



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

**Σχεδιασμός επέκτασης δικτύου μεταφοράς
ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο Benders και
αξιολόγηση με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Η. Βούλγαρης

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

Αθήνα, Ιούλιος 2007



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

**Σχεδιασμός επέκτασης δικτύου μεταφοράς
ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο Benders και
αξιολόγηση με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Η. Βούλγαρης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Ιουλίου 2007

.....
Ευάγγελος Διαλονάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

Αθήνα, Ιούλιος 2007

.....
Ιωάννης Η. Βούλγαρης

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

Copyright © Ιωάννης Βούλγαρης 2007

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 ο σχεδιασμός επέκτασης ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders. Η επέκταση αυτή εφαρμόστηκε στο πειραματικό δίκτυο δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE. Κατόπιν για την αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκε πολυκριτηριακή ανάλυση με τη βοήθεια της μεθόδου Electre I.

Στη πορεία της εργασίας παρουσιάζεται αναλυτικά το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος επέκτασης, τα πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και το πρόγραμμα επέκτασης που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια αναλύονται τα πλάνα επέκτασης που προσομοιώθηκαν και η πολυκριτηριακή τους ανάλυση.

Τα στοιχεία του δικτύου των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE που χρησιμοποιήθηκε βασίστηκαν στο Ελληνικό Σύστημα. Αρχικά υποτέθηκε ενίσχυση της απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής, ύστερα συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής και τέλος ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Αντίστοιχα στην πολυκριτηριακή ανάλυση μελετήθηκαν ένα οικονομικό, ένα κοινωνικό και ένα οικολογικό σενάριο.

Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης και του προγράμματος επέκτασης οδήγησε στη διατύπωση ορισμένων προτάσεων για την βέλτιστη, ως προς το σύστημα μεταφοράς, επέκταση του συστήματος παραγωγής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύστημα μεταφοράς, μέθοδος αποσύνθεσης Benders, πολυκριτηριακή ανάλυση, μέθοδος Electre I, διεσπαρμένη παραγωγή

ABSTRACT

The purpose of this thesis is an expansion planning of an electrical energy transmission system using the Benders decomposition technique. This expansion was applied to the IEEE 14-bus experimental network. The expansion schemes that resulted were evaluated via multicriteria analysis and particularly the method Electre I.

The Greek Electrical Energy System, the mathematical foundation of the expansion problem, the multicriteria decision making systems and the expansion program are thoroughly presented during the analysis of the thesis. The expansion schemes that were simulated and their multicriteria analysis are also analyzed.

The data for the IEEE 14-bus network, that was used, were based on the Greek System. Primarily, a remote conventional generation expansion was regarded, then retained distributed generation and finally a wide distributed generation. Respectively in the multicriteria analysis they were studied the economical, the social and the ecological scenarios.

The results of multicriteria analysis and expansion program led to the formulation of certain proposals for the optimal, regarding the transmission system, expansion of the generation system.

KEY WORDS

Transmission system, Benders decomposition technique, multicriteria analysis, method Electre I, 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 τον Δεκέμβριο 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	6
2. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	7
3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	9
4. ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	15
5. ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΧΜΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	15
6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	19
i. Ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής	19
ii. Αύξηση του φορτίου.....	19
iii. Ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	24
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	24
i. Θεμελίωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης	24
ii. Γραμμικός προγραμματισμός	26
iii. Η μέθοδος simplex	28
iv. Ακέραιος προγραμματισμός	30
3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Σ.Η.Ε.	32
4. Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	46
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	46
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	47
3. ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΣΕΩΝ ΥΠΕΡΟΧΗΣ	49
i. Εισαγωγή	49
ii. Η οικογένεια των μεθόδων Electre.....	50
4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ELECTRE I	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	56
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	56
2. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	57

i Μοντέλα αναπαράστασης δικτύων.....	57
A. Το μοντέλο μεταφοράς	57
B. Η DC ροή φορτίου	58
ii. Επίλυση υποπροβλήματος λειτουργίας	59
3. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	64
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	64
2. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΩΝ 14 ΖΥΓΩΝ ΤΗΣ ΙΕΕΕ	64
3. ΑΡΧΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΠΛΑΝΩΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ.....	69
i. Πλάνο Α : ενίσχυση απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής.....	69
ii. Πλάνο Β : συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής.....	71
iii. Πλάνο Γ : ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής	72
4. ΤΕΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΛΑΝΩΝ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ	73
i. Πλάνο Α : ενίσχυση απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής.....	73
ii. Πλάνο Β : συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής.....	75
iii. Πλάνο Γ : ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	80
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	80
2. ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	80
i. Ορισμός του προβλήματος	80
ii. Παρουσίαση εναλλακτικών πλάνων.....	80
iii. Παρουσίαση σεναρίων	81
iv. Η επιλογή των κριτηρίων απόφασης	82
v. Πίνακας επιδόσεων	84
vi. Μελέτη σεναρίων	75
1. Το οικονομικό σενάριο.....	84
2. Το κοινωνικό σενάριο	86
3. Το οικολογικό σενάριο	88
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	91
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	91
2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ	
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ.....	91
3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	95
4. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	99
A. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ	
ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	101
A.1. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ	
ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	101
A.1.a. Θερμικοί σταθμοί παραγωγής	101

A.1.β. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής (ισχύς μεγαλύτερη από 10 MW).....	101
A.1.γ.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	102
A.2. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΝΗΣΙΩΤΙΚΟΥ	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	105
A.2.α. Πετρελαϊκοί σταθμοί παραγωγής	105
A.2.β.: Εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	106
B. ΧΑΡΤΕΣ.....	109
B.1 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΔΡΟΗΛ- ΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	110
B.2 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	111
B.3 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΒΟΙΑΣ.....	112
B.4 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗ ΘΡΑΚΗ.	112
B.5 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟ	112
B.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ.....	113
B.7 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ Ε.Δ.Σ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ Μ.Α.Σ.Μ. 2006.....	114
Γ. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	115
Γ.1 ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΗ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	115
Γ.2 ΠΙΝΑΚΕΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	124
Γ.3 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ.....	127
Δ.ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	128
Δ.1 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	128
Δ.2 Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ELECTRE I ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.....	145
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	147
ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....	148

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 η παροχή ηλεκτρικής 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 ηλεκτρική 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).

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 εναέρια και υπόγεια γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150kV), από εναέρια 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.

Λόγω της πολυπλοκότητας και της σημαντικότητας της απόφασης καθώς και των πολλών εμπλεκόμενων έχει γίνει σταδιακά αποδεκτό ότι πρέπει ο ενεργειακός σχεδιασμός αλλά και η συνεπαγόμενη λήψη αποφάσεων να εξελίσσονται μέσω ενός ξεκάθαρα και ολοκληρωμένου επιστημονικού πλαισίου. Τα τελευταία χρόνια η χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης για τη μελέτη τέτοιων προβλημάτων κερδίζει συνεχώς έδαφος.

Έχοντας αυτά ως κύριο γνώμονα η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί τον σχεδιασμό και την επίλυση του προβλήματος επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders. Στη συνέχεια τα πλάνα επέκτασης που προέκυψαν αξιολογούνται με την μέθοδο πολυκριτηριακής ανάλυσης Electre I.

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 ανάπτυξής του.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά παρουσιάζονται οι τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης με έμφαση στον γραμμικό και ακέραιο προγραμματισμό. Στη συνέχεια διατυπώνεται με μαθηματική πληρότητα το πρόβλημα ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο τέλος παρουσιάζεται η μέθοδος αποσύνθεσης Benders με την οποία μπορεί να λυθεί ένα τέτοιο πρόβλημα.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύονται τα πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Παρουσιάζεται το γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Έπειτα δίνεται η θεωρία των σχέσεων υπεροχής και τέλος αναλύεται διεξοδικά η μέθοδος Electre I η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης.

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

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του προγράμματος επέκτασης στο δίκτυο δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE για διάφορα πλάνα επέκτασης του συστήματος μεταφοράς.

Το Κεφάλαιο 7 περιλαμβάνει την πολυκριτηριακή ανάλυση των πλάνων επέκτασης που προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο. Αναλύονται τα τρία σενάρια που μελετήθηκαν, τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα από την αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης.

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται αναλυτική μελέτη των συμπερασμάτων που προέκυψαν τόσο από τα αποτελέσματα από το πρόγραμμα επέκτασης όσο και από την πολυκριτηριακή ανάλυση.

Τέλος παρατίθεται Παράρτημα όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του Ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (συμβατικές μονάδες και μονάδες Α.Π.Ε.),

χάρτες με την παρούσα αλλά και την πιθανή μελλοντική κατάσταση του Ελληνικού συστήματος μεταφοράς, συμπληρωματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην πορεία της εργασίας, ο κώδικας του προγράμματος επέκτασης δικτύου μεταφοράς και του προγράμματος πολυκριτηριακής ανάλυσης.

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 ρυπογόνων ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρερχομένων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

Πριν από την ίδρυση της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού 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.

Ημερομηνία ορόσημο αποτελεί η 19^η Φεβρουαρίου όταν και ξεκίνησε το άνοιγμα των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και η δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στη χώρα μας λόγω των ιδιόμορφων χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού συστήματος δόθηκε παράταση της προθεσμίας απελευθέρωσης της αγοράς, οπότε η εφαρμογή αυτού του σχεδίου ξεκίνησε στις 19 Φεβρουαρίου του 2001. Οι κυριότεροι λόγοι που ώθησαν στη δημιουργία μιας ενιαίας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ήταν οι εξής:

1. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας ως προς τη χρησιμοποίηση και την κατανομή των οικονομικών πόρων με την είσοδο του ανταγωνισμού στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Η στήριξη της ανταγωνιστικότητας της ευρωπαϊκής βιομηχανίας στο διεθνοποιημένο περιβάλλον μέσα από ανταγωνιστικές τιμές ενέργειας.
3. Η ανταγωνιστικότητα της αγοράς, που συμβάλλει θετικά σε δύο ακόμα άξονες της ενεργειακής πολιτικής, που είναι το περιβάλλον και η ασφάλεια τροφοδοσίας.
4. Η διαπίστωση ότι η διασύνδεση των επιμέρους συστημάτων οδηγεί σε μικρότερα περιθώρια εφεδρείας και φυσικά στη μείωση του κόστους.
5. Η βελτίωση των προσφερόμενων υπηρεσιών εκ μέρους των παραγωγών, που δίνει τη δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέγουν τον προμηθευτή τους

6. Ο ανταγωνισμός, που θα οδηγήσει σε μείωση των τιμών.

Ο νόμος για την απελευθέρωση τη ενέργειας προβλέπει τα ακόλουθα :

1.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.

2.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.

3.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.

4.Η κυριότητα και η διαχείριση του Δικτύου Διανομής ανήκει αποκλειστικά στη ΔΕΗ.

Σήμερα η Δ.Ε.Η. Α.Ε. είναι η μεγαλύτερη εταιρία παραγωγής 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 . 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.ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ 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 8 λιγνιτικούς σταθμούς, που αποτελούν τη βάση του συστήματος, 2 πετρελαϊκοί σταθμοί, ένας σταθμός φυσικού αερίου στον Άγιο Γεώργιο Κερατσινίου, ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου στη Κομοτηνή και 18 υδροηλεκτρικοί σταθμοί.

Αναλυτικότερα 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 4.438 MW. Το νότιο ενεργειακό - λιγνιτικό κέντρο βρίσκεται στο κέντρο της Πελοποννήσου κοντά στη πόλη της Μεγαλόπολης και αποτελείται από τέσσερις μονάδες συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 850 MW. 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 300 MW. Ο δεύτερος βρίσκεται στο Λαύριο και αποτελείται από δύο πετρελαϊκές μονάδες ισχύος 450 MW καθώς επίσης και από δύο μονάδες συνδυασμένου κύκλου, το "Μικρό Λαύριο" εγκατεστημένης ισχύος 180 MW, που έχει τη δυνατότητα καύσης φυσικού αερίου ή πετρελαίου και το "Μεγάλο Λαύριο" εγκατεστημένης ισχύος 560. 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 τη μονάδα Νο 8 εγκατεστημένης ισχύος 160 MW, χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το φυσικό αέριο μετά τη μετατροπή του από πετρελαϊκό, ενώ άλλη μία μονάδα, η Νο 9 ισχύος 200 MW, επίσης με φυσικό αέριο. Η μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου στην Κομοτηνή είναι ισχύος 495 MW. 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.

Οι μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες βρίσκονται κοντά σε μεγάλους ποταμούς στον κύριο κορμό της χώρας. 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.

Τα τελευταία χρόνια εντείνονται οι προσπάθειες για αύξηση του μεριδίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) καθώς υπάρχουν μεγάλες πιέσεις τόσο από τις δεσμεύσεις της χώρας μας προς την Ε.Ε. όσο και από την συμμετοχή μας στο πρωτόκολλο του Κιότο. Σε αυτήν την κατεύθυνση έχουν ήδη αδειοδοτηθεί πολλές ΑΠΕ ενώ αναμένεται στο άμεσο και απώτερο μέλλον να αυξηθούν σημαντικά τα αιολικά πάρκα (Α/Π) σαν επακόλουθο του ενδιαφέροντος που έχουν επιδείξει ξένες ηλεκτροπαραγωγικές επιχειρήσεις σε συνεργασία με ελληνικές. Η εγκατεστημένη ισχύς των Α/Π στο διασυνδεδεμένο σύστημα είναι 653 MW, 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.

Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ηπειρωτικό δίκτυο από συμβατικές μονάδες (μαζί με μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς) είναι 11233 MW. Η συντριπτική πλειοψηφία της παραγωγής των συμβατικών μορφών με ποσοστό 95,2% (10693 MW) ανήκει στη ΔΕΗ Α.Ε. Βέβαια αυτό το ποσοστό αναμένεται να μειωθεί τα επόμενα χρόνια αφού γίνονται μεγάλες επενδύσεις από ιδιωτικές επιχειρήσεις κυρίως σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου και φυσικού αερίου στα πλαίσια της απελευθέρωσης της αγοράς. Ήδη (Νοέμβριος 2006) έχουν εκδοθεί άδειες παραγωγής για μονάδες Θ.Η. Συνδυασμένου κύκλου ισχύος 5770,96 MW για το ΕΔΣ.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία (Νοέμβριος 2006) είναι 653,17 MW που αντιστοιχεί σε ποσοστό 5,5 % της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του ΕΔΣ. Το 84,08 % (549,21 MW) των ΑΠΕ αντιστοιχεί σε Αιολικά Πάρκα, το 10,18 % (66,55 MW) σε μικρά και μίνι υδροηλεκτρικά έργα, το 5,73 % (37,41 MW) σε βιοαέριο – βιομάζα. Επίσης υπάρχει και ένα πολύ μικρό ποσό εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών πάνελ. Αντίστοιχα 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 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 στον Πίνακα 2.1.

Εγκατεστημένη Ισχύς	MW	Ποσοστό (%)
Λιγνιτικοί Σταθμοί	5288	44,49
Βιοαέριο	37,41	0,56
Πετρελαϊκοί Σταθμοί	750	6,31
Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	3058,5	25,73
Αιολικά	549,21	4,62
Μικρά κα Μίνι Υ/Η	66,55	0,56
Συνδυασμένου Κύκλου	1630	13,71
Φυσικό Αέριο	507,8	4,27
Σύνολο	11886	100

Πίνακας 2.1 :Εγκατεστημένη ισχύς σταθμών παραγωγής στο 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 Αθερινόλακκο 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

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από το διασυνδεδεμένο σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα υψηλής (150 KV και 66 KV) και υπερυψηλής (400 KV) τάσης.

Κύριο χαρακτηριστικό του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος είναι η μεγάλη συγκέντρωση σταθμών παραγωγής στο βόρειο τμήμα της χώρας (Δυτική Μακεδονία, περιοχή Πτολεμαΐδας) 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 περίξ της ευρύτερης περιοχής της πρωτεύουσας. Η μεγάλη γεωγραφική ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, μια εγγενή αδυναμία του συστήματος, 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

Το υφιστάμενο σύστημα αποτελείται από τις εξής κυριότερες συνιστώσες :

- 1)Υποσταθμούς υψηλής τάσης (ΥΤ), μέσης τάσης (ΜΤ).
- 2)Κέντρα υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ).
- 3)Γραμμές μεταφοράς
- 4)Συσκευές αντιστάθμισης άεργου ισχύος
- 5)Διεθνείς διασυνδέσεις

Για τη κάθε συνιστώσα έχουμε πιο αναλυτικά :

1) 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.

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 ΜΤ/400kV, είτε με την υψηλή, μέσω Μ/Σ ανυψώσεως ΜΤ/150kV, ανάλογα με την τοπολογία του συστήματος μεταφοράς στην ευρύτερη περιοχή του σταθμού

2) 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.

3) Το σύστημα των γραμμών μεταφοράς αποτελείται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, 150kV και 66kV, και υπερυψηλής τάσης 400kV. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται το μήκος του εναέριου δικτύου μεταφοράς του διασυνδεδεμένου συστήματος ανά τάση (σε km):

Επίπεδο Τάσης	Κύκλωμα	Χαρακτηρισμός Γ.Μ.	Συνολικό Μήκος (Km)
66	Απλό	E/66	40
150	Απλό	E/150	2630
150	Απλό	B/150	2040
150	Διπλό	2B(E)/150	245
150	Διπλό	2B/150	5850
400	Διπλό	B'B'/400	280
400	Διπλό	2B'B'/400	3440
400	Απλό	B'B'B'/400	285

Πίνακας 2.2 :Μήκος εναέριου συστήματος μεταφοράς Ε.Δ.Σ. ανά τάση.(Οι χαρακτηρισμοί των γραμμών μεταφοράς εξηγούνται παρακάτω)

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 γραμμή 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.

Τα τυποποιημένα είδη εναέριων γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται σήμερα στην Ελλάδα φαίνονται στον Πίνακα 2.3 που ακολουθεί :

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

Πίνακας 2.3: 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).

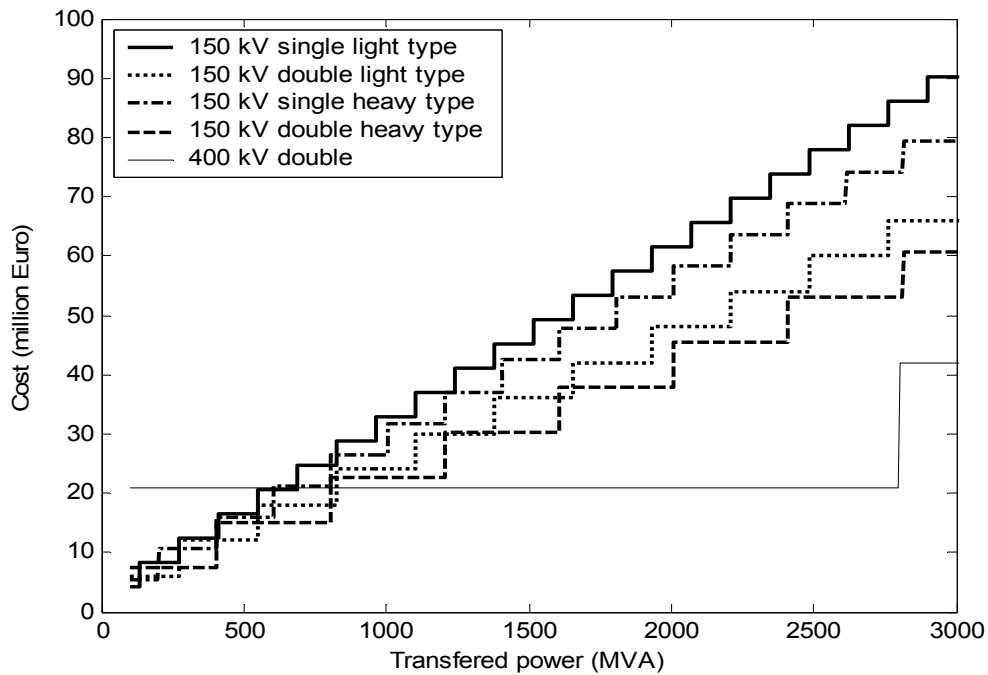
Μεγαλύτερη αξιοπιστία μεταφοράς έχουν όπως είναι φυσικό οι γραμμές απλού κυκλώματος, όταν δηλαδή οι ζώνες διελεύσεως των γραμμών χωρίζονται μεταξύ τους με σημαντική απόσταση. Όπου όμως είναι δύσκολη η εξεύρεση επαρκών διαδρομών διελεύσεως, όπως οι διαδρομές ορεινού χαρακτήρα ή και για λόγους μικρότερου 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 Πίνακα 2.4:

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

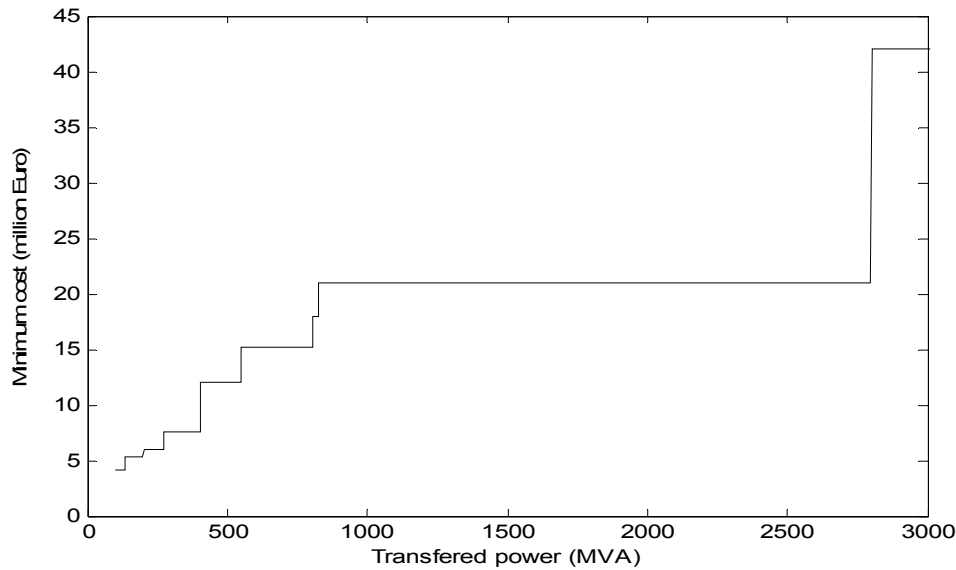
Πίνακας 2.4: Χαρακτηριστικά εναέριων γραμμών μεταφοράς

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



Σχήμα 2.1: Κόστος γραμμών μεταφοράς ανά μεταφερόμενη ισχύ

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



Σχήμα 2.2: 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 :

- i. Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 310mm² χαλκού, ισχύος 125MVA
- ii. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 250mm² χαλκού, τριφασική ισχύος 125MVA
- iii. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 400mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 125MVA
- iv. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 650mm² χαλκού, τριφασική ισχύος 200MVA
- v. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 500mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 200MVA
- vi. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 600mm² αλουμινίου, τριφασικής ισχύος 200MVA
- vii. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 700mm² αλουμινίου, τριφασικής ισχύος 200MVA
- viii. 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.:

- i. Τριπολικά καλώδια 66kV, διατομής 300mm² χαλκού, ισχύος 60MVA
- ii. Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 240mm² χαλκού, ισχύος 125MVA
- iii. Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 310mm² χαλκού, ισχύος 135MVA
- iv. Τριπολικά καλώδια 150kV, διατομής 630mm² χαλκού, ισχύος 175MVA
- v. Μονοπολικά καλώδια 66kV, διατομής 150mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 35MVA
- vi. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 250mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA
- vii. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 125MVA
- viii. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 145MVA
- ix. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 300mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA
- x. Μονοπολικά καλώδια 150kV, διατομής 400mm² χαλκού, τριφασικής ισχύος 175MVA

4) Οι ανάγκες για αντιστάθμιση αέργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων. Πιο συγκεκριμένα, για την τοπική στήριξη των τάσεων στους Υ/Σ 150kV/MT, χρησιμοποιούνται στατοί πυκνωτές που εγκαθίστανται κυρίως στους ζυγούς Μ.Τ. των Υποσταθμών. Επιπρόσθετα, κατά τη διετία 2004-2005 εγκαταστάθηκαν συστοιχίες πυκνωτών 150kV ονομαστικής ικανότητας 25 Mvar εκάστη στα ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου, Παλλήνης, Αχαρνών και Αργυρούπολης. Επίσης, έχουν εγκατασταθεί πηνία στην πλευρά 150kV σε Υποσταθμούς 150kV/MT (σε εκείνους στους οποίους συνδέονται υποβρύχια καλώδια), καθώς και στο τριτεύον τύλιγμα (πλευρά 30 kV) των ΑΜ/Σ των ΚΥΤ, για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου.

5) Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το σύστημα της UCTE μέσω διασυνδετικών Γ.Μ. 400 και 150 kV με τα Συστήματα Αλβανίας, Βουλγαρίας και ΠΓΔΜ. Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος) με την Ιταλία. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των διασυνδέσεων του Ελληνικού Συστήματος με τα Συστήματα των γειτονικών χωρών.

Με το Σύστημα της ΠΓΔΜ η Ελλάδα συνδέεται μέσω:

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

Μέσω των γραμμών αυτών το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί παράλληλα και σύγχρονα με το Διασυνδεδεμένο Σύστημα της UCTE.

Με το Σύστημα της Αλβανίας συνδέεται μέσω:

- μιας γραμμής 400kV απλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό, μεταξύ ΚΥΤ 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.

Μέσω των πιο πάνω διασυνδετικών γραμμών το Αλβανικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το Ελληνικό Σύστημα.

Με το Βουλγαρικό Σύστημα η Ελλάδα συνδέεται μέσω μίας Γ.Μ. 400kV (τύπου Β'Β'), μεταξύ ΚΥΤ Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad στην Βουλγαρία.

Η διασύνδεση Ελλάδας Ιταλίας συνδέει το ΚΥΤ Αράχθου με τον Υ/Σ Galatina Ιταλίας. Είναι σύνδεση συνεχούς ρεύματος και περιλαμβάνει τα ακόλουθα :

- 2 σταθμούς μετατροπής ΥΤΣΡ (HVDC) μονοπολικού τύπου 400kV ικανότητας 500MW
- τμήματα εναερίων Γ.Μ. DC μήκους 45km επί Ιταλικού εδάφους και 107km επί ελληνικού εδάφους
- τμήμα υπογείου καλωδίου DC μήκους 4km επί Ιταλικού εδάφους • ένα υποβρύχιο καλώδιο DC 400kV ισχύος 500MW και μήκους 160km.

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 2.5.

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

Πίνακας 2.5 : 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. Να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν συγκεντρωτικά στοιχεία για το 2006 καθώς η ΔΕΗ δεν έχει δημοσιεύσει τον απολογισμό της εταιρίας μέχρι την σύνταξη της παρούσης εργασίας για το έτος.

Ηλεκτρικό σύστημα	Κατανάλωση (TWh)		Ποσοστό (%)
	2004	2005	
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 2.6 : Διάρθρωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Στον Πίνακα 2.7 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*	0,895	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 2.7: Διάρθρωση της παραγωγής και ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών ενέργειας

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά κατηγορία στο διασυνδεδεμένο σύστημα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.8:

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
Άντληση	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 2.8: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά χρήση.

Οι ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας που πραγματοποιήθηκαν το 2005 με τα γειτονικά μας συστήματα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.9 :

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 2.9: Ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας το έτος 2005

Στον Πίνακα 2.10 καθώς και στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η εξέλιξη της ετήσιας αιχμής ζήτησης (μέση ωριαία τιμή) ηλεκτρικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο σύστημα κατά την τελευταία δεκαετία.

Έτος	Ετήσια αιχμή (MW) ⁽¹⁾	Διαφορά από προηγούμενο έτος (%)	Μέση ποσοστιαία μεταβολή				
			Δεκαετία 1995-2005	Πενταετία 2000-2005	Τριετία 2003-2005		
1996	6503		4,6%				
1997	6703	3,08					
1998	7370	9,95					
1999	7364	-0,08					
2000	8529	15,82					
2001	8598	0,81					
2002	8924 9100 ⁽²⁾	5,84					
2003	9042 9112 ⁽²⁾	0,13					
2004	9370 ⁽³⁾ 9500 ⁽⁴⁾	5,36				3,2%	3,4%
2005	9635 9800 ⁽⁵⁾	2,08					
2006	9889	2,63					

(1) Συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες Μεταφοράς

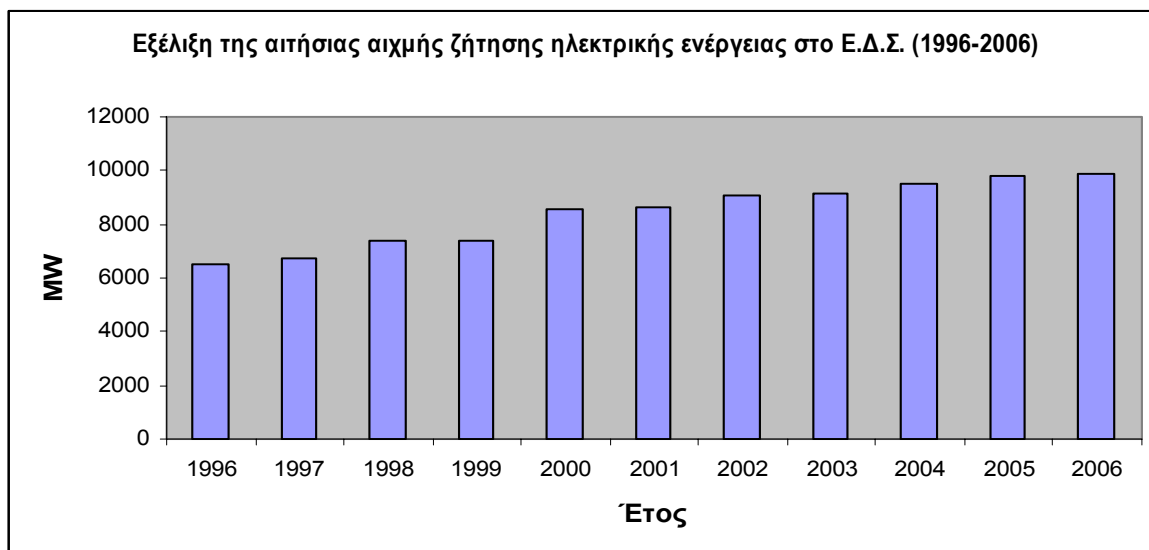
(2) Έγιναν συμφωνημένες περικοπές τουλάχιστον 150 MW το 2002 και 70 MW το 2003

(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 2.10: Εξέλιξη ετήσιας αιχμής ζήτησης



Σχήμα 2.6: Εξέλιξη της ετήσιας αιχμής του ΕΔΣ

Στο παρόν σημείο θα παρουσιάσουμε περισσότερα στοιχεία για το έτος 2005 καθώς είναι αυτό στο οποίο θα βασιστούμε για το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία. Στον Πίνακα 2.11 παρουσιάζεται η μηνιαία εξέλιξη της αιχμής ζήτησης καθώς και η μηνιαία παραγωγή από ΑΠΕ.

Μήνας	Αιχμή Ζήτησης (MW)	Παραγωγή ΑΠΕ (MW)
Ιανουάριος	8023	96,286
Φεβρουάριος	8321	110,118
Μάρτιος	7916	99,78
Απρίλιος	7356	110,264
Μάιος	7205	89,113
Ιούνιος	8858	80,541
Ιούλιος	9300	85,754
Αύγουστος	9635	77,74
Σεπτέμβριος	8249	68,708
Οκτώβριος	7531	124,028
Νοέμβριος	8516	113,23
Δεκέμβριος	8740	150,443

Πίνακας 2.11 :Μηνιαία εξέλιξη αιχμής ζήτησης και παραγωγής ΑΠΕ

6. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ 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).

i. Ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής

Σύμφωνα λοιπόν με τη ΜΑΣΜ 2006-2010 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 Ν. 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 Ν. 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 2.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα κατά την τελευταία δεκαετία.

Έτος	Ετήσια αιχμή (MW)	Διαφορά από προηγούμενο έτος (%)	Μέση ποσοστιαία μεταβολή		
			Δεκαετία 1995-2005	Πενταετία 2000-2005	Τριετία 2003-2005
1994	33.976.754				
1995	35.159.317	3,48%	4,3%		
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 2.12: Εξέλιξη ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Στον Πίνακα 2.13 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 2.13: 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 2.14: 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 2.15 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 2.15: 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 2.16:

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 2.16: 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 ΚΥΤ και το κλείσιμο του βρόχου 400kV ΚΥΤ Κουμουνδούρου – Κόρινθος – Μεγαλόπολη – Πάτρα, κατασκευή 2 ΚΥΤ στο Αλιβέρι και στο Σχηματάρι που θα συνδέουν ουσιαστικά το σταθμό παραγωγής του Αλιβερίου με το ΚΥΤ Αγ.Στεφάνου και θα δίνει νέες δυνατότητες απορρόφησης ισχύος από ΑΠΕ στην ευρύτερη περιοχή της Εύβοιας καθώς και κατασκευή στην Αττική του ΚΥΤ 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 ΚΥΤ.

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 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

Μαθηματική θεμελίωση του προβλήματος επέκτασης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αρχικά θα παρουσιαστεί μια σύντομη εισαγωγή στις τεχνικές βελτιστοποίησης, ύστερα η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και θα ακολουθήσει η παρουσίαση της μεθόδου αποσύνθεσης Benders.

2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

i. Θεμελίωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως η εύρεση ενός διανύσματος:

$$X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix}$$

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.

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:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{No} c_i \left(\prod_{j=1}^n x_j^{p_{ij}} \right) \text{ με } c_i > 0 \text{ και } x_j > 0$$

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 .

ii. Γραμμικός Προγραμματισμός

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 $g(X) \leq b$ και $X \geq 0$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι της μορφής:

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

ενώ οι περιορισμοί:

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

και

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

Οι περιορισμοί πρόσημου 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 για 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.

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

iii. 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:

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

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 αλγόριθμος 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_j 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 *ρίνοτ*. Έχοντας διαλέξει μεταβλητή εισαγωγής και μεταβλητή εξόδου από τη βάση “στριφογυρίζουμε” γύρω από το ρίνοτ, 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 υπονήφια 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.

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 απεριοριστο 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^{ns} 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^{ns} 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^{ns} 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^{ns} φάσης, όλες οι τεχνητές μεταβλητές είναι μηδέν, δηλαδή $w = 0$, τότε το αρχικό πρόβλημα ΓΠ έχει λύση. Υπάρχουν όμως πάλι δύο υποπεριπτώσεις:

Αν όλες οι τεχνητές μεταβλητές στο βέλτιστο πίνακα της 1^{ns} 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.

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 .

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

iv) Ακέραιος προγραμματισμός

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 υποψήφια. Αν όμως είναι μεγαλύτερη του τρέχοντος κάτω ορίου, τότε θεωρείται ως νέο τρέχον κάτω όριο και η αντίστοιχη λύση θεωρείται υποψήφια.

Υπάρχουν πολλές παραλλαγές της τεχνικής branch-and-bound χωρίς όμως κάποια από αυτές να υπερέρχει 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 υποψήφια όταν οι μεταβλητές που πρέπει να είναι ακέραιες παίρνουν στη λύση ακέραιες τιμές .

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.

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

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 .

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 .

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 απόπτωση (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.

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.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί εν μέρει 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. 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 ρυθμών.

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:

Σύνολα

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 .
$HRS_{y, s', d, peak}$: Σύνολο ωρών που εμφανίζεται τύπος ημέρας d_{peak} , στην εποχή s' κατά τη διάρκεια ενός χρόνου y .
$HRS_{y, s', d, base}$: 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 έργου ισχύος (επαγωγική λειτουργία) μονάδας m στο ζυγό i .
K_{im}^{Mq}	:Μέγιστη παραγωγή έργου 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 έργου 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_{ijts}^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_{ijts}^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:

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

$$\begin{aligned} \text{Min} C = & \sum_{i \in I} \sum_{m \in NM_i} CC_{im} U_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} EC_{imw} \varepsilon_{imw} + \sum_{c \in CR} \sum_{l \in NL_c} TC_{cl} F_{cl} + \sum_{b \in D} DSM_b D_b \\ & + \sum_y \sigma_y \left[\sum_{t \in T_y} E \sum_{i \in I} \left(\sum_{c \in CL} OC_{ic't} P_{ic't}^u + \sum_{m \in M_i} PC_{im} P_{imts}^s + \sum_{n \in NSA} AC_{ny} A_{nts} \right) \right] \quad (3.1) \end{aligned}$$

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 .

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

$$(3.2) \quad \sum_{i \in I} \sum_{m \in NM_i} CC_{yim} U_{im} + \sum_{i \in I} \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} EC_{yimw} \varepsilon_{imw} + \sum_{c \in CRI \in NL_C} \sum_{ycl} TC_{ycl} F_{cl} + \sum_{b \in D} DSM_{yb} D_b \leq BD_y$$

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

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

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

$$\sum_{m \in M_i} P_{imts}^g + \sum_{c' \in CL} P_{ic'ts}^u - \sum_{j \in J} \sum_{l \in EL_C} P_{ijlts}^f - \sum_{j \in J} \sum_{l \in NL_C} P_{ijlts}^f F_{cl} = P_{it}^d \quad (3.3)$$

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

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

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

$$\sum_{m \in M_i} Q_{imts}^g + \sum_{c' \in CL} q_{ic't}^u P_{ic'ts}^u - \sum_{j \in J} \sum_{l \in EL_C} Q_{ijlts}^f - \sum_{j \in J} \sum_{l \in NL_C} Q_{ijlts}^f F_{cl} = Q_{it}^d \quad (3.4)$$

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

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

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

$$0 \leq P_{imts}^g \leq K_{im}^P a_{imts} \quad (3.5)$$

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

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

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

$$0 \leq P_{imts}^g \leq K_{im}^P a_{imts} U_{im} \quad (3.6)$$

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

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

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

$$K_{im}^{mq} a_{imts} \leq Q_{imts}^g \leq K_{im}^{Mq} a_{imts} \quad (3.7)$$

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

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

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

$$K_{im}^{mq} a_{imts} U_{im} \leq Q_{imts}^g \leq K_{im}^{Mq} a_{imts} U_{im} \quad (3.8)$$

8. Περιορισμός προσυμφωνημένης απόρριψης ισχύος σε συνθήκες μέγιστης ζήτησης.

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

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

$$0 \leq P_{ibts}^D \leq K_{ib}^D D_b \quad (3.9)$$

9. Ισοζύγιο ενέργειας για προγράμματα διαχείρισης φορτίου.

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

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

$$P_{ibys'd'peak}^D HRS_{ys'd'peak} = a_b P_{ibys'd'base}^D HRS_{ys'd'base} \quad (3.10)$$

10. Ισοζύγιο ροής ενεργού ισχύος στις γραμμές.

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

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

$$\left\{ V_{its} V_{jts} \left[-G_{cl} \cos(d_{its} - d_{jts}) + B_{cl} \sin(d_{its} - d_{jts}) \right] + (V_{its})^2 G_{cl} \right\} b_{clts} = P_{ijlts}^f \quad (3.11)$$

11. Ισοζύγιο ροής άεργου ισχύος στις γραμμές.

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

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

$$\left\{ -V_{its} V_{jts} \left[G_{cl} \sin(d_{its} - d_{jts}) + B_{cl} \cos(d_{its} - d_{jts}) \right] + (V_{its})^2 (B_{cl} - b_{cl} / 2) \right\} b_{clts} = Q_{ijlts}^f \quad (3.12)$$

12. Περιορισμός ροής ισχύος για ήδη υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς.

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

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

$$\sqrt{(P_{ijlts}^f)^2 + (Q_{ijlts}^f)^2} \leq T_{cl} b_{clts} \quad (3.13)$$

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

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

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

$$\sqrt{(P_{ijlts}^f)^2 + (Q_{ijlts}^f)^2} \leq T_{cl} b_{clts} F_{cl} \quad (3.14)$$

14. Περιορισμός τάσης για κάθε ζυγό i του συστήματος.

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

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

$$V_i^{\min} \leq V_{its} \leq V_i^{\max} \quad (3.15)$$

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

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

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

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{m \in M_i} e_{nim} P_{imts}^g - \sum_{m \in PM_i} \sum_{w \in PT} \eta_{nimwt} \varepsilon_{imw} P_{imts}^g \right) \leq HA_{nt} + A_{nts} \quad (3.16)$$

16. Περιορισμός μη εξυπηρετούμενης ισχύος για κάθε ζυγό i.

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

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

$$0 \leq P_{ic'ts}^u \leq CLP_{ic'} P_{it}^d \quad (3.17)$$

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 ακέραίου 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.

4. 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 .

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:

$$\begin{aligned} \text{(Π1)} \quad & \text{Min } z = c(y) + d(x) \\ & \text{v.π. } f(y) \geq a \\ & g(y) + h(x) \geq b \end{aligned} \quad (3.18)$$

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):

$$\begin{aligned} \text{(Π2)} \quad & D(y) = \text{Min } d(x) \\ & \text{v.π. } h(x) \geq b - g(y) \end{aligned} \quad (3.19)$$

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

$$\begin{aligned} \text{(Π3)} \quad & \text{Min } c(y) + D(y) \\ & \text{v.π. } f(y) \geq a \end{aligned} \quad (3.20)$$

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:

$$\begin{aligned}
 \text{(IMP)} \quad & \text{Min } z \\
 \text{υ.π. } & z \geq c(y) + D^k + \pi^k (y^k - y) \quad , \quad k=1,2,\dots,K \\
 & f(y) \geq a
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

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.

$$\begin{aligned}
 \text{(OSP)} \quad & D^k = \text{Min } d(x) \\
 \text{υ.π. } & h(x) \geq b - g(y^k)
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

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.

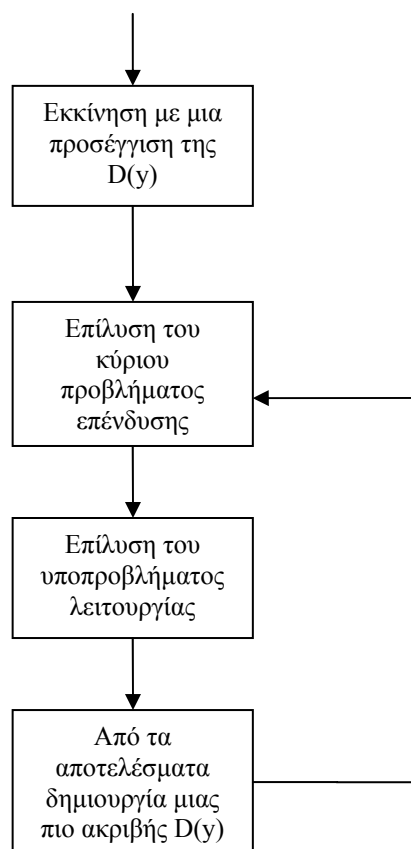
Βήμα 3^ο : Λύνουμε το OSP (για δεδομένο y^0 από το βήμα 2) και βρίσκουμε τα (D^k, x^k, π^k) .

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 3.1: 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πολυκριτηριακά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποτελεί ένα εργαλείο λήψης αποφάσεων που αναπτύχθηκε για να περιορίσει την σύγχυση που προκαλείται σε περιπτώσεις που εμπλέκονται μεταξύ τους πολλά και διαφορετικής φύσεως κριτήρια που αφορούν συγκεκριμένες επιλογές. Ουσιαστικά με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η σύνθεση ενός μεγάλου όγκου πληροφοριών διατηρώντας παράλληλα τους στόχους και τις προτιμήσεις του εκάστοτε λήπτη της απόφασης. Τελικά, αυτό που επιδιώκουμε χρησιμοποιώντας πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης αποφάσεων είναι ο καλύτερος δυνατός συμβιβασμός ανάμεσα σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς, ρυθμίζοντας κατά περίπτωση και ανάλογα με τους στόχους που έχουμε θέσει, το βάρος που φέρει ο καθένας στην τελική λήψη της απόφασης.

Όλες οι προσεγγίσεις πολυκριτηριακής ανάλυσης κάνουν τις επιλογές και την συνεισφορά τους στα διάφορα κριτήρια και όλες απαιτούν την άσκηση κρίσης. Διαφέρουν, όμως, στον τρόπο που συνδυάζουν τα στοιχεία. Επίσημες τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης συνήθως παρέχουν ένα συγκεκριμένο σύστημα σχετικής βαρύτητας για τα διαφορετικά κριτήρια. Ο βασικός ρόλος αυτών των τεχνικών είναι να αντιμετωπίσουν τις δυσκολίες που φαίνεται να έχουν οι λήπτες αποφάσεων να χειριστούν με συνέπεια και λογική μεγάλο αριθμό περίπλοκων πληροφοριών.

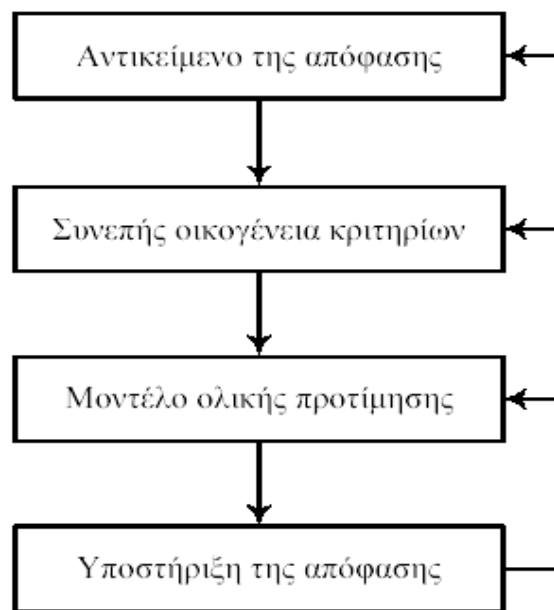
Οι τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της προτιμότερης επιλογής, για την κατάταξη επιλογών, για απαρίθμηση ενός περιορισμένου αριθμού επιλογών, για επακόλουθη λεπτομερή αξιολόγηση, ή απλά για διαχωρισμό αποδεκτών και μη αποδεκτών δυνατοτήτων.

Υπάρχουν πολλές τεχνικές πολυκριτηριακής ανάλυσης και ο αριθμός τους ακόμα αυξάνεται. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους γίνεται αυτό:

- υπάρχουν πολλοί τύποι αποφάσεων που ταιριάζουν τις ευρείες περιστάσεις των τεχνικών πολυκριτηριακής ανάλυσης,
- ο διαθέσιμος χρόνος για την ανάληψη της ανάλυσης μπορεί να διαφέρει,
- ο αριθμός ή η φύση των διαθέσιμων στοιχείων που στηρίζουν την ανάλυση ποικίλει,
- οι αναλυτικές ικανότητες αυτών που υποστηρίζουν την απόφαση μπορεί να ποικίλουν
- η διοικητική κουλτούρα και οι απαιτήσεις των οργανισμών διαφέρουν.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Η διαδικασία μοντελοποίησης της απόφασης είναι η ακόλουθη :



Σχήμα 4.1 :Γενικό Μεθοδολογικό Πλαίσιο

Στο πρώτο στάδιο καθορίζεται το σύνολο των εναλλακτικών δραστηριοτήτων και η προβληματική της ανάλυσης. Ως 'εναλλακτική' ορίζεται κάθε πιθανή επιλογή η οποία αποτελεί λύση του προβλήματος και η οποία πρέπει να αξιολογηθεί ως προς την καταλληλότητά της. Το σύνολο των εναλλακτικών μπορεί να οριστεί είτε ως ένα διακριτό σύνολο – στο οποίο είναι δυνατή η πλήρης καταγραφή όλων των εναλλακτικών δραστηριοτήτων – είτε ως ένα συνεχές σύνολο – στο οποίο η εξαντλητική καταγραφή των εναλλακτικών δεν είναι δυνατή. Στη συνέχεια, απαιτείται ο καθορισμός της προβληματικής της ανάλυσης. Γενικά υπάρχουν τέσσερις προβληματικές που καλύπτουν τις πρακτικές περιπτώσεις:

- Η προβληματική τύπου α αναφέρεται στην επιλογή μίας ή περισσότερων εναλλακτικών οι οποίες θεωρούνται ως οι πιο κατάλληλες (choice).
- Η προβληματική β αναφέρεται στην ταξινόμηση των εναλλακτικών σε προκαθορισμένες ομοιογενείς κατηγορίες (classification/ sorting).
- Η προβληματική γ αναφέρεται στην κατάταξη των εναλλακτικών δραστηριοτήτων ξεκινώντας από τις καλύτερες (ranking).

- Τέλος, η προβληματική δ αναφέρεται στην περιγραφή των εναλλακτικών με βάση τα επιμέρους κριτήρια αξιολόγησης (description).

Στο δεύτερο στάδιο καθορίζεται μία συνεπής οικογένεια κριτηρίων. Ως κριτήριο ορίζουμε κάθε μονότονη μεταβλητή δηλωτική των προτιμήσεων ενός αποφασίζοντα .

Ένα κριτήριο μπορεί να είναι είτε ποσοτικό και να εκφράζεται από μία συνεχή κλίμακα είτε ποιοτικό, για την μοντελοποίηση του οποίου υιοθετείται μια συμβατική κλίμακα διακεκριμένων τιμών, του τύπου: άριστος (βαθμός 5), πολύ καλός (βαθμός 4) κ.ο.κ. Στη μαθηματική γλώσσα, ένα κριτήριο αντιπροσωπεύεται από μία πραγματική συνάρτηση g . Με $g(a)$ δηλώνουμε την εκτίμηση της δραστηριότητας a πάνω στο κριτήριο g .

Οι τρεις θεμελιώδεις συνθήκες των κριτηρίων είναι οι εξής :

- Μονοτονία

Εάν για ένα ζεύγος δραστηριοτήτων (a,b) ισχύει $g_i(a) = g_j(b)$ για κάθε $i \neq j$ και $g_i(a) > g_j(b)$, τότε η δραστηριότητα a προτιμάται από την b .

- Επάρκεια

Εάν για ένα ζεύγος δραστηριοτήτων (a,b) ισχύει $g_i(a) = g_i(b)$ για κάθε $i=1,2,\dots,n$ τότε η δραστηριότητα a είναι ισοδύναμη της b , δηλαδή δεν απουσιάζει κανένα κριτήριο απόφασης από το σύνολο των n κριτηρίων.

- Μη πλεονασμός

Η διαγραφή ενός κριτηρίου g_i από το σύνολο των κριτηρίων είναι ικανή να αναιρέσει μία από τις προηγούμενες δύο συνθήκες για κάποιο ζεύγος δραστηριοτήτων.

Για τη λήψη ορθολογικών αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι το σύνολο των εξεταζόμενων κριτηρίων διαμορφώνει μία συνεπή οικογένεια κριτηρίων.

Το επόμενο στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή και χρήση ενός μοντέλου ολικής προτίμησης (global evaluation model), το οποίο θεωρείται η σύνθεση όλων των κριτηρίων έτσι ώστε να ολοκληρωθεί ο στόχος της ανάλυσης με βάση την προβληματική που έχει οριστεί. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως βάση για : τον προσδιορισμό μίας συνολικής αξιολόγησης κάθε εναλλακτικής, την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών και τη διεύρυνση του συνόλου των εναλλακτικών (σε συνεχές σύνολο). Η ανάπτυξη του γίνεται με δυο τρόπους: αλληλεπιδραστικά μέσω συνεργασίας του αναλυτή και του αποφασίζοντα, ή με ανάλυση των αποφάσεων που λαμβάνει ο αποφασίζων έτσι ώστε να αναπτυχθεί το κατάλληλο μοντέλο που είναι συμβατό με την πολιτική λήψης των αποφάσεων που ακολουθεί ο αποφασίζων.

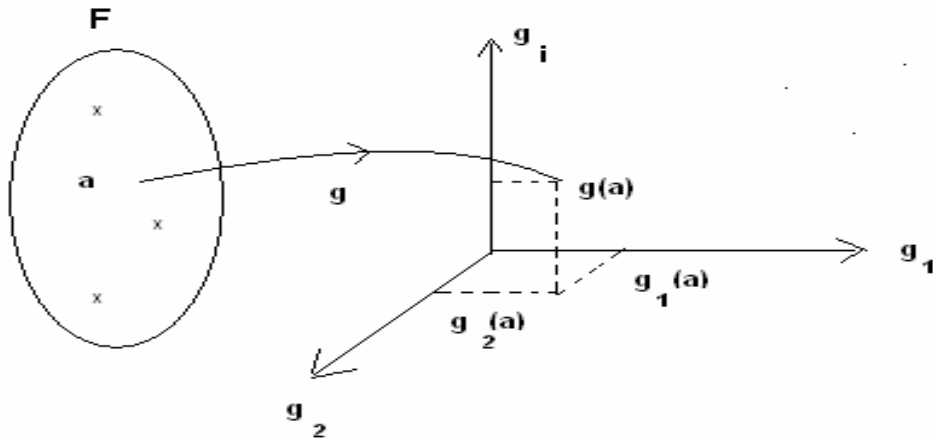
Το σύνολο των δυνατών επιλογών (F) θα πρέπει να πληρεί δύο βασικές :

- τα όρια του πρέπει να είναι σαφή και προσδιορισμένα
- τα στοιχεία του πρέπει να είναι αλληλοαποκλειόμενα για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα απόφασης.

Τρόπος προσδιορισμού του F :

- το F δημιουργείται με βάση ένα συνδυαστικό κανόνα οποιασδήποτε μορφής
- οι εναλλακτικές λύσεις προκύπτουν από ένα σύστημα εξισώσεων και ανισώσεων
- με βάση τα δεδομένα του προβλήματος δημιουργείται ένας κατάλογος υποψηφίων λύσεων, που τα στοιχεία του περιγράφουν κάθε λύση.

Ο ρόλος του μοντελοποιού συνίσταται στη διασαφήνιση των επιπτώσεων των διαφόρων δραστηριοτήτων του συνόλου F . Η πολυκριτηριακή απεικόνιση του συνόλου F είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 4.2: Πολυκριτηριακή απεικόνιση συνόλου F

3. ΘΕΩΡΙΑ ΣΧΕΣΕΩΝ ΥΠΕΡΟΧΗΣ

ι) Εισαγωγή

Η θεωρία των σχέσεων υπεροχής, που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Roy (1991, 1996), έχει στόχο την ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου που επιτρέπει την πραγματοποίηση διμερών συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών. Οι μέθοδοι σχέσεων υπεροχής/ ανάλυσης συμφωνίας επιτρέπουν τη γενική διάταξη των εναλλακτικών ενώ παράλληλα επιτρέπουν ξεχωριστά ζεύγη απόψεων να παραμείνουν μη συγκρίσιμα όταν δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες για να γίνει διάκριση μεταξύ των εναλλακτικών. Αντίθετα, οποιαδήποτε προσθετική μέθοδος, όπως η πολυδιάστατη θεωρία χρησιμότητας ή η διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας, από τις οποίες προκύπτει ένα μόνο σκορ για κάθε εναλλακτική, απαιτεί όλες οι επιλογές να είναι άμεσα συγκρίσιμες, ακόμη κι όταν τέτοιες συγκρίσεις είναι αμφισβητήσιμες λόγω έλλειψης κατάλληλων στοιχείων. Οι μέθοδοι υπεροχής χτίζουν μια σχέση, τη «σχέση υπεροχής», η οποία αναπαριστά τις έντονα διαμορφωμένες προτιμήσεις του λήπτη αποφάσεων, δεδομένων των διαθέσιμων πληροφοριών. Πρόκειται για ένα πολυκριτηριακό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις ώστε να δείξει το βαθμό επικράτησης της μιας εναλλακτικής έναντι της άλλης. Οι μέθοδοι υπεροχής διευκολύνουν τη σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών με την αντιστοίχιση αρχικών βαρών στα κριτήρια

αποφάσεων και εν συνεχεία μεταβάλλοντας τα βάρη αυτά στα πλαίσια της ανάλυσης ευαισθησίας, εάν η ακριβή τους τιμή δεν είναι γνωστή. Η σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών συνεχίζεται ανά ζεύγη αναφορικά με κάθε κριτήριο απόφασης και καθορίζει το βαθμό επικράτησης ή «υπεροχής» της μία επιλογής έναντι της άλλης. Το αποτέλεσμα είναι η κατάταξη των διαφόρων επιλογών.

Οι γνωστότερες μέθοδοι με χρήση της σχέσης υπεροχής είναι η οικογένεια μεθόδων Electre – την οποία θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία – και Promethe, η μέθοδος Melchior και η μέθοδος Oreste.

ii) Η οικογένεια των μεθόδων Electre

Η προσέγγιση των μεθόδων Electre (η κύρια εκπρόσωπος των μεθοδολογιών υπεροχής) ξεκινά από τη βασική προϋπόθεση ότι αυτός που επιθυμεί να λάβει μια απόφαση δύναται να επιτύχει μόνο προσεγγιστικές συγκρίσεις μεταξύ των αποδόσεων των εναλλακτικών δράσεων. Η έννοια της υπεροχής (outranking) στερείται αξιωματικής βάσης, αλλά βασίζεται στην εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων και στην εφαρμογή ενός αλγορίθμου απόφασης. Ο αποφασίζων σε συνεργασία με τον αναλυτή προσδιορίζουν κάποια όρια – κατώφλια, σύμφωνα με το οποία επιτελείται η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών δράσεων. Τα κατώφλια αυτά είναι:

- το κατώφλι αδιαφορίας q_j
- το όριο προτίμησης p_j
- το όριο άρνησης v_j

όπου j το αντίστοιχο κριτήριο επιλογής.

Η υιοθέτηση των ορίων q_j και p_j καταλήγει στη θέσπιση ζωνών αδιαφορίας και προτίμησης μεταξύ των αποδόσεων των εναλλακτικών δράσεων. Το όριο άρνησης δηλώνει το σημείο κατά το οποίο μία δράση αποδίδει τόσο άσχημα σε κάποιο κριτήριο, ώστε η πρόταση 'η δράση a είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η b ', δεν ευσταθεί. Τα όρια q_j και p_j δύναται να είναι σταθερά για όλα τα επίπεδα απόδοσης στο κριτήριο j , ή αναλογικά με την απόδοση $g_j(a)$ της δράσης a στο κριτήριο j ή και τα δύο ταυτόχρονα, στη μορφή $p_j = \mu g_j(a) + \varepsilon$.

Το όριο αδιαφορίας q_j είναι ένας πραγματικός θετικός αριθμός που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διαφορά μεταξύ των αποδόσεων δύο εναλλακτικών δράσεων σε ένα κριτήριο, η οποία δεν θεωρείται ικανή να υποδηλώσει προτίμηση της μιας από την άλλη. Αυτό μπορεί να εκφραστεί μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$a \text{ I } b \leftrightarrow |g_j(a) - g_j(b)| \leq q_j \quad (4.1)$$

όπου, $g_j(a)$ είναι η απόδοση της δράσης a στο κριτήριο j . Το q_j δύναται να διαφοροποιείται για κάθε κριτήριο.

Ο πρωταρχικός στόχος εισαγωγής του ορίου προτίμησης p_j είναι να υποδηλώσει πως μία δράση είναι αυστηρά προτιμητέα σε σχέση με κάποια άλλη, μόνο όταν υπάρχει 'σημαντική' διαφορά στις αποδόσεις τους. Επεκτείνοντας παραπέρα, αυστηρή προτίμηση μιας δράσης σχετικά με μία άλλη μπορεί να συμβεί μόνο όταν η διαφορά των αποδόσεών τους είναι αρκετά μεγάλη, τόσο ώστε να ξεπερνά κάθε ανακρίβεια, αβεβαιότητα, ή σφάλμα που συνοδεύει τον προσδιορισμό τους. Αυτό καθορίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$a \text{ P } b \leftrightarrow g_j(a) > g_j(b) + p_j \quad (4.2)$$

Αυστηρή προτίμηση μιας δράσης a σε σχέση με μία δράση b εγκαθιδρύεται ακόμη και σύμφωνα με μόνο ένα κριτήριο, ανεξάρτητα από τις σχετικές αποδόσεις τους στα υπόλοιπα.

Αυτή η περίπτωση εμφανίζεται όταν η διαφορά των αποδόσεων των δράσεων a και b είναι τόσο σημαντική στο συγκεκριμένο κριτήριο ώστε να υπερνικά το αντίστοιχο όριο άρνησης v_j :

$$b P a \leftrightarrow g_j(a) + v_j < g_j(b) \quad (4.3)$$

Τη θέσπιση τιμών (ή συναρτήσεων) για τα όρια προτίμησης, αδιαφορίας και άρνησης ακολουθεί η σύγκριση των αποδόσεων των εναλλακτικών κατά ζεύγη, και αρχικά για κάθε κριτήριο ξεχωριστά. Έτσι, οι εναλλακτικές δράσεις δύνανται να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορα σύνολα. Το πρώτο είναι το σύνολο αδιαφορίας I , και τα μέλη του επαληθεύουν τη σχέση (4.1), το δεύτερο είναι το σύνολο προτίμησης P και τα μέλη του επαληθεύουν τη σχέση (4.2). Ενδιάμεσα βρίσκεται το σύνολο της ασθενούς προτίμησης Q , και περιλαμβάνει τις εναλλακτικές που βρίσκονται μεταξύ αδιαφορίας και αυστηρής προτίμησης. Το τελευταίο σύνολο είναι το σύνολο R , που περικλείει τις δράσεις που δεν δύνανται να συγκριθούν μεταξύ τους.

Έτσι είναι δυνατό να κατασκευαστεί μία σχέση υπεροχής S , για όλα τα κριτήρια, που υποδεικνύει πως μία δράση μπορεί να χαρακτηριστεί ως ‘τουλάχιστον τόσο καλή όσο’ μία άλλη:

$$a S_j b: \text{ η δράση } a \text{ είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η } b \text{ στο κριτήριο } j \leftrightarrow g_j(a) \leq g_j(b) - q_j, \text{ δηλαδή:} \\ \{a S_j b\} = \{a P_j b\} \cup \{a Q_j b\} \cup \{a I_j b\} \quad (4.4).$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις κατηγοριοποιήσεις, οι μέθοδοι ELECTRE καθορίζουν τις έννοιες των συντελεστών συμφωνίας και ασυμφωνίας. Γενικά, ο συντελεστής συμφωνίας είναι ένα ποσοτικό μέτρο της βαρύτητας των επιχειρημάτων που επικυρώνουν την πρόταση ‘η δράση a είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η b ’, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια. Αντίστροφα, εάν ο συντελεστής συμφωνίας μετράει την ένταση της υποστήριξης της υπόθεσης *η δράση a προτιμάται σε σχέση με την b* , τότε ο συντελεστής ασυμφωνίας μετράει την ένταση των επιχειρημάτων ενάντια σε αυτήν την υπόθεση.

Οι μέθοδοι ELECTRE επιτρέπουν τη σύγκριση των εναλλακτικών υποδηλώνοντας το κατά πόσο υπάρχει ένα ‘βέλτιστο’ σημείο, ή το αν κάποιες δράσεις μπορούν να παραβλεφθούν, ή εάν είναι απαραίτητη περαιτέρω ανάλυση. Βέλτιστο σημείο υπάρχει όταν κάποια εναλλακτική υπερέχει σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες. Επίσης εάν όλες οι δράσεις υπερέχουν σε σχέση με μια συγκεκριμένη, τότε αυτή μπορεί να παραβλεφθεί.

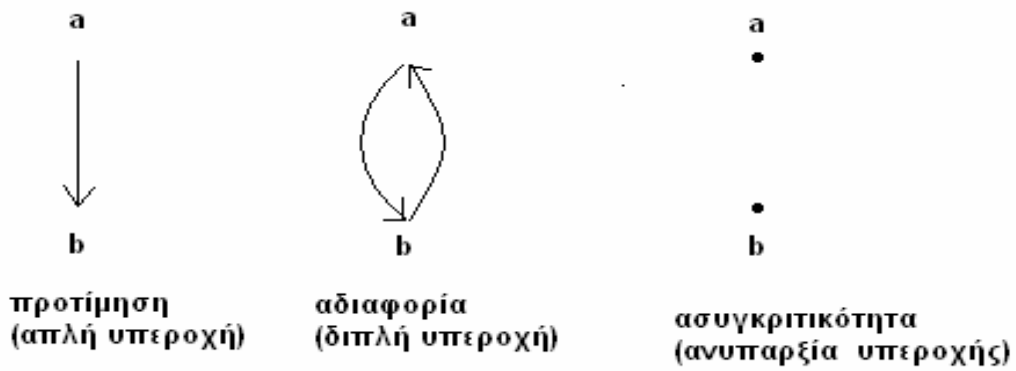
Οι μεθοδολογίες σχέσεων υπεροχής δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε μία από τις παρακάτω προοπτικές: επιλογή της καλύτερης δράσης σύμφωνα με τα δεδομένα εισαγωγής, κατηγοριοποίηση των εναλλακτικών σε αποδεχθείς, απορριφθείσες, ή σε αυτές για τις οποίες χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση και μερική κατάταξη των δράσεων. Υπάρχουν πέντε μέθοδοι Electre, και ο εκάστοτε αποφασίζων δύνανται να διαλέξει μία από αυτές, ανάλογα με το τι επιθυμεί να επιτύχει.

4. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ELECTRE I

Η μέθοδος αυτή ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων υπεροχής και σχετίζεται άμεσα με την προβληματική a της επιλογής. Η μοντελοποίηση των προτιμήσεων μέσω της μεθόδου ELECTRE είναι σχεσιακή (relational), συγκρίνονται δηλαδή οι δράσεις ανά ζεύγη, επομένως η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη μοντελοποίηση μιας ρεαλιστικής σχέσης μεταξύ δραστηριοτήτων, της ασυγκριτικότητας (incomparability).

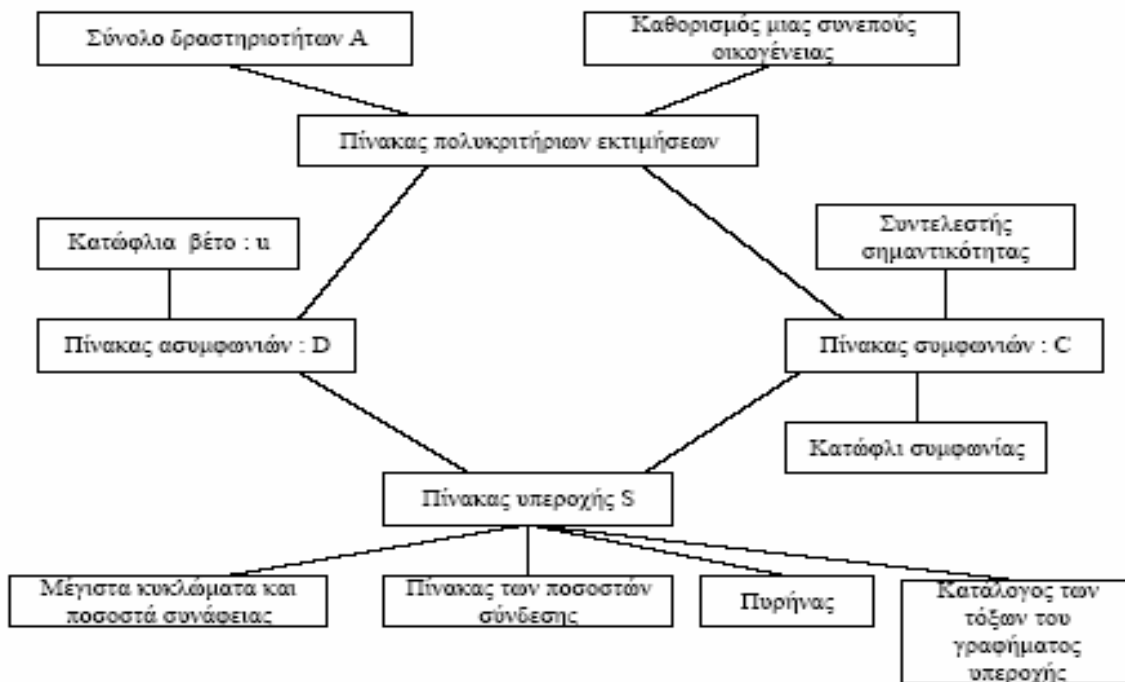
Η σχέση της υπεροχής μεταξύ δύο δράσεων ορίζεται απλά ως εξής:

$a S b \Leftrightarrow a$ τουλάχιστο εξίσου καλή με τη b (a υπερέρχει της b) και παριστάνεται με γράφημα δύο κορυφών και ένα τόξο που έχει για αρχή την κορυφή a και για τέλος την κορυφή b . Έτσι, για κάθε ζεύγος δράσεων μπορεί να παρουσιαστεί μια από τις τρεις καταστάσεις του σχήματος 4.3.



Σχήμα 4.3 :Μοντελοποίηση διμερών σχέσεων με τη βοήθεια σχέσης υπεροχής

Η μέθοδος ELECTRE I μπορεί να παρασταθεί γραφικά μέσω του παρακάτω σχήματος. Μετά την κατασκευή του πίνακα πολυκριτηρίων εκτιμήσεων (ποσοτικών ή ποιοτικών), κατασκευάζεται ο πίνακας (σχέση) υπεροχής με τη βοήθεια δύο ελέγχων: του ελέγχου συμφωνίας και του ελέγχου ασυμφωνίας.



Σχήμα 4.4 : Λογικό διάγραμμα της μεθόδου Electre I

Οι είσοδοι της μεθόδου είναι οι εξής :

- μία συνεπής οικογένεια κριτηρίων $\{ C_1, C_2, \dots, C_n \}$
- βάρη κριτηρίων $\{ W_1, W_2, \dots, W_n \}$
- κατώφλι συμφωνίας c : είναι καθαρός αριθμός που δίνεται από τον μοντελοποιό του προβλήματος και κυμαίνεται από 0,5 ως 1.
- κατώφλι ασυμφωνίας d : είναι καθαρός αριθμός που δίνεται από τον μοντελοποιό του προβλήματος και κυμαίνεται από 0 ως 0,5.

Η ανάπτυξη της σχέσης υπεροχής υλοποιείται σε δύο φάσεις που αφορούν τον έλεγχο δύο αρχών: τον έλεγχο συμφωνίας (concordance test) και τον έλεγχο ασυμφωνίας (discordance test). Η αρχή της συμφωνίας απαιτεί ότι μια πλειοψηφία κριτηρίων, αφού υπολογιστεί η σχετική σημαντικότητά τους, είναι υπέρ του ισχυρισμού -αρχή της πλειοψηφίας, ενώ η αρχή της ασυμφωνίας απαιτεί μέσα στη μειοψηφία των κριτηρίων που δεν υποστηρίζουν τον ισχυρισμό, να μην είναι κανένα από αυτά ισχυρά εναντίον του ισχυρισμού - η αρχή του σεβασμού των μειοψηφιών.

Έλεγχος συμφωνίας

Ορίζουμε σαν δείκτη συμφωνίας C το μέτρο του ποσοστού των κριτηρίων που συμφωνούν ότι η a επικρατεί της b δηλαδή

$$C(a, b) = (\sum_{g_j(a) \geq g_j(b)} W_j) / w \quad \text{όπου} \quad w = \sum W_j$$

Η ποσότητα $C(a, b)$ είναι δηλαδή το άθροισμα των βαρών των κριτηρίων για τα οποία η δράση a προτιμάται ή είναι ισοδύναμη της b . Το ζεύγος (a, b) ικανοποιεί τη συνθήκη συμφωνίας όταν ισχύει:

$$C(a, b) \geq c, \text{ όπου } c, \text{ ισχύει βέβαια } 0 \leq C \leq 1.$$

Έλεγχος ασυμφωνίας

Το ζεύγος δραστηριοτήτων ικανοποιεί τον έλεγχο ασυμφωνίας όταν $g_j(a) < g_j(b)$ για κάθε j και είναι

$$D(a, b) = [\max \{g_j(b) - g_j(a)\}] / \delta \quad \text{όπου} \quad \delta = \max_{c,d,j} \{g_j(c) - g_j(d)\}$$

διαφορετικά $D(a,b)=0$. Είναι και πάλι $0 \leq D \leq 1$.

Σχέση επικράτησης

Ύστερα από τους ορισμούς που προηγήθηκαν η σχέση επικράτησης γίνεται πλέον :

$a S b \Leftrightarrow C(a,b) \geq c$ και $D(a,b) \leq d$ δηλαδή το ζεύγος (a,b) ικανοποιεί τις συνθήκες συμφωνίας και ασυμφωνίας.

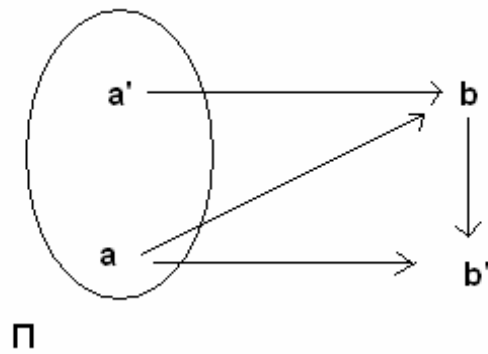
Κατασκευή του πυρήνα

Τελικός σκοπός της μεθόδου είναι η κατασκευή του πυρήνα από τον οποίο θα προκύψει η επικρατέστερη εναλλακτική. Ορίζουμε σαν πυρήνα του γραφήματος υπεροχής ένα υποσύνολο Π του συνόλου F για το οποίο ισχύουν οι δύο παρακάτω ιδιότητες :

1) $\forall b \in F - \Pi, \exists a \in \Pi$ για το οποίο $a S b$

2) $\forall a \in \Pi$ και $a' \in \Pi$ ισχύει $a S a'$ και $a' S a$

Η γραφική απεικόνιση της κατασκευής του πυρήνα είναι η ακόλουθη :



Σχήμα 4.5 :Απεικόνιση κατασκευής του πυρήνα

Το πλήθος των μελών του πυρήνα μειώνεται καθώς το c μειώνεται από το 1 και το d αυξάνει από το 0 έως ότου καταλήξουμε στην βέλτιστη επιλογή.

Η μέθοδος Electre I που μόλις αναλύσαμε θα χρησιμοποιηθεί στο κεφάλαιο 6 για την αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Το πρόγραμμα επέκτασης

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 παρουσιαστεί και στη συνέχεια, στο τελικό πρόγραμμα υλοποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αρκετοί πίνακες διαφόρων διαστάσεων.

Στο κεφάλαιο 3 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 κεφάλαιο 3, από τις σχέσεις (3.18) ως (3.22) και στο σχήμα 3.1.

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάπτυξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, από τις εξισώσεις (3.1) ως (3.17). 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.

2. ΤΟ ΥΠΟΠΡΟΒΛΗΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

ι 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 Kirchoff, 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 ενώ παρέχει τη δυνατότητα, με κάποιες προσθήκες, να συνυπολογίζονται και οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς .

A. Το μοντέλο μεταφοράς

Στο μοντέλο μεταφοράς η ροή της ενεργούς ισχύος στο δίκτυο ικανοποιεί μόνο τον πρώτο νόμο του Kirchoff. 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 (3.3), φαίνεται στη εξίσωση που ακολουθεί :

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

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 (3.5), (3.13) και (3.17) 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 Kirchhoff. 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:

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

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

$$0 \leq r_k \leq \bar{d}_k \quad k=1,2,\dots,N \quad (5.8)$$

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

$$\begin{aligned} |f_{kl}| \leq \bar{f}_{kl} &\Rightarrow |\Theta_k - \Theta_l| \leq \frac{\bar{f}_{kl}}{Y_{kl}} \Rightarrow \\ |\Theta_k - \Theta_l| &\leq \bar{\psi}_{kl} \end{aligned} \quad (5.9)$$

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

Σε μορφή πινάκων οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται:

$$\begin{aligned} B\Theta + g + r &= d \\ 0 &\leq r \leq \bar{d} \\ 0 &\leq g \leq \bar{g} \\ |S\Theta| &\leq \bar{\psi} \end{aligned} \quad (5.10)$$

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 $q \times q$, ενώ οι πίνακες Θ , g , d, r , \bar{g} και $\bar{\psi}$ είναι $q \times 1$.

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 (3.1). Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία δε λαμβάνει υπόψη το κόστος παραγωγής εφόσον αιώτερος 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 :

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

Σε αντιστοιχία με τον τύπο (3.22) του κεφαλαίου 3, 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 υπάρχουσών 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 καταστρώνεται 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 3 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 p_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. 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 (3.1), 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 :

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

- 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 (3.21) 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 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 εναλλακτικά πλάνα κατά την εκτέλεση του προγράμματος επέκτασης

1.Εισαγωγή

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 το πρόγραμμα στο ευρέως διαδεδομένο για μελέτες ανάπτυξης δικτύων μεταφοράς, μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE. Το μοντέλο αυτό είναι αρκετά εύχρηστο και μπορεί να μας καταδείξει τις δυνατότητες αλλά και τα ελαττώματα του προγράμματός μας. Το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE χρησιμοποιήθηκε 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.

2.Το μοντέλο 14 ζυγών της IEEE

Το μοντέλο των δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE χρησιμοποιείται πολύ συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία για διάφορες μελέτες. 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 6.1, αποτελείται από 5 σταθμούς παραγωγής στους ζυγούς 1,2,3,6 και 8. 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 από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή μικροδίκτυα. 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 6.1 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 5.2 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 6.3.

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

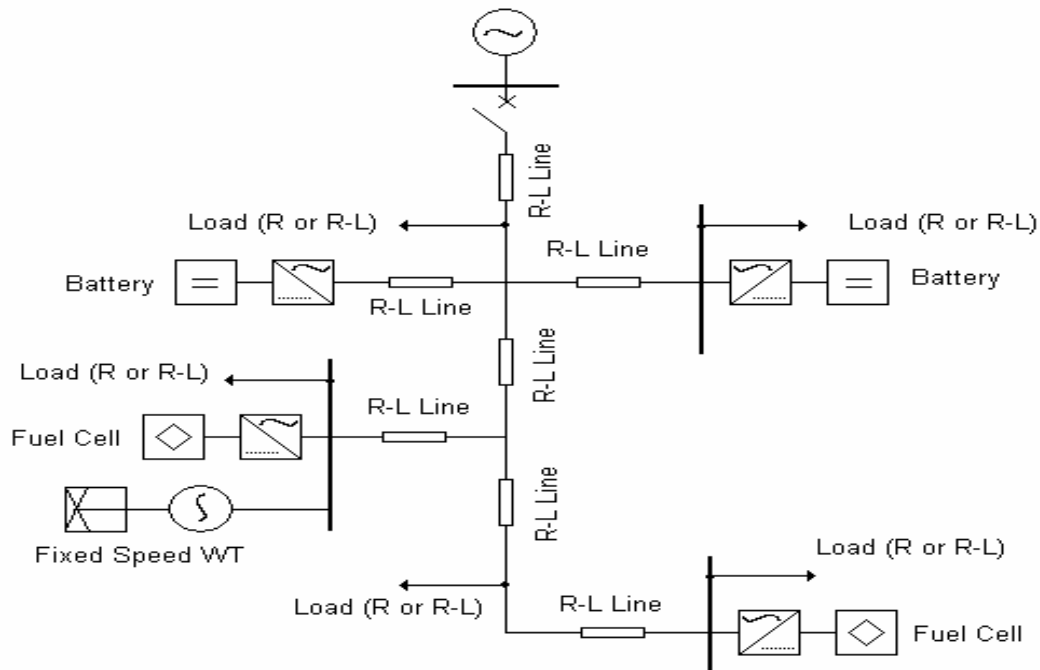
Πίνακας 6.1: Οι αποστάσεις μεταξύ των ζυγών του δικτύου

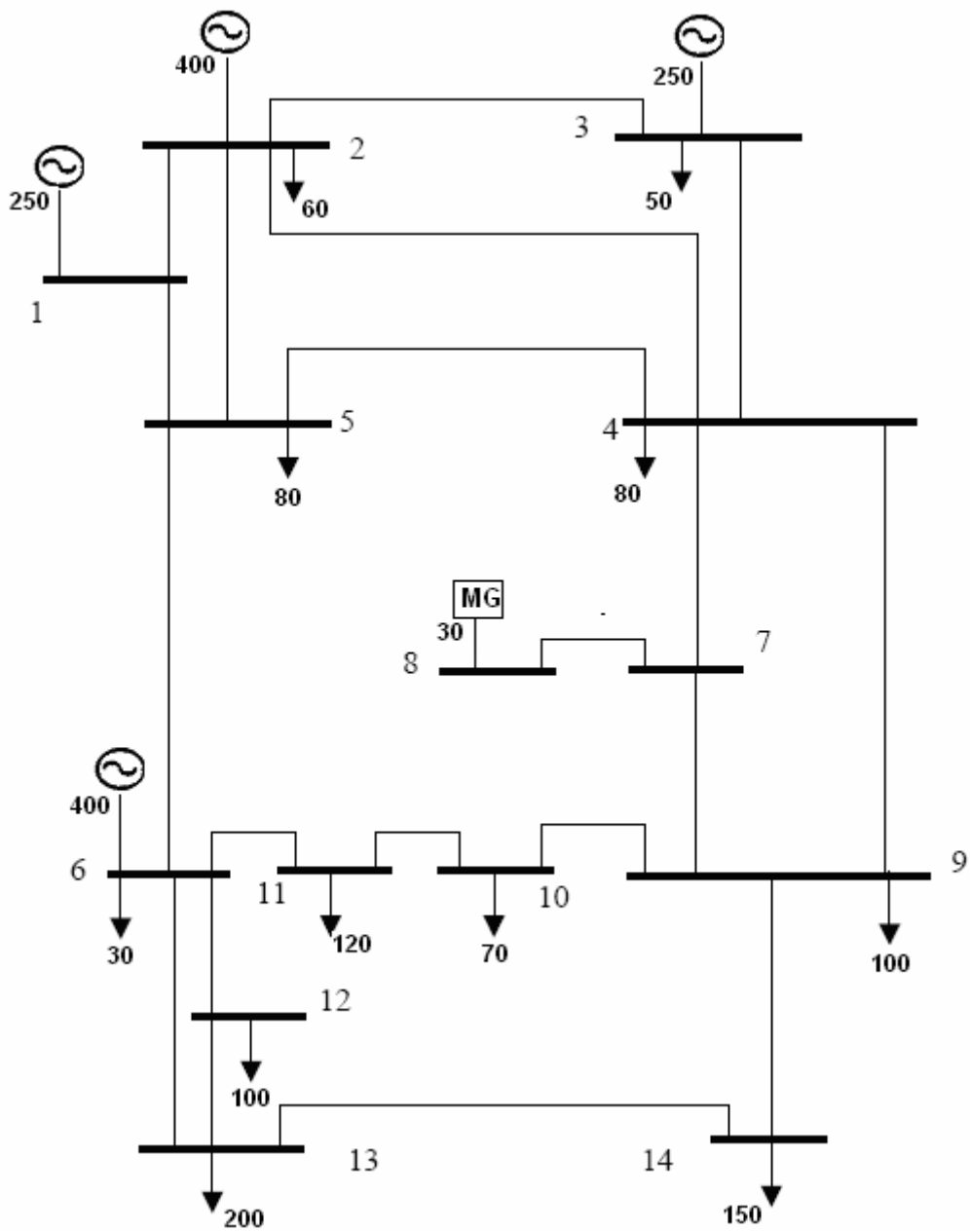
Πριν παρουσιαστούν οι αρχικές καταστάσεις των πλάνων επέκτασης πρέπει να σημειωθεί ότι έχουμε συμπεριλάβει στις μονάδες παραγωγής και παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [Αιολικά πάρκα ή/και μικροδίκτυα (microgrids)]. Τα μικροδίκτυα είναι μια νέα ταχέως αναπτυσσόμενη μορφή παραγωγής ενέργειας τα οποία αποτελούνται από διεσπαρμένες πηγές ενέργειας (φωτοβολταϊκά στοιχεία, ανεμογεννήτριες, μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες, μικροτουρμπίνες, κ.α.) καθώς και από συσκευές αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες, αντλιοσταμειωτικά συστήματα, flywheels κ.α.) Αυτά τα συστήματα έχουν σαφή και μεγάλα πλεονεκτήματα ανεξάρτητα αν συνδεθούν στο δίκτυο ή λειτουργούν αυτόνομα. Τα κυριότερα από αυτά είναι :

- Υψηλή ενεργειακή απόδοση και ελαχιστοποίηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.
- Βελτίωση περιβαλλοντικής επίδρασης
- Βελτίωση αξιοπιστίας του συστήματος
- Μείωση απωλειών ισχύος
- Μείωση κόστους επενδύσεων διάρθρωσης δικτύου

Τα μικροδίκτυα έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν είτε συνδεδεμένα στο κύριο ηλεκτρικό δίκτυο (δεδομένο που υποθέτουμε και στην παρούσα εργασία) είτε αυτόνομα.

Στην συνέχεια αυτής της εργασίας όλες οι μη συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας θα συμβολίζονται με MG (microgrids) και η τιμή που θα αναγράφεται στον εκάστοτε ζυγό θα θεωρείται δεδομένη και θα είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδοθεί στο σύστημα από την συγκεκριμένη μονάδα. Αυτή η τιμή της παραγωγής μπορεί να μην αντιστοιχεί στην μέγιστη ικανότητα παραγωγής της μονάδας ούτε βέβαια στην εγκατεστημένη παραγωγή. Ακολουθεί το μονογραμμικό σχέδιο ενός συστήματος που χρησιμοποιείται εκτεταμένα για τη μελέτη ενός τυπικού μικροδικτύου.





Σχήμα 6.1: Το υπάρχον δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE

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

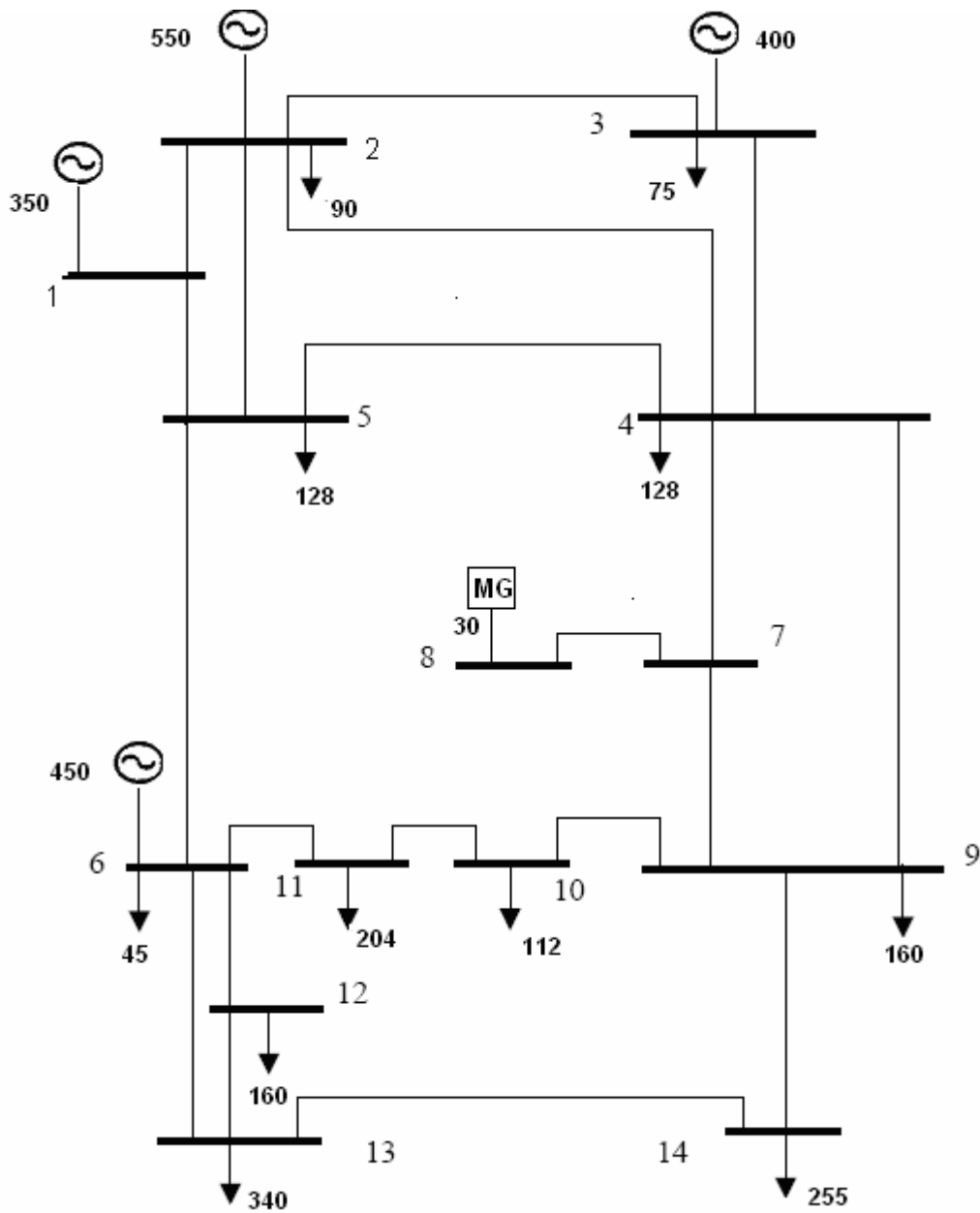
Πίνακας 6.2: Δεδομένα της γραμμής μεταφοράς που θα χρησιμοποιηθεί

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 6.3: Ροή ισχύος στο αρχικό δίκτυο των 14 ζυγών

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, στους ζυγούς 11,13 και 14 που βρίσκονται στο νότιο μέρος του δικτύου και έχουν αρχικά αρκετά μεγάλη αιχμή φορτίου συγκρινόμενη με τους υπόλοιπους ζυγούς, θεωρήθηκε μελλοντική αύξηση φορτίου κατά 70%. Στους ζυγούς 4,5,9,10, και 12 που έχουν λίγο μικρότερο αρχικό φορτίο, η αύξηση είναι 60% ενώ στους ζυγούς παραγωγής με κάποιο αρχικό φορτίο (2,3 και 6) θεωρήθηκε αύξηση 50%. Το συνολικό φορτίο για το σύστημα προκύπτει πλέον ίσο με 1697MW και οι τελικές τιμές του ανά ζυγό φαίνονται στο σχήμα 6.2. Η παρούσα

πρόβλεψη θεωρείται για 10ετή χρονικό ορίζοντα και είναι κοινή για όλα τα σενάρια που θα μελετηθούν.



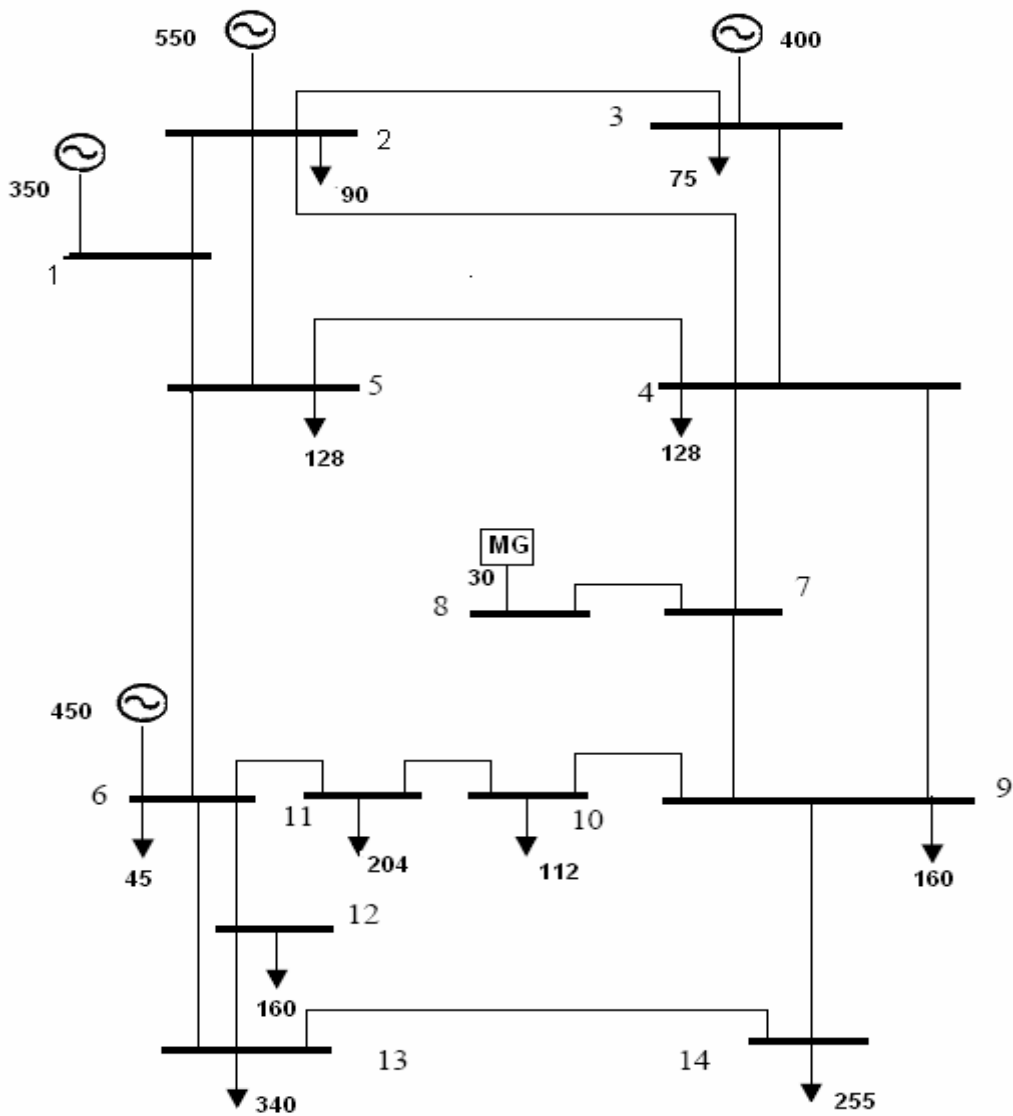
Σχήμα 6.2: Η μελλοντική κατάσταση του δικτύου

3. Αρχικές καταστάσεις των πλάνων επέκτασης

ι) Πλάνο Α: ενίσχυση απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής

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

Η κάλυψη της αύξησης αυτής του φορτίου κατά την εκτέλεση του σεναρίου 1, πραγματοποιήθηκε με ενίσχυση της παραγωγής στους ζυγούς 1,2,3 και 6. 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 6.3, 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 550MW, στο ζυγό 3 γίνεται 400MW, στο ζυγό 1 η αύξηση είναι μικρότερη και η τελική τιμή της παραγωγής είναι 350MW. Τέλος στο ζυγό 6 η ικανότητα παραγωγής αυξάνεται στα 450 MW υποθέτοντας ότι αυτή είναι η μέγιστη δυνατή αύξηση. Η συνολική ικανότητα παραγωγής του συστήματος ανέρχεται πλέον στα 1780MW για το χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται το πρόβλημα. Η συγκεκριμένη πρακτική ταιριάζει πολύ στα τωρινά εγχώρια δεδομένα αφού έως τώρα η αύξηση του φορτίου αντιμετωπιζόταν κυρίως με αύξηση της ικανότητας παραγωγής των ήδη υπάρχοντων σταθμών παραγωγής στο βόρειο τμήμα της χώρας. Το σύστημα που προκύπτει ακολουθεί στο σχήμα 6.3.

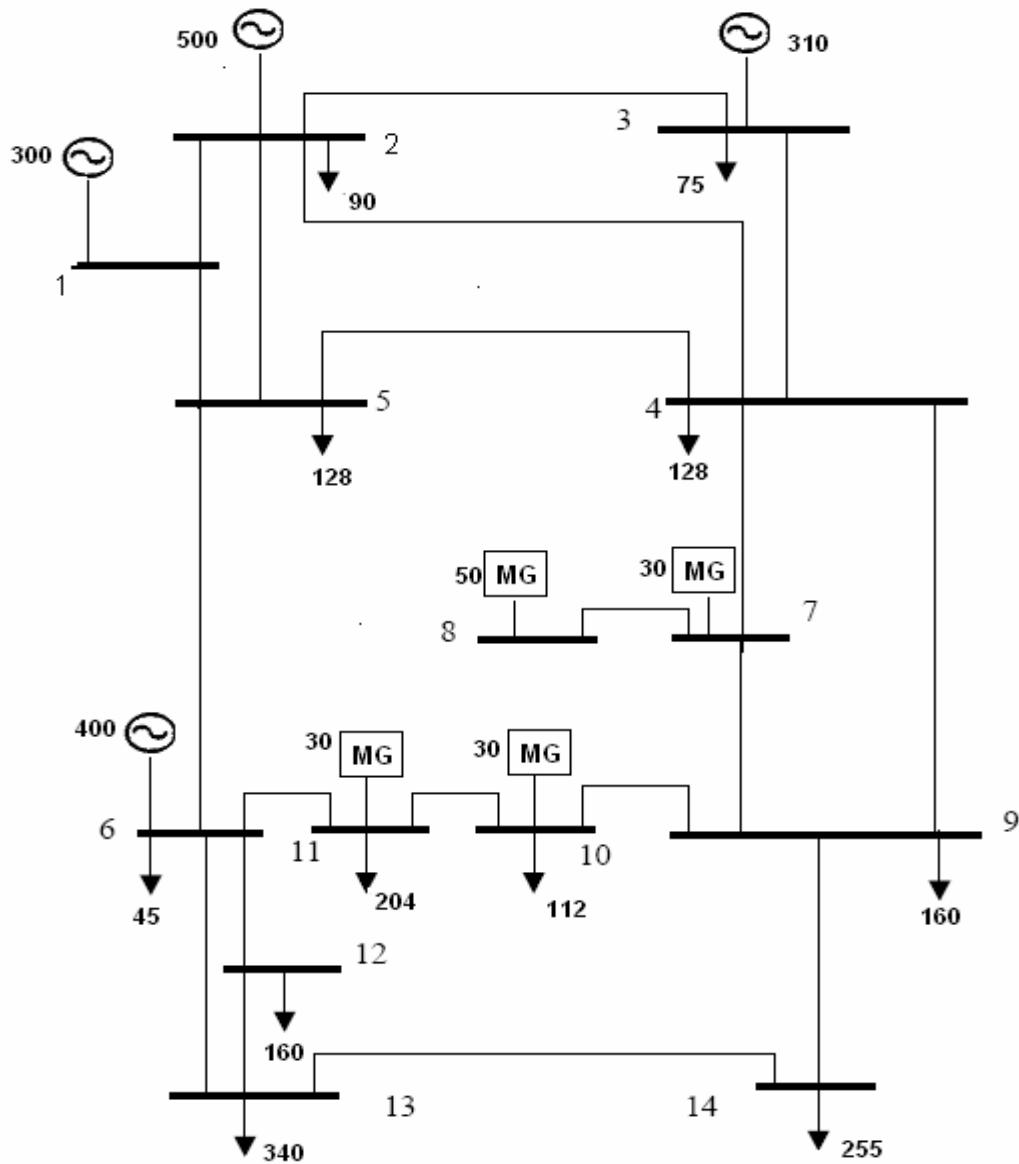


Σχήμα 6.3 :Μελλοντικές συνθήκες για το πλάνο Α

ii)Πλάνο Β: συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής

Στο σενάριο αυτό υποτέθηκε ότι η αύξηση του φορτίου θα καλυφθεί κατά ένα σημαντικό ποσοστό με ενίσχυση της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου. Παράλληλα θα πραγματοποιηθεί μια μερική εισαγωγή διεσπαρμένης παραγωγής στο υπό μελέτη δίκτυο. Η διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι μικρή σε κάθε ζυγό αλλά η τιμή της θα είναι δεδομένη.

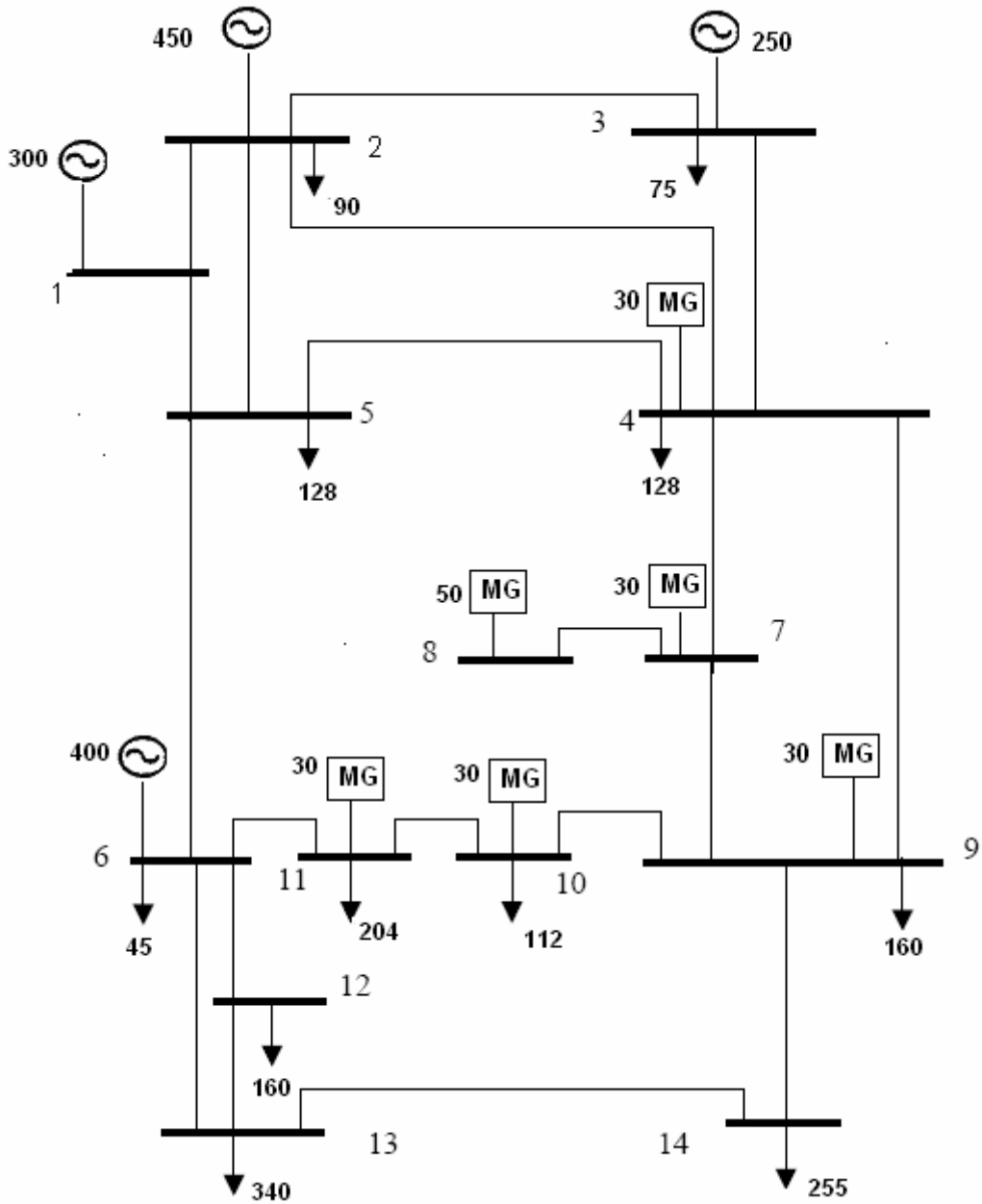
Έτσι στο πλάνο αυτό εγκαταστάθηκε μη συμβατική παραγωγή 30 MW στους ζυγούς 7, 10 και 11.Ακόμα προστέθηκε στο ζυγό 8 άλλα 20 MW στα προϋπάρχοντα 30 MW που είναι ΑΠΕ. Άρα σε αυτό το σενάριο έχουμε συνολική διεσπαρμένη παραγωγή 140 MW ενώ προηγουμένως είχαμε μόλις 30 MW. Επιπλέον υποτέθηκε αύξηση της ικανότητας παραγωγής του ζυγού 1 στα 300 MW ,του ζυγού 2 στα 500 MW και του ζυγού 3 στα 310 MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής στο δίκτυο ανέρχεται στα 1650 MW. Το δίκτυο που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 5,4.Είναι προφανές ότι η δεδομένη ικανότητα παραγωγής δεν επαρκεί για να καλύψει την υπάρχουσα δεδομένη ζήτηση φορτίου αφότου αυτή είναι και στα τρία σενάρια 1697 MW. Συνεπώς θα προκύψει αποκοπή φορτίου κατά την εκτέλεση του προγράμματος.



Σχήμα 6.4 :Μελλοντικές συνθήκες για το πλάνο Β

iii) Πλάνο Γ: ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής

Στο πλάνο αυτό υποτέθηκε ότι η αύξηση του φορτίου θα καλυφθεί κατά το μεγαλύτερο ποσοστό με την εγκατάσταση ακόμα περισσότερων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής όπου αυτό είναι δυνατόν. Αφού εξαντληθεί η ικανότητα του δικτύου σε διεσπαρμένη παραγωγή θα αυξηθεί στο τέλος και η ικανότητα συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τα παραπάνω εγκαθίστανται στους ζυγούς 4 και 9 από 30 MW διεσπαρμένης παραγωγής. Έτσι η συνολική διεσπαρμένη παραγωγή σε αυτό το σενάριο είναι πλέον 200 MW. Εκτός αυτού υποτέθηκε αύξηση της ικανότητας συμβατικής παραγωγής στο ζυγό 1 στα 300 MW και στο ζυγό 2 στα 450 MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής ανέρχεται σε αυτή τη περίπτωση στα 1600 MW. Συνεπώς και σε αυτό το σενάριο αναμένουμε να παρουσιαστεί αποκοπή φορτίου και μάλιστα πιο εκτεταμένη. Το δίκτυο που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 6.5.

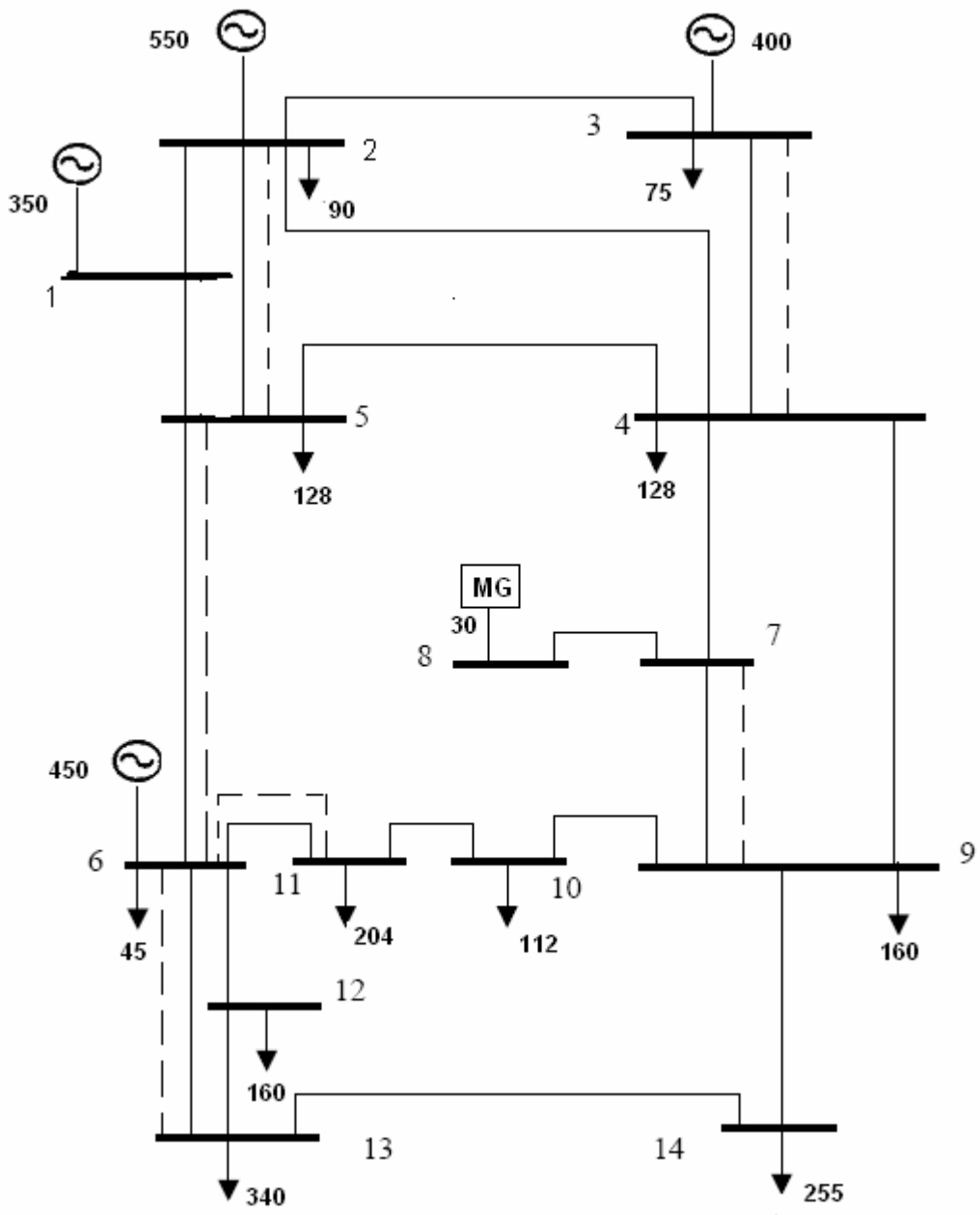


Σχήμα 6.5 : Μελλοντικές συνθήκες για το πλάνο Γ

4. Τελικά αποτελέσματα των πλάνων επέκτασης

ι) Πλάνο Α: ενίσχυση απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής

Σύμφωνα με τις αρχικές εισόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκτελούμε το πρόγραμμα. Τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν ύστερα από 6 επαναλήψεις του προγράμματος επέκτασης και παρουσιάζονται στους πίνακες 6.4 και 6.5. Το δίκτυο που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6.



Σχήμα 6.6 : Βέλτιστη λύση πλάνου Α

ΚΛΑΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
2-5	1
3-4	1
5-6	1
6-11	1

6-13	1
7-9	1
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	16589 χιλιάδες ευρώ

Πίνακας 6.4 : Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση του πλάνου Α για το μοντέλο των 14 ζυγών της ΙΕΕΕ

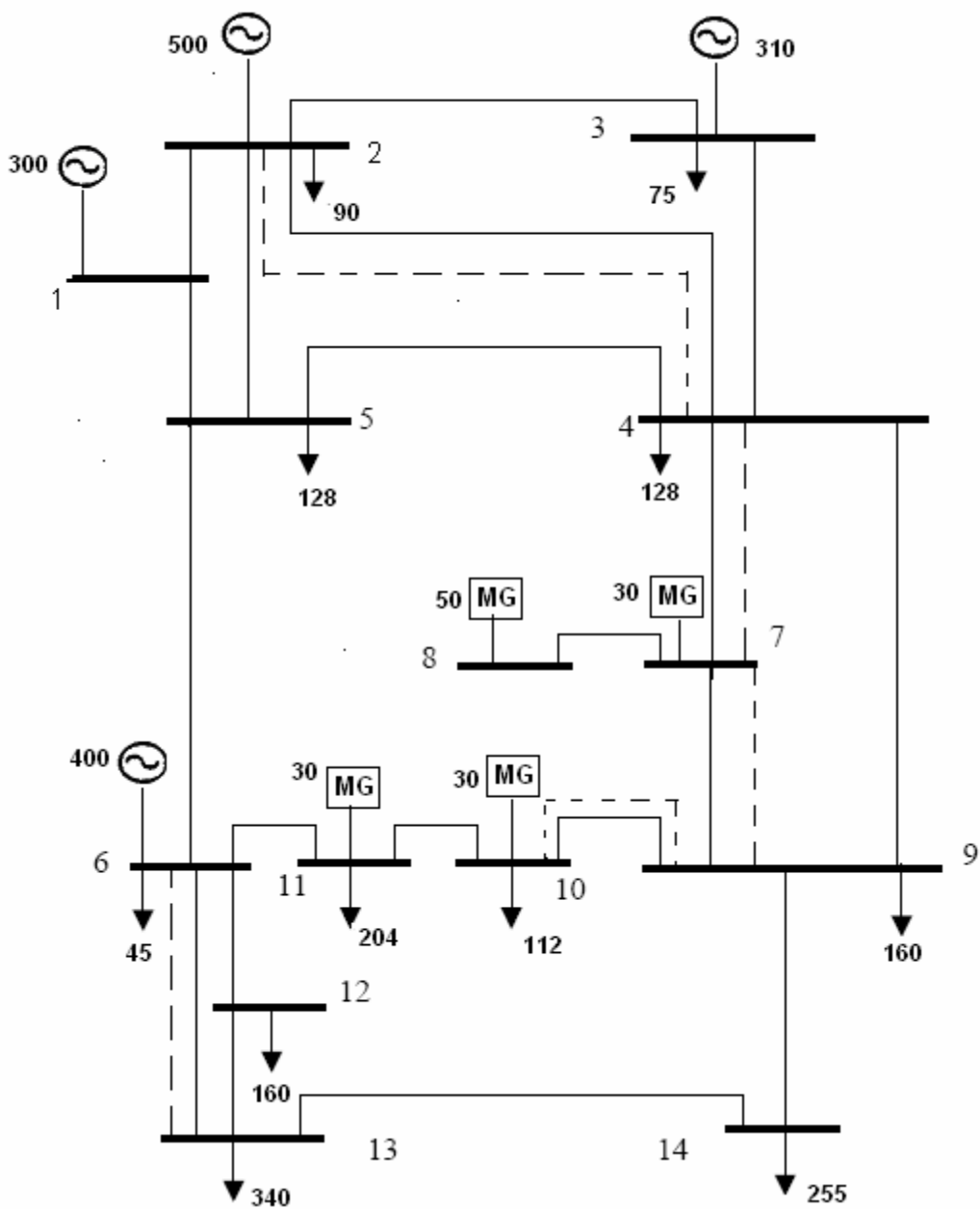
Εξερχόμενη	Εισερχόμενη	Ροή Ισχύος (MW)
1	2	64
1	5	200
2	4	200
2	5	324
3	4	328
4	5	4
4	7	200
4	9	196
5	6	400
6	11	250
6	12	155
6	13	400
7	9	230
8	7	30
9	10	66
9	14	200
11	10	46
13	12	5
13	14	55

Πίνακας 6.5: Ροή ισχύος στο τελικό δίκτυο του πλάνου Α

Με μια προσεκτική παρατήρηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι ικανοποιείται όλη η ζήτηση φορτίου πράγμα απολύτως λογικό αφού η ικανότητα παραγωγής είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Επιπλέον κανονικοποιώντας την ροή ισχύς υπολογίζουμε τον σταθμικό μέσο όρο της ροής ισχύς έτσι ώστε τελικά να βρούμε το συνολικό ποσοστό χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς στη δεδομένη κατάσταση του δικτύου και το οποίο προκύπτει ίσο με 65,54 % . Επίσης το ποσοστό μη συμβατικής παραγωγής προς την συνολική ικανότητα παραγωγής εκφρασμένα σε MW είναι 1,7 %.

ii) Πλάνο Β : συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής

Σύμφωνα με τις αρχικές εισόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκτελούμε το πρόγραμμα. Τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν ύστερα από 5 επαναλήψεις του προγράμματος επέκτασης και παρουσιάζονται στους πίνακες 6.6 και 6.7. Το δίκτυο που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 6.7



Σχήμα 6.7 : Βέλτιστη λύση πλάνου Β

ΚΛΑΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
2-4	1
4-7	1

7-9	1
9-10	1
6-13	1
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	11130 χιλιάδες ευρώ

Πίνακας 6.6 : Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση του Πλάνου Β για το μοντέλο των 14 ζυγών της ΙΕΕΕ

Εξερχόμενη	Εισερχόμενη	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ (MW)
1	2	100
1	5	200
2	4	345
2	5	200
3	2	35
3	4	200
4	7	320
4	9	169
5	4	72
5	6	200
6	11	47
6	12	160
6	13	348
7	9	400
8	7	50
9	10	209
9	14	200
10	11	127
13	14	8

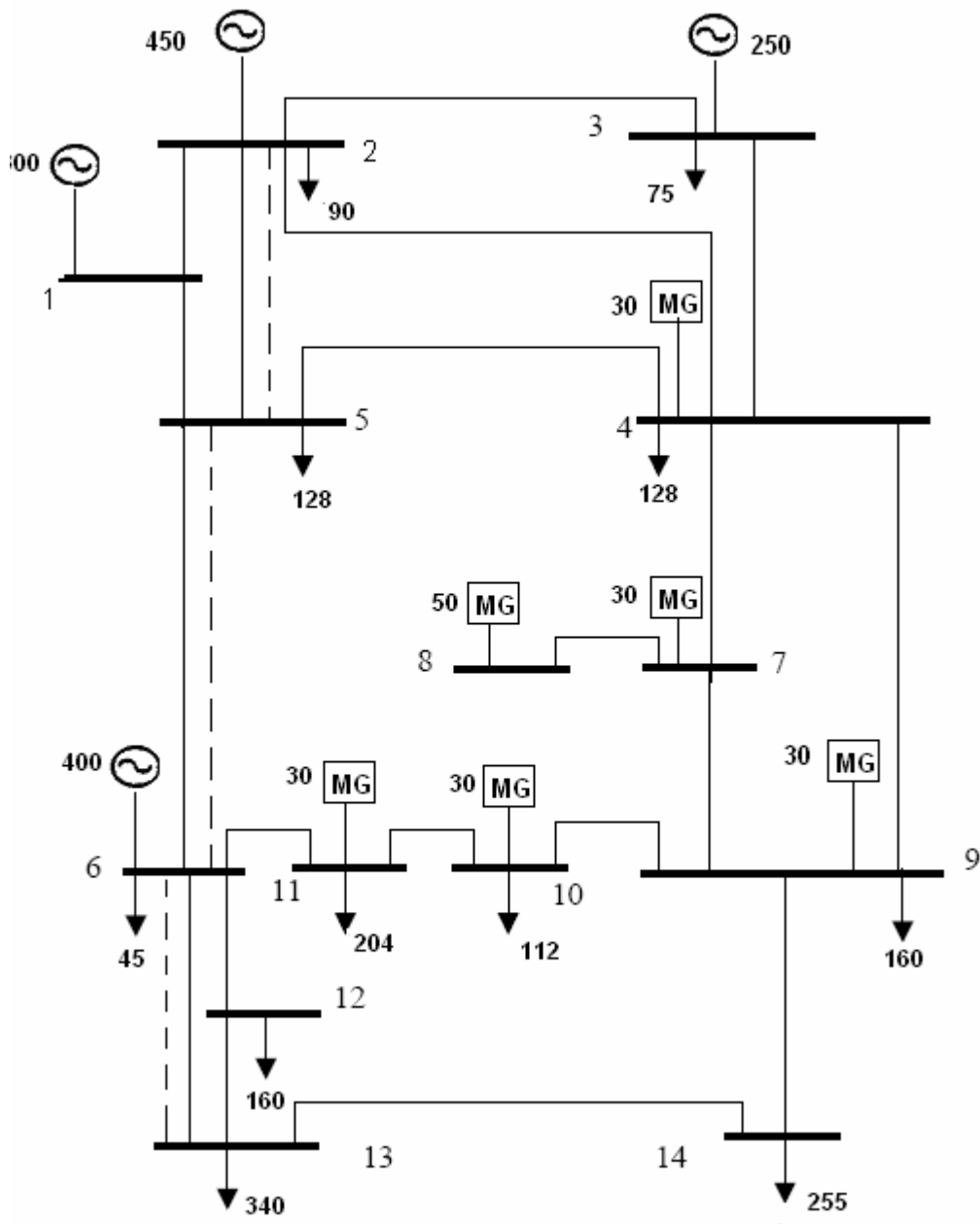
Πίνακας 6.7: Ροή ισχύος στο τελικό δίκτυο του πλάνου Β

Ύστερα από το τρέξιμο του προγράμματος προκύπτει , όπως είναι αναμενόμενο, μια αποκοπή φορτίου η οποία ισούται με τη διαφορά της ζήτησης φορτίου και της ικανότητας παραγωγής και είναι 47 MW. Αν κοιτάξουμε τον πίνακα ροής ισχύος παρατηρούμε ότι αυτή η αποκοπή φορτίου εμφανίζεται ολόκληρη στο ζυγό 14. Σύμφωνα με αυτό και χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που μας παρέχει ο ΔΕΣΜΗΕ για το έτος αναφοράς που έχουμε επιλέξει υπολογίζουμε ότι υπάρχει αποκοπή φορτίου για 5 ώρες σε όλο έτος και η συνολική μη εξυπηρετούμενη ενέργεια είναι 130,06 MWh. Επίσης το ποσοστό χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς είναι 67,94 % και το ποσοστό μη συμβατικής μορφής παραγωγής προς την συνολική ικανότητα παραγωγής εκφρασμένα σε MW είναι 8,48 %.. Η επεξεργασία των στοιχείων υπάρχει στο παράρτημα.

iii) Πλάνο Γ : ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής

Σύμφωνα με τις αρχικές εισόδους που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκτελούμε το πρόγραμμα. Τα τελικά αποτελέσματα προέκυψαν ύστερα από 4 επαναλήψεις του

προγράμματος επέκτασης και παρουσιάζονται στους πίνακες 6.8 και 6.9. Το δίκτυο που προκύπτει παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8



Σχήμα 6.8 : Βέλτιστη λύση πλάνου Γ

ΚΛΑΔΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΙΘΕΜΕΝΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ
2-5	1
5-6	1
6-13	1
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ	8480 χιλιάδες ευρώ

Πίνακας 6.8 : Εγκατεστημένες γραμμές κατά την επίλυση του σεναρίου 3 για το μοντέλο των 14 ζυγών της IEEE

Εξερχόμενη	Εισερχόμενη	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ (MW)
1	2	100
1	5	200
2	4	132
2	5	328
3	4	175
4	7	120
4	9	89
5	6	400
6	11	200
6	12	160
6	13	395
7	9	200
8	7	50
9	10	56
9	14	103
11	10	26
13	14	55

Πίνακας 6.9: Ροή ισχύος στο τελικό δίκτυο του σεναρίου 3

Ύστερα από το τρέξιμο του προγράμματος προκύπτει , όπως είναι και πάλι αναμενόμενο, μια αποκοπή φορτίου η οποία αυτή τη φορά είναι σημαντικά μεγαλύτερη και ισούται με 97 MW. Αν κοιτάξουμε τον πίνακα ροής ισχύς παρατηρούμε ότι αυτή η αποκοπή φορτίου εμφανίζεται και αυτή τη φορά ολόκληρη στο ζυγό 14. Αυτό δεν πρέπει να μας ξενίζει μιας και η ενίσχυση του δικτύου με νέες γραμμές γίνεται στο δυτικό κομμάτι οπότε είναι λογικό να παρουσιαστεί η αποκοπή στο ανατολικό.

Χρησιμοποιώντας και πάλι τα στοιχεία που μας παρέχει ο ΔΕΣΜΗΕ για το έτος αναφοράς που έχουμε επιλέξει υπολογίζουμε ότι υπάρχει αποκοπή φορτίου για 30 ώρες σε όλο έτος και η συνολική μη εξυπηρετούμενη ενέργεια είναι 952,23 MWh. Επίσης το ποσοστό χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς είναι 69,725 % και το ποσοστό διεσπαρμένης παραγωγής προς την συνολική ικανότητα παραγωγής με μονάδες μέτρησης τα MW είναι 10,625 %. Η επεξεργασία των στοιχείων υπάρχει στο παράρτημα.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αξιολόγηση των τριών εναλλακτικών πλάνων επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί είναι η Electre I. Τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν έχουν αντληθεί από τα αποτελέσματα του προγράμματος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πολυκριτηριακή ανάλυση

1.Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήσαμε εκτενώς τα τρία πιθανά πλάνα επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση των σεναρίων αυτών με με βάση τις αρχές της πολυκριτηριακής ανάλυσης και συγκεκριμένα με τη μέθοδο Electre I. Το πρόγραμμα που υλοποιήθηκε για τους σκοπούς αυτής της εφαρμογής παρατίθεται στο παράρτημα, ενώ η γλώσσα στην οποία αναπτύχθηκε και σε αυτή την περίπτωση είναι η Matlab.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αρχικά ορίζουμε επακριβώς το πρόβλημα που θα μελετήσουμε παρουσιάζοντας τις τρεις εναλλακτικές αποφάσεις και τις τρεις διαφορετικές πολιτικές της τελική επιλογής με τα αντίστοιχα βάρη τους. Έπειτα ορίζουμε τα κριτήρια που θα χρησιμοποιήσουμε στην μέθοδο καθώς και τις αντίστοιχες επιδόσεις τους. Τέλος, υλοποιούμε την μέθοδο για τις τρεις πολιτικές και παρουσιάζουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα.

2. Πολυκριτηριακή ανάλυση

i) Ορισμός του προβλήματος

Το πρόβλημα που τίθεται προς επίλυση είναι η επιλογή του βέλτιστου από τα τρία πλάνα επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αποφασίζων σε αυτό το πρόβλημα είναι ένας, ο διαχειριστής του συστήματος (στην περίπτωση του ελληνικού συστήματος αυτός είναι ο ΔΕΣΜΗΕ). Ο διαχειριστής είναι αυτός που θα αποφασίσει ποια κριτήρια θα λάβει υπόψη αλλά και σύμφωνα με ποια συστήματα αξιών θα αξιολογήσει τα τρία πλάνα επέκτασης.

ii) Παρουσίαση εναλλακτικών πλάνων

Τα τρία εναλλακτικά πλάνα από τα οποία καλείται να επιλέξει ο αποφασίζων όπως παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι τα εξής:

1)Πλάνο Α: Ενίσχυση απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής. Σε αυτό το πλάνο επιλέγεται να ενισχυθούν σε ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι ήδη υπάρχοντες συμβατικοί σταθμοί παραγωγής. Είναι μία πρακτική που ως επί το πλείστον εφαρμόστηκε στη χώρα μας μέχρι το πρόσφατο παρελθόν. Παρόλα τα δεδομένα πλεονεκτήματα(αξιοπιστία συστήματος, μείωση κόστους) έχει σοβαρότατες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περιορισμένη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης. Από τα αποτελέσματα της μελέτης προκύπτει ότι απαιτούνται 6 νέες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2)Πλάνο Β: Συγκρατημένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Σε αυτό το πλάνο η ανάγκη αύξησης της ικανότητας παραγωγής κατά το μεγαλύτερο μέρος επιλέγεται να ικανοποιηθεί από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Στο υπόλοιπο κομμάτι ,που είναι πολύ σημαντικό, αποφασίζεται να εισαχθεί διεσπαρμένη παραγωγή συνολικής δεδομένης παραγωγής(και όχι μέγιστης δυνατής) 100 MW. Σε αυτό το πλάνο προστέθηκαν 5 νέες γραμμές μεταφοράς. Αυτή η πολιτική ξεκινά σταδιακά να εφαρμόζεται στη χώρα μας με την ολοένα αυξανόμενη σύνδεση αιολικών πάρκων και φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο.

3)Πλάνο Γ: Ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Σε αυτό το πλάνο πραγματοποιείται μεγάλη εισαγωγή διεσπαρμένης παραγωγής συνολικής δεδομένης παραγωγής 170 MW. Το υπόλοιπο κομμάτι καλύπτεται από τους συμβατικούς σταθμούς. Σε αυτό το πλάνο προστέθηκαν 3 νέες γραμμές μεταφοράς. Αυτή η μορφή πολιτικής είναι η νέα μεγάλη πρόκληση στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η κοινωνική απαίτηση για “πράσινες μορφές ενέργειας” και η επιταγή από την Ευρωπαϊκή Ένωση για σημαντική μείωση των εκπομπών των αέριων ρύπων επιβάλλει τέτοιου είδους αποφάσεις.

iii) Παρουσίαση σεναρίων

Η ανάγκη για πολύπλευρη μελέτη του προβλήματος οδηγεί στη δημιουργία τριών διαφορετικών σεναρίων με σκοπό να απεικονίσουν διαφορετικά συστήματα αξιών του αποφασίζοντα. Συγκεκριμένα στο πρόβλημα υπάρχουν τα παρακάτω σενάρια για τον αποφασίζοντα: το οικονομικό, το κοινωνικό και το οικολογικό σενάριο. Για κάθε σενάριο υπάρχουν διαφορετικοί συντελεστές βαρύτητας για το κάθε είδος των κριτηρίων αξιολόγησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα τρία σενάρια και η κατανομή των συντελεστών βαρύτητας.

- **1. Το οικονομικό σενάριο.**

Δίνεται βαρύτητα στις οικονομικές επιδόσεις .Η μεγάλη σημασία που έχει το κόστος της απόφασης αλλά και οι μελλοντικές οικονομικές επιβαρύνσεις του συστήματος οδηγούν στον ορισμό αυτού του σεναρίου.

- **2. Το κοινωνικό σενάριο.**

Κύριο μέλημα αποτελούν οι επιπτώσεις της απόφασης στο κοινωνικό σύνολο. Είναι προφανές ένας κρίσιμος τομέας για την ομαλή λειτουργία της κοινωνίας είναι η αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς ο αποφασίζων σε αυτό το σενάριο δίνει ιδιαίτερη σημασία στην αξιοπιστία του συστήματος.

- **3. Το οικολογικό σενάριο.**

Δίνεται μεγαλύτερη σημασία στις περιβαλλοντικές επιδόσεις των πλάνων. Οι επιδόσεις στον τομέα αυτόν προβάλλονται στα κύρια πλεονεκτήματα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνεπώς το περιβαλλοντικό σενάριο έχει ιδιαίτερη σημασία.

Η κατανομή των συντελεστών βαρύτητας στα σενάρια που μόλις παρουσιάστηκαν ακολουθεί στον πίνακα 7.1.

Σενάριο	Οικονομικό	Κοινωνικό	Οικολογικό
Οικονομικά κριτήρια	55%	20%	20%
Περιβαλλοντικά κριτήρια	20%	30%	45%
Κριτήρια αξιοπιστίας	25%	50%	35%

Πίνακας 7.1: Κατανομή συντελεστών βαρύτητας.

iv) Η επιλογή των κριτηρίων απόφασης

Κατά την συγκρότηση των κριτηρίων αξιολόγησης επιχειρείται η ανάλυση του πολυσχιδούς χαρακτήρα των εναλλακτικών πλάνων επέκτασης στα βασικά συστατικά του Η διαμόρφωση μίας ομάδας αντιπροσωπευτικών κριτηρίων αποτελεί την “καρδιά” της πολυκριτηριακής ανάλυσης και ταυτόχρονα τη μεγαλύτερη πρόκληση. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή της πολυκριτηριακής ανάλυσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: **1)οικονομικά, 2)περιβαλλοντικά και 3)κριτήρια αξιοπιστίας**. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν επτά κριτήρια όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

Κριτήριο 1.1:Οικονομικό: Αποδίδεται ποσοτικά ως το ποσό που απαιτείται για την κατασκευή των νέων γραμμών μεταφοράς στο εκάστοτε πλάνο όπως αυτό προέκυψε από το πρόγραμμα επέκτασης. Η μονάδα μέτρησης είναι τα κ€. Οι επιδόσεις του κριτηρίου έχουν σχέση αναλογίας με τα ποσά αυτά.

Κριτήριο 1.2:Οικονομικό: Είναι το κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο πως ενδέχεται να υπάρξει αποκοπή φορτίου στο δίκτυο. Ο διαχειριστής καλείται να αποζημιώσει για αυτήν την αποκοπή φορτίου. Οι επιδόσεις του κριτηρίου προκύπτουν ανάλογα με τις συνολικές ώρες αποκοπής φορτίου σε ένα έτος σύμφωνα με το έτος αναφοράς και όπως παρουσιάζεται στο παράρτημα.

Κριτήριο 2.1: Περιβαλλοντικό Είναι ο λόγος της εγκατεστημένης ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής(ΑΠΕ, μικροδίκτυα) προς τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος. Οι επιδόσεις του κριτηρίου προκύπτουν ανάλογα με τα ποσοστά αυτά.

Κριτήριο 2.2: Περιβαλλοντικό: Είναι η μείωση εκπομπών λόγω της χρήσης ΑΠΕ. Επειδή δεν έχουμε ακριβή ποσά θα είναι ποιοτικό κριτήριο όπου θεωρούμε ότι είναι ανάλογο με την εγκατεστημένη ισχύ των συμβατικών μονάδων που παράγεται από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

Κριτήριο 3.1: Κριτήριο αξιοπιστίας: Είναι το ποσοστό χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς στο κάθε πλάνο επέκτασης όπως προκύπτει από την επεξεργασία των στοιχείων που υπάρχει στο παράρτημα. Οι επιδόσεις του κριτηρίου προκύπτουν σε αναλογία με τα ποσοστά αυτά.

Κριτήριο 3.2: Κριτήριο αξιοπιστίας: Είναι το ποσοστό της μέγιστης αποκοπής του φορτίου προς την αιχμή του συστήματος. Είναι το πιο σημαντικό από τα κριτήρια αξιοπιστίας. Οι επιδόσεις προκύπτουν ανάλογα με τα ποσοστά αυτά.

Κριτήριο 3.3: Κριτήριο αξιοπιστίας: Είναι η εκτιμώμενη αξιοπιστία των μονάδων παραγωγής. Είναι ποιοτικό κριτήριο, ελλείπει ακριβών ποσών, και θα ληφθεί κυρίως υπόψη το μέγεθος των προστιθέμενων MW που παράγονται από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής καθώς θα θεωρήσουμε ότι οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής έχουν υψηλότερο δείκτη αξιοπιστίας σε σύγκριση με τις ΑΠΕ και τα μικροδίκτυα.

Τα κριτήρια όπως είδαμε ανήκουν σε τρεις διαφορετικές ομάδες. Όμως μέσα σε κάθε ομάδα το κάθε κριτήριο δεν έχει την ίδια σημαντικότητα. Έτσι για κάθε κριτήριο ορίζεται το Επίπεδο Σημαντικότητας Κριτηρίου (ΕΣΚ) ως ποσοστό (%) ώστε να μοντελοποιηθεί η διαφορά σημαντικότητας εντός της αντίστοιχης ομάδας. Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα κριτήρια με το ΕΣΚ που έχει το καθένα.

<i>Κατηγορία κριτηρίου</i>	<i>Κριτήρια</i>	<i>ΕΣΚ</i>
1.Οικονομικά	1.1 Κόστος νέων Γραμμών	70 %
	1.2 Κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	30 %
2.Περιβαλλοντικά	2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή / Συνολική παραγωγή	60 %
	2.2 Μείωση εκπομπών ρύπων λόγω ΑΠΕ	40 %
3.Αξιοπιστίας	3.1 Ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών	30 %
	3.2 Μέγιστη αποκοπή / Αιχμή	40 %
	3.3 Αξιοπιστία μονάδων παραγωγής	30 %

Πίνακας 7.2:Κριτήρια με το αντίστοιχο ΕΣΚ

v) Πίνακας επιδόσεων

Έχοντας ορίσει τα κριτήρια και το ΕΣΚ του κάθε κριτηρίου αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να δώσουμε τις επιδόσεις των κριτηρίων. Οι επιδόσεις αυτές προέκυψαν σύμφωνα με τις εξηγήσεις που δώσαμε στους ορισμούς των κριτηρίων. Αποφασίσαμε ότι μέγιστη τιμή μιας επίδοσης θα είναι η τιμή 10 για λόγους κατανόησης. Αυτές οι επιδόσεις είναι κοινές για τα τρία σενάρια. Στο πίνακα 7.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι επιδόσεις των κριτηρίων για το κάθε πλάνο επέκτασης. Τα απόλυτα μεγέθη από τα οποία προέκυψαν οι επιδόσεις υπάρχουν στο παράρτημα.

<i>Κριτήρια</i>	<i>1.1</i>	<i>1.2</i>	<i>2.1</i>	<i>2.2</i>	<i>3.1</i>	<i>3.2</i>	<i>3.3</i>
Πλάνο Α	5	0	2	2	10	10	10
Πλάνο Β	7	2	8	5	8	6	5
Πλάνο Γ	10	10	10	10	5	4	3

Πίνακας 7.3:Επιδόσεις των κριτηρίων

vi)Μελέτη σεναρίων

1)Το οικονομικό σενάριο

Έχοντας πλέον καθορίσει τόσο την κατανομή των συντελεστών βαρύτητας στο κάθε σενάριο όσο και το επίπεδο σημαντικότητας των κριτηρίων (ΕΣΚ) εντός των τριών κατηγοριών κριτηρίων είμαστε πλέον σε θέση να υπολογίσουμε το τελικό βάρος του κάθε κριτηρίου. Αυτό προκύπτει ουσιαστικά πολλαπλασιάζοντας το ΕΣΚ του κάθε κριτηρίου με τον αντίστοιχο συντελεστή βάρους της κατηγορίας κριτηρίων στην οποία ανήκει. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα τελικά βάρη των κριτηρίων για το οικονομικό σενάριο όπως φαίνονται στον πίνακα 7.4. Το βάρος του κάθε κριτηρίου είναι εκφρασμένο σε ποσοστό (%) και το συνολικό άθροισμα είναι 100 όπως είναι αναμενόμενο άλλωστε. Στην εφαρμογή της μεθόδου στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε τα τελικά βάρη εκφράζονται σε απόλυτα νούμερα με συνολικό άθροισμα τη μονάδα.

<i>Κατηγορία κριτηρίου</i>	<i>Κριτήρια</i>	<i>Βάρος (%)</i>
1.Οικονομικά	1.1 Κόστος νέων Γραμμών	38,5
	1.2 Κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	16,5
2.Περιβαλλοντικά	2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή / Συνολική παραγωγή	12
	2.2 Μείωση εκπομπών ρύπων λόγω ΑΠΕ	8
3.Αξιοπιστίας	3.1 Ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών	7,5
	3.2 Μέγιστη αποκοπή / Αιχμή	10
	3.3 Αξιοπιστία μονάδων παραγωγής	7,5
Σύνολο		100

Πίνακας 7.4:Τελικά βάρη κριτηρίων στο οικονομικό σενάριο

Έχοντας πλέον στη διάθεση μας τα τελικά βάρη των κριτηρίων εφαρμόζουμε την μέθοδο Electre I για το οικονομικό σενάριο αξιολόγησης των πλάνων επέκτασης. Εισάγουμε σαν εισόδους στο πρόγραμμα τις επιδόσεις των κριτηρίων και τα αντίστοιχα βάρη τους. Παρακάτω στα σχήματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας C και D αντίστοιχα όπως προκύπτουν από το τρέξιμο του προγράμματος. Για λόγους ευκολίας στη συνέχεια του κεφαλαίου συμβολίζουμε τα πλάνα επέκτασης Α, Β και Γ μόνο με τα γράμματα Α, Β και Γ αντίστοιχα.

C	A	B	Γ
A	X	0,35	0,25
B	0,72	X	0,39
Γ	0,925	0,64	X

Σχήμα 7.1:Δείκτης συμφωνίας οικονομικού σεναρίου

D	A	B	Γ
A	X	0,62	0.75
B	0,4	X	0,68
Γ	0,1	0,33	X

Σχήμα 7.2: Δείκτης ασυμφωνίας οικονομικού σεναρίου

Αφού έχουμε υπολογίσει τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας το μόνο που απομένει είναι η κατασκευή του πυρήνα έτσι ώστε να καταλήξουμε στη βέλτιστη επιλογή. Άρα έχουμε τους εξής συλλογισμούς:

- Με κατώφλι συμφωνίας $c=0,9$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,1$ ισχύει :
 $C(\Gamma, A)=0,925 \geq c$ και $D(\Gamma, A)=0,1 \leq d$ άρα σύμφωνα με τη σχέση επικράτησης, που όπως έχουμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζει, είναι
 $a S b \Leftrightarrow C(a,b) \geq c$ και $D(a,b) \leq d$
 προκύπτει
 $\Gamma S A$ άρα $\Pi = \{ B, \Gamma \}$
- Με $c=0,6$ και $d=0,4$ έχουμε με παρόμοιο συλλογισμό:
 $\Gamma S B$ άρα $\Pi = \{ \Gamma \}$

Άρα ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου για το οικονομικό σενάριο φτάσαμε στο συμπέρασμα ότι βέλτιστη επιλογή για την επέκταση του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι το πλάνο Γ δηλαδή η ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2) Το κοινωνικό σενάριο

Αντίστοιχα με το οικονομικό σενάριο υπολογίζουμε τα τελικά βάρη των κριτηρίων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή της μεθόδου. Ύστερα από τους υπολογισμούς αυτά προκύπτουν όπως φαίνονται στον πίνακα 7.5. Όπως είναι φυσικό τα βάρη των κριτηρίων έχουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την περίπτωση του οικονομικού σεναρίου

<i>Κατηγορία κριτηρίου</i>	<i>Κριτήρια</i>	<i>Βάρος (%)</i>
1.Οικονομικά	1.1 Κόστος νέων Γραμμών	14
	1.2 Κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	6
2.Περιβαλλοντικά	2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή / Συνολική παραγωγή	18
	2.2 Μείωση εκπομπών ρύπων λόγω ΑΠΕ	12
3.Τεχνολογικά	3.1 Ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών	15
	3.2 Μέγιστη αποκοπή / Αιχμή	20
	3.3 Αξιοπιστία μονάδων παραγωγής	15
Σύνολο		100

Πίνακας 7.5:Τελικά βάρη κριτηρίων στο κοινωνικό σενάριο

Ύστερα από τον υπολογισμό των τελικών βαρών των κριτηρίων είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε το πρόγραμμα υλοποίησης της μεθόδου Electre I έχοντας σαν εισόδους του προγράμματος τους πίνακες 7.3 και 7.5. Ακολουθώντας τρέχουμε το πρόγραμμα και προκύπτουν οι ακόλουθοι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας των σχημάτων 7.3 και 7.4 αντίστοιχα.

C	A	B	Γ
A	X	0,55	0,783
B	0,325	X	0,6
Γ	0,26	0,38	X

Σχήμα 7.3:Δείκτης συμφωνίας κοινωνικού σεναρίου

D	A	B	Γ
A	X	0,42	0,24
B	0,57	X	0,39
Γ	0,69	0,65	X

Σχήμα 7.4: Δείκτης ασυμφωνίας κοινωνικού σεναρίου

Αφού έχουμε υπολογίσει τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας το μόνο που απομένει είναι η κατασκευή του πυρήνα έτσι ώστε να καταλήξουμε στη βέλτιστη επιλογή. Άρα έχουμε τους εξής συλλογισμούς:

- Με κατώφλι συμφωνίας $c=0,75$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,25$
A S Γ άρα $\Pi = \{ A, B \}$
- Με $c=0,55$ και $d=0,45$
A S B άρα $\Pi = \{ A \}$

Συνεπώς ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου για το κοινωνικό σενάριο το αποτέλεσμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι η βέλτιστη επιλογή για την επέκταση του δικτύου μεταφοράς είναι η ενίσχυση της απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής ή με άλλα λόγια το πλάνο A.

3) Το οικολογικό σενάριο

Το τελευταίο σενάριο που απομένει να μελετήσουμε είναι το οικολογικό σενάριο το οποίο ορίστηκε παραπάνω. Θα υπολογίσουμε τα τελικά βάρη των κριτηρίων από το ΕΣΚ του κάθε κριτηρίου και το συντελεστή βάρους της ομάδας στην οποία ανήκει το κριτήριο. Τα βάρη που προκύπτουν είναι τα παρακάτω.

<i>Κατηγορία κριτηρίου</i>	<i>Κριτήρια</i>	<i>Βάρος (%)</i>
1.Οικονομικά	1.1 Κόστος νέων Γραμμών	14
	1.2 Κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	6
2.Περιβαλλοντικά	2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή / Συνολική παραγωγή	27
	2.2 Μείωση εκπομπών ρύπων λόγω ΑΠΕ	18
3.Τεχνολογικά	3.1 Ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών	10,5
	3.2 Μέγιστη αποκοπή / Αιχμή	14
	3.3 Αξιοπιστία μονάδων παραγωγής	10,5
Σύνολο		100

Πίνακας 7.6:Τελικά βάρη κριτηρίων στο οικολογικό σενάριο

Αφού έχουμε στη διάθεση μας τα τελικά βάρη των κριτηρίων τα εισάγουμε μαζί με τις επιδόσεις των κριτηρίων από τον πίνακα 7.3 στο πρόγραμμα που υλοποιεί τη μέθοδο Electre I και παίρνουμε σαν αποτελέσματα τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας. Αυτοί οι δείκτες φαίνονται στα σχήματα 7.5 και 7.6.

C	A	B	Γ
A	X	0,38	0,22
B	0,73	X	0,35
Γ	0,8	0,62	X

Σχήμα 7.5:Δείκτης συμφωνίας οικολογικού σεναρίου

D	A	B	Γ
A	X	0,64	0,73
B	0,24	X	0,8
Γ	0,17	0,36	X

Σχήμα 7.6: Δείκτης ασυμφωνίας οικολογικού σεναρίου

Σύμφωνα με τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας κατασκευάζουμε τον πυρήνα ο οποίος προκύπτει από τους παρακάτω συλλογισμούς

- Με κατώφλι συμφωνίας $c=0,8$ και κατώφλι ασυμφωνίας $d=0,2$
Γ S A άρα Π= { B, Γ }
- Με $c= 0,62$ και $d=0,38$
Γ S B άρα Π= { Γ }

Άρα ύστερα από τη μελέτη του οικολογικού σεναρίου προκύπτει ότι βέλτιστη επιλογή είναι το πλάνο Γ. Το συγκεκριμένο πλάνο υλοποιεί την επέκταση του δικτύου μεταφοράς με ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Έχοντας ολοκληρώσει την πολυκριτηριακή ανάλυση οι τελικές κατατάξεις των πλάνων επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από την εφαρμογή της μεθόδου Electre I για το κάθε σενάριο είναι οι εξής:

Σενάρια	Κατατάξεις πλάνων επέκτασης
Οικονομικό	Γ > Β > Α
Κοινωνικό	Α > Β > Γ
Οικολογικό	Γ > Β > Α

Πίνακας 7.7: Τελικές κατατάξεις εναλλακτικών σεναρίων

Στο κεφάλαιο που επιχειρείται η εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων τόσο από τη παρούσα πολυκριτηριακή ανάλυση όσο και από το σύνολο της εργασίας και των σεναρίων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η αποτίμηση των αποτελεσμάτων των τριών πλάνων που προσομοιώθηκαν στο πρόγραμμα επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η λεπτομερής εξέταση των αποτελεσμάτων της εκτέλεσης του αλγορίθμου θα μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα για την ορθότητα της μεθόδου και του προγράμματός συνολικά. Στη συνέχεια θα γίνει ένας αναλυτικός σχολιασμός των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της πολυκριτηριακής μεθόδου Electre I στα πλάνα επέκτασης. Τέλος βασιζόμενοι στα συμπεράσματα της ανάλυσης θα διατυπωθούν ορισμένες απόψεις για τη σωστότερη ανάπτυξη και επέκταση ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2.ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ

Η διαδικασία της αποσύνθεσης Benders που χρησιμοποιήθηκε στο πρόγραμμα είναι ουσιαστικά επιμέρους λύση δύο υποπροβλημάτων, του υποπροβλήματος επένδυσης και λειτουργίας. Το πιο σημαντικό κομμάτι του προγράμματος 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 μεταφοράς.

Το υποπρόβλημα 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. Από την άλλη πλευρά, το υποπρόβλημα λειτουργίας, εφόσον υποτεθεί 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. 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.

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 υπονήφιων 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. Έχοντας πραγματοποιήσει μια μικρή ανάλυση της συμπεριφοράς του αλγόριθμου του προγράμματος επέκτασης θα προχωρήσουμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των πλάνων επέκτασης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 6.

Το δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE το οποίο παρουσιάστηκε στο σχήμα 6.1, 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 6.3 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 ισχύς που απομένει μετά την εξυπηρέτηση του φορτίου στο ζυγό 5 καταλήγει 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 βοηθάει στο σχεδιασμό των πλάνων επέκτασης που εξετάστηκαν.

Στο πλάνο επέκτασης A εξετάσαμε την επίδραση που θα έχει στο σύστημα μεταφοράς του δικτύου μας η ενίσχυση της απομακρυσμένης παραγωγής για την κάλυψη του μελλοντικού φορτίου του. Η αιχμή του μελλοντικού φορτίου είναι 1697MW και οι τιμές του ανά ζυγό φαίνονται στο σχήμα 6.2. Η αύξηση της συμβατικής παραγωγής στους ζυγούς 1,2 και 3 φαίνεται επίσης στο ίδιο σχήμα. Πιο συγκεκριμένα η ικανότητα παραγωγής ισχύος στο ζυγό 1 αυξάνεται στα 350 MW, στο ζυγό 2 στα 550 MW και στο ζυγό 3 γίνεται 400 MW. Η συνολική ικανότητα παραγωγής του δικτύου ανέρχεται πλέον στα 1780 MW. Τα αποτελέσματα του προγράμματος επέκτασης παρατίθενται στους πίνακες 6.4, 6.5 και στο σχήμα 6.6. Από αυτά μπορούμε να συμπεράνουμε ότι χρησιμοποιήθηκαν σχεδόν όλες οι γραμμές που ήταν διαθέσιμες, εκτός κυρίως από την γραμμή 4-5, και επιπλέον ισχυροποιήθηκε ο ζυγός 5. Ο ζυγός 2, για το λόγο που αναφέραμε στη προηγούμενη παράγραφο, παρέχει 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, 3-4, 5-6 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, 11, 12 και 13 και για αυτό ενισχύεται από την παραγωγή του βορείου κομματιού του δικτύου μέσω της διπλής γραμμής μεταφοράς 5-6. Έτσι για τη μεταφορά της μεγάλης ισχύος των 400MW στο ζυγό 13, προτιμάται ο διπλασιασμός της πιο μικρής γραμμής 6-13, από το διπλασιασμό των γραμμών 6-12 και 12-13. Τα 250MW που απομένουν από το ζυγό 6, ύστερα από την τροφοδότηση των ζυγών 6,12 και 13, οδηγούνται στο ζυγό 11 μέσω της διπλής γραμμής μεταφοράς 6-11. Η ισχύς αυτή χρειάζεται σημαντική ενίσχυση από την άλλη πλευρά του δικτύου και συγκεκριμένα από το ζυγό 9, ο οποίος βέβαια για να αποκτήσει την ισχύ που χρειάζεται διπλασιάζεται η γραμμή 7-9. Το συνολικό κόστος της επέκτασης ανέρχεται στα 16.589k€. Το τελικό δίκτυο που προκύπτει είναι αρκετά δυνατό αλλά υπάρχει το σημαντικά μειονεκτήματα ότι πρώτον οι μονάδες παραγωγής ως επί το πλείστον βρίσκονται πολύ μακριά από το κύριο φορτίο και δεύτερον ότι υπάρχει ελάχιστη παραγωγή, συγκεκριμένα 30MW, από μη συμβατική μορφή. Για αυτούς τους λόγους αλλά και για να προσπαθήσουμε να ελαττώσουμε το κόστος επέκτασης του συστήματος μεταφοράς υπό συγκεκριμένη στρατηγική ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής, θεωρήσαμε την αντιμετώπιση της αύξησης του φορτίου μέσω της εγκατάστασης διεσπαρμένης παραγωγής.

Στο πλάνο επέκτασης Β θεωρήσαμε συγκρατημένη διείσδυση ενώ στο πλάνο Γ ενισχυμένη διείσδυση 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 που έχουν το σύμβολο MG αντιστοιχούν στην πραγματική μέγιστη ικανότητα των συγκεκριμένων μονάδων, καθώς αυτό το μέγεθος χρησιμοποιείται κατά τις μελέτες επέκτασης δικτύων σε διεθνές επίπεδο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στο πλάνο επέκτασης Β η αύξηση του φορτίου καλύπτεται κυρίως από συμβατικές μορφές ενέργειας αλλά και κατά ένα σημαντικότερο ποσοστό της τάξης του 30% επί της προστιθέμενης ικανότητας παραγωγής από διεσπαρμένη παραγωγή. Η συνολική ικανότητα παραγωγής σε αυτό το πλάνο ανέρχεται στα 1650MW. Άρα είναι μικρότερη από το ζητούμενο φορτίο κατά 47MW, για αυτό το λόγο αναμένεται να υπάρξει αποκοπή φορτίου κατά τη εκτέλεση του προγράμματος. Το δίκτυο που προκύπτει είναι φανερά πιο ισορροπημένο σε σχέση με το προηγούμενο, αφού η ύπαρξη πολλών μικρών παραγωγών δίνει πολλές διεξόδους στην ισχύ και μειώνει τη συμφόρηση στις γραμμές. Αυτό έχει ως συνέπεια να είναι αναγκαία η εγκατάσταση λιγότερων νέων γραμμών μεταφοράς στο σύστημα. Η πρόταση αυτή επιβεβαιώνεται και από τον αλγόριθμό μας.

Τα αποτελέσματα των πινάκων 6.6 και 6.7 μαζί με το δίκτυο που προκύπτει στο σχήμα 6.7 δείχνουν ότι προστίθενται πέντε νέες γραμμές μεταφοράς. Ενώ στη προηγούμενη περίπτωση υπήρξε ενίσχυση του δικτύου και στο ανατολικό και στο δυτικό κομμάτι τώρα υπάρχει ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς στο ανατολικό κομμάτι. Αυτό συμβαίνει επειδή οι υπάρχουσες γραμμές δεν επαρκούν για να μεταφερθεί η ισχύς στο νότιο κομμάτι που υπάρχει το κυρίως φορτίο. Έτσι προστίθενται οι γραμμές 2-4, 4-7 και 7-9. Η γραμμή 9-10 προστίθεται για να μεταφερθεί ισχύς στους ζυγούς 10 και 11. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς του ζυγού 6 συνεισφέρει ελάχιστα για την τροφοδότηση των ζυγών αυτών. Αντίθετα η ισχύς του χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση των ζυγών 12 και 13. Η γραμμή 6-13 φτιάχνεται για την ικανοποίηση των αναγκών του μεγαλύτερου ζυγού ζήτησης, ζυγού 13. Επίσης όπως αναμενόταν υπάρχει αποκοπή φορτίου της τάξης των 47 MW το οποίο εμφανίζεται εξ' ολοκλήρου στο ζυγό 14. Το γεγονός αυτό είναι φυσιολογικό επειδή πρώτον ο ζυγός 14 έχει μεγάλο φορτίο και δεύτερον το πρόγραμμα επιλέγει την πιο οικονομική λύση της τροφοδότησης του ζυγού 13 μέσω της οικονομικής νέας γραμμής 6-13 αντί για την κατασκευή της ασύμφορης οικονομικά 9-14. Η μη εξυπηρετούμενη ενέργεια προκύπτει χρησιμοποιώντας

τις τιμές του έτους αναφοράς και ανέρχεται στις 130MWh. Το συνολικό ποσοστό της επέκτασης ανέρχεται στα 11130 k€ μειωμένο αρκετά σε σχέση με το πλάνο Α.

Στο πλάνο επέκτασης Γ θα εφαρμόσουμε πολιτική ανάλογη με του πλάνου Β αλλά σε πιο έντονο βαθμό. Έτσι η αύξηση του φορτίου αυτήν τη φορά καλύπτεται κυρίως από διεσπαρμένη παραγωγή σε ποσοστό 60% επί της προστιθέμενης ικανότητας παραγωγής και το υπόλοιπο μέρος από συμβατική παραγωγή. Σε αυτό το πλάνο οι επιπτώσεις από την διείσδυση της διασπαρμένης παραγωγής αναμένεται να ενταθούν. Με άλλα λόγια οι γραμμές θα είναι λιγότερο επιβαρυνόμενες και το κόστος θα μειωθεί. Η συνολική ικανότητα παραγωγής σε αυτό το πλάνο ανέρχεται στα 1600MW. Συνεπώς θα υπάρξει μια αποκοπή φορτίου σημαντικού μεγέθους. Επιλέγουμε σε αυτή την στρατηγική ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής να υπάρχει μη εξυπηρετούμενο φορτίο κυρίως για να αντισταθμιστούν τα οφέλη της διεσπαρμένης παραγωγής διαφορετικά αυτό το πλάνο θα ήταν σε κάθε περίπτωση η βέλτιστη επιλογή.

Τα αποτελέσματα του πλάνου αυτού παρουσιάζονται στους πίνακες 6.8, 6.9 και στο σχήμα 6.8. Από εκεί μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι απαιτούνται μόλις τρεις νέες γραμμές μεταφοράς. Οι τρεις νέες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ισχύος από τους απομακρυσμένους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής στο κυρίως φορτίο που βρίσκεται στο νότιο κομμάτι μέσω του δυτικού κομματιού του δικτύου. Υπάρχει δηλαδή διαφορά με το προηγούμενο πλάνο επέκτασης. Επίσης μειώθηκε το ποσοστό χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς. Το τελικό κόστος εγκατάστασης είναι αυτήν τη φορά 8480k€ και είναι σημαντικά ελαττωμένο σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Από την άλλη μεριά υπάρχει μια αποκοπή φορτίου μεγέθους 97MW, γεγονός αναμενόμενο, η οποία εμφανίζεται ολόκληρη στο ζυγό 14. Οι λόγοι για τους οποίους υπάρχει αποκοπή του φορτίου σε αυτό το ζυγό έχουν εξηγηθεί προηγουμένως. Η μη εξυπηρετούμενη ενέργεια προκύπτει 952MWh, η οποία είναι σημαντικά μεγαλύτερη απ' ό τι στο πλάνο Β.

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα των τριών πλάνων επέκτασης που υλοποιήθηκαν στο δίκτυο των 14 ζυγών της IEEE μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η επιπλέον γραμμή 6-13 ήταν αναγκαία σε όλες τις περιπτώσεις η οποία υλοποιήθηκε εξαιτίας κυρίως της τεράστιας ανάγκης σε ισχύ του ζυγού 13 ο οποίος και έχει το μεγαλύτερο φορτίο από όλους τους άλλους ζυγούς και δευτερευόντως επειδή η κατασκευή της είναι οικονομικά συμφέρουσα λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο ζυγών.

Το πλάνο Α αποτελεί το πιο αντιοικονομικό από τα τρία πλάνα 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 διεσπαρμένης παραγωγής σε διάφορους ζυγούς αλλά η πολιτική αυτή έχει πάρα πολλά μειονεκτήματα. Χρειάζονται συνολικά 6 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 ισχύος του πλάνου Γ, είναι φανερό πως η ισχύς που μεταφέρεται μέσω των γραμμών μεταφοράς είναι μικρότερη από όλα τα άλλα πλάνα επέκτασης. Αυτό έχει φυσικά σαν αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες μεταφοράς.

Λόγω του πλήθους των δεδομένων και της σημαντικότητας της απόφασης για την αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης επιλέχθηκε η εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου ανάλυσης, συγκεκριμένα της μεθόδου Electre I. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εφαρμογή της μεθόδου παρουσιάζονται στο επόμενο τμήμα του κεφαλαίου.

3.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα δημόσια προβλήματα λήψης αποφάσεων στον ενεργειακό σχεδιασμό συχνά περιλαμβάνουν πολλαπλούς στόχους και πολλές διαφορετικές ομάδες ενδιαφερόμενων. Επιπλέον, η λήψη των αποφάσεων οφείλει να λαμβάνει υπόψη της τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κλιμάκων χώρου και χρόνου, της πολυπλοκότητας των φυσικών και κοινωνικών δομών και των συχνά μη μετρήσιμων, αντικρουόμενων και πολλαπλών κοινωνικών επιδιώξεων. Η πολυπλοκότητα αυτή των ενεργειακών συστημάτων σε συνδυασμό με τη σοβαρότητα και δριμύτητα των επιπτώσεων των ανθρώπινων ενεργειών στον πλανήτη καθιστά αναγκαία τη λήψη των αποφάσεων μέσω στιβαρών και αυστηρά δομημένων πλαισίων και όχι ακολουθώντας μία ‘δαισθητικού τύπου’ διαδικασία λήψης απόφασης. Επιπλέον, εμπλέκονται πολλοί ενδιαφερόμενοι (άμεσα και έμμεσα), οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τους τις επιπτώσεις αυτές, και για αυτό επιθυμούν να συμμετέχουν στη λήψη των αποφάσεων. Συνεπώς είναι εύλογο πως θα ανακύψουν αντικρουόμενα συμφέροντα και πολλαπλοί προς επίτευξη στόχοι, παράγοντες τους οποίους πρέπει να αντιμετωπίζει και να ενσωματώνει κάθε μεθοδολογικό εργαλείο διευκόλυνσης της σχετικής λήψης των αποφάσεων.

Οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής ανάλυσης μπορεί να αποτελέσουν ένα αυστηρό μεθοδολογικό εργαλείο για τον σχεδιασμό πολιτικής λαμβάνοντας υπόψη έναν μεγάλο αριθμό κριτηρίων που ενσωματώνουν λειτουργικά τις αντικρουόμενες επιδιώξεις, ενώ ταυτόχρονα δύνανται να συμπεριλάβουν διεργασίες ομαδικής λήψης αποφάσεων. Η σύγχρονη δημοτικότητα τους στηρίζεται ακριβώς στη συνειδητοποίηση της πολυπλοκότητας αυτής της κατάστασης. Ωστόσο, συγκεκριμένες εφαρμογές των μεθοδολογιών πολυκριτηριακής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των κατάλληλων αναπτυξιακών πρακτικών θα ενισχύσουν την αξιοπιστία της πολυκριτηριακής αντιμετώπισης τέτοιων θεμάτων. Ιδιαίτερα στην περίπτωση του ενεργειακού σχεδιασμού για τις ΑΠΕ και τη διεσπαρμένη παραγωγή, οι μεθοδολογίες πολυκριτηριακής ανάλυσης επιβάλλεται να εμπλουτίζονται με δημόσιες συμμετοχικές διαδικασίες και να αναζητούν εφαρμογές κάτω από πραγματικές συνθήκες σε όλα τα χωρικά επίπεδα.

Για τους λόγους που μόλις αναφέρθηκαν επιλέχτηκε η εφαρμογή της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης Electre I για την όσο το δυνατόν πληρέστερη αξιολόγηση των πλάνων επέκτασης. Επειδή όπως αναφέρθηκε οι ενδιαφερόμενοι σε μια τέτοια διαδικασία λήψης απόφασης είναι πολλοί προσεγγίστηκε η διαδικασία με τρία διαφορετικά σενάρια: το οικονομικό, το κοινωνικό και το οικολογικό. Με αυτό τον τρόπο γίνεται προσπάθεια να καλυφθούν διαφορετικά ‘συστήματα αξιών’ του αποφασίζοντα για τη μέγιστη δυνατή πληρότητα της μελέτης του προβλήματος.

Στο οικονομικό σενάριο κύριο ρόλο στην απόφαση διαδραματίζουν οι οικονομικές επιδόσεις της εκάστοτε απόφασης. Ο έντονος ανταγωνισμός που έχει δημιουργηθεί στη συνεχώς ανερχόμενη απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά τα οικονομικά ως ένα κρίσιμο παράγοντα. Στο κοινωνικό σενάριο λαμβάνεται κυρίως υπ’ όψιν οι επιπτώσεις της απόφασης στο κοινωνικό σύνολο. Τέλος στο οικολογικό σενάριο σημαντικότερος παράγοντας είναι οι περιβαλλοντικές προδιαγραφές του κάθε πλάνου επέκτασης και κατά επέκταση κατά πόσον αυτά συμμορφώνονται με τις σύγχρονες απαιτήσεις που έχουν διαμορφωθεί κυρίως ύστερα από το πρωτόκολλο του Κιότο.

Η χρήση πολλαπλών κριτηρίων αξιολόγησης παρέχει τη δυνατότητα παρουσίασης των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών διαστάσεων του προβλήματος, στον αποφασίζοντα(ένας ή περισσότεροι) με τρόπο σαφή και κατανοητό, καθιστώντας τελικά

δυνατή τη συνεκτίμηση των παραπάνω διαστάσεων στην λήψη της τελικής απόφασης και την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του προβλήματος. Τα κριτήρια ανήκουν σε τρεις υποομάδες όπου το κάθε κριτήριο έχει ένα επίπεδο σημαντικότητας (ΕΣΚ) εντός της υποομάδας.

Έχοντας ορίσει τα κριτήρια και αντίστοιχα ΕΣΚ συμπληρώνουμε τον πίνακα επιδόσεων των εναλλακτικών πλάνων επέκτασης όπως φαίνεται στον πίνακα 7.3. Πρόκειται για μια σημαντική και λεπτομερή διαδικασία καθώς τα δεδομένα, οι επιδόσεις στα κριτήρια που επιλέχθηκαν, οφείλουν να είναι διασταυρωμένα και τεκμηριωμένα. Είναι γνωστό άλλωστε ότι τα υπολογιστικά εργαλεία απλά επεξεργάζονται το ποσό της πληροφορίας που εισάγεται μέσω των δεδομένων, δεν το επαυξάνουν. Συνεπώς απαραίτητη προϋπόθεση αποδοχής του αποτελέσματος είναι η χρήση όσο το δυνατόν εγκυρότερων στοιχείων.

Με όλα τα παραπάνω στοιχεία εφαρμόζουμε την πολυκριτηριακή μέθοδο Electre I για την αξιολόγηση των τριών πλάνων επέκτασης δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για το κάθε σενάριο ξεχωριστά αλλά και για τη μέθοδο συνολικότερα προκύπτουν κάποια συμπεράσματα

Στο οικονομικό σενάριο διαφαίνεται ότι πλεονέκτημα κατέχει το πλάνο Γ κυρίως επειδή είχε το χαμηλότερο κόστος πραγματοποίησης νέων γραμμών. Από την άλλη αυτό το πλάνο παρουσιάζει την υψηλότερη αποκοπή φορτίου. Πράγματι τα αποτελέσματα επαλήθευσαν την πρόβλεψή μας. Το οικονομικό προκρίνει σαν βέλτιστη επιλογή το πλάνο επέκτασης Γ. Από ότι φαίνεται το πλάνο Γ έχει ισχυρή προτίμηση σε σχέση με το πλάνο Α. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη τιμή του δείκτη συμφωνίας $C(\Gamma, A)$ ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως ποσοτικό μέτρο των επιχειρημάτων που υποστηρίζουν την πρόταση “η δράση Γ υπερέχει της Α”. Αντίθετα το πλάνο Γ υπερέχει λιγότερο του πλάνου Β γεγονός που οφείλεται στο ότι αυτά τα δύο πλάνα ακολουθούν την ίδια πολιτική της εισόδου διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, σε διαφορετικό βαθμό έντασης απλά. Ενδέχεται η αύξηση της ικανότητας παραγωγής των ήδη υπάρχοντων σταθμών παραγωγής συμβατικής μορφής να είναι πιο οικονομική από την κατασκευή πολλών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό άλλωστε είναι ο κύριος λόγος που αυτή η πρακτική εφαρμοζόταν κατά κόρον στη χώρα μας. Αλλά το παρόν πρόβλημα μελετά την βέλτιστη ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς. Έτσι λαμβάνει κυρίως υπόψη το κόστος κατασκευής νέων γραμμών. Αυτή η λογική αποτυπώνεται στο αποτέλεσμα.

Στο δεύτερο εναλλακτικό σενάριο που είναι το κοινωνικό μελετάται η απόφαση από τη σκοπιά της κοινωνικής ευημερίας. Όπως είναι φυσικό βασική προϋπόθεση για την εύρυθμη κοινωνική και οικονομική λειτουργία μιας σύγχρονης κοινωνίας αποτελεί σε κάθε περίπτωση η αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ισχύος στους πάσης φύσεως καταναλωτές. Αυτός ο στόχος εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα καθώς εγκυμονεί κάθε στιγμή η πιθανότητα μιας απρόσμενης βλάβης στο ηλεκτρικό σύστημα (βραχυκύκλωμα, κτλ). Αυτό που μπορεί να εξασφαλίσει ο διαχειριστής του συστήματος είναι η δεδομένη ικανότητα παραγωγή ισχύος να επαρκεί για τη κάλυψη φορτίου όπως αυτό προκύπτει από τη μελλοντική ζήτηση. Ακόμα η όσο το δυνατόν μικρότερη συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς αυξάνει την αξιοπιστία του δικτύου επειδή οι γραμμές μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ που απέχει από τις ονομαστικές τιμές τους.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στο κοινωνικό σενάριο σημαντικότερο ρόλο στην κρίση του αποφασίζοντα κατέχει η ελαχιστοποίηση της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας και του ποσοστού χρησιμοποίησης των γραμμών μεταφοράς. Παρατηρώντας τα δεδομένα της πολυκριτηριακής μεθόδου υπερέχει το πλάνο επέκτασης Α καθώς εξασφαλίζει την κάλυψη της ζήτησης και έχει το μικρότερο ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών. Πράγματι ύστερα από το τρέξιμο του προγράμματος προκύπτει ότι βέλτιστη επιλογή αποτελεί το πλάνο Α, η ενίσχυση δηλαδή της απομακρυσμένης συμβατικής παραγωγής. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα φαίνεται ότι το πλάνο Α υπερέχει ξεκάθαρα του πλάνου Γ. Αντίθετα το πλάνο Α έχει ασθενέστερη προτίμηση έναντι του πλάνου Β, το οποίο οφείλεται κυρίως στην μικρότερη αποκοπή φορτίου του πλάνου

Β σε σύγκριση με αυτή του Γ. Κοιτώντας τις τιμές που παίρνει το όριο συμφωνίας για να κατασκευάσουμε τον πυρήνα παρατηρείται ότι είναι μικρότερες από τα άλλα δύο σενάρια. Αυτό σημαίνει ότι η προτίμηση επιλογής του πλάνου Α σε αυτό το σενάριο έχει την μικρότερη ισχύ από τις προτιμήσεις που μας δίνουν τα άλλα δύο σενάρια. Αυτό συμβαίνει διότι το πλάνο Α έχει σημαντικά μειονεκτήματα όσον αφορά το κόστος υλοποίησης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Το τελευταίο σενάριο που μελετάται είναι το οικολογικό. Είναι ίσως το πιο σημαντικό σενάριο δεδομένου ότι η επιδείνωση του παγκοσμίου κλίματος και η γενικευμένη αφύπνιση γύρω από αυτό το θέμα επιβάλλει τεχνολογίες και αποφάσεις όσο το δυνατόν περισσότερο προς το περιβάλλον. Άρα όπως είναι φυσικό τα περιβαλλοντικά κριτήρια έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στη λήψη της απόφασης. Ύστερα από το τρέξιμο του προγράμματος προκύπτει ότι βέλτιστη επιλογή αποτελεί το πλάνο Γ, η ενισχυμένη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής. Από τις τιμές των αποτελεσμάτων φαίνεται η ισχυρότερη προτίμηση του πλάνου Γ επί του πλάνου Α σε σύγκριση με αυτή επί του πλάνου Β. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το Β ακολουθεί την ίδια πολιτική με το πλάνο Γ αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ενώ αντίθετα το πλάνο Α έχει ακριβώς αντίθετη λογική πράγμα που εξηγεί την σειρά κατάταξής του. Η επιλογή του πλάνου Γ από το πρόγραμμα είναι λογική και αναμενόμενη καθώς ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της διεσπαρμένης παραγωγής αποτελεί η μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

Αφού αναλύθηκαν τα αποτελέσματα του κάθε σεναρίου ξεχωριστά μια συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων θα μπορούσε να είχε σαν κύριο συμπέρασμα ότι το πλάνο που φαίνεται να διακρίνεται των άλλων είναι αυτό της ενισχυμένης διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πλάνο Γ στα δυο σενάρια, οικονομικό και οικολογικό, είναι πρώτο στη κατάταξη ενώ στο τρίτο σενάριο, στο κοινωνικό, βγήκε τρίτον μεν αλλά με τη μικρότερο κατώφλι συμφωνίας όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Το οικονομικό σενάριο δίνει την πιο ισχυρή επιλογή σε μικρή απόσταση από το οικολογικό σενάριο ενώ το κοινωνικό σενάριο δίνει την ασθενέστερη. Συνολικά αποδεικνύεται πολύτιμη η εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου ανάλυσης μέσω της οποίας φιλτράρονται και οργανώνονται οι (συχνά αντικρουόμενες) πληροφορίες που φέρουν το πλήθος των δεδομένων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

4.ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν αφενός ο σχεδιασμός επέκτασης δικτύου μεταφοράς ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της μεθόδου Benders. Αφετέρου τα πλάνα επέκτασης που προέκυψαν αξιολογήθηκαν με χρήση της μεθόδου πολυκριτηριακής ανάλυσης Electre I.

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 είναι οι κύριοι στόχοι του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς

Τα αποτελέσματα από την πολυκριτηριακή ανάλυση έδειξαν ότι αυτή η πολιτική ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής οδηγεί στις πιο συμφέρουσες λύσεις για το σύστημα μεταφοράς. Τα πλεονεκτήματα 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 η μεγάλη πρόκληση των επόμενων χρόνων στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Α. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Α.1. ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΘΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Α.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
Λιπόλ (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

Α.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
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
Μακρυρράχη, 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	2	500 280	780

	ΕΛΛΑΔΑΣ – ΠΗΓΑΣΟΣ			
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 ΕΝΕΡΓΙΚΟΝΤΟΡ	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)
Άγγιστρο, 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, Φθιοτίδα	ΚΟΥΛΑΞΙΖΕΛΗ ΣΟΦΙΑ	0,155

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/ΕΙΑ 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 ΠΕΤΡΑΣ	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

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
	Αθερινόλακκος	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
Ερεικούσα	Ερεικούσα	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
Τος-Σίκινος-Φολέγανδρος	Τος-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
Πάρος-Νάξος-Αντίπαρος-Ηράκλεια-	Πάρος	43,25

Σχοινούσα-Κουφονήσια		
	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
ΑΝΩΓΙΑ, ΚΡΗΤΗ	ΔΕΤΕΑ	1	55	55
ΡΟΔΟΣ	ΝΕΟΦΥΤΟΥ	1	150	150

	ΚΕΡΑΜΙΚΑ			
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	IWECO 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
ΣΤΡΩΤΟΣ, ΜΑΡΑΘΟΚΑΜΠΟΣ,	ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΑΜΟΥ Α.Ε.	2	600	1200

ΣΑΜΟΣ				
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

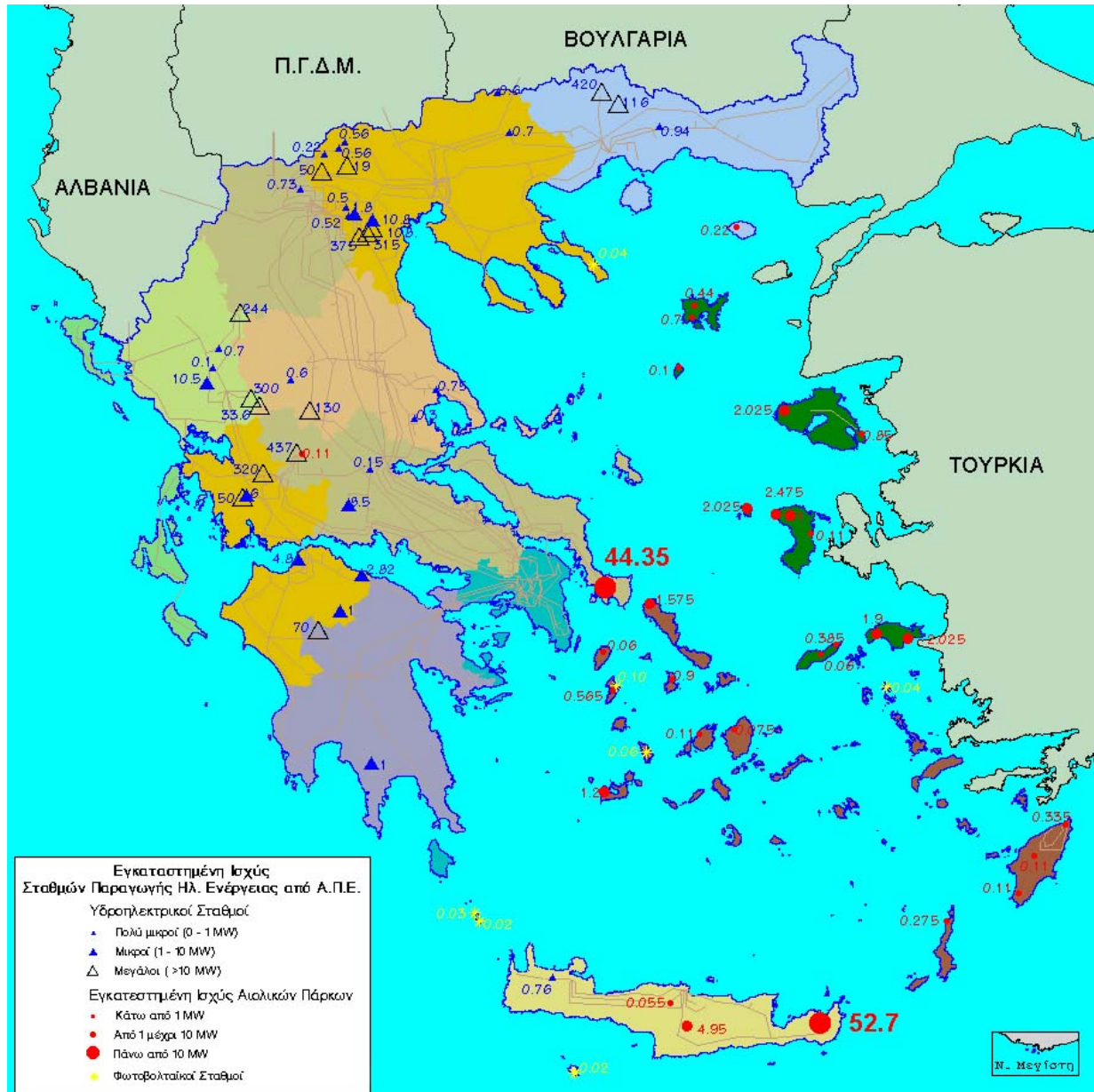
Πηγή: Κ.Α.Π.Ε. 2000

B. ΧΑΡΤΕΣ

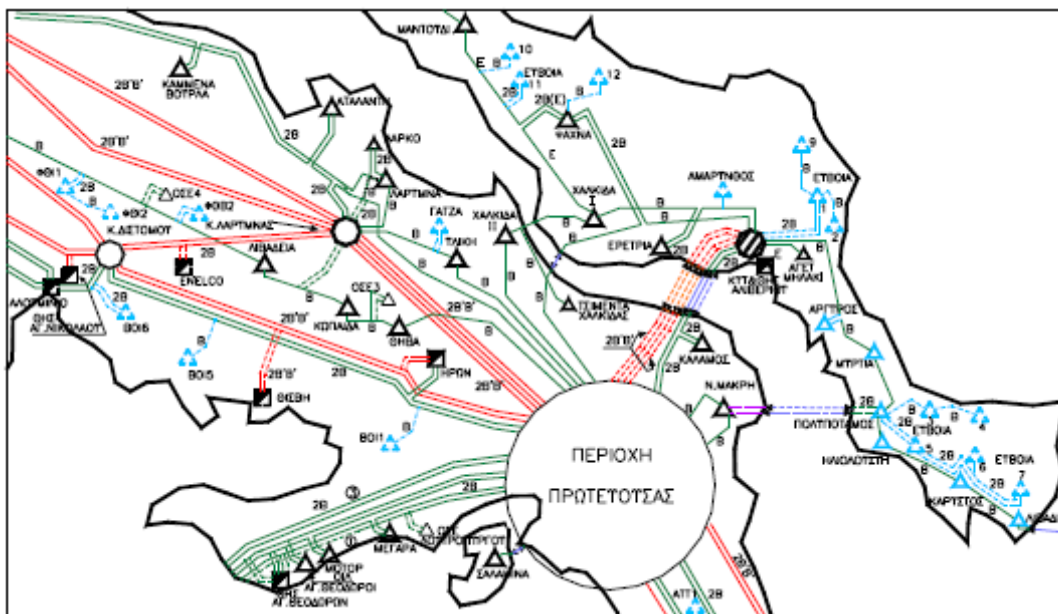
B.1 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ



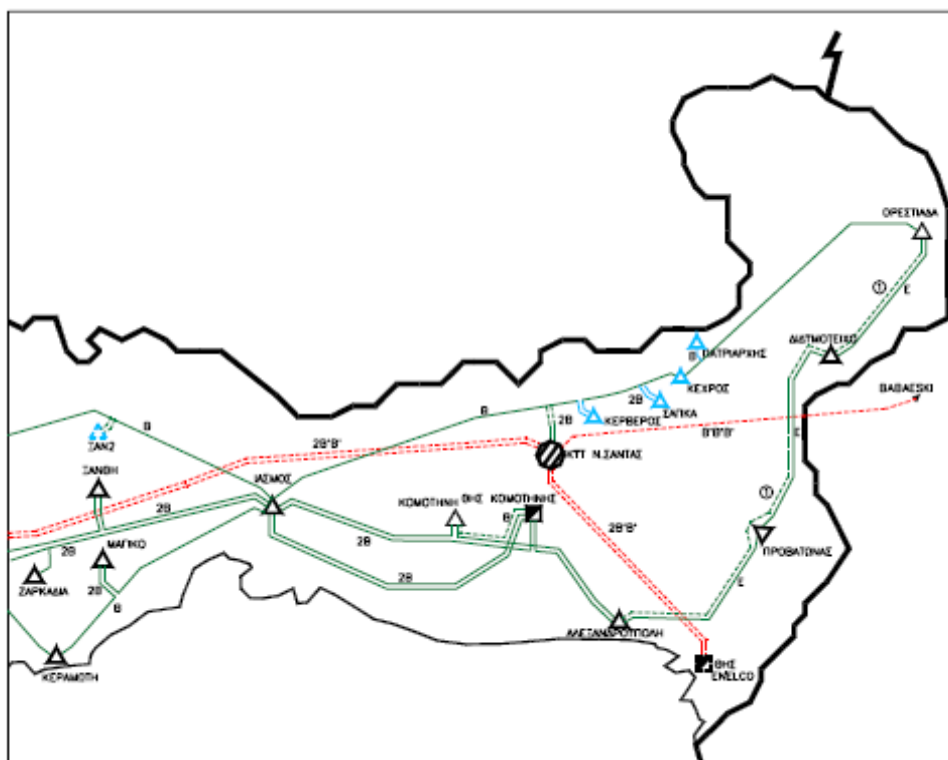
Β.2 ΧΑΡΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ, ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ) ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ



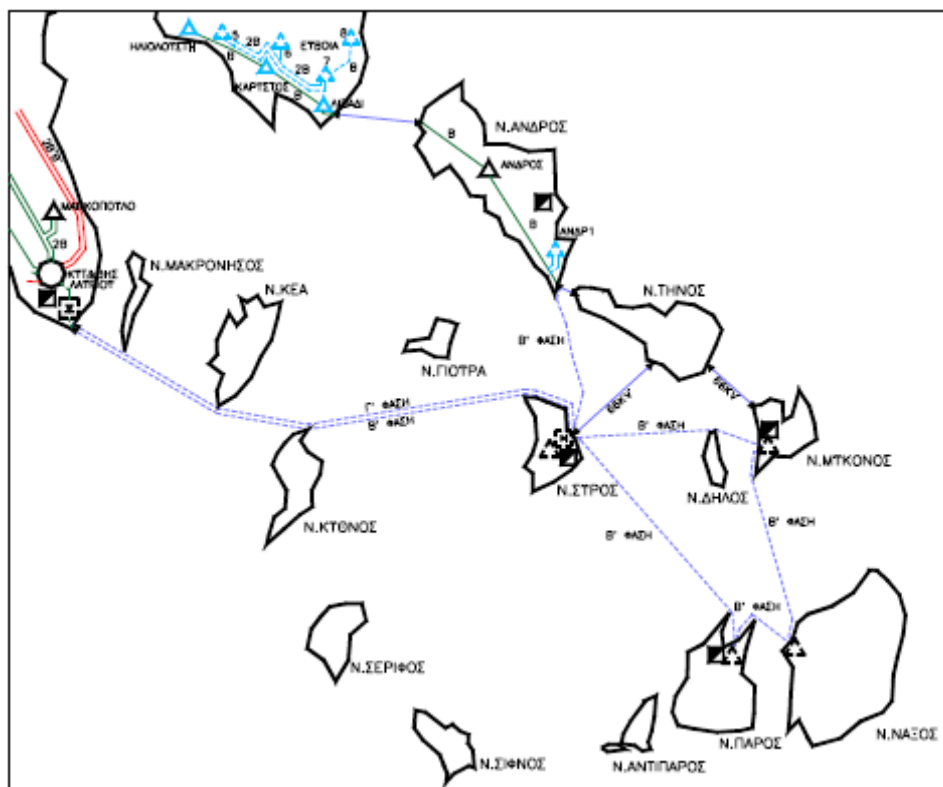
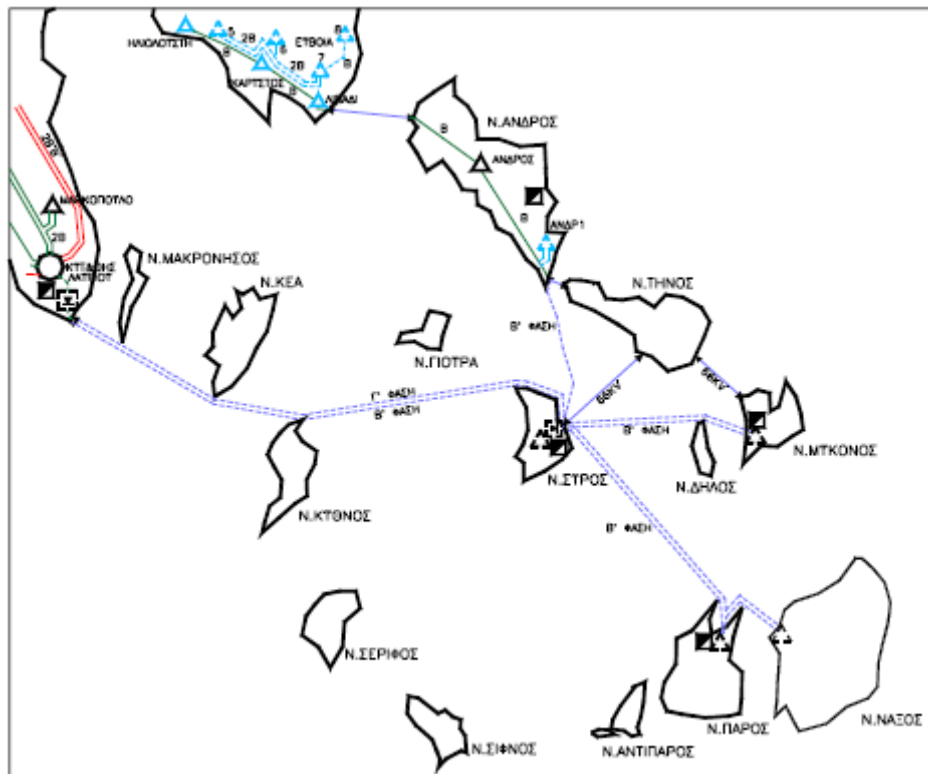
B.3 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΒΟΙΩΤΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΒΟΙΑΣ



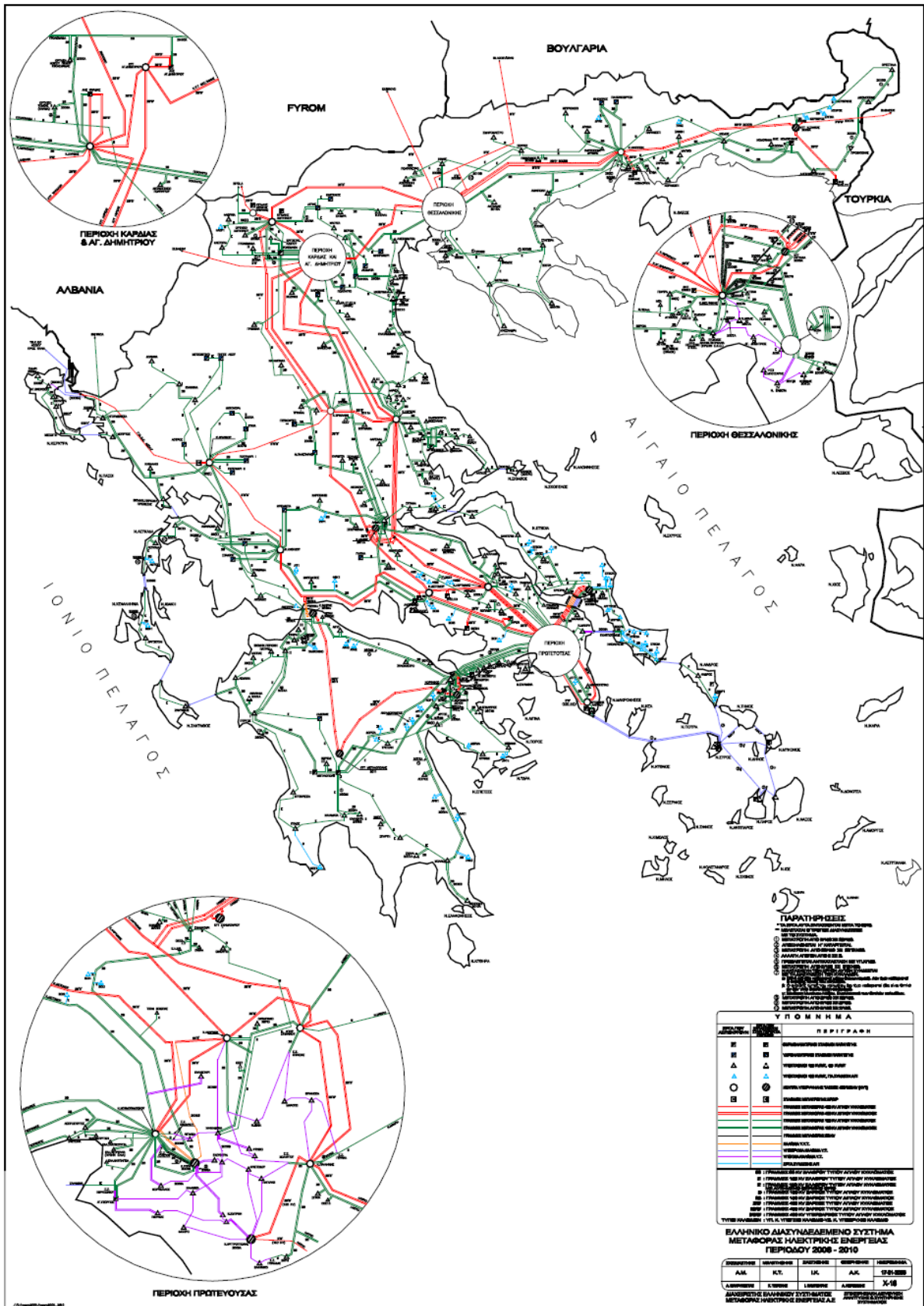
B.4 ΧΑΡΤΗΣ ΜΕ ΤΑ ΕΡΓΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΕ ΣΤΗ ΘΡΑΚΗ



Β.6 ΠΙΘΑΝΕΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΥΚΛΑΔΩΝ



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



Γ. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Γ.1 ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΗ ΕΞΥΠΗΡΕΤΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΤΟΣ	2005				Αιχμή(με βαση 2005)	G=1650	G=1600
ΜΗΝΑΣ	Αιχμή(MW)	Κανονικοποίηση	ΑΠΕ (ΜWΗ)	Κανονικοποίηση			
ΙΑΝ	8023	0,845	96,286	0,640	1434,37	215,63	165,63
ΦΕΒ	8321	0,877	110,118	0,732	1487,65	162,35	112,35
ΜΑΡ	7916	0,834	99,78	0,663	1415,24	234,76	184,76
ΑΠΡ	7356	0,775	110,264	0,733	1315,12	334,88	284,88
ΜΑΙ	7205	0,759	89,113	0,592	1288,13	361,87	311,87
ΙΟΥΝ	8858	0,933	80,541	0,535	1583,65	66,35	16,35
ΙΟΥΛ	9186	0,968	85,754	0,570	1642,29	7,71	-42,29
ΑΥΓ	9492	1,000	77,74	0,517	1697,00	-47,00	-97,00
ΣΕΠ	8044	0,847	68,708	0,457	1438,12	211,88	161,88
ΟΚΤ	7531	0,793	124,028	0,824	1346,41	303,59	253,59
ΝΟΕ	8377	0,883	113,23	0,753	1497,66	152,34	102,34
ΔΕΚ	8657	0,912	150,443	1,000	1547,72	102,28	52,28

ΙΟΥΛΙΟΣ	D Max (MW)	Κανονικοποίηση	Αιχμή	G=1600
1	8922	0,940	1595,094	4,906
2	8224	0,866	1470,304	129,696
3	6612	0,697	1182,107	417,893
4	7648	0,806	1367,326	232,674
5	8077	0,851	1444,023	155,977
6	8277	0,872	1479,780	120,220
7	8572	0,903	1532,520	67,480
8	8670	0,913	1550,041	49,959
9	7953	0,838	1421,854	178,146
10	7440	0,784	1330,139	269,861
11	8916	0,939	1594,021	5,979
12	8939	0,942	1598,133	1,867
13	8653	0,912	1547,002	52,998
14	8156	0,859	1458,147	141,853
15	7935	0,836	1418,636	181,364
16	7470	0,787	1335,503	264,497
17	6936	0,731	1240,033	359,967
18	8757	0,923	1565,595	34,405
19	9186	0,968	1642,293	-42,293
20	9140	0,963	1634,069	-34,069
21	9144	0,963	1634,784	-34,784
22	8827	0,930	1578,110	21,890
23	8044	0,847	1438,123	161,877
24	7446	0,784	1331,212	268,788
25	8994	0,948	1607,966	-7,966
26	8662	0,913	1548,611	51,389
27	9025	0,951	1613,509	-13,509

28	9126	0,961	1631,566	-31,566
29	8969	0,945	1603,497	-3,497
30	8290	0,873	1482,104	117,896
31	7811	0,823	1396,467	203,533

ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	D Max (MW)	Κανονικοποίηση	Αιχμή	G=1650	G=1600
1	9185	0,968	1642,114	7,886	-42,114
2	9435	0,994	1686,809	-36,809	-86,809
3	9492	1,000	1697	-47,000	-97,000
4	9213	0,971	1647,12	2,880	-47,120
5	8362	0,881	1494,976	155,024	105,024
6	6522	0,687	1166,017	483,983	433,983
7	6451	0,680	1153,324	496,676	446,676
8	7360	0,775	1315,836	334,164	284,164
9	7414	0,781	1325,491	324,509	274,509
10	7290	0,768	1303,322	346,678	296,678
11	7441	0,784	1330,318	319,682	269,682
12	7627	0,804	1363,571	286,429	236,429
13	7184	0,757	1284,371	365,629	315,629
14	6782	0,714	1212,5	437,500	387,500
15	6531	0,688	1167,626	482,374	432,374
16	7602	0,801	1359,102	290,898	240,898
17	7599	0,801	1358,565	291,435	241,435
18	7489	0,789	1338,899	311,101	261,101
19	7538	0,794	1347,66	302,340	252,340
20	7190	0,757	1285,444	364,556	314,556
21	7025	0,740	1255,944	394,056	344,056
22	8035	0,847	1436,514	213,486	163,486
23	8029	0,846	1435,442	214,558	164,558
24	7860	0,828	1405,228	244,772	194,772
25	8005	0,843	1431,151	218,849	168,849
26	7868	0,829	1406,658	243,342	193,342
27	7234	0,762	1293,31	356,690	306,690
28	6620	0,697	1183,538	466,462	416,462
29	7984	0,841	1427,397	222,603	172,603
30	8166	0,860	1459,935	190,065	140,065
31	8056	0,849	1440,269	209,731	159,731

G=1600		ΣΥΝΟΛΟ	30 ΩΡΕΣ	952,53 MWh					
19 Ιουλίου					20 Ιουλίου				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600
1	6851	0,72	1224,84	375,16	1	7116	0,75	1272,21	327,79
2	6235	0,66	1114,71	485,29	2	6558	0,69	1172,45	427,55
3	5880	0,62	1051,24	548,76	3	6183	0,65	1105,41	494,59
4	5694	0,60	1017,99	582,01	4	5993	0,63	1071,44	528,56
5	5563	0,59	994,57	605,43	5	5834	0,61	1043,01	556,99
6	5586	0,59	998,68	601,32	6	5818	0,61	1040,15	559,85
7	5688	0,60	1016,91	583,09	7	5905	0,62	1055,71	544,29
8	6497	0,68	1161,55	438,45	8	6672	0,70	1192,83	407,17
9	7519	0,79	1344,26	255,74	9	7622	0,80	1362,68	237,32
10	8312	0,88	1486,04	113,96	10	8395	0,88	1500,88	99,12
11	8549	0,90	1528,41	71,59	11	8692	0,92	1553,97	46,03
12	8872	0,93	1586,16	13,84	12	8838	0,93	1580,08	19,92
13	9099	0,96	1626,74	-26,74	13	9034	0,95	1615,12	-15,12
14	9186	0,97	1642,29	-42,29	14	9140	0,96	1634,07	-34,07
15	8924	0,94	1595,45	4,55	15	9024	0,95	1613,33	-13,33
16	8628	0,91	1542,53	57,47	16	8785	0,93	1570,60	29,40
17	8439	0,89	1508,74	91,26	17	8545	0,90	1527,69	72,31
18	8359	0,88	1494,44	105,56	18	8423	0,89	1505,88	94,12
19	8455	0,89	1511,60	88,40	19	8385	0,88	1499,09	100,91
20	8358	0,88	1494,26	105,74	20	8256	0,87	1476,03	123,97
21	8303	0,87	1484,43	115,57	21	8181	0,86	1462,62	137,38
22	8591	0,91	1535,92	64,08	22	8611	0,91	1539,49	60,51
23	8174	0,86	1461,37	138,63	23	8230	0,87	1471,38	128,62
24	7720	0,81	1380,20	219,80	24	7727	0,81	1381,45	218,55

21 Ιουλίου					25 Ιουλίου				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600
1	7185	0,76	1284,55	315,45	1	6555	0,69	1171,92	428,08
2	6667	0,70	1191,94	408,06	2	5968	0,63	1066,97	533,03
3	6268	0,66	1120,61	479,39	3	5670	0,60	1013,69	586,31
4	6021	0,63	1076,45	523,55	4	5491	0,58	981,69	618,31
5	5891	0,62	1053,21	546,79	5	5394	0,57	964,35	635,65
6	5896	0,62	1054,10	545,90	6	5386	0,57	962,92	637,08
7	6004	0,63	1073,41	526,59	7	5532	0,58	989,02	610,98
8	6757	0,71	1208,03	391,97	8	6257	0,66	1118,64	481,36
9	7718	0,81	1379,84	220,16	9	7241	0,76	1294,56	305,44
10	8482	0,89	1516,43	83,57	10	8042	0,85	1437,77	162,23
11	8694	0,92	1554,33	45,67	11	8388	0,88	1499,62	100,38
12	8898	0,94	1590,80	9,20	12	8648	0,91	1546,11	53,89
13	9078	0,96	1622,98	-22,98	13	8869	0,93	1585,62	14,38
14	9144	0,96	1634,78	-34,78	14	8994	0,95	1607,97	-7,97
15	9006	0,95	1610,11	-10,11	15	8801	0,93	1573,46	26,54
16	8748	0,92	1563,99	36,01	16	8402	0,89	1502,13	97,87
17	8518	0,90	1522,87	77,13	17	8060	0,85	1440,98	159,02
18	8376	0,88	1497,48	102,52	18	7917	0,83	1415,42	184,58
19	8391	0,88	1500,16	99,84	19	7872	0,83	1407,37	192,63
20	8215	0,87	1468,70	131,30	20	7746	0,82	1384,85	215,15
21	8216	0,87	1468,87	131,13	21	7747	0,82	1385,03	214,97
22	8418	0,89	1504,99	95,01	22	8265	0,87	1477,63	122,37
23	7924	0,83	1416,67	183,33	23	7816	0,82	1397,36	202,64
24	7423	0,78	1327,10	272,90	24	7299	0,77	1304,93	295,07

27 Ιουλίου					28 Ιουλίου				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600
1	6626	0,70	1184,61	415,39	1	6924	0,73	1237,89	362,11
2	6155	0,65	1100,40	499,60	2	6425	0,68	1148,68	451,32
3	5809	0,61	1038,55	561,45	3	6012	0,63	1074,84	525,16
4	5597	0,59	1000,64	599,36	4	5831	0,61	1042,48	557,52
5	5497	0,58	982,77	617,23	5	5760	0,61	1029,79	570,21
6	5479	0,58	979,55	620,45	6	5764	0,61	1030,50	569,50
7	5679	0,60	1015,30	584,70	7	5857	0,62	1047,13	552,87
8	6521	0,69	1165,84	434,16	8	6575	0,69	1175,49	424,51
9	7452	0,79	1332,28	267,72	9	7549	0,80	1349,63	250,37
10	8238	0,87	1472,81	127,19	10	8365	0,88	1495,51	104,49
11	8514	0,90	1522,15	77,85	11	8620	0,91	1541,10	58,90
12	8751	0,92	1564,52	35,48	12	8856	0,93	1583,29	16,71
13	8941	0,94	1598,49	1,51	13	9059	0,95	1619,59	-19,59
14	9025	0,95	1613,51	-13,51	14	9126	0,96	1631,57	-31,57
15	8816	0,93	1576,14	23,86	15	8813	0,93	1575,61	24,39
16	8472	0,89	1514,64	85,36	16	8501	0,90	1519,83	80,17
17	8178	0,86	1462,08	137,92	17	8242	0,87	1473,52	126,48
18	8054	0,85	1439,91	160,09	18	8225	0,87	1470,48	129,52
19	7988	0,84	1428,11	171,89	19	8286	0,87	1481,39	118,61
20	7917	0,83	1415,42	184,58	20	8167	0,86	1460,11	139,89
21	7959	0,84	1422,93	177,07	21	8183	0,86	1462,97	137,03
22	8351	0,88	1493,01	106,99	22	8475	0,89	1515,18	84,82
23	7975	0,84	1425,79	174,21	23	8018	0,84	1433,48	166,52
24	7461	0,79	1333,89	266,11	24	7517	0,79	1343,91	256,09

29 Ιουλίου					1 Αυγ/του				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600
1	6626	0,70	1184,61	415,39	1	6924	0,73	1237,89	362,11
2	6155	0,65	1100,40	499,60	2	6425	0,68	1148,68	451,32
3	5809	0,61	1038,55	561,45	3	6012	0,63	1074,84	525,16
4	5597	0,59	1000,64	599,36	4	5831	0,61	1042,48	557,52
5	5497	0,58	982,77	617,23	5	5760	0,61	1029,79	570,21
6	5479	0,58	979,55	620,45	6	5764	0,61	1030,50	569,50
7	5679	0,60	1015,30	584,70	7	5857	0,62	1047,13	552,87
8	6521	0,69	1165,84	434,16	8	6575	0,69	1175,49	424,51
9	7452	0,79	1332,28	267,72	9	7549	0,80	1349,63	250,37
10	8238	0,87	1472,81	127,19	10	8365	0,88	1495,51	104,49
11	8514	0,90	1522,15	77,85	11	8620	0,91	1541,10	58,90
12	8751	0,92	1564,52	35,48	12	8856	0,93	1583,29	16,71
13	8941	0,94	1598,49	1,51	13	9059	0,95	1619,59	-19,59
14	9025	0,95	1613,51	-13,51	14	9126	0,96	1631,57	-31,57
15	8816	0,93	1576,14	23,86	15	8813	0,93	1575,61	24,39
16	8472	0,89	1514,64	85,36	16	8501	0,90	1519,83	80,17
17	8178	0,86	1462,08	137,92	17	8242	0,87	1473,52	126,48
18	8054	0,85	1439,91	160,09	18	8225	0,87	1470,48	129,52
19	7988	0,84	1428,11	171,89	19	8286	0,87	1481,39	118,61
20	7917	0,83	1415,42	184,58	20	8167	0,86	1460,11	139,89
21	7959	0,84	1422,93	177,07	21	8183	0,86	1462,97	137,03
22	8351	0,88	1493,01	106,99	22	8475	0,89	1515,18	84,82
23	7975	0,84	1425,79	174,21	23	8018	0,84	1433,48	166,52
24	7461	0,79	1333,89	266,11	24	7517	0,79	1343,91	256,09

2 Αυγ/ου					3 Αυγ/του				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1600
1	7182	0,76	1284,01	315,99	1	7428	0,78	1327,99	272,01
2	6685	0,70	1195,16	404,84	2	6899	0,73	1233,42	366,58
3	6321	0,67	1130,08	469,92	3	6520	0,69	1165,66	434,34
4	3128	0,33	559,23	1040,77	4	6312	0,66	1128,47	471,53
5	5998	0,63	1072,34	527,66	5	6157	0,65	1100,76	499,24
6	5967	0,63	1066,79	533,21	6	6128	0,65	1095,58	504,42
7	6015	0,63	1075,37	524,63	7	6158	0,65	1100,94	499,06
8	6671	0,70	1192,66	407,34	8	6780	0,71	1212,14	387,86
9	7579	0,80	1354,99	245,01	9	7713	0,81	1378,95	221,05
10	8439	0,89	1508,74	91,26	10	8563	0,90	1530,91	69,09
11	8922	0,94	1595,09	4,91	11	8977	0,95	1604,93	-4,93
12	9070	0,96	1621,55	-21,55	12	9044	0,95	1616,91	-16,91
13	9290	0,98	1660,89	-60,89	13	9274	0,98	1658,03	-58,03
14	9435	0,99	1686,81	-86,81	14	9492	1,00	1697,00	-97,00
15	9200	0,97	1644,80	-44,80	15	9382	0,99	1677,33	-77,33
16	9005	0,95	1609,93	-9,93	16	9021	0,95	1612,79	-12,79
17	8833	0,93	1579,18	20,82	17	8668	0,91	1549,68	50,32
18	8796	0,93	1572,57	27,43	18	8517	0,90	1522,69	77,31
19	8786	0,93	1570,78	29,22	19	8462	0,89	1512,85	87,15
20	8655	0,91	1547,36	52,64	20	8336	0,88	1490,33	109,67
21	8646	0,91	1545,75	54,25	21	8336	0,88	1490,33	109,67
22	8810	0,93	1575,07	24,93	22	8667	0,91	1549,50	50,50
23	8355	0,88	1493,72	106,28	23	8296	0,87	1483,18	116,82
24	7942	0,84	1419,89	180,11	24	7901	0,83	1412,56	187,44

4 Αυγ/ου				
Ωρα	Φορτίο	Κανονικοποίηση	Αιχμή	G=1600
1	7379	0,78	1319,23	280,77
2	6871	0,72	1228,41	371,59
3	6466	0,68	1156,01	443,99
4	6259	0,66	1119,00	481,00
5	6119	0,64	1093,97	506,03
6	6076	0,64	1086,28	513,72
7	6140	0,65	1097,72	502,28
8	6677	0,70	1193,73	406,27
9	7578	0,80	1354,81	245,19
10	8355	0,88	1493,72	106,28
11	8758	0,92	1565,77	34,23
12	9016	0,95	1611,90	-11,90
13	9196	0,97	1644,08	-44,08
14	9213	0,97	1647,12	-47,12
15	8837	0,93	1579,90	20,10
16	8449	0,89	1510,53	89,47
17	8119	0,86	1451,53	148,47
18	8003	0,84	1430,79	169,21
19	8002	0,84	1430,61	169,39
20	7885	0,83	1409,70	190,30
21	7938	0,84	1419,17	180,83
22	8090	0,85	1446,35	153,65
23	7679	0,81	1372,87	227,13
24	7259	0,76	1297,78	302,22

G=1650		ΣΥΝΟΛΟ	5 ΩΡΕΣ	130,06 MWh					
2 Αυγ/του					3 Αυγ/ου				
Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1650	Ωρα	Φορτίο	Καν/ση	Αιχμή	G=1650
1	7182	0,76	1284,01	365,99	1	7428	0,78	1327,99	322,01
2	6685	0,70	1195,16	454,84	2	6899	0,73	1233,42	416,58
3	6321	0,67	1130,08	519,92	3	6520	0,69	1165,66	484,34
4	3128	0,33	559,23	1090,77	4	6312	0,66	1128,47	521,53
5	5998	0,63	1072,34	577,66	5	6157	0,65	1100,76	549,24
6	5967	0,63	1066,79	583,21	6	6128	0,65	1095,58	554,42
7	6015	0,63	1075,37	574,63	7	6158	0,65	1100,94	549,06
8	6671	0,70	1192,66	457,34	8	6780	0,71	1212,14	437,86
9	7579	0,80	1354,99	295,01	9	7713	0,81	1378,95	271,05
10	8439	0,89	1508,74	141,26	10	8563	0,90	1530,91	119,09
11	8922	0,94	1595,09	54,91	11	8977	0,95	1604,93	45,07
12	9070	0,96	1621,55	28,45	12	9044	0,95	1616,91	33,09
13	9290	0,98	1660,89	-10,89	13	9274	0,98	1658,03	-8,03
14	9435	0,99	1686,81	-36,81	14	9492	1,00	1697,00	-47,00
15	9200	0,97	1644,80	5,20	15	9382	0,99	1677,33	-27,33
16	9005	0,95	1609,93	40,07	16	9021	0,95	1612,79	37,21
17	8833	0,93	1579,18	70,82	17	8668	0,91	1549,68	100,32
18	8796	0,93	1572,57	77,43	18	8517	0,90	1522,69	127,31
19	8786	0,93	1570,78	79,22	19	8462	0,89	1512,85	137,15
20	8655	0,91	1547,36	102,64	20	8336	0,88	1490,33	159,67
21	8646	0,91	1545,75	104,25	21	8336	0,88	1490,33	159,67
22	8810	0,93	1575,07	74,93	22	8667	0,91	1549,50	100,50
23	8355	0,88	1493,72	156,28	23	8296	0,87	1483,18	166,82
24	7942	0,84	1419,89	230,11	24	7901	0,83	1412,56	237,44

Γ.2 ΠΙΝΑΚΕΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

• ΠΛΑΝΟ Α

ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗ	ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗ	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ(MW)	ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ Μ.Ο.
1	2	64	0,32	0,0128
1	5	124	0,62	0,0248
2	4	200	1	0,0400
2	5	200	1	0,0400
2	5	124	0,62	0,0248
3	4	200	1	0,0400
3	4	128	0,64	0,0256
4	5	4	0,02	0,0008
4	7	200	1	0,0400
4	9	196	0,98	0,0392
5	6	200	1	0,0400
5	6	200	1	0,0400
6	11	200	1	0,0400
6	11	50	0,25	0,0100
6	12	155	0,775	0,0310
6	13	200	1	0,0400
6	13	200	1	0,0400
7	9	200	1	0,0400
7	9	30	0,15	0,0060
8	7	30	0,15	0,0060
9	10	66	0,33	0,0132
9	14	200	1	0,0400
11	10	46	0,23	0,0092
13	12	5	0,025	0,0010
13	14	55	0,275	0,0110
			ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ	0,6554

• ΠΛΑΝΟ Β

ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗ	ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗ	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ(MW)	ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ Μ.Ο.
1	2	100	0,5	0,0200
1	5	200	1	0,0400
2	4	200	1	0,0400
2	4	145	0,725	0,0290
2	5	200	1	0,0400
3	2	35	0,175	0,0070
3	4	200	1	0,0400
4	7	200	1	0,0400
4	7	120	0,6	0,0240
4	9	169	0,845	0,0338
5	4	72	0,36	0,0144
5	6	200	1	0,0400
6	11	47	0,235	0,0094
6	12	160	0,8	0,0320
6	13	200	1	0,0400
6	13	148	0,74	0,0296
7	9	200	1	0,0400
7	9	200	1	0,0400
8	7	50	0,25	0,0100
9	10	200	1	0,0400
9	10	9	0,045	0,0018
9	14	160	0,8	0,0320
10	11	127	0,635	0,0254
13	14	55	0,275	0,0110
			ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ	0,6794

• ΠΛΑΝΟ Γ

ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗ	ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΜΗ	ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ(MW)	ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ	ΣΤΑΘΜΙΚΟΣ Μ.Ο.
1	2	100	0,5	0,0250
1	5	200	1	0,0500
2	4	132	0,66	0,0330
2	5	200	1	0,0500
2	5	128	0,64	0,0320
3	4	175	0,875	0,0438
4	7	120	0,6	0,0300
4	9	89	0,445	0,0223
5	6	200	1	0,0500
5	6	200	1	0,0500
6	11	200	1	0,0500
6	12	160	0,8	0,0400
6	13	200	1	0,0500
6	13	195	0,975	0,0488
7	9	200	1	0,0500
8	7	50	0,25	0,0125
9	10	56	0,28	0,0140
9	14	103	0,515	0,0258
11	10	26	0,13	0,0065
13	14	55	0,275	0,0138
			ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ	0,69725

Γ.3 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΙΜΩΝ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

<i>Κατηγορία κριτηρίου</i>	Σενάριο		Απόφαση Α	Απόφαση Β	Απόφαση Γ
	<i>Κριτήρια</i>	<i>ΕΣΚ</i>	Βάρη		
1.Οικονομικά	1.1 Κόστος νέων Γραμμών (κ€)	70 %	16589	11130	8480
	1.2 Κόστος αποζημίωσης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας (Ωρες αποκοπής)	30 %	0	5	30
2.Οικολογικά	2.1 Παραγωγή ΑΠΕ/Συνολική παραγωγή (%)	60 %	1,7	8,48	10,625
	2.2 Μείωση εκπομπών ρύπων λόγω ΑΠΕ (Προστιθέμενα MW συμβατικής μορφής)	40 %	450	210	100
3.Τεχνολογικά	3.1 Ποσοστό χρησιμοποίησης γραμμών (%)	30 %	65,54	67,94	69,725
	3.2 Μέγιστη αποκοπή / Αιχμή (%)	40 %	0	2,85	6,06
	3.3 Αξιοπιστία μονάδων παραγωγής (MW)	30 %	450	210	100

Δ. ΚΩΔΙΚΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Δ1. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ BENDERS ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

%Τα δεδομένα του προγράμματος αναφέρονται στην υλοποίηση του πλάνου επέκτασης Α
%των 14ζυγών της ΙΕΕΕ

%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 υποψήφιες 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 0.4 0 0.4 0 0;  
    0 0 0 0 0 0.4 0 0 0 0 0.4 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

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

$$X_{pu}=X1./225 ;$$

%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
%αγωγιμοτήτων*

```
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
```

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

G=[350;550;400;0;0;450;0;30;0;0;0;0;0]; g=G/100;

D=[0;90;75;128;128;45;0;0;160;112;204;160;340;255]; d=D/100;

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

```
f=[200; 0; 0; 200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
    200;200;200;200; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
    0; 200;200; 0; 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; 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; 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;
    0; 0; 0; 200; 0; 0; 200; 0; 200; 0; 0; 0; 200;
```

```

0; 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; 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 διανύσματος 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

```

```

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
end

```

```

%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
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
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
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;

```

```

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=δ*w+cost; %Ανω όριο του προβλήματος αποσύνθεσης,
                %Με την τιμή δ 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


```

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;
    end
  end
end

```

```

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

```

```
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']);
```

```

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

```

```

% 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
disp(['The artificial variables have been removed'])
pause(pt)
c=corig;
reg % solve the problem using file reg.m
disp(['Final tableau'])

end
end

```

% 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. $a(\text{bas},:)=\text{identity}$.

% 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, $\text{epsi}, i=0,1,2,3$.

% 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;

iterm=100;

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

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

eps0=10⁻¹⁰; % numerical zero

eps1=10⁻⁵; % accuracy parameter for optimality check

eps2=10⁻⁸; % accuracy parameter pivot element (threshold test)

eps3=10⁻⁶; % accuracy parameter for final roundoff error check

a0=a; % save the matrix a for the final roundoff error test

b0=b; % save the vector b for the final roundoff error test

c0=c;bas0=bas;

[m,mn]=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]
    if pt > 20,
        disp(['Hit return to continue'])
        pause
    else
        pause(pt)
    end
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
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
    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
    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.
    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);
            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
end
if iter>=100,
    text='Iteration bound has been exceeded ***** '
end

```

Δ2. Ο ΚΩΔΙΚΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ELECTRE I ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB

*%Τα δεδομένα του προγράμματος αναφέρονται στην υλοποίηση του οικονομικού
%σεναρίου*

```
bari=[0.385; 0.165; 0.12; 0.08; 0.075; 0.01; 0.075];
```

```
isodi=[5 0 2 2 10 10 10;
```

```
7 2 8 5 8 6 5;
```

```
10 10 10 10 5 4 3];
```

```
i=3;
```

```
j=3;
```

```
k=7;
```

```
crit=7;
```

```
epil=3;
```

```
c=0.6;
```

```
d=0.4;
```

```
C=zeros(epil);
```

```
D=zeros(epil);
```

```
delta=max(max(isodi)-min(isodi));
```

```
for i=1:1:epil
```

```
for j=1:1:epil
```

```
if (i~=j)
```

```
for k=1:1:crit
```

```
if (isodi(i,k)>=isodi(j,k))
```

```
C(i,j)=C(i,j)+bari(k)
```

```
else
```

```
D(i,j)=max(D(i,j),isodi(j,k)-isodi(i,k));
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
C=C/sum(bari);
```

```
D=D/delta;
```

```
epikrat=zeros(epil,epil);
```

```
for i=1:1:epil
```

```
for j=1:1:epil
```

```
if (i~=j)
```

```
if ((C(i,j)>=c)&&(D(i,j)<=d))
```

```
epikrat(i,j)=1;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
epikrat
```

```
end
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας – Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταζής – Εκδόσεις Ε.Μ.Π. – 2001.
2. Ηλεκτρική οικονομία – Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταζής – 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. Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού – Π.Κάπρος – Εκδόσεις Ε.Μ.Π. – 1997.
7. Συστήματα Αποφάσεων – Μ. Σαμουηλίδης Κ. Βλάχος, Γ. Ψαρράς – Εκδόσεις Ε.Μ.Π. – 1987.
8. Electric power system applications of optimization – James A. Momoh – Marcel Dekker, Inc. – 2001.
9. 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
10. 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.
11. 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.
12. New transmission planning model – H.K. Youssef, R.Hackam – IEEE Transactions on Power Systems vol.4, no1 – 1989.
13. 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.
14. A generic approach to network modeling for harmonic analysis – Arindam Maitra – A dissertation submitted to the Faculty of Mississippi State University – 2002.
15. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure – Figueira, J. and Roy, B – European Journal of Operational Research -2002.
16. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning. A review – S.D.Pohekar, M.Ramachandran – Renewable and Sustainable Energy Reviews – 2004.

17. The outranking approach and the foundations of Electre methods–*B.Roy–Theory and Decision – 199.*
18. Multicriteria analysis: survey and new directions–*B.Roy, Ph.Vincke–European Journal of Operational Research– 198.*
19. Decision making in energy planning: The Electre multicriteria analysis approach – *Beccali M, Cellura M, Ardenete D– Energy Convers Mgmt– 1998.*

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