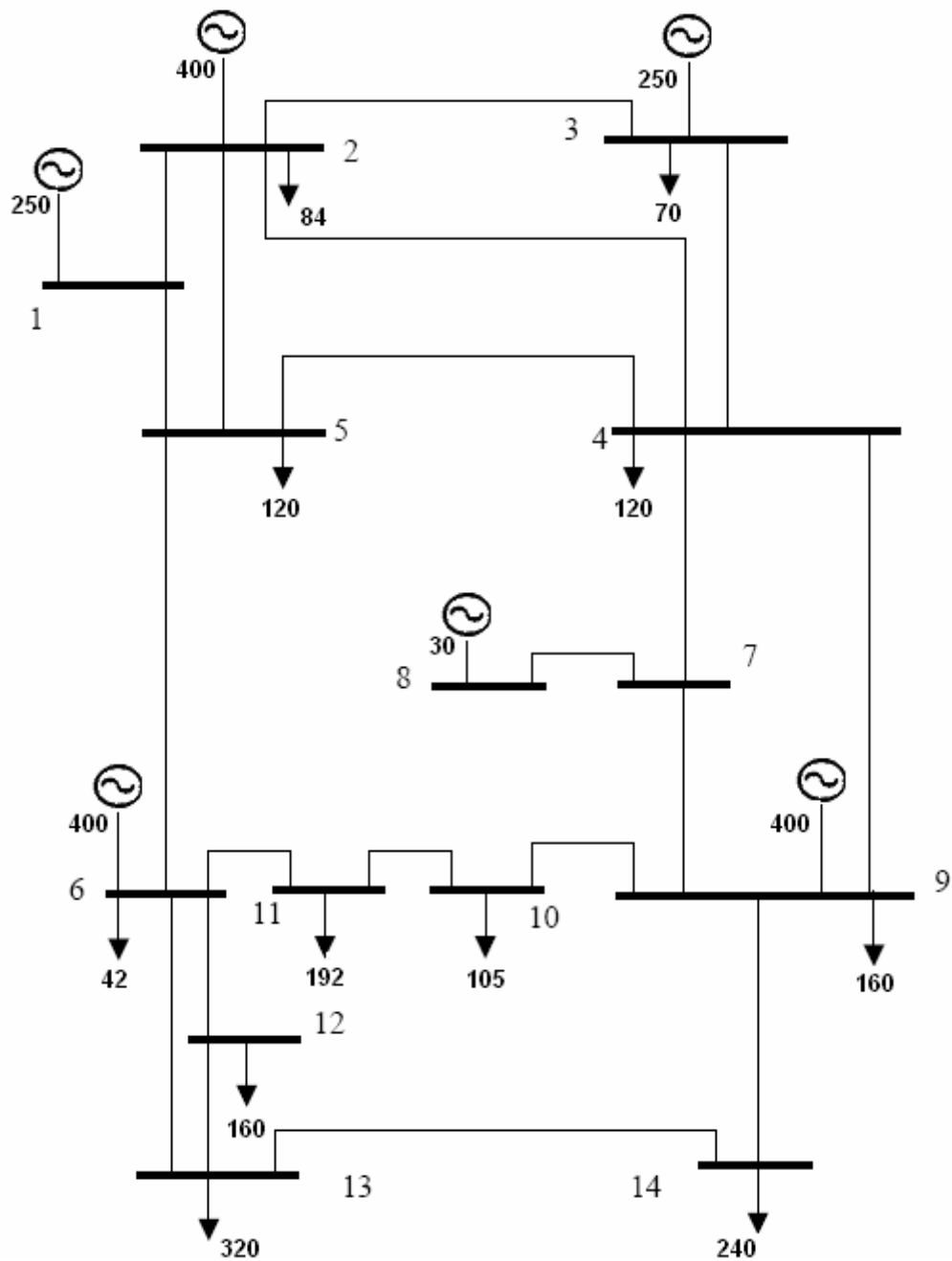
Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	2	84
1	5	120
2	4	200
2	5	400
3	4	200
4	7	370
4	9	110
5	4	200
5	6	200
6	11	38
6	12	160
6	13	360
7	9	400
8	7	30
9	10	259
9	14	200
10	11	154
13	14	40

Πίνακας 6.16: Ροή ισχύος στο τελικό δίκτυο του σεναρίου 1

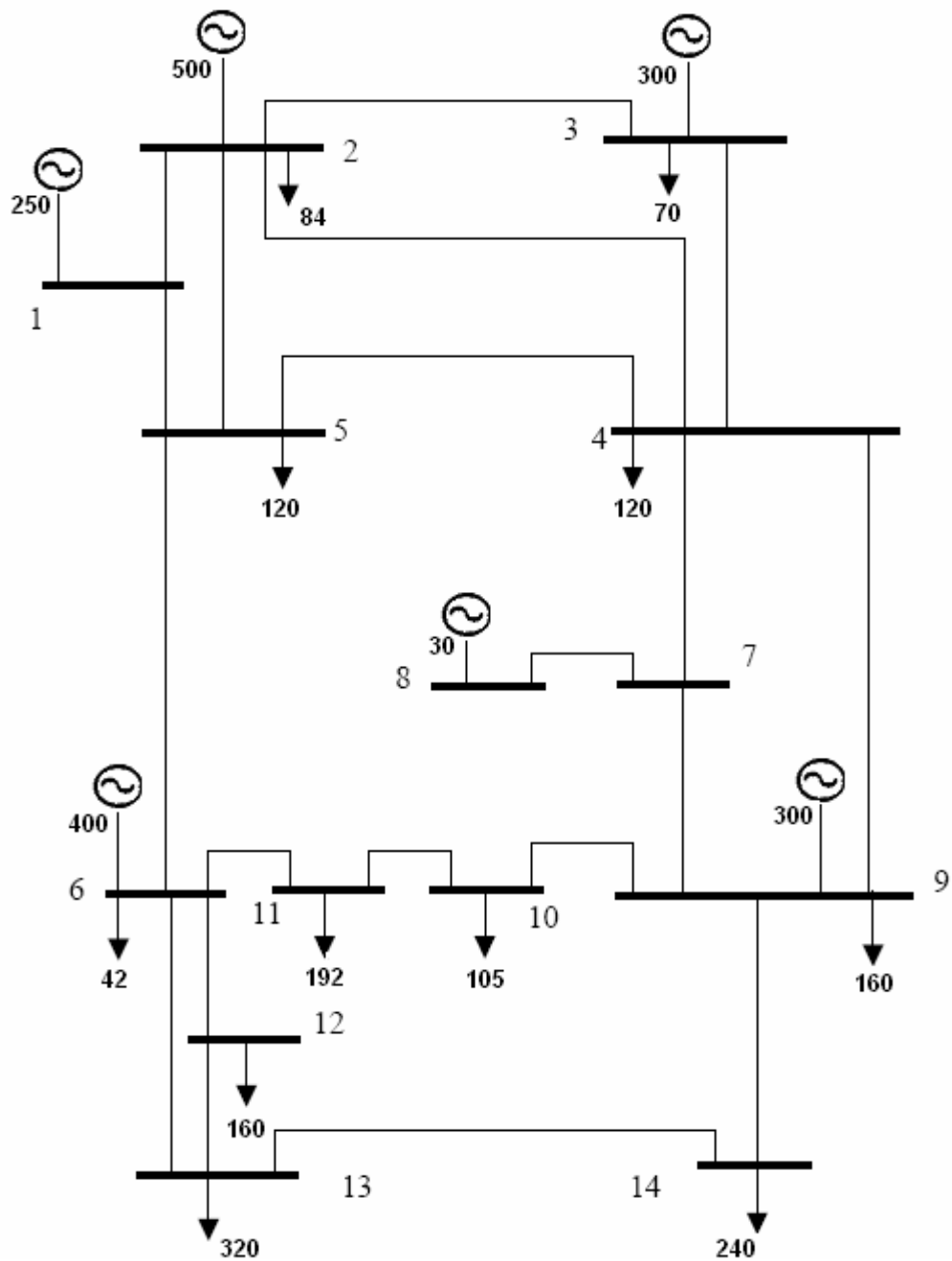
ii. Σενάριο εγκατάστασης μεγάλης συμβατικής μονάδας παραγωγής κοντά στο φορτίο

Στο σενάριο αυτό θεωρήσαμε ότι όλη ή σχεδόν όλη η αύξηση του φορτίου που παρουσιάστηκε προηγουμένως και φαίνεται στο σχήμα 6.11, θα καλυφθεί από μια νέα συμβατική μονάδα παραγωγής εγκατεστημένη κοντά στο συγκεντρωμένο φορτίο, στο νότιο τμήμα του συστήματος. Επομένως αρχικά επιλέχθηκε η εγκατάσταση μιας μόνο μονάδας παραγωγής στο ζυγό 9 με ικανότητα παραγωγής 400MW, ενώ στη συνέχεια αποφασίστηκε η αντικατάστασή της με μία μονάδα ικανότητας 300MW και παράλληλη αύξηση της ικανότητα παραγωγής του ζυγού 2 κατά 100MW και του ζυγού 3 κατά 50MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής ανέρχεται πλέον στην πρώτη περίπτωση στα 1730MW και στη δεύτερη στα 1780MW.

Στα σχήματα 6.13 και 6.14 φαίνονται οι μελλοντικές συνθήκες του συστήματος για τα σενάρια αυτά, ενώ στους πίνακες 6.17 και 6.18 καθώς και στα σχήματα 6.15 και 6.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προγράμματος για τα παραπάνω 2 σενάρια ύστερα από 4 και 5 επαναλήψεις του αλγορίθμου αντίστοιχα:



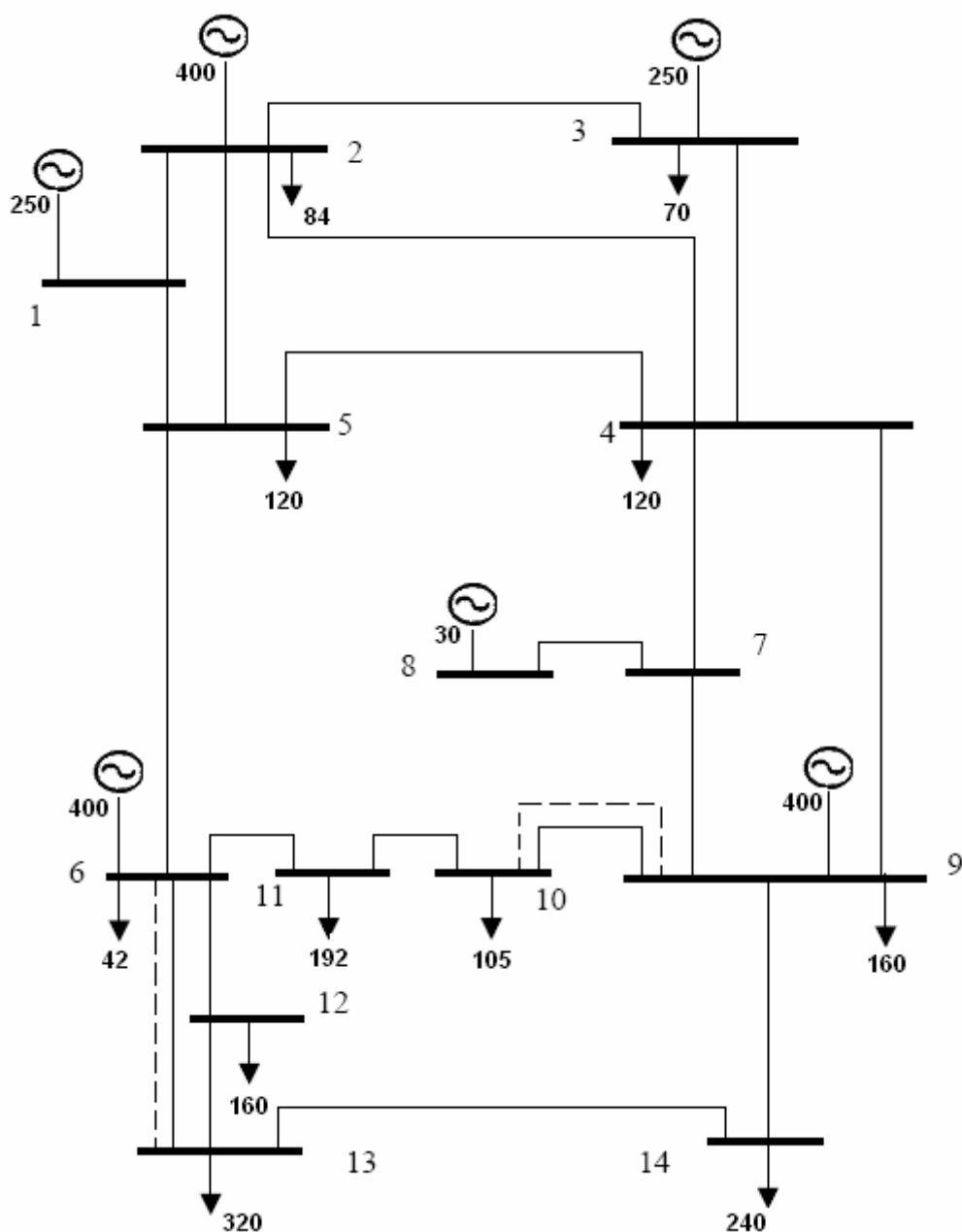
Σχήμα 6.13: Μελλοντικές συνθήκες του μοντέλου των 14 ζυγών της IEEE για το σενάριο 2α



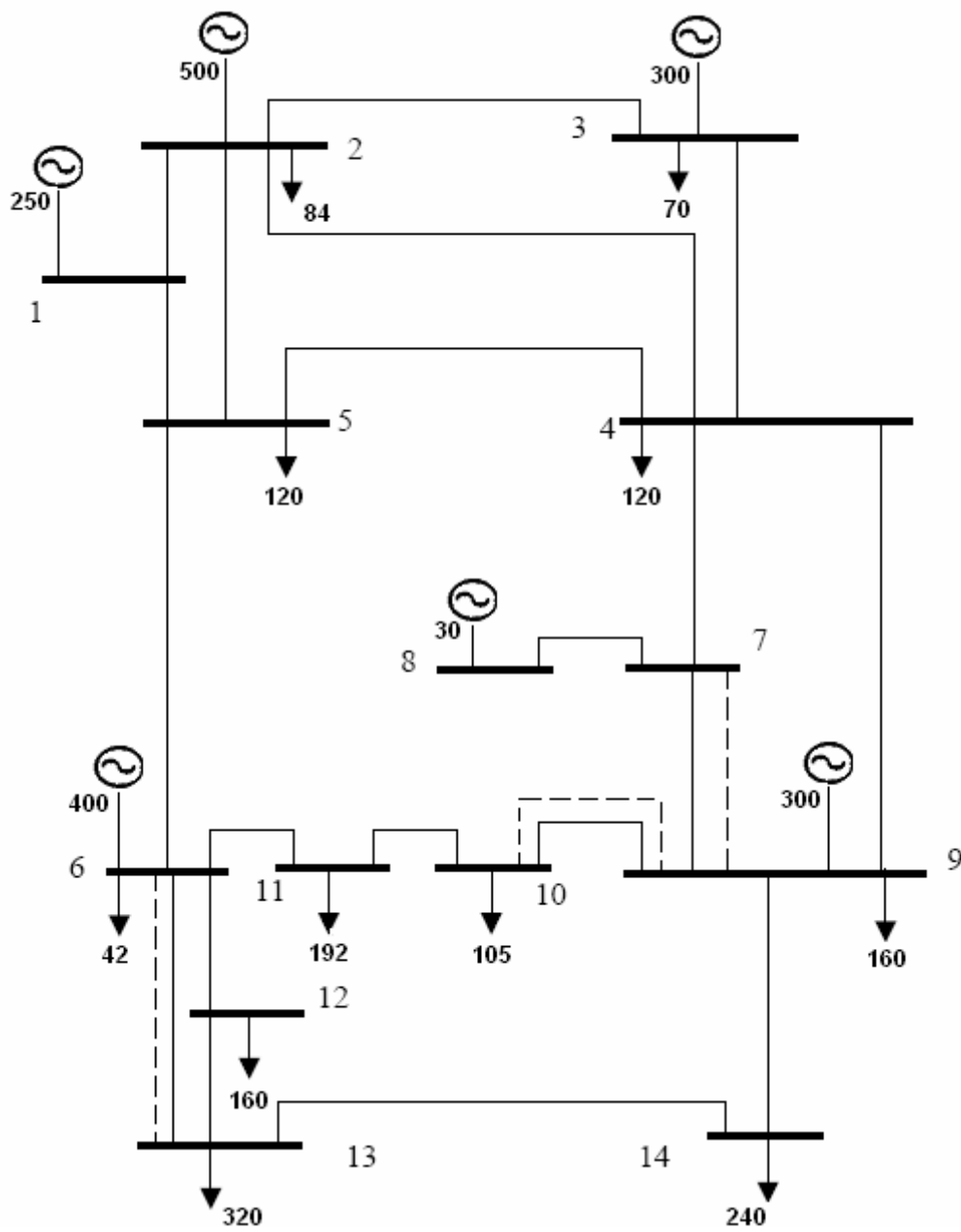
Σχήμα 6.14: Μελλοντικές συνθήκες του μοντέλου των 14 ζυγών της IEEE για το σενάριο 2β

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο	
	Σενάριο 2α	Σενάριο 2β
6-13	1	1
7-9	0	1
9-10	1	1
Συνολικό κόστος	2.809k€	4.187k€

Πίνακας 6.17: Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση σεναρίων 2α και 2β για το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE



Σχήμα 6.15: Βέλτιστη λύση σεναρίου 2α



Σχήμα 6.16: Βέλτιστη λύση σεναρίου 2β

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)	
		Σενάριο 2α	Σενάριο 2β
1	2	104	-
1	5	29	129
2	3	20	-
2	4	200	200
2	5	200	200
3	4	200	200
4	5	91	-
4	7	170	200
4	9	19	89
5	4	-	9
5	6	200	200
6	11	38	38
6	12	120	120
6	13	400	400
7	9	200	230
8	7	30	30
9	10	259	259
9	14	200	200
10	11	154	154
13	12	40	40
13	14	40	40

Πίνακας 6.18: Ροή ισχύος στα τελικά δίκτυα των σεναρίων 2α και 2β

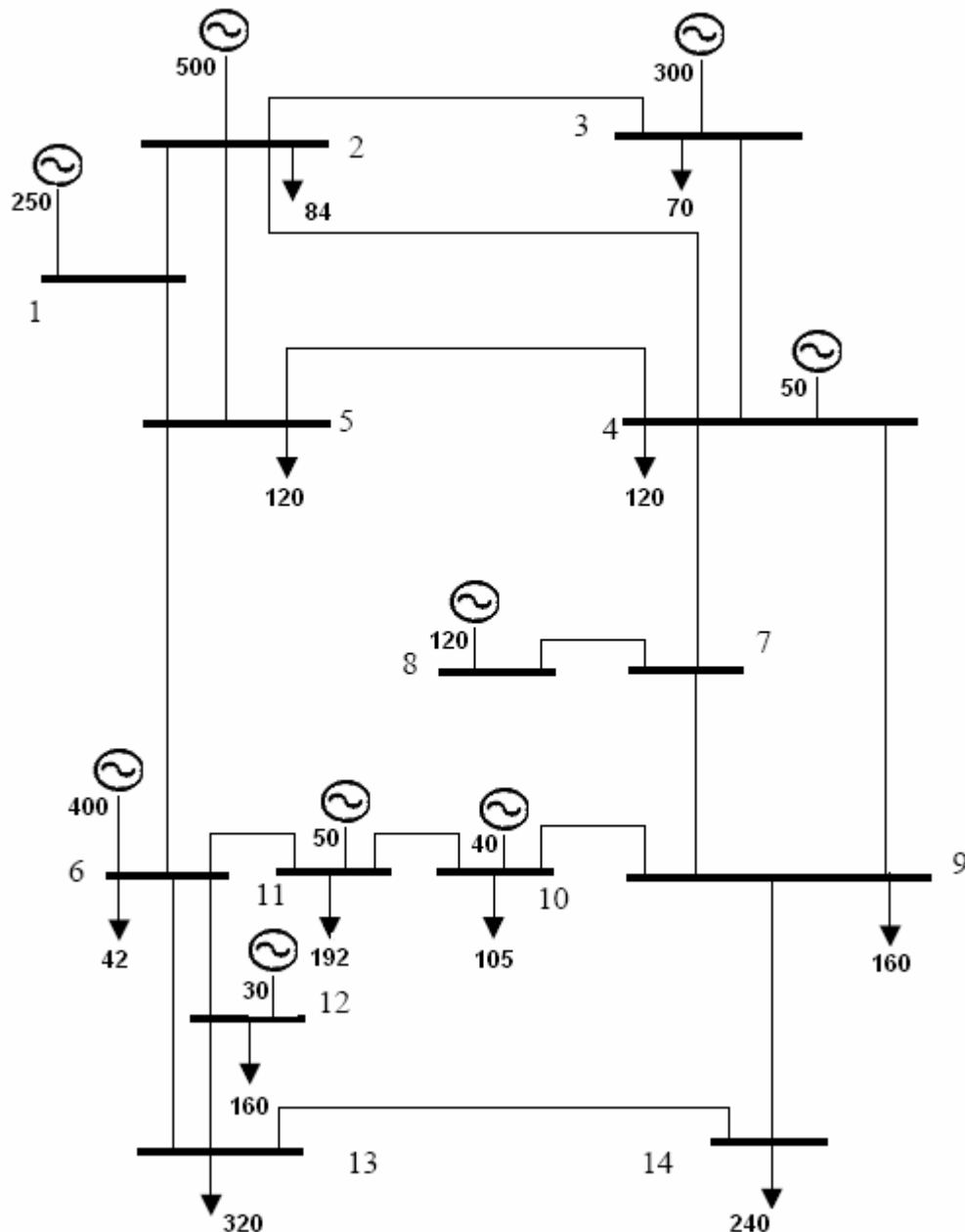
iii. Σενάριο εγκατάστασης μεγάλης διεσπαρμένης παραγωγής

Κατά τη σχεδίαση του σεναρίου αυτού θεωρήθηκε ότι είναι πιθανόν η αύξηση του φορτίου που παρουσιάστηκε στο σχήμα 6.11 να καλυφθεί από την εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής σε όποια σημεία του δικτύου είναι εφικτό. Η παραγωγή αυτή θα είναι μικρή σε κάθε ζυγό αλλά η τιμή της θα είναι πάντα δεδομένη. Δηλαδή ακόμα και αν προέρχεται από κάποια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας ή κάποια άλλη πηγή τελευταίας τεχνολογίας (π.χ. fuel cells), η τιμή της παραγωγής ισχύος που αναγράφεται δίπλα από το ζυγό που είναι αυτή εγκατεστημένη, θεωρείται ότι είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα από τη συγκεκριμένη μονάδα. Αυτή η τιμή της παραγωγής μπορεί φυσικά να μην αντιστοιχεί στη μέγιστη ικανότητα παραγωγής της μονάδας.

Η εγκατάσταση μικρής παραγωγής σε όσους ζυγούς του συστήματος είναι εφικτό, ισοδυναμεί ουσιαστικά με μείωση του φορτίου σε αυτούς τους ζυγούς. Έτσι στο σενάριο αυτό στο ζυγό 4 εγκαταστάθηκε παραγωγή 50MW ενώ στο ζυγό 8 εγκαταστάθηκαν άλλα 90MW, επομένως η συνολική ικανότητα παραγωγής εκεί είναι 120MW. Στους ζυγούς 10, 11 και 12 εγκαταστάθηκαν 40, 50 και 30MW αντίστοιχα. Επιπλέον, υποτέθηκε αύξηση της

ικανότητας παραγωγής του ζυγού 2 έως 500MW και του ζυγού 3 έως 300MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής στο δίκτυο ανέρχεται στα 1740MW.

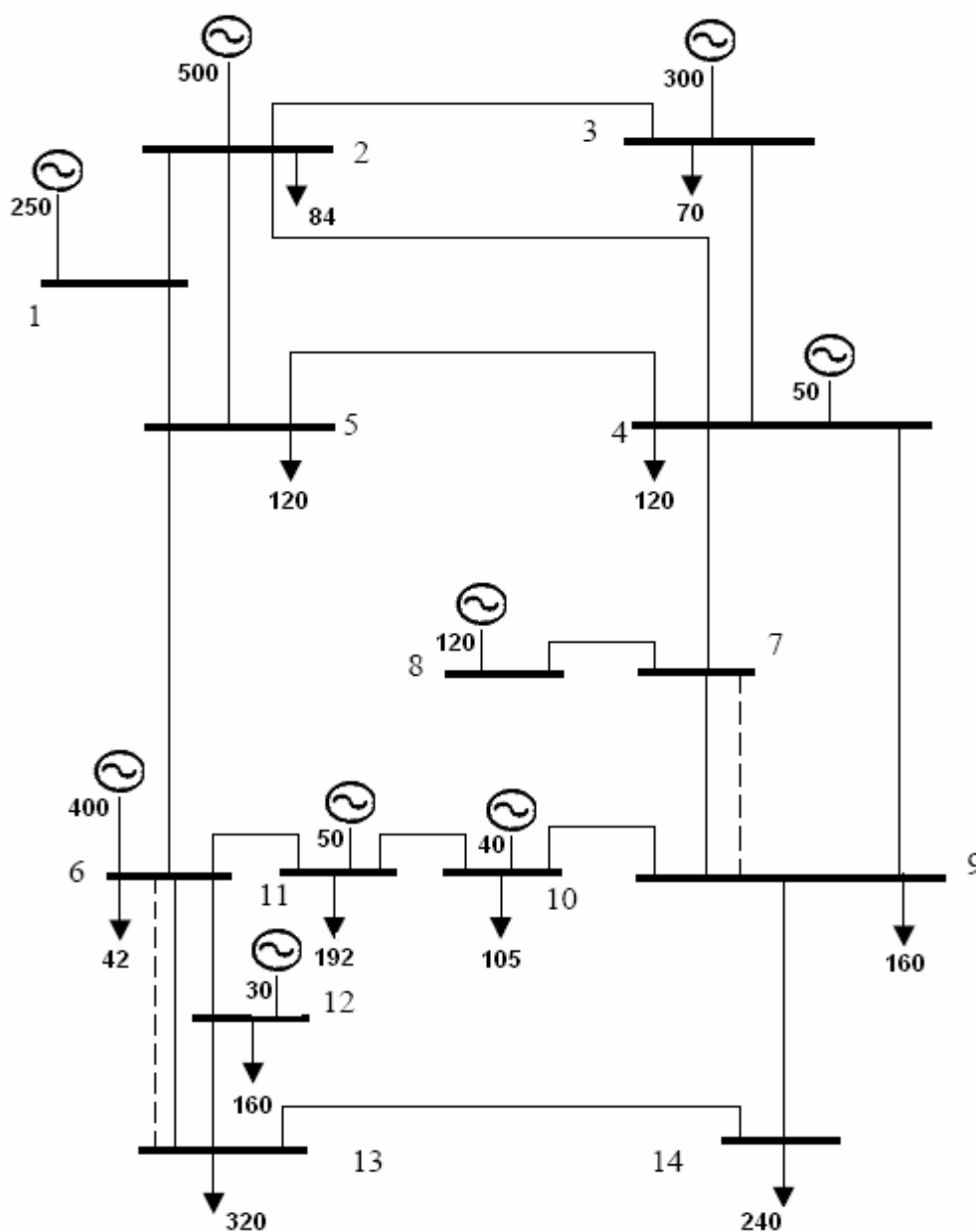
Στο σχήμα 6.17 φαίνονται οι μελλοντικές συνθήκες του συστήματος για το σενάριο της διεσπαρμένης παραγωγής, ενώ στους πίνακες 6.19 και 6.20 καθώς και στο σχήμα 6.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προγράμματος για τα προαναφερθέντα δεδομένα ύστερα από τις 5 επαναλήψεις του αλγορίθμου που απαιτήθηκαν για την ύπαρξη ροής ισχύος με μηδενική μη εξυπηρετούμενη ισχύ:



Σχήμα 6.17: Μελλοντικές συνθήκες του μοντέλου των 14 ζυγών της IEEE κατά το σενάριο 3

Κλάδος	Αριθμός γραμμών που μπήκαν στο δίκτυο
6-13	1
7-9	1
Συνολικό κόστος	2.968k€

Πίνακας 6.19: Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση του σεναρίου 3 για το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE



Σχήμα 6.18: Βέλτιστη λύση σεναρίου 3

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΤΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Από ζυγό	Στο ζυγό	Ροή ισχύος (MW)
1	5	169
2	4	200
2	5	200
3	4	200
4	7	200
4	9	179
5	4	49
5	6	200
6	11	68
6	12	90
6	13	400
7	9	320
8	7	120
9	10	139
9	14	200
10	11	74
13	12	40
13	14	40

Πίνακας 6.20: Ροή ισχύος στο τελικό δίκτυο του σεναρίου 3

Τα σενάρια επέκτασης του συστήματος παραγωγής που προηγήθηκαν, σχεδιάστηκαν και αυτά, έχοντας ως γνώμονα τη λογική μίας πιθανής επέκτασης που θα μπορούσε αναλογικά να εφαρμοστεί στο Ελληνικό σύστημα. Στο κεφάλαιο 7 που ακολουθεί θα γίνει μια συνολική και πιο αναλυτική αποτίμηση των παραπάνω αποτελεσμάτων του προγράμματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του τελευταίου αυτού κεφαλαίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αποτιμηθούν τα αποτελέσματα των σεναρίων που προσομοιώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη χρήση του προγράμματος επέκτασης δικτύου μεταφοράς που υλοποιήθηκε. Η λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του αλγορίθμου θα μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για την ορθότητα της μεθόδου και του προγράμματός μας συνολικά. Με δεδομένο αυτό, θα μπορέσουμε να αποτιμήσουμε και να συγκρίνουμε τα 3 σεναρία επέκτασης της παραγωγής που πραγματοποιήθηκαν στο δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE τόσο με οικονομικά όσο και με λειτουργικά κριτήρια. Τέλος, βασιζόμενοι στα συμπεράσματα της ανάλυσης των προσομοιώσεων, θα διατυπωθούν ορισμένες απόψεις για τη σωστότερη ανάπτυξη και επέκταση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Όπως είναι φανερό από τα κεφάλαια 4 και 5, όπου παρουσιάστηκε και αναλύθηκε διεξοδικά η διαδικασία της αποσύνθεσης Benders αλλά και οι παραλλαγές της που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα που τελικά υλοποιήθηκε, ο πιο σημαντικός κρίκος του αλγορίθμου είναι η επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτό (Benders cuts) αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου του υποπροβλήματος επένδυσης που καθορίζει τελικά ποιες γραμμές θα εγκατασταθούν στο δίκτυο.

Το πρόβλημα επένδυσης είναι ένα απλό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού που για τις ανάγκες του δικού μας προβλήματος μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού αφού ο αριθμός των νέων γραμμών μεταφοράς θα πρέπει να είναι πάντα ακέραιος. Στο υποπρόβλημα αυτό, η λύση που προκύπτει τελικά από τη μέθοδο simplex εξαρτάται αποκλειστικά από το κόστος εγκατάστασης των νέων γραμμών και συγκεκριμένα στο δίκτυο που εξετάστηκε, εγκαθίστανται οι πιο οικονομικές από τις γραμμές που έχουν “προταθεί” από το υποπρόβλημα λειτουργίας. Επίσης, όπως φαίνεται και από τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επένδυσης (5.12), ο αλγόριθμος, σε κάθε επανάληψη του προβλήματος προσπαθεί να εξισώσει τη μη εξυπηρετούμενη ισχύ που προκύπτει από την προηγούμενη επανάληψη του προβλήματος λειτουργίας, με την ικανότητα μεταφοράς ισχύος των νέων υποψήφιων γραμμών. Προσπαθεί δηλαδή η λύση σε κάθε επανάληψη, να προσφέρει νέες ικανότητες μεταφοράς ισχύος που να εξισορροπούν άμεσα την μη εξυπηρετούμενη ισχύ. Η ιδιαιτερότητα αυτή εμπεριέχει τον κίνδυνο στην τελική βέλτιστη λύση του συνολικού προβλήματος, να έχουν ήδη εγκατασταθεί νέες γραμμές που δε χρησιμοποιούνται στην τελευταία ροή που υπολογίζεται από το υποπρόβλημα λειτουργίας. Αυτές οι γραμμές βέβαια μπορούν να αγνοηθούν και το κόστος εγκατάστασης τους να

αφαιρεθεί από το συνολικό τελικό κόστος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς του προβλήματος, καθώς αυτές χρησιμοποιούνται μόνο σε μεταβατικά στάδια του αλγορίθμου.

Από την άλλη πλευρά, το υποπρόβλημα λειτουργίας, εφόσον υποθεθεί ότι πραγματοποιείται AC ανάλυση ροής, είναι ένα αρκετά περίπλοκο και μη γραμμικό πρόβλημα. Για αυτό στο υλοποιούμενο πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γραμμικοποιημένη ροή ισχύος (DC power flow) που μπορεί να επιλυθεί εύκολα με το γνωστή μέθοδο των δύο φάσεων της μεθόδου simplex. Η DC ροή ισχύος χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα στις μελέτες πραγματικών συστημάτων και στη διεθνή βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά η εύρεση της ροής ισχύος σε ένα δίκτυο με τη μέθοδο αυτή, και χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος, δεν είναι πάντα η βέλτιστη. Μπορεί παρόλα αυτά να δώσει μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικής ροής, ανάλογα φυσικά και με το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα και την εκτελούμενη εφαρμογή.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου simplex, όπως φαίνεται από την αντικειμενική συνάρτηση και του περιορισμούς του υποπροβλήματος λειτουργίας σύμφωνα με τη σχέση 5.11, προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τη μη εξυπηρετούμενη ισχύ σε κάθε ζυγό r_k μεγιστοποιώντας τη διαφορά φάσεως των τάσεων μεταξύ κάποιων ζυγών. Δηλαδή προσπαθεί να βρει μια βέλτιστη λύση μηδενικού μη εξυπηρετούμενου φορτίου όπου από τις γραμμές που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά της παραγόμενης ισχύος στα φορτία, περνάει όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύς. Η ιδιότητα αυτή μπορεί να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα από μια DC ροή ισχύος όπου λαμβάνουμε υπόψη και τις απώλειες των γραμμών, αλλά μας δείχνει ποιες γραμμές του δικτύου είναι οι πιο σημαντικές και προσφέρει έναν εναλλακτικό δρόμο μεταφοράς της ισχύος. Η ροή που τελικά βρίσκουμε δεν είναι η πιο οικονομική από πλευράς απωλειών ενέργειας αλλά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι εκμεταλλεύεται στο έπακρο τις δυνατότητες των γραμμών που χρησιμοποιεί. Είναι δηλαδή μια, κατά κάποιον τρόπο, έσχατη ροή ισχύος από την οποία προκύπτει μηδενικό μη εξυπηρετούμενο φορτίο στο δίκτυό μας. Όταν, στις επαναλήψεις του υποπροβλήματος λειτουργίας, προκύπτει μη εξυπηρετούμενη ισχύς σε κάποιους ζυγούς, τότε το πρόγραμμα προτείνει σαν υποψήφιες νέες γραμμές προς εγκατάσταση είτε εκείνες τις γραμμές που είναι κορεσμένες στη ροή ισχύος της συγκεκριμένης επανάληψης είτε νέες γραμμές που μπορούν να συνδέσουν δύο μη συνδεδεμένους μέχρι πρότινος ζυγούς. Στους ζυγούς αυτούς (ή σε έναν από τους ζυγούς) μπορεί να εμφανίζεται μη εξυπηρετούμενο φορτίο ή να υπάρχει περίσσεια ισχύος η οποία πρέπει να μεταφερθεί σε άλλους γειτονικούς ή μη προβληματικούς ζυγούς με απώτερο σκοπό να μηδενιστεί η συνολική μη εξυπηρετούμενη ισχύς.

Η πιθανή σύνδεση δύο μέχρι πρότινος μη συνδεδεμένων ζυγών θα πρέπει να εξασφαλίζεται από τις αρχικές συνθήκες που εμείς εισάγουμε στο πρόγραμμα. Δηλαδή στον αρχικό πίνακα αποστάσεων του δικτύου θα πρέπει να προϋπάρχει η τιμή του μήκους της πιθανής συνδετικής γραμμής (ή η τιμή της απόστασης μεταξύ των ζυγών) καθώς και στον πίνακα με τις ικανότητες μεταφοράς ισχύος των υποψήφιων γραμμών να υπάρχει καταγεγραμμένη η αναμενόμενη ικανότητα μεταφοράς της πιθανής αυτής γραμμής. Το ίδιο ισχύει και για έναν καινούριο ζυγό, ο οποίος δε συνδέεται αρχικά με κανέναν άλλο ζυγό του δικτύου. Πρέπει οι αποστάσεις των ζυγών μεταξύ των οποίων είναι δυνατή η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς καθώς και οι αντίστοιχες ικανότητες μεταφοράς τους να δηλώνονται στους κατάλληλους πίνακες.

Ο μέγιστος αριθμός γραμμών που μπορούν να εγκατασταθούν ανά κλάδο μπορεί να πάρει όποια τιμή θέλουμε, αρχικοποιώντας το αντίστοιχο διάνυσμα (N) του προγράμματός. Στο Ελληνικό δίκτυο υπάρχουν μέχρι και 4 γραμμές μεταφοράς (απλές ή διπλές) ανά κλάδο. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος στα σενάρια που εξετάστηκαν, για τους λόγους

αξιοπιστίας που αναφέραμε στο κεφάλαιο 6.2, τέθηκε ως μέγιστος αριθμός γραμμών μεταφοράς ανά κλάδο οι δύο γραμμές.

Τέλος όπως αναφέρθηκε στα κεφάλαια 5 και 6, οι τιμές της παραγωγής και της ζήτησης στους ζυγούς, αντιστοιχούν στις μέγιστες τιμές που μπορούν να παρουσιαστούν σε αυτούς. Εξυπηρετώντας κυρίως το κοινωνικό συμφέρον, θεωρήθηκε ότι δεν θα πρέπει να υπάρχει κανένας ζυγός που να μην τροφοδοτείται επαρκώς με ισχύ, οποιαδήποτε στιγμή του έτους. Έτσι λαμβάνουμε σαν τιμές ζήτησης στους εκάστοτε ζυγούς το μέγιστο φορτίο που μπορεί να εμφανιστεί σε αυτούς. Εναλλακτικά η μη εξυπηρετούμενη ισχύς που προκύπτει από κάθε επανάληψη θα μπορούσε να κοστολογηθεί (ανάλογα και με το ζυγό που αυτή εμφανίζεται) και να συγκριθεί με το κόστος εγκατάστασης νέων γραμμών που προκύπτουν από την επόμενη επανάληψη του αλγορίθμου. Άλλο ενδεχόμενο θα ήταν η μείωση της αιχμής του φορτίου σε κάποιους ζυγούς με την απαραίτητη βέβαια αποζημίωση ανάλογα και με το είδος του φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσαμε να αντιμετωπίσουμε και να υλοποιήσουμε εν μέρει προγράμματα διαχείρισης φορτίου (DSM), όπου το κόστος αποζημίωσης π.χ. θα υπολογίζονταν με βάση το κόστος εγκατάστασης γραμμών που τελικά δε θα κατασκευάζονταν. Οι τιμές παραγωγής αντιστοιχούν στις ικανότητες παραγωγής που είναι εγκατεστημένες και διαθέσιμες τη συγκεκριμένη αυτή στιγμή.

Έχοντας αναλύσει διεξοδικά τη συμπεριφορά του αλγορίθμου του προγράμματος που υλοποιήθηκε, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των σεναρίων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Το μοντέλο των 6 ζυγών του Garver συναντάται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία στις μελέτες προβλημάτων ανάπτυξης και επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ένα μικρό πειραματικό δίκτυο το οποίο μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την ορθότητα του αλγορίθμου μας αλλά και την επαλήθευση των ιδιοτήτων του. Το δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE είναι ένα μεσαίου μεγέθους, αρκετά αξιόπιστο, πειραματικό ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο μπορεί εν μέρει να θεωρηθεί ρεαλιστικό. Τα αποτελέσματα του προγράμματός μας σε αυτό το δίκτυο μπορούν να μας δώσουν πληροφορίες για την επέκταση του συστήματος μεταφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά την υλοποίηση διαφορετικών σεναρίων ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής του.

Το αρχικό μοντέλο του Garver αλλά και η μελλοντική ανάπτυξη της παραγωγής και της ζήτησης του δικτύου φαίνονται στα σχήματα 6.1 και 6.2 αντίστοιχα. Η κύρια παραγωγή ισχύος του συστήματος γίνεται στους ζυγούς 1 και 3, οι οποίοι εξυπηρετούν και ένα μικρό σχετικά φορτίο. Οι ζυγοί 2,4 και 5 αποτελούν το κυρίως φορτίο του δικτύου. Όλες οι τιμές της ζήτησης αντιστοιχούν σε τιμές αιχμής φορτίου. Αντίστοιχη διάταξη επικρατεί και στο δίκτυο των 14 ζυγών του οποίου βέβαια οι τιμές παραγωγής, ζήτησης και αποστάσεων ζυγών διαμορφώθηκαν με βάση το Ελληνικό σύστημα. Έτσι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.10, οι κύριοι ζυγοί παραγωγής του δικτύου είναι οι 1,2,3 και 6 οι οποίοι εξυπηρετούν και ένα μικρό φορτίο, με τους 3 πρώτους ζυγούς να βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του συστήματος. Η κύρια ζήτηση ισχύος είναι ανεξάρτητη της παραγωγής και βρίσκεται στους ζυγούς 4,5,9,10,11,12,13 και 14, με τους τελευταίους 5 ζυγούς να αποτελούν το κύριο φορτίο του

συστήματος το οποίο και είναι συγκεντρωμένο στο νότιο τμήμα του. Είναι φανερό ότι το δίκτυο των 14 ζυγών αντιπροσωπεύει πράγματι σε ένα βαθμό το Ελληνικό σύστημα (βλέπε κεφάλαιο 2).

ι. Συμπεράσματα για το μοντέλο του Garver και τη λειτουργία του προγράμματος

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα που βρέθηκαν για την ανάπτυξη του δικτύου μεταφοράς του μοντέλου του Garver, ύστερα από την εγκατάσταση νέας μεγάλης παραγωγής στο καινούριο ζυγό 6, είναι παρόμοια με αυτά άλλων εργασιών. Οι μόνες διαφορές εντοπίζονται στον αριθμό των νέων γραμμών που εγκαθίστανται ανά κλάδο. Πιο συγκεκριμένα το πρόγραμμα εγκατέστησε δύο νέες γραμμές μεταξύ των ζυγών 6-2 και μία μεταξύ των ζυγών 6-4, 3-2 και 3-5 ενώ στις άλλες εργασίες δεν υπάρχει διπλασιασμός της γραμμής 3-2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απαιτούμενη ισχύς για την εξυπηρέτηση των μεγάλων φορτίων στους ζυγούς 2 και 4 καλύπτεται με την εγκατάσταση περισσότερων των 2 γραμμών ανά κλάδο μεταξύ των ζυγών 6 και 2.

Η εγκατάσταση μιας τόσο μεγάλης παραγωγής στο ζυγό 6 (600MW) αναγκάζει εκ των πραγμάτων το πρόγραμμα να συνδέσει αυτήν την παραγωγή με κάποια από τα φορτία, αφού η παραγωγή στους ζυγούς 1 και 3 δεν είναι αρκετή για την εξυπηρέτηση όλου του φορτίου. Το συνολικό φορτίο του συστήματος είναι 760MW ενώ η συνολική ικανότητα παραγωγής του γίνεται 1110MW. Παρόλα αυτά στην τελική ροή που φαίνεται στον πίνακα 6.3, η simplex δε χρησιμοποίησε όλη την ικανότητα παραγωγής του ζυγού 6 (που είναι 300MW ύστερα από τη σύνδεση τριών συνολικά γραμμών μεταφοράς με ικανότητα μεταφοράς 100MW η καθεμία), εν αντιθέσει με τους ζυγούς 1 και 3 που παρέχουν όλη την ισχύ που παράγουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ των ζυγών 3 και 2 είναι μικρότερη από αυτήν μεταξύ των ζυγών 6 και 2 και το πρόγραμμα επιλέγει να τροφοδοτήσει το ζυγό 2 με όσο το δυνατόν περισσότερη ισχύ από το ζυγό 3. Ο ζυγός 3 βέβαια, εκτός από την τοπική ζήτηση των 40MW που εξυπηρετεί, τροφοδοτεί και το φορτίο στο ζυγό 5 μαζί με την παραγωγή του ζυγού 1.

Πιο αναλυτικά, η λογική του αλγορίθμου είναι να προσπαθεί να μηδενίσει τη μη εξυπηρετούμενη ισχύ σε κάθε ζυγό, μεταφέροντας την παραγόμενη ή την αφιχθείσα από άλλους ζυγούς ισχύ στους πιο κοντινούς σε αυτούς ζυγούς εκμεταλλευόμενος όσο γίνεται την ικανότητα μεταφοράς των γραμμών. Έτσι ξεκινώντας από το ζυγό 1, η περισσευούμενη ισχύς του ζυγού, που ισούται βέβαια με τη διαφορά της ζήτησης από την παραγωγή του, είναι 70MW, τα οποία και πηγαίνουν στο ζυγό 5, ο οποίος είναι πιο κοντά από το ζυγό 2. Ο ζυγός 5 έχει φορτίο 240MW. Επομένως χρειάζεται αναγκαστικά άλλα 170MW από το ζυγό 3 για να εξυπηρετηθεί όλο του το φορτίο, τα οποία και λαμβάνει ύστερα από το διπλασιασμό της γραμμής 3-5. Ο ζυγός 3, μπορεί να παράγει μέχρι 360MW. Αφαιρώντας το τοπικό φορτίο των 40MW, μένουν άλλα 150MW για την τροφοδοσία του ζυγού 2. Για το λόγο που αναφέραμε προηγουμένως, αυτά τα 150MW καταλήγουν πράγματι στο συγκεκριμένο ζυγό. Ο ζυγός 2 χρειάζεται άλλα 90MW για την κάλυψη του φορτίου του, τα οποία μπορεί να πάρει είτε απευθείας από το ζυγό 6 είτε έμμεσα από το ζυγό 4. Αντιθέτως ο ζυγός 4, με το φορτίο των 160MW το οποίο έχει, δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από έναν και μόνο ζυγό αφού οι γραμμές 2-4 και 6-4 έχουν ικανότητα μεταφοράς 100MW η καθεμία. Για αυτό το λόγο τα 100MW μεταφέρονται από την πιο μικρή γραμμή, την 6-4, ενώ τα υπόλοιπα 60MW μεταφέρονται μέσω των γραμμών 6-2 και 2-4 από τον ζυγό 6. Έτσι τελικά από τη γραμμή 6-2 περνάνε τα 90MW που χρειάζονται για το ζυγό 2 και τα 60MW που προορίζονται για το

ζυγό 4. Το συνολικό μη εξυπηρετούμενο φορτίο είναι μηδενικό σε κάθε ζυγό, ενώ από το ζυγό 6 παράγονται τελικά 250MW.

Αυτή είναι η φιλοσοφία και η διαδικασία που ακολουθεί ο αλγόριθμος κατά την εκτέλεση του υποπροβλήματος λειτουργίας του προγράμματος, αφού έχουν εγκατασταθεί όσες γραμμές υπολογίζει το προηγούμενο πρόβλημα επένδυσης. Φυσικά, όταν οι εγκατεστημένες γραμμές στο δίκτυο δεν επαρκούν για τη μεταφορά της παραγωγής στα φορτία, τότε αναγκαστικά σε κάποιους ζυγούς εμφανίζεται μη εξυπηρετούμενη ισχύς. Για παράδειγμα, κατά την πρώτη επίλυση του υποπροβλήματος λειτουργίας του αλγορίθμου για το μοντέλο του Garver, τα φορτία των ζυγών 1 και 2 δεν εξυπηρετούνται καθόλου ενώ στους ζυγούς 4 και 5 υπάρχει μη εξυπηρετούμενη ισχύς 10 και 40MW αντίστοιχα. Ακολουθώντας τη συλλογιστική της προηγούμενης παραγράφου συμπεραίνουμε ότι τα παραγόμενα 150MW του ζυγού 1 μοιράζονται στις γραμμές 1-5 και 1-4 με τη μικρότερη γραμμή (1-5) να μεταφέρει και την περισσότερη ισχύ (100MW), που είναι και η μέγιστη ικανότητά της σε μεταφοράς ισχύος. Από τα 360MW που μπορούν να παραχθούν στο ζυγό 3, μόνο τα 200MW μπορούν να μεταφερθούν εφόσον τόση είναι και η συνολική ικανότητα μεταφοράς των γραμμών 3-2 και 3-5. Τα 100MW που πηγαίνουν στο ζυγό 2, μεταφέρονται στο ζυγό 4, αφού όπως έχουμε πει το πρόγραμμα προσπαθεί πρωταρχικά να μεταφέρει την αφιχθείσα ισχύ κάποιου ζυγού σε γειτονικούς σε αυτόν ζυγούς. Αυτό είναι ίσως και ένα από τα ελαττώματα του αλγορίθμου αυτού. Η συνολική μη εξυπηρετούμενη ισχύς στο δίκτυο είναι 370MW. Από τις υποψήφιες γραμμές που προκύπτουν μέσω των Benders cuts, επιλέγονται από την πρώτη επανάληψη του υποπροβλήματος επένδυσης οι πιο οικονομικές γραμμές 3-2, 3-5 και 6-2, που λόγω της ικανότητας μεταφοράς τους είναι πιθανό να μπορέσουν να μεταφέρουν άλλα 300MW από την παραγωγή στα φορτία. Δηλαδή κατά τη δεύτερη επανάληψη του αλγορίθμου θα αναμέναμε συνολική μη εξυπηρετούμενη ισχύς 70MW. Όμως η μία γραμμή μεταξύ των ζυγών 6 και 2 δεν επαρκεί τελικά για την κάλυψη των επιπλέον αναγκών σε ισχύ του δικτύου, οι οποίες μπορούν να καλυφθούν μόνο από το ζυγό 6. Με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε προηγουμένως μπορούμε εύκολα να επαληθεύσουμε ότι η μη εξυπηρετούμενη ισχύς στο δίκτυο κατά την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου θα είναι συνολικά 150MW: τα 80MW στο ζυγό 1 και τα 70MW στο ζυγό 2. Ακολουθεί η δεύτερη επίλυση του υποπροβλήματος επένδυσης όπου επιλέγεται για εγκατάσταση η γραμμή 6-2. Αυτή μας οδηγεί στην επίλυση του προβλήματος λειτουργίας με τελική λύση την ύπαρξη 80MW μη εξυπηρετούμενη ισχύος στο ζυγό 1. Στη συνέχεια, στην τρίτη επανάληψη του αλγορίθμου επιλέγεται η γραμμή 6-4 και καταλήγουμε στη ροή ισχύος που παρουσιάστηκε στον πίνακα 6.3 και αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Από την αναλυτική παρουσίαση της λειτουργίας του προγράμματός μας που προηγήθηκε, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι επαληθεύονται όλες οι ιδιότητες του αλγορίθμου που αναπτύχθηκαν στα κεφάλαια 4.6, 5, 6 και 7.2. Έτσι στη συνέχεια θα εστιάσουμε την ανάλυσή μας στην επεξεργασία και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του προγράμματος για τα διάφορα σενάρια επέκτασης της παραγωγής του συστήματος.

Όπως είδαμε στον πίνακα 6.2 και αναλύσαμε πιο πάνω, στην τελική λύση του μοντέλου του Garver μπήκαν συνολικά 5 νέες γραμμές με τελικό κόστος 130.000€. Θεωρήθηκε ενδιαφέρον να παρατηρηθεί η επέκταση του δικτύου μεταφοράς χωρίς την ύπαρξη της μεγάλης παραγωγής στο ζυγό 6, αυξάνοντας την παραγωγή στους ζυγούς παραγωγής 1 και 3 στα 240 και στα 600MW αντίστοιχα. Το συνολικό φορτίο παρέμεινε στα 760MW ενώ η παραγωγή είναι τώρα στα 840MW. Αυτό έχει σα συνέπεια τη δημιουργία νέων δρόμων στην τελική λύση για τη ροή της ισχύος από τη παραγωγή στο φορτίο. Έτσι αντί για τις δύο γραμμές μεταξύ των ζυγών 6-2, και τη γραμμή 6-4, στην παραλλαγή του μοντέλου του Garver δημιουργούνται οι νέες γραμμές 1-3 και 2-5. Το συνολικό κόστος της παραπάνω επέκτασης ήταν 109.000€. Μέσω αυτών των δύο νέων γραμμών η αυξημένη

ισχύς των ζυγών 1 και 3 μπορεί να μεταφερθεί στα μεγάλα φορτία των ζυγών 2 και 5. Από την τελική ροή ισχύος του πίνακα 6.5, βλέπουμε ότι η παραγωγή του ζυγού 1 ενισχύεται από την παραγωγή του ζυγού 3 μέσω της καινούργιας γραμμής 3-1. Η γραμμή αυτή συνεισφέρει και στη συνολική αξιοπιστία του συστήματός μας. Ο ζυγός 1 τροφοδοτεί και τους άλλους τρεις ζυγούς (2,4,5) με τους οποίους συνδέεται χρησιμοποιώντας και τα 240MW της εγκατεστημένης του ισχύος. Από το ζυγό 3 αναχωρούν τα 520 από τα 600MW της συνολικής ικανότητας παραγωγής του προς τους ζυγούς 1,2 και 5. Ο ζυγός 3 τροφοδοτεί έμμεσα και το ζυγό 4 μέσω της διασυνδετικής γραμμής 2-4. Βλέπουμε δηλαδή ότι όλα τα φορτία των ζυγών τροφοδοτούνται συγχρόνως και από τις δύο μεγάλες μονάδες παραγωγής των ζυγών 1 και 3. Οι βρόχοι αυτοί βοηθάνε σημαντικά, όπως ήδη ειπώθηκε, στην αξιοπιστία του δικτύου μας. Παρόλα αυτά, η ύπαρξη δύο μόνο μεγάλων μονάδων παραγωγής μειώνει τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος, καθώς κατά την περίπτωση απώλειας μίας από αυτές, η εφεδρεία του συστήματος μπορεί να είναι ανεπαρκής για την κάλυψη της ζήτησης. Για αυτό στη συνέχεια θα θεωρηθεί μια μικρή παραγωγή στο ζυγό 6, η οποία θα προσφέρει τους νέους αυτούς δρόμους που ίσως χρειάζεται το σύστημα για την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων.

Στο σημείο αυτό, θα πρέπει παρενθετικά, να επισημανθεί το γεγονός ότι στο τελικό κόστος επέκτασης του δικτύου δε συμπεριλαμβάνεται φυσικά το κόστος αύξησης της ικανότητας παραγωγής των μονάδων αλλά και ούτε το κόστος κατασκευής καινούριων ζυγών. Αυτά τα κόστη θεωρήθηκε ότι επιβαρύνουν τους ιδιώτες παραγωγούς και όχι το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς. Έτσι η παραλλαγή του μοντέλου του Garver είναι τελικά πιο οικονομική από το απλό μοντέλο όσον αφορά την επέκταση του δικτύου μεταφοράς. Αυτό όμως δεν πρέπει να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η ενίσχυση της συμβατικής και ήδη εγκατεστημένης παραγωγής είναι πιο οικονομική από την εγκατάσταση μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής κοντά στο μεγάλο φορτίο, γεγονός το οποίο θα καταδειχθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου. Ο ζυγός παραγωγής 3 είναι πιο κοντά στους ζυγούς 2 και 5 και επομένως η εγκατάσταση μεγάλης παραγωγής στον πιο απομακρυσμένο ζυγό 6 δε βοηθάει στην εξεύρεση μιας πιο οικονομικής λύσης. Αν ο ζυγός 6 βρισκόταν πιο κοντά στο ζυγό 2 ή στο ζυγό 5 τότε σίγουρα στην πρώτη περίπτωση θα παρουσιαζόταν μια πιο συμφέρουσα λύση.

Η νέα μικρή ικανότητα παραγωγής του ζυγού 6, είναι πολύ σημαντική για την επέκταση του δικτύου μεταφοράς όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.6. Η εγκατάσταση παραγωγής 60MW οδηγεί στην κατασκευή τεσσάρων νέων γραμμών (1-3,2-3,2-6,3-5) με συνολικό κόστος 108.000€ ενώ η εγκατάσταση λίγο μεγαλύτερης παραγωγής, 80MW, κάνει το δίκτυο λειτουργικό χωρίς την επιπλέον κατασκευή της γραμμής 1-3, με τελικό κόστος 70.000€. Παρατηρούμε ότι πλέον δεν είναι αναγκαία η δημιουργία της γραμμής 2-5 αφού τα μεταφερόμενα 60MW από τη γραμμή αυτή καλύπτονται από την παραγωγή του νέου ζυγού 6. Από τον πίνακα 6.7 της τελικής ροής για την παραλλαγή του μοντέλου του Garver με μικρή παραγωγή στο ζυγό 6, βλέπουμε ότι όταν η μικρή παραγωγή είναι 60MW η νέα γραμμή 3-1 ενισχύει κατά 20MW την παραγωγή του ζυγού 1. Έτσι αν θεωρηθεί παραγωγή 80MW στο ζυγό 6, η γραμμή 3-1 δεν είναι αναγκαία, καθώς τα 20MW της γραμμής 3-1 που χρειάζονταν ουσιαστικά για την τροφοδότηση του ζυγού 2, παρέχονται πλέον από το ζυγό 6.

Θεωρώντας ότι η παραγωγή στους εκάστοτε ζυγούς είναι δεδομένη, η πιο συμφέρουσα οικονομική αλλά και λειτουργική λύση για τα διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς είναι η εγκατάσταση ισχύος μεγαλύτερης ή ίσης των 80MW στο ζυγό 6 στην παραλλαγή του μοντέλου του Garver. Αυτό βέβαια αν είναι δυνατή η αύξηση της ικανότητας παραγωγής των ζυγών 1 και 3. Είναι φανερό ότι με έναν πιο προσεκτικό σχεδιασμό του συστήματος παραγωγής μπορούμε να μειώσουμε το κόστος της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς. Η εγκατάσταση 600MW στο ζυγό 6 μας δίνει σίγουρα ένα νέο πολύ ισχυρό ζυγό

παραγωγής αλλά όπως είδαμε στην τελική ροή, χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 250MW. Επομένως χρειάζεται μια πιο προσεκτική επιλογή της θέσης εγκατάστασης της νέας μεγάλης παραγωγής (πιο κοντά στο μεγάλο φορτίο) όσο και της αναγκαίας ικανότητας παραγωγής της.

Θέλοντας να εξακριβώσουμε αν η επιλογή της χρησιμοποίησης μιας κοινής γραμμής μεταφοράς σε όλες τις παλιές και νέες συνδέσεις ζυγών είναι σωστή, επανεκτελέσαμε το αρχικό μοντέλο του Garver. Σε αυτό το τελευταίο σενάριο βλέπουμε ότι η επιλογή αυτή δεν οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα αρκεί να διπλασιαστούν οι τιμές παραγωγής και φορτίου σε όλους τους ζυγούς. Πράγματι στο διπλασιασμένο μοντέλο του Garver, οι γραμμές που τελικά εισέρχονται στο δίκτυο είναι οι ίδιες με αυτές που βρήκαμε για το αρχικό μοντέλο. Οι ροές πάνω στις γραμμές είναι λίγο διαφορετικές αλλά αυτό δεν μπορεί να μας οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η χρησιμοποίηση της συγκεκριμένης γραμμής δεν είναι ορθή, αφού οι ίδιοι ζυγοί τροφοδοτούν τα ίδια φορτία μέσω των ίδιων γραμμών. Επομένως στο δίκτυο των 14 ζυγών, χάριν καλύτερης εποπτείας των τελικών αλλά και των μεταβατικών αποτελεσμάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της γραμμής της οποίας τα χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα 6.8.

ii. Συμπεράσματα για τα αποτελέσματα στο δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE

Το δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE το οποίο παρουσιάστηκε στο σχήμα 6.10, διαμορφώθηκε έτσι ώστε να μπορεί να προσεγγίζει ορισμένα στοιχεία του Ελληνικού συστήματος παραγωγής και μεταφοράς. Η κύρια παραγωγή βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του δικτύου (ζυγοί 1,2,3) ενώ το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου βρίσκεται στο νότιο τμήμα του (ζυγοί 9,11,12,13,14), και γενικά αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την κεντρική παραγωγή. Η μόνη παραγωγή που βρίσκεται σχετικά κοντά στο φορτίο είναι η παραγωγή του ζυγού 6. Οι γραμμές μεταφοράς που υποτέθηκαν είναι μονές και με πολύ μεγάλο μήκος. Έτσι οι αρχικές συνθήκες του συστήματος δίνουν σε αυτό συνολική ικανότητα παραγωγής 1330MW και μέγιστο φορτίο 1040MW.

Από τη dc ροή ισχύος που πραγματοποιήθηκε για τις αρχικές συνθήκες του δικτύου βρέθηκαν τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 6.14. Από αυτά φαίνεται ότι από την παραγωγή των 400MW του ζυγού 6 τροφοδοτούνται αποκλειστικά οι ζυγοί 12 και 13 και εν μέρει ο ζυγός 11. Οι υπόλοιποι ζυγοί εξυπηρετούνται από την ισχύ που παράγεται στους ζυγούς 1, 2, 3 και 8. Ο ζυγός 1 παράγει 60MW τα οποία ενισχύουν την παραγωγή του ζυγού 2. Ο ζυγός 2 βρίσκεται πιο κοντά στους ζυγούς 4 και 5 από ότι οι ζυγοί 3 και 1 αντίστοιχα και έτσι το πρόγραμμα προτιμά την πλήρη αξιοποίηση της δυνατότητας παραγωγής και μεταφοράς από τον συγκεκριμένο ζυγό. Ο ζυγός 3 παρέχει άλλα 100MW στο ζυγό 4. Η ισχύ που περισσεύει μετά την εξυπηρέτηση του φορτίου στο ζυγό 5 πηγαίνει και αυτή στο ζυγό 4 αφού η γραμμή 5-4 είναι μικρότερου μήκους από τη γραμμή 5-6. Η συνολική παραγόμενη ισχύς που καταλήγει στο ζυγό 4 είναι 420MW η οποία τροφοδοτεί μαζί και με τη μικρή παραγωγή του ζυγού 8 (30MW) το φορτίο στους ζυγούς 4,9,10,14 και εν μέρει στο ζυγό 11 (50MW). Βλέπουμε ότι το πρόγραμμά μας επιλέγει να μη χρησιμοποιήσει καθόλου τη διασυνδετική γραμμή 5-6 και προτιμά να ισχυροποιήσει αρκετά τους ζυγούς 4 και 9. Πρέπει να τονιστεί ότι οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών, οι οποίες και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη ροή της τελικής ισχύος, είναι βασισμένες στην προσέγγιση του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Τέλος είναι φανερό ότι το πρόγραμμα επιλέγει να χρησιμοποιεί τους ζυγούς παραγωγής που βρίσκονται πιο κοντά στη ζήτηση για την

τροφοδότηση των αντίστοιχων φορτίων, γεγονός το οποίο είναι ρεαλιστικό, αλλά και μας βοηθάει στο σχεδιασμό των σεναρίων που εξετάστηκαν.

Στο σενάριο 1, εξετάσαμε την επίδραση που θα έχει στο σύστημα μεταφοράς του δικτύου μας η ενίσχυση της απομακρυσμένης παραγωγής του για την κάλυψη του μελλοντικού φορτίου του. Η αιχμή του μελλοντικού φορτίου είναι 1613MW και οι τιμές του ανά ζυγό φαίνονται στο σχήμα 6.11. Η αύξηση της συμβατικής μας παραγωγής στους ζυγούς 1, 2 και 3 φαίνεται επίσης στο σχήμα 6.11. Η ικανότητα παραγωγή ισχύος στο ζυγό 2 αυξάνεται στα 600MW, στο ζυγό 3 γίνεται 400MW ενώ στο ζυγό 1, 300MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής του συστήματος ανέρχεται πλέον στα 1730MW. Τα αποτελέσματα του προγράμματος παρατίθενται στους πίνακες 6.15 και 6.16. Από αυτά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πρόγραμμα αυτή τη φορά χρησιμοποίησε σχεδόν όλες τις γραμμές που ήταν διαθέσιμες αλλά πλέον εκτός από τους ζυγούς 4 και 7, ισχυροποίησε και το ζυγό 5. Ο ζυγός 2, για το λόγο που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, παρέχει στους διασυνδεδεμένους ζυγούς όλη την ισχύ του, ενώ ενισχύεται και από το ζυγό 1 μέσω της γραμμής 1-2.

Η μεγάλη αύξηση της απομακρυσμένη παραγωγής, όπως ήταν αναμενόμενο, αναγκάζει το πρόγραμμα να διπλασιάσει τις γραμμές 2-5,4-7 και 7-9 για τη μεταφορά της στο νότιο τμήμα του δικτύου. Η παραγωγή στο ζυγό 6, δεν επαρκεί πλέον για την κάλυψη των φορτίων στους ζυγούς 6, 12 και 13 και για αυτό ενισχύεται από την παραγωγή που περισσεύει από το ζυγό 5. Έτσι για τη μεταφορά της τεράστιας ισχύος των 320MW στο ζυγό 13, προτιμάται ο διπλασιασμός της πιο μικρής γραμμής 6-13, από το διπλασιασμό των γραμμών 6-12 και 12-13. Τα 78MW που περισσεύουν από το ζυγό 6, ύστερα από την τροφοδότηση των ζυγών 6,12 και 13, πηγαίνουν στο ζυγό 11. Η ισχύς αυτή χρειάζεται σημαντική ενίσχυση από την άλλη πλευρά του δικτύου και συγκεκριμένα από το ζυγό 9. Επομένως το πρόγραμμα προτείνει το διπλασιασμό της γραμμής 9-10. Το συνολικό κόστος της επέκτασης ανέρχεται στα 11.077k€. Το τελικό δίκτυο που προκύπτει είναι αρκετά δυνατό αλλά ο βαθμός αξιοπιστίας του περιορίζεται σημαντικά από το γεγονός ότι οι μονάδες παραγωγής βρίσκονται πολύ μακριά από το πολύ φορτίο.

Αυτός ήταν άλλωστε και ο λόγος της υλοποίησης του 2^{ου} σεναρίου. Σε αυτό υποθέσαμε ότι στον αρκετά ισχυρό, από την πλευρά της συγκέντρωσης ισχύος από άλλους ζυγούς, ζυγό 9 εγκαθίσταται μια μεγάλη μονάδα παραγωγής ενώ η απομακρυσμένη παραγωγή αυξάνεται λίγο, κυρίως για λόγους ασφάλειας. Αυτή η μονάδα είναι αρκετά κοντά στο μεγάλο φορτίο των ζυγών 9,10 και 14 και αναμένεται να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες τους.

Από τα αποτελέσματα του προγράμματός μας, που παρουσιάστηκαν στους πίνακες 6.17 και 6.18, η παραπάνω υπόθεσή μας επαληθεύτηκε. Ο διπλασιασμός των γραμμών 2-5 και 4-7 δεν είναι απαραίτητος αφού η αναγκαία παραγόμενη ισχύς δε χρειάζεται πλέον να μεταφερθεί από το βόρειο τμήμα του δικτύου στο νότιο. Το 2^ο αυτό σενάριο εκτελέστηκε με δύο μικρές παραλλαγές. Στην πρώτη θεωρήσαμε ότι η καινούρια παραγωγή στο ζυγό 9 είναι αρκετά μεγάλη (400MW) και καμία άλλη ικανότητα παραγωγής δεν αυξάνεται. Στη δεύτερη, η εγκατάσταση παραγωγής στο ζυγό 9 ήταν λίγο μικρότερη (300MW) ενώ άλλα 150MW προστέθηκαν στους ζυγούς 2 και 3 (100 και 50 MW αντίστοιχα). Στο σενάριο 2α, χρειάστηκε η εγκατάσταση μόλις δύο γραμμών (6-13 και 9-10) για την ύπαρξη ροής ισχύος με μηδενική μη εξυπηρετούμενη ισχύ με τελικό κόστος εγκατάστασης 2.809k€. Αντίθετα, στο σενάριο 2β χρειάστηκε και η προσθήκη μιας επιπλέον γραμμής (7-9) με αποτέλεσμα το συνολικό κόστος να αυξηθεί στα 4.187k€.

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού δείχνουν πόσο σημαντική είναι η ύπαρξη μεγάλης παραγωγής κοντά στη μεγάλη ζήτηση. Πολύ σημαντική βέβαια είναι και η θέση της

νέας παραγωγής, αφού μια πιθανή εγκατάσταση στο ζυγό 6 ή 11 θα είχε σαν αποτέλεσμα την ανάγκη διπλασιασμού περισσότερων γραμμών μεταφοράς. Συμπεραίνουμε ότι το κόστος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς είναι μικρότερο όταν η αναγκαία αύξηση της παραγωγής πραγματοποιείται κοντά στην ύπαρξη του μεγάλου φορτίου του συστήματος και σε ισχυρό ζυγό του δικτύου, από όταν η αύξηση αυτή γίνεται στις απομακρυσμένες μονάδες παραγωγής. Το συμπέρασμα αυτό ήταν προβλεπόμενο αλλά επαληθεύτηκε και από το πρόγραμμα επέκτασης δικτύου μεταφοράς που υλοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι τελικές ροές ισχύος των δύο παραλλαγών του 2^{ου} σεναρίου παρατίθενται στον πίνακα 6.18. Από αυτές φαίνονται πως στο μεν σενάριο 2α οι ζυγοί παραγωγής 2,3,6,8 και 9 εξαντλούν την ικανότητα παραγωγής τους και ο ζυγός 1 συνεισφέρει 133MW, ενώ στο σενάριο 2β οι ζυγοί 6,8 και 9 (που βρίσκονται στο νότιο τμήμα του δικτύου) παράγουν το σύνολο της ικανότητας παραγωγής τους και οι ζυγοί 1,2 και 3 παράγουν 129MW, 484MW και 270MW αντίστοιχα.

Σαν εναλλακτικό τρόπο ελάττωσης του κόστους επέκτασης του συστήματος μεταφοράς υπό συγκεκριμένη στρατηγική ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής, θεωρήσαμε την αντιμετώπιση της αύξησης του φορτίου μέσω της εγκατάστασης ισχυρής διεσπαρμένης παραγωγής. Η πολιτική αυτή φαίνεται να κερδίζει έδαφος στη διεθνή βιβλιογραφία αφού μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με εναλλακτικές μορφές ενέργειας (όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των μικροδικτύων). Η ικανότητα παραγωγής ισχύος ανά πάσα στιγμή από τέτοιες πηγές δεν μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ως σταθερή. Παρόλα αυτά, στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι τιμές παραγωγής που αναγράφονται δίπλα στους ζυγούς στο σχήμα 6.18 αντιστοιχούν στην πραγματική μέγιστη ικανότητα των συγκεκριμένων μονάδων, καθώς αυτό το μέγεθος χρησιμοποιείται κατά τις μελέτες επέκτασης δικτύων σε διεθνές επίπεδο. Επομένως στο σενάριο 3, προσπαθήσαμε να υποκαταστήσουμε την εγκατάσταση μεγάλης μονάδας σε ένα ζυγό με την εγκατάσταση πολλών μικρότερων μονάδων σε διάφορους ζυγούς.

Η συνολική ικανότητα παραγωγής σε αυτό το σενάριο (μαζί με τη μικρή αύξηση της παραγωγής στους ζυγούς 2 και 3) είναι σχεδόν η ίδια με αυτή των σεναρίων 1 και 2α (1740MW). Το δίκτυο όμως είναι φανερά πιο ισορροπημένο, αφού η ύπαρξη πολλών μικρών παραγωγών δίνει πολλές διεξόδους στην ισχύ και μειώνει τη συμφόρηση στις γραμμές. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην είναι αναγκαία η εγκατάσταση πολλών νέων γραμμών μεταφοράς στο σύστημα. Η πρόταση αυτή επιβεβαιώνεται και από τον αλγόριθμό μας.

Τα αποτελέσματα των πινάκων 6.19 και 6.20 δείχνουν ότι το δίκτυο έρχεται σε ισορροπία (μηδενικό μη εξυπηρετούμενο φορτίο) με την εγκατάσταση μόλις δύο νέων γραμμών. Η πρώτη γραμμή, 6-13, φτιάχνεται για την ικανοποίηση των αναγκών του μεγαλύτερου ζυγού ζήτησης (ζυγός 13) ενώ η δεύτερη, 7-9, φτιάχνεται για να ενισχύσει την νοτιοανατολική πλευρά του δικτύου (ζυγοί 7,9,14), στην οποία δεν έχουμε υποθέσει καθόλου νέα παραγωγή. Το κόστος εγκατάστασης αυτών των δύο γραμμών είναι 2.968k€ και είναι λίγο μεγαλύτερο από το κόστος που υπολογίσαμε στο σενάριο 2α. Από την τελική ροή του σεναρίου 3, μπορούμε να δούμε πως όλες οι καινούριες μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και οι μονάδες στους ζυγούς 6 και 8 παράγουν ισχύ ίση με τις ικανότητες παραγωγής τους. Δηλαδή επαληθεύεται ότι για την κάλυψη των αναγκών των ζυγών προτιμάται η παραγωγή που βρίσκεται όσο γίνεται πιο κοντά σε αυτούς. Οι ζυγοί 1,2 και 3 παράγουν 169MW, 484MW και 270MW αντίστοιχα.

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα των τεσσάρων σεναρίων που υλοποιήθηκαν στο δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η γραμμή 6-13 ήταν αναγκαία σε όλα τα σενάρια τα οποία υλοποιήθηκαν εξαιτίας κυρίως της

τεράστιας ανάγκης σε ισχύ του ζυγού 13 ο οποίος και έχει το μεγαλύτερο φορτίο από όλους τους άλλους ζυγούς. Οι γραμμές 7-9 και 9-10 εμφανίστηκαν είτε μαζί είτε ξεχωριστά σε όλα επίσης τα σενάρια αφού, για τις υφιστάμενες αποστάσεις μεταξύ των ζυγών, το πρόγραμμα αποφάσισε ότι η ανατολική πλευρά του δικτύου μας είναι αυτή που πρέπει να ενισχυθεί με νέες γραμμές μεταφοράς.

Συμπερασματικά, η πιο οικονομική λύση για την επέκταση του δικτύου μεταφοράς και μόνο, είναι αυτή του σεναρίου 2α ακολουθούμενη από αυτή του σεναρίου 3. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα έπαιξε η τοποθέτηση της μεγάλης παραγωγής των 400MW του σεναρίου 2α στο ζυγό 9. Οποιαδήποτε άλλη επιλογή θα οδηγούσε σε πιθανή εγκατάσταση περισσότερων γραμμών στο δίκτυό μας, πράγμα που φαίνεται και από τα αποτελέσματα του σεναρίου 2β. Όμως, και στα τέσσερα σενάρια που υλοποιήθηκαν, έγινε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθούν οι αποφάσεις για την αύξηση της παραγωγής στους εκάστοτε ζυγούς σύμφωνα πάντα και με τη στρατηγική που ακολουθείται κάθε φορά.

Το σενάριο 1 αποτελεί το πιο αντιοικονομικό από τα τέσσερα σενάρια όσον αφορά την επέκταση του δικτύου μεταφοράς. Μπορεί η αύξηση της ικανότητας παραγωγής των ζυγών 1,2 και 3 να είναι εν τέλει πιο οικονομική από την εγκατάσταση μεγάλης μονάδας στο ζυγό 9 ή την εγκατάσταση διεσπαρμένης παραγωγής σε διάφορους ζυγούς αλλά η πολιτική αυτή έχει πάρα πολλά μειονεκτήματα. Χρειάζονται συνολικά 5 νέες γραμμές μεταφοράς για την χωρίς αποκοπή φορτίου λειτουργία του, ενώ διαιωνίζεται και το πρόβλημα της ανομοιομορφίας μεταξύ παραγωγής (στο βόρειο τμήμα του δικτύου) και του συγκεντρωμένου φορτίου (στο νότιο τμήμα του).

Από την τελική ροή του σεναρίου 3, είναι φανερό πως η ισχύς που μεταφέρεται μέσω των γραμμών μεταφοράς είναι μικρότερη από όλα τα άλλα σενάρια. Αυτό έχει φυσικά σαν αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες μεταφοράς αλλά και μικρότερο συνωστισμό στις χρησιμοποιούμενες γραμμές. Οπότε παρατηρούμε πως η χρησιμοποίηση διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα (με δεδομένες όμως ικανότητες παραγωγής), αυξάνει την αξιοπιστία και την ασφάλεια του δικτύου.

4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ο στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η δημιουργία ενός προγράμματος επέκτασης δικτύου μεταφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της τροποποιημένης μεθόδου Benders. Το πρόγραμμα αυτό, αφού υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab, προσομοιώθηκε στο μοντέλο του Garver και στο δίκτυο των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE, για διάφορα σενάρια επέκτασης του συστήματος παραγωγής.

Η μελέτη της επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς και οι αποφάσεις για την ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής είναι πράξεις αλληλένδετες. Στην απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, οι ιδιώτες παράγωγοι προτείνουν διάφορες τοποθεσίες εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής και ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη του τις συνολικές προσφορές αυτές, πρέπει να προτείνει για το ποιες κατά τη γνώμη του είναι οι πλέον οικονομικά και λειτουργικά συμφέρουσες για το σύστημα. Οι τελικές όμως αποφάσεις για την ένταξη των νέων μονάδων δεν ανήκουν στο διαχειριστή και επομένως πρέπει να έχει γίνει μελέτη όλων των πιθανών σεναρίων ανάπτυξης της παραγωγής.

Η ορθά επιλεγμένη επέκταση και ανάπτυξη ενός δικτύου μεταφοράς είναι ικανή να μειώσει τις ανάγκες του συνολικού συστήματος για νέα παραγωγή, μέσω της μείωσης των απωλειών μεταφοράς αλλά και της δημιουργίας νέων δρόμων διέλευσης της ισχύος. Το σύστημα μεταφοράς, υπό τα νέα δεδομένα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ορθολογική λειτουργία του ΣΗΕ. Η εξασφάλιση ασφαλούς και συμφέρουσας οικονομικά διέλευσης της ροής από καινούριες και παλιές μονάδες παραγωγής στα επιμέρους φορτία προκειμένου να διασφαλίζονται συνθήκες υγιούς ανταγωνισμού, αλλά και η αποφυγή μερικών ή ολικών black outs, είναι οι κύριοι στόχοι του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του προγράμματος επέδειξαν την ευεργετική επίδραση που έχει η εγκατάσταση νέων μεγάλων μονάδων παραγωγής κοντά στην ύπαρξη μεγάλου φορτίου, στην οικονομικότερη επέκταση του δικτύου μεταφοράς. Η πολιτική αυτή, πρέπει να προτιμάται έναντι της επέκτασης των ήδη υπάρχουσων απομακρυσμένων σταθμών παραγωγής, ανεξαρτήτως ίσως του αυξημένου της κόστους. Οι καινούριοι τρόποι θερμικής παραγωγής (μονάδες συνδυασμένου κύκλου, συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού κλπ.) καθώς και οι διάφορες τεχνολογίες ελέγχου ρύπων που χρησιμοποιούνται επιτυχώς, μειώνουν αισθητά την εκπομπή επικίνδυνων για την υγεία των ανθρώπων ρύπων συμβάλλοντας και στη μη περαιτέρω καταπόνηση του περιβάλλοντος.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα που αφορούσαν τη διεσπαρμένη παραγωγή, έδειξαν ότι και αυτή η πολιτική ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής οδηγεί σε οικονομικές λύσεις για το σύστημα μεταφοράς. Τα πλεονεκτήματα όμως της συγκεκριμένης πολιτικής όσον αφορά τη μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος και τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ασύγκριτα. Η διεσπαρμένη παραγωγή, με τη χρήση βέβαια όσον το δυνατόν περισσότερων μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (μικροδίκτυα), με αρκετά μεγάλη ικανότητα παραγωγής αλλά και δυνατότητα παρακολούθησης των εκάστοτε μεταβολών του φορτίου, είναι και η μεγάλη πρόκληση των επόμενων χρόνων στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

A.1. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

A.1.α. Θερμικοί σταθμοί παραγωγής

Σταθμός	Παραγωγός	Τύπος μονάδας	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Αγίου Δημητρίου	ΔΕΗ	Λιγνιτικές μονάδες	1595
Καρδιάς	ΔΕΗ		1250
Πτολεμαΐδας	ΔΕΗ		620
Αμυνταίου	ΔΕΗ		600
Λιπὸλ (Πτολεμαΐδα)	ΔΕΗ		43
Μελίτη	ΔΕΗ		330
Μεγαλόπολης Ι	ΔΕΗ		550
Μεγαλόπολης ΙΙ	ΔΕΗ		300
		Σύνολο	5288
Λαυρίου	ΔΕΗ	Πετρελαϊκές μονάδες	450
Αλιβερίου	ΔΕΗ		300
		Σύνολο	750
Κομοτηνή	ΔΕΗ	Μονάδες συνδυασμένου κύκλου (ΜΣΚ)	495
Λαύριο	ΔΕΗ		710
ΘΗΣ ΕΝΘΕΣ	Ενεργειακή Θεσ/νίκης		395
		Σύνολο	1630
Αγ.Γεώργιος	ΔΕΗ	Μονάδες φυσικού αερίου	360
ΘΗΣ ΗΡΩΝ	ΗΡΩΝ ΘΕΡΜΟ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ		147,8
		Σύνολο	507,8
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς θερμικών σταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα			8175,8

Πηγή: Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε 2006

A.1.β. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής (ισχύς μεγαλύτερη από 10 MW)

Σταθμός	Παραγωγός	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Άγρας	ΔΕΗ	50
Ασωμάτων	ΔΕΗ	108
Γκιώνας	ΔΕΗ	8,5
Εδεσσαίου	ΔΕΗ	19
Θησαυρού	ΔΕΗ	384
Μακροχωρίου	ΔΕΗ	10,8

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πολυφύτου	ΔΕΗ	375
Σφηκιάς	ΔΕΗ	315
Πλατανόβρυσης	ΔΕΗ	116
Καστρακίου	ΔΕΗ	320
Κρεμαστών	ΔΕΗ	437,2
Πλαστήρα	ΔΕΗ	130
Στράτου	ΔΕΗ	156,2
Πουρναρίου I & II	ΔΕΗ	333,6
Πηγές Αώου	ΔΕΗ	210
Λούρου	ΔΕΗ	10,3
Λάδωνα	ΔΕΗ	70
Σύνολο		3058,5 MW

Πηγή: Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε 2006

Α.1.γ.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Αιολικά πάρκα

Τοποθεσία	Παραγωγός	Αριθμός Α/Γ	Ισχύς Α/Γ (kW)	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)
Μαρμάρι, Εύβοια	ΔΕΗ	17	300	5100
Πολυπόταμος, Εύβοια	ΕΝΤΕΚΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	2	750	1500
Μομίλι, Εύβοια	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΕΠΕ	1	400	400
Μακρυνράχη, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	40	600	24000
Αγ. Βασίλειος, Μεγάλη ράχη, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
Τσούκα, Εύβοια	ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	16	750	12000
Στύρα, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	19	600	11400
Στύρα, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
Στύρα, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	19	600	11400
Στύρα, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
Στύρα, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΥΒΟΙΑ Α.Β.Ε.Ε.	21	600	12600
Μπουρλάρι, Κάρυστος	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΥΚΛΑΔΩΝ Α.Ε.	13	600	7800
Μαρμάρι, Εύβοια	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΕΛΛΑΔΑΣ - ΠΗΓΑΣΟΣ	2	500 280	780

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πολυπόταμος, Εύβοια	ΠΟΛΥΠΟΤΑΜΟΣ Ε.Π.Ε.	20	600	12000
Εύβοια	ΜΕΛΤΕΜΙ ΚΑΣΤΡΙ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	10	500	5000
Πυργάρι Δ. Δυστιών, Εύβοια	IWECO SA	9	600	5400
Ηλιόλουστη Δ. Στυρέων, Εύβοια	ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗ Α.Τ.Ε.Β.Ε.	10	600	6000
Ζάρακες Δ. Δυστιών, Εύβοια	ΡΟΚΑΣ Α.Ε.	39	600	23400
Παραία Ζαράκων Δ. Δυστιών, Εύβοια	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ENERGIKONTOR	5	600	3000
Τσίκνα, Προφήτης Ηλίας Δ. Δυστιών, Εύβοια	ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	17	660	11220
Τσιλίκωκα πρασίνου, Εύβοια	ΤΕΡΝΑ Α.Ε.	17	600	10200
Λαύριο, Αττική	Κ.Α.Π.Ε	4	500	2000
Καρπενήσι	ΕΥΡΥΤΑΝΙΑ	1	110	110
Σύνολο				203000 kW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Μικρά υδροηλεκτρικά (1-10MW)

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Βέρμιο Ι, Βέροια	ΔΕΗ	1,8
Γκιώνα, Φωκίδα	ΔΕΗ	8,5
Πάτρα, Γλαύκος	ΔΕΗ	4,8
Στρατός ΙΙ, Αιτ/νία	ΔΕΗ	6,2
Τσίβλος, Ακράτα, Αχαΐα	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΤΣΙΒΛΟΥ	2,82
Αγία Μαρίνα, Λακωνία	ΥΔΡΟΒΑΤ Α.Ε.Β.Ε. ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	1
Κλειτορία, Αχαΐα	ΥΔΡΟΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	1
Σύνολο		26,12 MW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2001

Μίνι υδροηλεκτρικά

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Αγγιστρο, Σέρρες	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΑΓΓΙΣΤΡΟΥ	0,6
Βέρμιο ΙΙ	ΒΑΡΒΑΡΕΣΟΣ Α.Ε.	0,625
Βέρμιο ΙV	TEXTILE Α.Ε.	0,5
Χρυσούπολη, Καβάλα	ΔΗΜΟΣ ΞΑΝΘΗΣ	0,94
Γοργοπόταμος, Φθιώτιδα	ΚΟΥΛΑΞΙΖΕΛΗ ΣΟΦΙΑ	0,155

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Σέρρες	ΔΕΗ	0,7
Αλμυρός, Βόλος	ΔΕΗ	0,3
Λουτράκι Αριδαίας, Πέλλα	ΣΩΤΗΡΙΟΣ ΟΡΤΖΑΝΗΣ & ΣΙΑ Ο.Ε.	0,63
Βορεινό Αλμοπείας, Πέλλα	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,56
Σαρακηνός, Μαγνησία	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΜΕΙΖΟΝΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΒΟΛΟΥ	0,75
Ζλατίνο, Πέλλα	ΜΕΘΟΔΙΟΣ ΚΑΙ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ Ο.Ε.	0,22
Βεγορίτιδα, Πέλλα	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,15
Βεγορίτιδα, Πέλλα	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,06
Μουζάκιο, Καρδίτσα	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,6
Κατσανοχώρια, Ιωάννινα	ΚΟΙΝ/ΞΙΑ ΚΑΤΣΑΡΗΣ - ΚΡΙΚΩΝΗΣ	0,15
Γκούρα, Ιωάννινα	ΗΠΕΙΡΩΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	0,7
Βεγορίτιδα, Πέλλα	ΠΑΝΑΓΙΤΣΑ Α.Ε.	0,5
Αριδαία, Πέλλα	ΑΡΑΜΠΑΤΖΗΣ	0,83
Βορεινό, Αρριδαίας	ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ Α.Ε.	0,56
Πλατανάκι, Ηλεία	VASSERKRAFT S.A.	1,3
Πλατανάκι, Ηλεία	ΤΗΛΕΜΑΧΟΣ ΦΩΤΕΙΝΟΣ	1,3
Γκούρα, Ιωάννινα	ΛΑΚΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	0,99
Σύνολο		13,12 MW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Φωτοβολταϊκά

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (kWp)
Άγιο Όρος	Ι.Μ. ΣΙΜΩΝΟΣ ΠΙΕΤΡΑΣ	45
Θεσσαλονίκη	ΗΛΠΡΑ	6,5
Σύνολο		51,5 kW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Βιοαέριο

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (kWp)
Θεσσαλονίκη	ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ Ο.Τ.Α. ΜΕΙΖΟΝΟΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ	240
Ψυττάλεια, Αττική	ΕΥΔΑΠ	7400
Σύνολο		7640 kWp

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2000

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Α.2. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Α.2.α. Πετρελαϊκοί σταθμοί παραγωγής

Τροφοδοτούμενα νησιά	Αυτόνομοι Σταθμοί Παραγωγής	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Κρήτη *	Λινοπεράματα	193
	Χανιά	328
	Αθρινόλακκος	209
Ρόδος *	Σορώνη	234
Αγαθονήσι	Αγαθονήσι	0,24
Αγ.Ευστράτιος	Αγ.Ευστράτιος	0,36
Αμοργός	Αμοργός	2,65
Ανάφη	Ανάφη	0,355
Αντικύθηρα	Αντικύθηρα	0,14
Αστυπάλαια	Αστυπάλαια	1,6
Δονούσα	Δονούσα	0,21
Ερεϊκούσα	Ερεϊκούσα	0,27
Ικαρία	Ικαρία	6,9
Κύθνος	Κύθνος	2,3
Λέσβος	Λέσβος	49,5
Λήμνος	Λήμνος	8,9
Μεγίστη	Μεγίστη	0,39
Μύκονος	Μύκονος	21,2
Όθωνοι	Όθωνοι	0,27
Πάτμος	Πάτμος	4,38
Σαμοθράκη	Σαμοθράκη	2,2
Σέριφος	Σέριφος	2
Σίφνος	Σίφνος	4,3
Σκύρος	Σκύρος	4,5
Σύμη	Σύμη	4,35
Σύρος	Σύρος	20
Σάμος-Φούρνοι	Σάμος	46,08
Χίος-Ψαρά	Χίος	38,78
Άνδρος-Τήνος	Άνδρος	9,4
Θήρα-Θηρασιά	Θήρα	22,2
Ίος-Σίκινος-Φολέγανδρος	Ίος-Σίκινος-Φολέγανδρος	3,74
Κάλυμνος-Λέρος-Λειψοί-Τέλενδος-Ψέριμος-Κως-Νίσυρος-Τήλος-Γυαλί	Κάλυμνος-Κως	69,6
Κάρπαθος-Κάσος	Κάρπαθος-Κάσος	9
Μήλος-Κίμωλος	Μήλος	7,6

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Πάρος-Νάξος- Αντίπαρος-Ηράκλεια- Σχοινούσα- Κουφονήσια	Πάρος	43,25
Σύνολο		1350,665MW

Πηγή: Δ.Ε.Η. 2001

*Πηγή: Δ.Ε.Η. 2005

Α.2.β.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Αιολικά πάρκα

Τοποθεσία	Παραγωγός	Αριθμός Α/Γ	Ισχύς Α/Γ (kW)	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)
ΚΑΛΙΒΑΡΙ, ΑΝΔΡΟΣ	ΔΕΗ	7	225	1575
ΠΥΘΑΓΟΡΕΙΟ, ΣΑΜΟΣ	ΔΕΗ	9	225	2025
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	ΔΕΗ	9	100	900
ΜΕΛΑΝΙΟΣ, ΧΙΟΣ	ΔΕΗ	11	225	2475
ΠΟΤΑΜΙΑ, ΧΙΟΣ	ΔΕΗ	10	100	1000
ΠΡΟΦΗΤΗΣ ΗΛΙΑΣ, ΨΑΡΑ	ΔΕΗ	9	225	2025
ΣΙΓΡΙ, ΛΕΣΒΟΣ	ΔΕΗ	9	225	2025
ΣΑΜΟΘΡΑΚΗ	ΔΕΗ	4	55	220
ΠΕΡΔΙΚΙ, ΙΚΑΡΙΑ	ΔΕΗ	7	55	220
ΑΓΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΔΕΗ	5	55	275
ΒΙΓΛΑ, ΔΗΜΝΟΣ	ΔΕΗ	7	100	700
ΒΟΥΝΑΡΟΣ, ΔΗΜΝΟΣ	ΔΕΗ	8	55	440
ΚΥΘΝΟΣ	ΔΕΗ	5	33	165
ΚΟΥΚΟΥΒΑΓΙΑ, ΚΥΘΝΟΣ	ΔΕΗ	1	500	500
ΜΟΝΗ ΤΟΠΛΟΥ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΗ	3	500	1500
ΜΟΝΗ ΤΟΠΛΟΥ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΗ	17	300	5100
ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΗ	17	600	10200
ΣΥΡΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΣΥΡΟΣ	ΔΑΛΕΖΙΟΣ	1	90	90
ΚΕΑ	ΟΤΕ	1	60	60
ΠΑΡΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΚΩΣ	ΟΤΕ	1	60	60
ΚΑΤΑΒΙΑ, ΡΟΔΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110
ΑΤΑΒΥΡΟΣ, ΡΟΔΟΣ	ΟΤΕ	1	110	110

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΑΝΩΓΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΤΕΑ	1	55	55
ΡΟΔΟΣ	ΝΕΟΦΥΤΟΥ ΚΕΡΑΜΙΚΑ	1	150	150
ΡΟΔΟΣ	ΚΑΛΛΙΘΕΑ SUN	1	75	75
ΡΟΔΟΣ	ΓΕΝΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.	1	110	110
ΒΡΟΝΤΑΛΟΣ, ΧΙΟΣ	ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΙΚΗ	1	110	110
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΑΙΟΛΙΚΗ, ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΜΥΤΙΛΗΝΗΣ	3	300 225	825
ΕΓΓΑΡΕΣ, ΝΑΞΟΣ	ΕΝΩΣΗ ΑΓΡΟΤΙΚΩΝ ΣΥΝ/ΣΜΩΝ ΝΑΞΟΥ	1	75	75
ΖΗΡΟΣ, ΚΡΗΤΗ	ΣΗΤΕΙΑ, ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ	1	500	500
ΑΝΩ ΣΥΡΟΣ	ΔΗΜΟΣ ΑΝΩ ΣΥΡΟΥ	1	200	200
ΠΛΑΚΟΚΕΡΑΤΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΡΟΚΑΣ Α.Ε.	17	600	10200
ΣΥΡΟΣ	ENERCON Ε.Π.Ε.	1	500	500
ΑΓΙΟΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ	ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΑΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	1	100	100
ΚΟΥΤΣΟΥΝΟΡΑΧΗ, ΜΗΛΟΣ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΥΚΛΑΔΩΝ Α.Ε.	2	600	1200
ΧΑΝΔΡΑΣ, ΚΡΗΤΗ	ΑΕΟΛΟΣ Α.Ε.	18	550	9900
ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ, ΚΡΗΤΗ	ΙWECO ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Α.Ε.Β.Ε.	9	550	4950
ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	2	250 750	1000
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ Α.Ε.	20	500	10000
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ Α.Ε.	20	500	1000
ΣΗΤΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	10	500	5000
ΑΓ. ΜΑΡΙΝΑ, ΤΗΝΟΣ	ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΥΚΛΑΔΩΝ	1	400	400
ΑΝΩ ΜΕΡΑ, ΜΥΚΟΝΟΣ	ΔΕΥΑ ΜΥΚΟΝΟΥ	1	300	300
ΑΓΙΟΙ ΠΑΝΤΕΣ, ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	1	750	750
ΡΟΧΙΑΔΕΣ, Δ. ΑΜΑΝΗΣ, ΧΙΟΣ	ΑΙΓΑΙΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΑΡΔΑΜΥΛΩΝ Α.Ε.	1	280	280

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΣΤΡΩΤΟΣ, ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ, ΣΑΜΟΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	2	600	1200
ΚΑΡΠΑΘΟΣ	ΖΕΦΥΡΟΣ Ε.Π.Ε.	1	500	500
Σύνολο				81375kW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Μίνι υδροηλεκτρικά

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
ΑΓΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΗ	0,3

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Φωτοβολταϊκά

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (kWp)
ΚΥΘΝΟΣ	ΔΕΗ	100
ΑΡΚΟΙ	ΔΕΗ	37,5
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	ΔΕΗ	25
ΑΝΤΙΚΥΘΗΡΑ	ΟΤΕ	20
ΓΑΥΔΟΣ	ΔΕΗ	20
ΣΙΦΝΟΣ	ΔΕΗ	60
ΜΥΤΙΛΗΝΗ	ΔΕΗ	8
ΠΑΡΟΣ	ΧΑΡΜΗ Α.Ε HOTEL	10
Σύνολο		280,5 kW

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2002

Βιοαέριο

Τοποθεσία	Ιδιοκτήτης	Εγκατεστημένη Ισχύς (kWp)
ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΥΑ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	193
ΧΑΝΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΥΑ ΧΑΝΙΩΝ	166
Σύνολο		359 kWp

Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2000

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

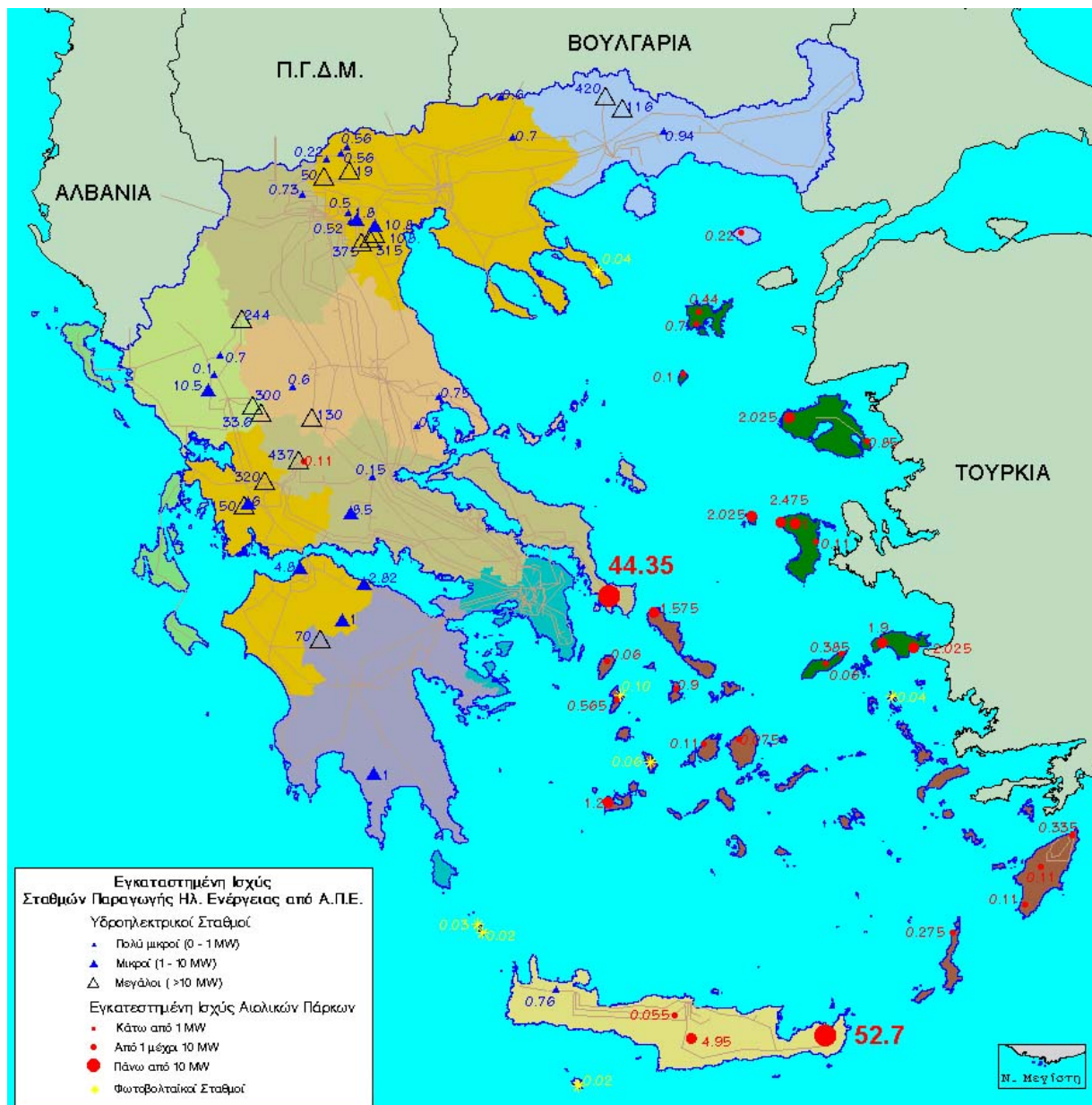
B. ΧΑΡΤΕΣ

B.1 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

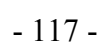


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Β.2 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

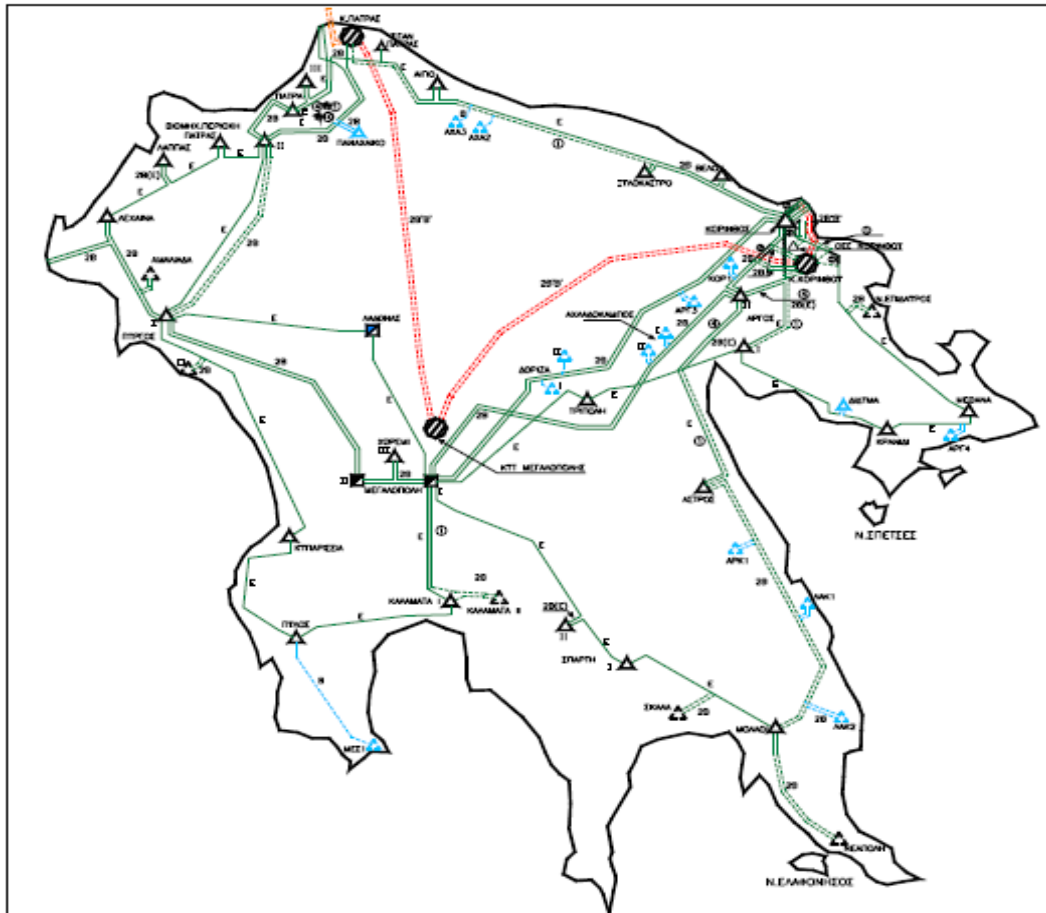


B.3 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΒΟΙΑΣ

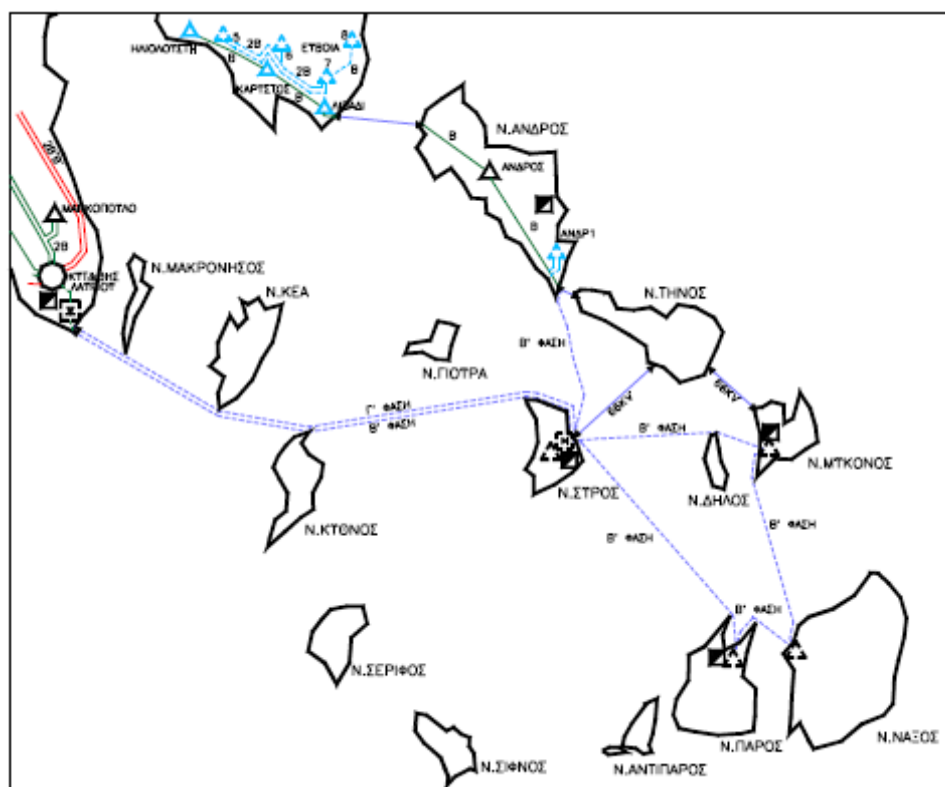
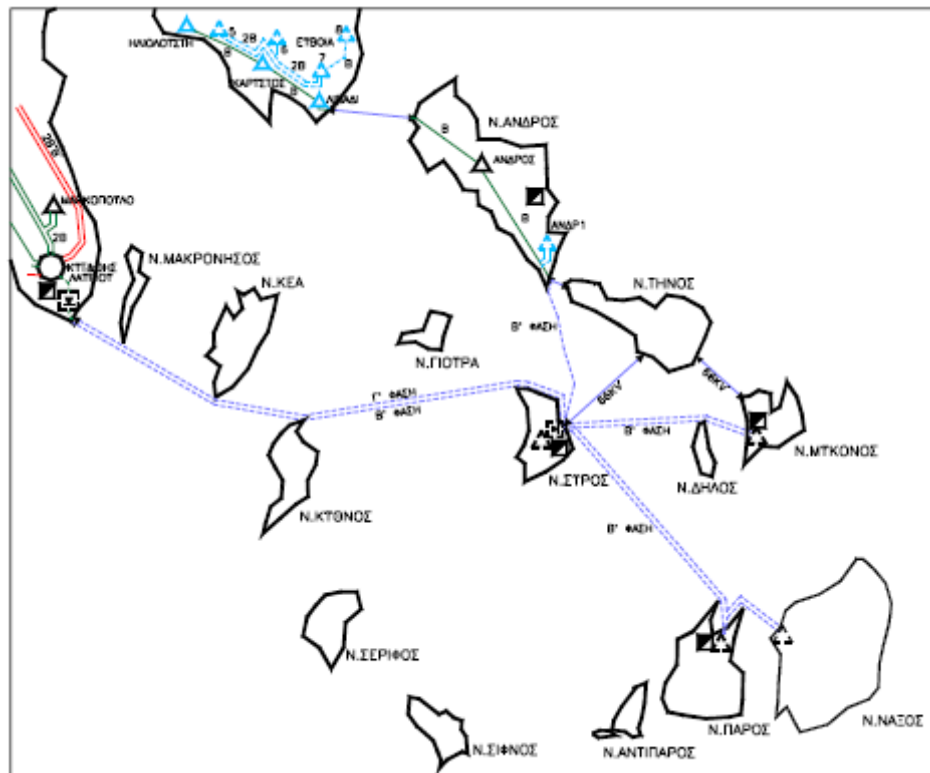


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

B.5 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ



B.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ



B.7 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Ε.Δ.Σ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ Μ.Α.Σ.Μ. 2006



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Γ. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

%Τα δεδομένα του προγράμματος αναφέρονται στην υλοποίηση του σεναρίου 1 των 14 ζυγών της IEEE

%Δηλώσεις

%Πίνακας των υπαρκτών συνδέσεων μεταξύ των ζυγών του δικτύου των 14 ζυγών

```
Sc=[1 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0;
    1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 0;
    0 0 0 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1;
    0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0;
    0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0;
    0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 0;
    0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 1 1 1;
    0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1 1];
```

%Πίνακας αγωγιμοτήτων ανά απόσταση(km) για όλες τις υπαρκτές ή υπονήφιες γραμμές %μεταφοράς (συνδέσεις ζυγών)

```
X1=[ 0    0.4    0    0    0.4    0.4    0    0    0    0    0    0    0    0;
     0.4    0    0.4    0.4    0.4    0    0    0    0    0    0    0.4    0    0;
     0    0.4    0    0.4    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0;
     0    0.4    0.4    0    0.4    0    0.4    0    0.4    0    0    0    0    0;
     0.4    0.4    0    0.4    0    0.4    0    0    0    0    0    0    0    0;
     0.4    0    0    0    0.4    0    0    0    0    0    0.4    0.4    0.4    0;
     0    0    0    0.4    0    0    0    0.4    0.4    0    0    0    0    0;
     0    0    0    0    0    0    0.4    0    0    0    0    0    0    0;
     0    0    0    0.4    0    0    0.4    0    0    0.4    0    0    0    0.4;
     0    0    0    0    0    0    0    0    0.4    0    0.4    0    0    0;
     0    0    0    0    0    0.4    0    0    0    0.4    0    0    0    0;
     0    0.4    0    0    0    0.4    0    0    0    0    0    0    0.4    0;
     0    0    0    0    0    0.4    0    0    0    0    0    0.4    0    0.4;
     0    0    0    0    0    0    0    0    0.4    0    0    0    0.4    0];
```

% Μετατροπή των παραπάνω τιμών σε τιμές ανά μονάδα

% $Z_B = V_B^2 / S_B = (150\text{kV})^2 / 100\text{MW} = 225\Omega$

Xpu=X1./225 ;

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

%Πίνακας αποστάσεων των ζυγών

```
distances=[0    28    0    0    94   160    0    0    0    0    0    0    0    0;
            28    0    84   71    70    0    0    0    0    0    0   170    0    0;
            0    84    0    76    0    0    0    0    0    0    0    0    0    0;
            0    71    76    0    17    0   60    0   60    0    0    0    0    0;
            94    70    0    17    0    60    0    0    0    0    0    0    0    0;
           160    0    0    0    60    0    0    0    0    0   51    59    30    0;
            0    0    0    60    0    0    0   46   26    0    0    0    0    0;
            0    0    0    0    0    0   46    0    0    0    0    0    0    0;
            0    0    0    60    0    0   26    0    0   23    0    0    0   64;
            0    0    0    0    0    0    0    0   23    0   45    0    0    0;
            0    0    0    0    0   51    0    0    0   45    0    0    0    0;
            0   170    0    0    0   59    0    0    0    0    0    0   51    0;
            0    0    0    0    0   30    0    0    0    0    0   51    0  100;
            0    0    0    0    0    0    0    0   64    0    0    0  100    0];
```

q=size(X1,1); %Ο αριθμός των ζυγών του δικτύου

X=Xpu.*distances; %Αντίδραση ανά μονάδα των γραμμών μεταφοράς

%Μηδενισμός των διαγώνιων στοιχείων του πίνακα X και δημιουργία του πίνακα Y των
%αγωγιμότητων

```
for i=1:q
    for j=1:
        if X(i,j)==0;
            Y(i,j)=0;
        else
            Y(i,j)=1./X(i,j);
        end
    end
end
end
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

%Εισαγωγή διανυσμάτων παραγωγής G και ζήτησης D σε κάθε ζυγό και μετατροπή τους σε
%τιμές ανά μονάδα

G=[300;600;400;0;0;400;0;30;0;0;0;0;0]; g=G/100; %Gmax=1730 για το σενάριο 1

D=[0;60*1.4;50*1.4;80*1.5;80*1.5;30*1.4;0;0;100*1.6;70*1.5;120*1.6;100*1.6;200*1.6;15
0*1.6];d=D/100; %Dmax=1613MW

%Εισαγωγή διανύσματος με τις ικανότητες μεταφοράς των υπάρχουσων γραμμών
%μεταφοράς

f=[200; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
200;200;200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 200;200;200; 0; 200; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0;
200;200; 0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 200; 200; 200; 0;
0; 0; 0; 200; 0; 0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 200; 0; 0; 200; 0; 200; 0; 0; 0; 200;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 200; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 200;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 200];

F=f/100;%Ανά μονάδα τιμές

%Εισαγωγή διανύσματος με τις αγωγιμότητες όλων των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς

f_candit=[200; 0; 0; 200; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
200;200;200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0;
0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 200;200;200; 0; 200; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0;
200;200; 0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
200; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 200; 200; 200; 0;
0; 0; 0; 200; 0; 0; 200;200; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 0;

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```
0; 0; 0; 200; 0; 0; 200; 0; 200; 0; 0; 0; 200;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 200; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0;
0; 200; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0;
0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 200;
0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 200];
f_can=f_candit/100;
```

%Δημιουργία πίνακα Y_exist με τις πραγματικά υπάρχουσες αγωγιμότητες

```
for i=1:q
    for j=1:q
        if Sc(i,j)==1
            Y_exist(i,j)=Y(i,j);
        else
            Y_exist(i,j)=0;
        end
    end
end
end
```

%Αρχικοποίηση διάνυσματος N που μας δίνει το μέγιστο αριθμό γραμμών μεταφοράς που
%μπορούν να εισαχθούν επιπλέον μεταξύ των ζυγών

```
for i=1:(q^2-q)
    if F(i)~=0
        N(i,1)=1;
    else
        N(i,1)=2;
    end
end
end
```

%Βοηθητική μεταβλητή για το διάνυσμα κόστους c των γραμμών μεταφοράς

```
for i=1:q
    k=1;
    for j=1:q
        if i~=j
            distance(i,k)=distances(i,j);
            k=k+1;
        end
    end
end
end
end
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```
c1=[53*distance(1,1:4),1.5*53*distance(1,5),53*distance(1,6:13)];  
c2=[53*distance(2,1:10),2*53*distance(2,11),53*distance(2,12:13)];  
c3=53*distance(3,:);c4=53*distance(4,:);c5=53*distance(5,:);  
c6=[1.5*53*distance(6,1),53*distance(6,2:13)];c7=53*distance(7,:);  
c8=53*distance(8,:);c9=53*distance(9,:);c10=53*distance(10,:);c11=53*distance(11,:);  
c12=[53*distance(12,1),2*53*distance(12,2),53*distance(12,3:13)];  
c13=53*distance(13,:);c14=53*distance(14,:);
```

```
zup=10;zlow=0; %Τυχαίες αρχικές τιμές για τα άνω και κάτω όρια της μεθόδου μας
```

```
operation;    % Τρέξιμο του υποπροβλήματος λειτουργίας  
              %Λύνουμε το υποπρόβλημα λειτουργίας πρώτα ώστε να έχουμε καλύτερες  
              %εισόδους στο πρώτο υποπρόβλημα επένδυσης που ακολουθεί
```

```
if w==0       % Ο αριθμός w μας δίνει τη συνολικά μη εξυπηρετούμενη ισχύ. Αν μετά το  
    zlow=10;   %βοηθητικό αυτό τρέξιμο του υποπροβλήματος λειτουργίας, w=0 τότε ο  
end           %αλγόριθμος σταματάει.
```

```
while zup-zlow>0.01 %Από εδώ ξεκινάει ο επαναληπτικός βρόχος της Benders
```

```
investment;    %Τρέξιμο του υποπροβλήματος επένδυσης
```

```
operation;     % Τρέξιμο του υποπροβλήματος λειτουργίας
```

```
end            %Τέλος του προγράμματος
```

```
%Το υποπρόβλημα λειτουργίας
```

```
%operation;
```

```
%Δημιουργία πίνακα Y1 με τις μη μηδενικές αγωγιμότητες
```

```
for i=1:q,l=0;  
    for j=1:q  
        if j~=i  
            l=l+1;  
            Y1(i,l)=Y(i,j);  
        end  
    end  
end  
end
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

%Δημιουργία πίνακα S για την εισαγωγή των αγωγιμοτήτων στον πίνακα a της simplex

```
k=0;
for i=1:q
    for j=1:q
        if j~=i
            k=k+1;
            S(i,k)=-Y(i,j);
            S(j,k)=Y(i,j);
        end
    end
end
```

```
a=[zeros(q^2-q,q) eye(q^2-q); %Ο πίνακας a της simplex με τα αριστερά μέλη των
    eye(q) zeros(q,q^2-q); %ανισοτήτων του προβλήματος λειτουργίας
    eye(q) S];
```

```
k=0; Y2=Y1'; %Βοηθητικές μεταβλητές και υπορουτίνες για τη δημιουργία του
for i=1:q % διανύσματος ορίου διαφοράς φάσης ps μεταξύ των ζυγών
    for j=1:q-1
        k=k+1;
        if Y2(k)==0
            ps(k,1)=0;
        else
            ps(k,1)=(F(k)/Y2(k));
        end
    end
end
```

```
b=[ps;d;(d-g)]; %Πίνακας b της simplex με τα δεξιά μέλη των περιορισμών
c=[ones(1,q),zeros(1,q^2-q)]; %Πίνακας δημιουργίας της αντικειμενικής συνάρτησης
m1=q^2;m2=q;pt=0; %m1 είναι οι περιορισμοί ανισότητας και m2 οι περιορισμοί ισότητας
```

```
cmplex; %Τρέξιμο της simplex
```

%Εύρεση δυαδικών λύσεων (Benders cuts) στην τελευταία γραμμή του τελικού πίνακα της %simplex, και στις στήλες των μεταβλητών που μας ενδιαφέρουν

```
pf_ini=c(q^2+1:2*q^2-q);
for i=1:(q^2-q)
    if pf_ini(i)~=0
        pf(i)=1;
    else
        pf(i)=0;
    end
end
```

%Εύρεση της μη εξυπηρετούμενης ισχύος στο συνολικό δίκτυο από τις αντίστοιχες στήλες της μεταβλητής r της τελευταίας γραμμής του τελικού πίνακα της simplex

```
M=find(c(1:q)==0);r=zeros(1,q);
op=size(M,2);i=1;
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

while i<=op
K=find(a(:,M(i))==1);j=1;
    if size(K,1)~=1
        i=i+1;
    else
        while j<=(q^2-q+1)
            if j==K | a(j,M(i))==0
                j=j+1;
            else
                b(K)=0;break
            end
        end
        r(M(i))=b(K);
        i=i+1;
    end
end
w=sum(r); %H μη εξυπηρετούμενη ισχύ στο δίκτυο
zup=8*w+cost; %Ανω όριο του προβλήματος αποσύνθεσης,
                %Με την τιμή 8 κοστολογήσαμε το κόστος μη εξυπηρέτησης καταναλωτή
iterat=iterat+1; %Ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγόριθμου

```

%Εύρεση της ροής ισχύος στις γραμμές με πραγματικές τιμές ισχύος (σε MW)

```

j=1;
for iu=(q+1):q^2
Fa=find( a(:,iu)~=1 & a(:,iu)~=0);
    if Fa~=0 & (a(Fa,iu)>=0.0001 | a(Fa,iu)<=-0.0001)
        Fm(j)=0;iu=iu+1;j=j+1;
    else
        Ka=find((1-a(:,iu))<=0.0001 | (a(:,iu)-1)>=-0.0001) ;
        if size(Ka,1)~=1
            Fm(j)=0;iu=iu+1;j=j+1;
        else
            Fm(j)=b(Ka);iu=iu+1;j=j+1;
        end
    end
end
end
Y12=Y1';
for i=1:(q-1)*q
    P(i)=(Y12(i)*Fm(i)); %Το διάνυσμα P δίνει τη ροή της ισχύος μεταξύ δύο διαφορετικών
end                                % ζυγών i και j του δικτύου.

```

%Το υποπρόβλημα επένδυσης

%investment

%Καταρτισμός των πινάκων a,b και c της simplex με βάση τα αρχικά δεδομένα του κώδικα
 %και τα εισαγωγικά αποτελέσματα του προηγούμενου υποπροβλήματος λειτουργίας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```
a=[eye(q^2-q);
    pf.*f_can'];
b=[N;w];
costpu=[c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8,c9,c10,c11,c12,c13,c14];
c=costpu;m1=q^2-q;m2=1;pt=0;
```

```
complex;    %Τρέξιμο της simplex
```

```
%Εύρεση των γραμμών που η simplex αποφάσισε να εισάγει στο δίκτυο, και δημιουργία
%διανύσματος με τις εγκατεστημένες αυτές γραμμές
```

```
L=find(c(1:(q^2-q))==0);
N_inst=zeros(q*(q-1),1);
op=size(L,2);i=1;
while i<=op
K=find(a(:,L(i))==1);j=1;
    if size(K,1)~=1
        i=i+1;
    else
        while j<=(q^2-q+1)
            if j==K | a(j,L(i))==0
                j=j+1;
            else
                b(K)=0;break
            end
        end
        N_inst(L(i))=N_inst(L(i))+b(K);
        i=i+1;
    end
end
```

```
%Μετατροπή σε ακέραιο πρόβλημα
```

```
H=find(N_inst~=0 & N_inst~=1 & N_inst~=2 &
        ((N_inst>=0.001 & N_inst<=0.999) |
         (N_inst>=1.001 & N_inst<=1.999))); %Βρίσκει αν υπάρχει μη ακέραια λύση
Xi=zeros(q^2-q,1);
Xi(H)=N_inst(H);
if H~=0
    meg=max(N_inst(H)); %Αν υπάρχει βρίσκει τη μεγαλύτερη
    La=find(N_inst==meg);Mi=N_inst(H);
    if (meg>0 & meg<1) %Αν είναι μεταξύ 0 και 1 τότε
        if any(N_inst-Xi)~=0 %Αν η μη ακέραια λύση δεν είναι η μοναδική τότε
            cost=cost-z-costpu(H)*N_inst(H); %αφαιρεί τα κόστη από το ολικό κόστος και
            N_inst(H)=0; %τις μηδενίζει όλες
        else
            N_inst(La)=1; %αν είναι η μοναδική τότε στρογγυλοποιώ προς τα πάνω
            cost=cost-z-costpu(H)*Mi+costpu(La)*N_inst(La);N_inst(H)=0;
            N_inst(La)=1;
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

end
else if (meg>1 & meg<2) %Αν είναι μεταξύ 1 και 2 τότε ακολουθεί την ίδια διαδικασία
    if any(N_inst-Xi)~=0 % με προηγούμενως
        N_inst(La)=1;
        cost=cost-z-costpu(H)*Mi+costpu(La)*N_inst(La);
        N_inst(H)=0;N_inst(La)=1;
    else
        N_inst(La)=2;
        cost=cost-z-costpu(H)*Mi+costpu(La)*N_inst(La);
        N_inst(H)=0;N_inst(La)=2;
    end
end
end
end
else %Αν δεν υπάρχει μη ακέραια λύση το κόστος είναι αυτό που βρήκε η
    cost=cost-z; %simplex
end

%Δημιουργία βοηθητικού πίνακα N_q για την αλλαγή της μήτρας Y
k=1;
for i=1:q
    for j=1:q,
        if i==j
            N_q(i,j)=0;
        else
            N_q(i,j)=N_inst(k);
            k=k+1;
        end
    end
end
end
for i=1:q
    for j=1:q
        if N_q(i,j)>N_q(j,i)
            N_q(j,i)=N_q(i,j);
        else
            N_q(i,j)=N_q(j,i);
        end
    end
end
end

Y_inst=Y.*N_q; %Εισαγωγή των αγωγιμοτήτων των νέων γραμμών στον πίνακα
Y_exist=Y_exist+Y_inst; % Y_exist
for i=1:q
    for j=1:q
        if Y_exist(i,j)~=0 & Y_exist(i,j)~=Y(i,j)
            Y(i,j)=Y_exist(i,j);
        end
    end
end
end
end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```
f_inst=f_can.*N_inst;F=F+f_inst; %Εισαγωγή των ικανοτήτων μεταφοράς των νέων  
N=N-N_inst; % γραμμών στον πίνακα f και αφαίρεση των γραμμών  
% αυτών από το διάνυσμα N
```

```
zlow=cost; %Το κάτω όριο του αλγορίθμου
```

```
%Ο αλγόριθμος της simplex
```

```
% Simplex Method (Phase 1 and 2)  
% Solves the Linear Programming Problem  
% (LP) min cx s.t. ax<=and=b, x>=0  
% The file reg.m is called to do phase 1 and phase 2.  
% Data input by user: a,b,c,m1,m2 where  
% a - m by n1 matrix containing inequality constraints in the  
% first m1 rows and equality constraints in the next m2 rows.  
% b - m-column vector assumed >=0  
% c - n1-row vector  
% m1,m2 - 2 nonnegative integers with the number of inequality and equality  
% constraints respectively.  
% pt - pause time after each iteration, 0 denotes no pause, while  
% any number > 20 denotes infinite time, i.e. you  
% are prompted to hit return to continue.
```

```
I = find(b<0);  
a(I,:) = -a(I,:);  
b(I) = -b(I);
```

```
nbas=[]; % initialize to avoid compiler definition error  
eps4=.00001; % accuracy parameter  
eps0=10^(-10); % numerical zero  
eps1=10^(-5); % accuracy parameter for optimality check  
z=0; % initial objective value  
[m,n1]=size(a); % number of rows and columns of a  
clc  
home,disp([blanks(20)]);  
disp(['You have entered the following linear programming data'])  
disp(['Constraint matrix a is ' int2str(m) ' by ' int2str(n1) '])  
disp(['There are ' int2str(m1) ' inequality (<=) and ' int2str(m2) ' equality constraints'])  
if pt <= 20,  
    disp(['The pause time between iterations is ' int2str(pt) ' seconds'])  
else  
    disp(['The program stops after each iteration'])  
end  
disp(['Hit the return key to begin']);
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

if m1~=0,    % inequality constraints exist
    a=[a [eye(m1) zeros(m1,m2)]];
    c=[c zeros(1,m1)];
        disp(['Slack variables are added'])
end
if m2==0,    % if no equality constraints
    bas=[n1+1:n1+m1];    % slack variables are basic
    disp(['start phase2 '])
    reg;
        clc
        home,disp([blanks(20)]),disp(['Final tableau'])
        [a b
c z]
        pause(pt)
return
else
    disp(['solve phase 1 first '])
    corig=c;
    c=[zeros(1,n1+m1) ones(1,m2)];
    a=[a [zeros(m2,m1) eye(m2)]];
    bas=[n1+1:n1+m1+m2];
        disp(['Artificial variables are added.'])
    reg;    % solve phase 1 using the reg.m file
    if z<-eps4,
        disp(['optimal value from phase 1 is: ' num2str(z) ])
        disp(['the above shows that the problem is infeasible'])
        pause(pt)
        disp(['Final tableau'])
        [a b
c z]
        return
    else
        disp(['phase 1 is solved now solve phase 2'])
        pause(pt)
        a=a(:,1:n1+m1);
        c=c(1:n1+m1);
        % Ensure that no artificial variable remains in the basis.
        while ~all(bas<n1+m1+1),
            disp(['an artificial variable remains in the basis after phase1'])
            disp(['pivot to remove the remaining artificial variables'])
            mto1=[1:m];
            i=mto1(bas>n1+m1); % pivot row
            i=i(1)
            n1m1to1=[1:n1+m1];
            t=n1m1to1(abs(a(i,:))>eps1); % pivot column
            t=t(1)
            v=nbas(nbas==t); % variable entering the basis
            nbas(v)=bas(i);
            bas(i)=t;
            alpha=a(i,t); % pivot element

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

% Store the data in ap,bp

```
ap=a;
bp=b;
```

% Now pivot by row

```
        clc,home,disp([blanks(20)])
    for k=1:m,
        ratio=ap(k,t)/ap(i,t);
        a(k,:)=ap(k,:)-ap(i,:)*ratio;
        b(k)=bp(k)-bp(i)*ratio;
        home,disp([blanks(20)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ')']
blanks(10)])
        [a b
         c z]
    end
```

% Now for the objective row update

```
        ratio=c(t)/ap(i,t);
        c=c-ap(i,:)*ratio;
        z=z-bp(i)*ratio;
        home,disp([blanks(20)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ')']
blanks(10)])
        [a b
         c z]
```

% Now for the pivot row update

```
        a(i,:)=ap(i,:)/ap(i,t);
        b(i)=bp(i)/ap(i,t);
        home,disp([blanks(20)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ')']
blanks(10)])
        [a b
         c z]
        if pt > 20,
            disp(['Hit return key to continue'])
            pause
        else
            pause(pt)
        end
    end
    end
    disp(['The artificial variables have been removed'])
    pause(pt)
    c=corig;
    reg % solve the problem using file reg.m
    disp(['Final tableau'])
end
end
```


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

%Το αρχείο reg με το οποίο λύνονται οι φάσεις 1 και 2 της μεθόδου δύο φάσεων της simplex

% Solves 'small' Linear Programming Problems (in canonical form)

%

% (LP) $\min cx$ s.t. $ax=b$, $x \geq 0$

%

%

% Data input by user or calling routine: a,b,c,bas,pt where

% a - m by (m+n) matrix (containing identity)

% b - m-column vector assumed ≥ 0

% c - m+n-row vector of costs which is priced out below using bas

% bas - m-row vector with column indices corresp. to the

% identity matrix in a, i.e. $a(bas,:)=\text{identity}$.

% pt - pause time after each iteration, 0 denotes no pause, while

% any number > 20 denotes infinite time, i.e. you

% are prompted to hit return to continue.

% The user can change the upper bound of 100 iterations

% The matrix a is assumed to contain an m by m identity matrix

% corresponding to the basic columns.

% A relative accuracy of approximately 15 significant decimal

% digits is assumed. This affects the values of 4 accuracy

% parameters, ϵ_i , $i=0,1,2,3$.

% The pivot step is done using 'Gauss-Jordan' elimination.

% No special factorizations to ensure stability are used.

% We do ****not**** use the revised simplex method.

% A final check on roundoff error is made.

% We use a threshold value when finding the pivot element.

% Problem (LP) is assumed to be in canonical form, i.e. slacks

% have been added and/or phase 1 has finished. However, we still

% price out the cost vector c.

rnderr=0;

item=100;

stop=1; % use to overcome the bug in the return statement

% Error tolerances (from 'Advanced Linear Progr.' by B.A.Murtaugh, pg 34.)

$\epsilon_0=10^{-10}$; % numerical zero

$\epsilon_1=10^{-5}$; % accuracy parameter for optimality check

$\epsilon_2=10^{-8}$; % accuracy parameter pivot element (threshold test)

$\epsilon_3=10^{-6}$; % accuracy parameter for final roundoff error check

$a_0=a$; % save the matrix a for the final roundoff error test

$b_0=b$; % save the vector b for the final roundoff error test

$c_0=c$; $bas_0=bas$;

$[m,mn]=\text{size}(a)$; % row and column size of a

$z=-c(bas)*b$; % initial value for z

clc

home,disp([blanks(30)]),disp(['Initial tableau ' blanks(10)])

[a b

c z]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

        if pt > 20,
            disp(['Hit return to continue'])
            pause
        else
            pause(pt)
        end
    % price out the cost vector
    z=-c(bas)*b;
    clc
    for i=1:m,
        c=c-c(bas(i))*a(i,:);
        home,disp([blanks(30)]),disp(['Price out the cost vector ' blanks(10) ])
        [a b
         c z]
    end
    clc
    home,disp([blanks(30)]),disp(['Price out the cost vector ' blanks(10) ])
    [a b
     c z]
    if pt > 20,
        disp(['Hit return to continue'])
        pause
    else
        pause(pt)
    end
    iter=0;    % initialize the iteration count
    n=mn-m;    % number of nonbasic variables
    % nbas - indices of the nonbasic variables
    nbas=[];
    for j=1:mn,
        if all(j~=bas),
            nbas=[nbas j];
        end
    end
    % Perform simplex iterations as long as there is a neg cost
    while iter<iterm,
    % Find a negative reduced cost.
        ctemp=c;    % temporary work vector
        neg=[];
        for j=1:n,
            if ctemp(nbas(j))<-eps1,
                neg=[neg nbas(j)];
            end
        end
        ct=-1;
        if length(neg)==0,
            disp(['This phase is completed - current basis is: '])
            bas=bas
            disp(['The current basic variable values are : '])
            b

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

disp(['The current objective value is:'])
c0(bas)*b
disp(['The number of iterations is ' int2str(iter) ])
if norm(a0(:,bas)*b-b0,inf)>eps3, % check solution
disp(['**WARNING** roundoff error is significant'])
end
if any(b<-eps0), % check positive final solution
disp(['**WARNING** final b not nonnegative'])
end
pause(pt)
clc
home,disp([blanks(30)]),disp(['Final tableau in this phase'
blanks(10)])
disp([' ' blanks(10)])
[a b
c z]
stop=0;
return
else
while ct<-eps1, % continue till we find a suitable pivot
[ct,i]=min(ctemp(neg));
if ct>=-eps1, % no suitable pivot columns are left
disp(['a suitable pivot element cannot be found'])
disp(['probable cause: roundoff error or ill-cond prob'])
disp(['equilibrate problem before solving'])
stop=0;
return
end
t=neg(i); % index of the most neg reduced cost
% Now, let x sub t enter the basis
%
% First, we need to find the variable which leaves the basis
pos=[];
ind=[];
for i=1:m,
if a(i,t)>eps0,
ind=[ind i]; % suitable rows
end
end
if length(ind)==0,
disp(['The problem is unbounded '])
stop=0;
return
end
[alpha,i]=min(b(ind)./a(ind,t));
i=ind(i); % pivot row
if a(i,t)>eps2, % a suitable pivot element is found
ct=0;
else
ctemp(t)=0; % column t is unsuitable pivot col.

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```

        end
    end
    if stop==0,
        return % Ensure that we return
    end

% Update the basic and nonbasic vectors.
    nbas(nbas==t)=bas(i);
    bas(i)=t;
    alpha=a(i,t); % pivot element
% Store the data in ap,bp
    ap=a;
    bp=b;
% Now pivot by row
        iter=iter+1;
        clc
        home,disp([blanks(30)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ']'
blanks(10)])
        disp(['tableau before pivot'])
            [a b
             c z]
            if pt > 20,
                disp(['Hit return to continue'])
                pause
            else
                pause(pt)
            end
            clc
        for k=1:m,
            ratio=ap(k,t)/ap(i,t);
            a(k,:)=ap(k,:)-ap(i,:)*ratio;
            b(k)=bp(k)-bp(i)*ratio;
            home,disp([blanks(30)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ']'
blanks(10)])
            disp(['pivoting          '])
                [a b
                 c z]
            end
% Now for the objective row update
            ratio=c(t)/ap(i,t);
            c=c-ap(i,:)*ratio;
            z=z-bp(i)*ratio;
            home,disp([blanks(30)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ']'
blanks(10)])
            disp(['pivoting          '])
                [a b
                 c z]
% Now for the pivot row update
            a(i,:)=ap(i,:)/ap(i,t);
            b(i)=bp(i)/ap(i,t);

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

```
                home,disp([blanks(30)]),disp(['pivot= a(' int2str(i) ',' int2str(t) ']'
blanks(10)])
                disp(['pivoting          '])
                    [a b
                     c z]
                if pt <= 20,
                    pause(pt)
                else
                    disp(['Hit return to continue'])
                    pause(pt)
                end
            end
        end
    if iter>=100,
        text='Iteration bound has been exceeded ***** '
    end

% End of Program
```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας – *Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξής* – Εκδόσεις *Ε.Μ.Π.* – 2001.
2. Ηλεκτρική οικονομία – *Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής* – Εκδόσεις *Ε.Μ.Π.* – 2003.
3. Απολογισμός της Δ.Ε.Η. για το έτος 2005 – *Έκθεση της Δ.Ε.Η* – 2006.
4. Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς (ΜΑΣΜ), περίοδος 2006-2010 – *Έκθεση του Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε.* – 2006
5. Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας - *Β. Κ. Παπαδιάς* – Εκδόσεις *Συμμετρία* - 1999
6. Electric power system applications of optimization – *James A. Momoh* – *Marcel Dekker, Inc.* – 2001.
7. Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού – *Π.Κάπρος* – Εκδόσεις *Ε.Μ.Π.* – 1997.
8. Integrating Transmission into IRP part 1 & 2 – *M.L.Baughman, S.N.Siddiqi, J.W.Zarnikau* – *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-98, no. 3, pp. 1652-1666 – 1995
9. A Method for Transmission System Expansion Planning Considering Probabilistic Reliability Criteria – *Jaeseok Choi, Trungtin Tran, A.(Rahim)A.El-Keib, Robert Thomas, HyungSeon Oh, Roy Billinton* – *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, no3 – 2005.
10. Genetic algorithms in Search, Optimization and Machine Learning – *D. E. Goldberg* – *Addison-Wesley* – 1989.
11. A Note on Boltzmann Tournament Selection for Genetic Algorithms and Population-Oriented Simulated Annealing – *D. E Goldberg* – *Complex Systems* 3 – 1991.
12. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning – *Vladimiro Miranda, J.V. Ranito, L.M. Proenca.*
13. A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set – *T. A. Feo, M. G. C. Resende, and S. H. Smith* – *Operation Research*, vol. 42, no. 5 – 1994.
14. A Greedy Randomized Adaptive Search Procedure for transmission expansion planning – *Silvio Binato et al* – *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no 2 – 2001.
15. Optimization by simulating annealing: Quantitative studies – *S. Kirkpatrick* – *Journal of Statistical Physics*, vol. 34, pp. 975–986 – 1984.
16. Transmission expansion planning and long term marginal process calculation using simulated annealing – *A.S. Braga and J.T. Saraiva.*
17. A decomposition approach to automated generation-transmission expansion planning – *M.V.F. Pereira, L.M.V.G. Pinto, S.H.F. Cunha, G.C. Oliveira* – *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-104, no. 11 – 1985.

18. New transmission planning model – *H.K. Youssef, R.Hackam – IEEE Transactions on Power Systems vol.4, no1 – 1989.*
19. Transmission Expansion Planning: A Mixed-Integer LP Approach – *N. Alguasil, A.L.Motto, A.J. Conejo – IEEE Transactions on Power Systems vol.18, no3 – 2003.*
20. A Kernel-Oriented Algorithm for Transmission Expansion Planning – *J. Contreras, F.F.Wu – IEEE Transactions on Power Systems vol.15, no4 – 2000.*
21. Transmission network estimation using linear programming – *L.L. Garver – IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-89, pp.1688-1697 – 1970.*
22. Transmission loss allocation using artificial neural networks – *Rezaul Haque – A thesis for the degree of M.Sc. in the department of Electrical Engineering, University of Saskatchewan – 2006.*
23. A generic approach to network modeling for harmonic analysis – *Arindam Maitra – A dissertation submitted to the Faculty of Mississippi State University – 2002.*

ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

1. www.desmie.gr : Διαχειριστής Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
2. www.dei.gr : Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
3. www.rae.gr : Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
4. www.cres.gr : Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
5. www.ypan.gr : Υπουργείο Ανάπτυξης
6. microgrids.power.ece.ntua.gr