



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

Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης Στον Προσδιορισμό Της Στρεφόμενης Εφεδρείας Του ΣΗΕ Της Κύπρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόδουλος Σ. Βιολάρης

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

Αθήνα 2008



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

Εφαρμογές Μηχανικής Μάθησης Στον Προσδιορισμό Της Στρεφόμενης Εφεδρείας Του ΣΗΕ Της Κύπρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χριστόδουλος Σ. Βιολάρης

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.

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

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

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2008

.....
Χριστόδουλος Βιολάρης

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

Copyright © Χριστόδουλος Βιολάρης, 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η χρήση των Δένδρων Απόφασης για τη διατύπωση κανόνων προσδιορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος, έτσι ώστε η συχνότητα του συστήματος να διατηρείται εντός των επιτρεπόμενων ορίων σε περιπτώσεις διαταραχών (πχ η απώλεια μονάδας παραγωγής), σε διάφορες συνθήκες φόρτισης και για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις. Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου μοντελοποιείται με τη χρήση του λογισμικού πακέτου Eurostag και στη συνέχεια προσομοιώνονται σε αυτό δύο σενάρια όπου εξετάζεται η μεταβολή της συχνότητας του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κύπρο και μία περιγραφή του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2, επεξηγείται ο ρόλος που διαδραματίζει η στρεφόμενη εφεδρεία στην ευστάθεια του συστήματος, ενώ περιγράφονται οι διάφοροι τύποι της Λειτουργικής Εφεδρείας καθώς και πως επιδρά η Αιολική Παραγωγή στην Εφεδρεία του συστήματος.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 3, γίνεται μία βιβλιογραφική αναφορά σε άλλες μελέτες που αφορούν τον προσδιορισμό της εφεδρείας για την ασφαλή λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, ενώ στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η μεθοδολογία των Δένδρων Απόφασης μέσω της οποίας στην συνέχεια θα γίνει εξαγωγή κανόνων για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5, γίνεται μια σύντομη τεχνική περιγραφή του λογισμικού πακέτου Eurostag, καθώς και μια λεπτομερή ανάλυση, που αφορά τον τρόπο με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση του ΣΗΕ της Κύπρου σε αυτό. Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας της Βάσης Γνώσης όπου επεξηγείται αναλυτικά πως υπολογίζεται η Αιολική Παραγωγή, η παραγωγή των γεννητριών και η συχνότητα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα 2 εξεταζόμενα σενάρια, όπως αυτά προκύπτουν μέσω των Δένδρων Απόφασης, ενώ στο τέλος του Κεφαλαίου αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία, τα οποία σχετίζονται με την ευστάθεια και ασφάλεια του κάθε σεναρίου

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ευστάθεια, Εφεδρεία, Συχνότητα, Γεννήτριες, Ανεμογεννήτριες, Δένδρα Απόφασης, Eurostag, Μοντέλο Προσομοίωσης.

ABSTRACT

The main target of this dissertation is to formulate some rules in order to maintain the frequency of the Cyprus Electrical Energy System (EES) within the limits under generator outage. These rules are extracted based on the methodology of the Decision Trees. The EES of Cyprus is being simulated for two different scenarios on the Eurostag software package.

The dissertation provides initially, in Chapter 1, a review of the history of the electricity in Cyprus and a brief description of the Cypriot Electrical Energy System (EES). Chapter 2 describes the role of the spinning reserve on the stability and adequacy of the power system and contains a short analysis for the different types of operating reserve and the impact of wind generators.

Chapter 3, contains the results of similar studies, which evaluate the reserve of the EES and Chapter 4 describes the methodology of the Decision Trees.

Chapter 5 gives a concise technical description of the Eurostag software package, as well as a detailed analysis concerning the modeling of the EES of Cyprus on this package and Chapter 6 describes the creation of the Knowledge Base.

Finally, Chapter 7 contains a presentation of the simulation process results, with the relevant decision tree's diagrams for each scenario, as well the basic conclusions of the study, regarding the stability and security of each scenario.

KEY WORDS:

Electrical Energy System, Stability, Reserve, Frequency, Generators, Wind Turbines, Decision Trees, Eurostag, Simulation Model

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Καταρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταπτυχιακό συνεργάτη, Εμμανουήλ Βουμβουλάκη, για την διαρκή συμπαράσταση του, καθώς και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε, καθόλη την διάρκεια της έρευνας μου .

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής, η οποία είναι προσαρμοσμένη στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου, καθώς επίσης και για την συνεχή του καθοδήγηση, η οποία ήταν καθοριστική, για την αποπεράτωση της εργασίας μου .

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μητέρα μου για την συνεχή οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχε καθόλη την διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΥΠΡΟΥ

1.1 Ιστορική αναδρομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κύπρο	12
1.2 Σύστημα Παραγωγής	16
1.3 Σύστημα Μεταφοράς	18
1.4 Σύστημα Διανομής	20
1.5 Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας	21
1.6 Αιολική Παραγωγή	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗ ΕΦΕΔΡΕΙΑ ΣΗΕ

2.1 Εισαγωγή	25
2.2 Τύποι Λειτουργικής Εφεδρείας	30
2.3 Επίδραση της Αιολικής Παραγωγής στην Εφεδρεία του συστήματος	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΕ ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ

3.1. Βέλτιστη κατανομή των υπηρεσιών πρωτογενούς εφεδρείας στην ενεργειακή αγορά	37
3.1.1 Περιγραφή Μεθόδου	37
3.1.2 Αλγόριθμος	38
3.1.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	39
3.2. Καθορισμός της Εφεδρείας χρησιμοποιώντας Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	42
3.3. Διαδικασίες για καθορισμό της απαραίτητης παραγωγής για εφεδρεία	45
3.3.1 Στοχαστική –Ντετερμινιστική Μέθοδος	45
3.3.2 Μέθοδος Προσομοίωσης Monte-Carlo	47
3.4. Προσομοίωση του συστήματος μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου της Κύπρου για υπολογισμό της εφεδρείας	49
3.4.1 Περιγραφή Μελέτης	49
3.4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	51
3.4.3 Κυριότερα Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΝΤΡΩΝ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή	57
4.2 Δέντρα Απόφασης	59
4.3 Αυτόματη Κατασκευή των Δένδρων Απόφασης	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΗΕ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ EUROSTAG

5.1 Περιγραφή Eurostag	67
5.1.1 Λειτουργία του Eurostag	68
5.1.2 Εφαρμογές του Eurostag	68
5.1.3 Τεχνικές Προδιαγραφές	69
5.1.4 Περιγραφή Προσομοίωσης	72
5.2 Μοντελοποίηση του δικτύου της Κύπρου στο Eurostag	74

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΓΝΩΣΗΣ

6.1 Υπολογισμός Παραγωγής Γεννητριών	85
6.2 Υπολογισμός Παραγωγής Ανεμογεννητριών	88
6.3 Υπολογισμός της συχνότητας	92

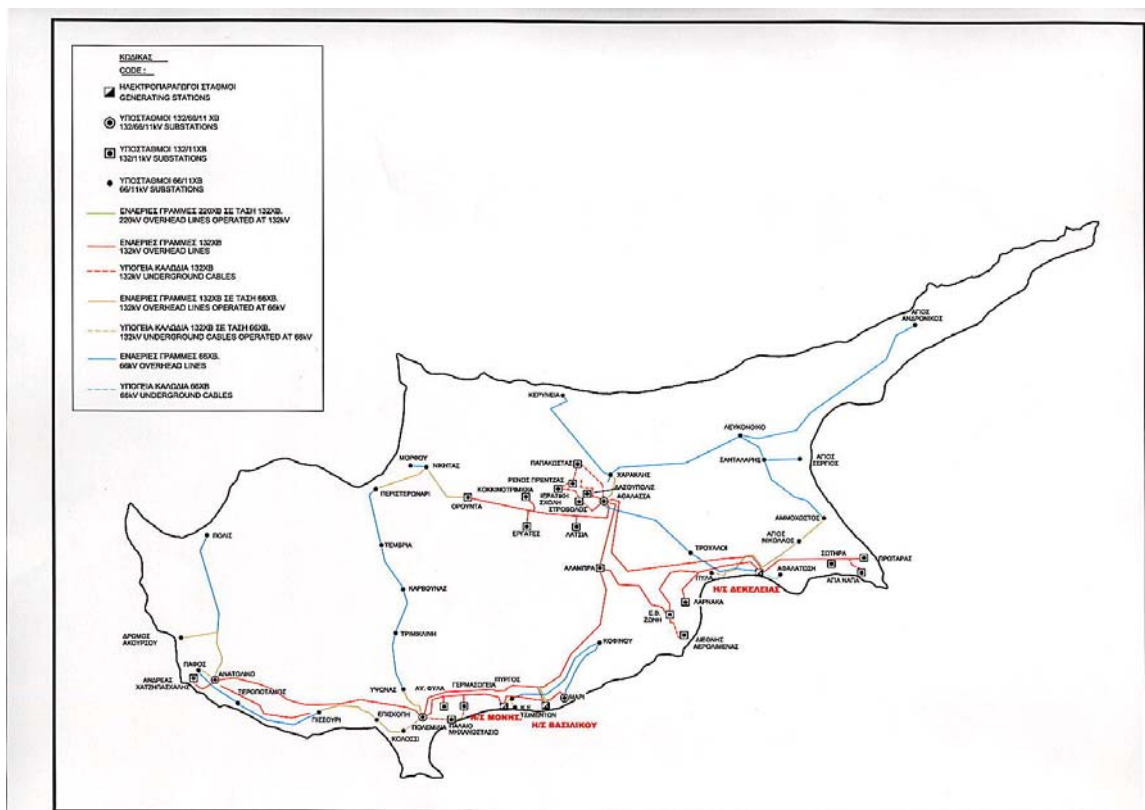
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΔΕΝΔΡΩΝ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΠΟΥ ΝΑ ΔΙΑΣΦΑΛΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.

7.1 Σενάριο 1: Φορτίο 2005 & Αιολική Παραγωγή	96
7.1.1 Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο	96
7.1.2 Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο	99
7.1.3 Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο	102
7.2 Σενάριο 2: Φορτίο 2005 χωρίς Αιολική Παραγωγή	105
7.2.1 Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο	105
7.2.2 Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο	108
7.2.3 Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο	111
7.3 Συμπεράσματα	115

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120
---------------------	-----

1. Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας Κύπρου

Αναφερόμενοι στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπονοούμε το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες (σταθμούς) παραγωγής στον καταναλωτή. Η Κύπρος έχει το δικό της αυτόνομο ΣΗΕ, που αποτελείται από τους αντίστοιχους σταθμούς παραγωγής, δίκτυο μεταφοράς, δίκτυο διανομής καθώς και το κέντρο ελέγχου ενέργειας, στοιχεία τα οποία θα παρουσιαστούν στην συνέχεια. Πάνω σε αυτό το σύστημα θα μελετηθούν οι διαταραχές που θα προκαλέσουν τα διάφορα σενάρια.



Εικόνα 1.1[1]: Χάρτης Συστήματος

1.1 Ιστορική αναδρομή της Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Κύπρο

Η ιστορία του ηλεκτρισμού στην Κύπρο ξεκινά στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και συγκεκριμένα το 1903, όταν και η τότε αποικιοκρατική κυβέρνηση, για τις ανάγκες της Αρμοστείας και του Γενικού Νοσοκομείου Λευκωσίας, εγκατέστησε στο νησί δύο ηλεκτρογεννήτριες. Ωστόσο, θα περάσει σχεδόν μία δεκαετία για να αποκτήσει ο απλός καταναλωτής πρόσβαση σε αυτό το πολύτιμο αγαθό και αυτό επιτυγχάνεται όταν το 1912 ιδρύθηκε εταιρεία ηλεκτρισμού στη Λεμεσό και εγκαθιδρύθηκε μηχανοστάσιο με ηλεκτρογεννήτριες (Ηλεκτροφωτιστική Εταιρεία Λεμεσού), για να ακολουθήσει ένα χρόνο αργότερα, το 1913, η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στην πόλη της Λευκωσίας (Ηλεκτρική Εταιρεία Λευκωσίας).

Στην δεκαετία του 30 η διείσδυση του ηλεκτρισμού εξαπλώθηκε και στο υπόλοιπο νησί με την ίδρυση Δημοτικών Ηλεκτρικών Επιχειρήσεων στις πόλεις Αμμοχώστου, Λάρνακας, Πάφου, Κερύνεια και σε μερικά αγροτικά κέντρα. Ωστόσο, μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 60 η διάδοση του ηλεκτρισμού στην Κύπρο συνεχιζόταν με πολύ αργό ρυθμό, ενώ ο εξηλεκτρισμός της υπαίθρου ήταν υποτυπώδης.

Η παροχή ηλεκτρισμού μόνο κατά τις βραδινές ώρες, η ηλεκτροδότηση καταναλωτών μόνο μέσα στα καθορισμένα δημοτικά ή χωρηντικά όρια λόγω της ισχύουσας νομοθεσίας και η υψηλή τιμολογιακή πολιτική των εταιριών λόγω μικρής κατανάλωσης και αυξημένων δαπανών λειτουργίας και συντήρησης των μηχανών αποθάρρυναν τον καταναλωτή. Εξάλλου οι συχνές διακοπές ηλεκτροδότησης λόγω της κακής κατάστασης των περισσότερων ηλεκτρογεννητριών και του δικτύου διανομής κλόνιζε την πίστη των καταναλωτών. Επιπλέον, εκείνη την εποχή επειδή οι ηλεκτρικές συσκευές δεν ήταν διαδεδομένες, η χρήση του ηλεκτρισμού περιοριζόταν μόνο για φωτιστικούς σκοπούς.

Τα παραπάνω γεγονότα οδήγησαν σε δραστικά μέτρα τα οποία ολοκληρώθηκαν την διετία 1952-53, η οποία και υπήρξε κομβικό σημείο στην εξέλιξη της ιστορίας του ηλεκτρισμού στην Κύπρο. Το 1952 η τότε κυβέρνηση της Κύπρου προχώρησε στην ίδρυση της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου με σκοπό την υπαγωγή της ηλεκτροπαραγωγού βιομηχανίας υπό πλήρη δημόσιο έλεγχο. Η Αρχή αυτή αποσκοπούσε στην απορρόφηση των υφιστάμενων εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας και την ενοποίηση του δικτύου

μεταφοράς, ενώ θα ήταν υπεύθυνη για την οργάνωση της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής του νέου συστήματος. Το 1953 τέθηκε σε λειτουργία ο ηλεκτροπαραγωγικός σταθμός της Δεκέλειας συνολικής ισχύς 84MW με σκοπό την κάλυψη των αναγκών ολόκληρης της Κύπρου.

Στα επόμενα χρόνια παρατηρήθηκε μία αλματώδης αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές γεγονός που οδήγησε στην ανάγκη για δημιουργία νέου παραγωγικού σταθμού. Έτσι, η ΑΗΚ προχώρησε στην κατασκευή και δεύτερου σταθμού στην περιοχή της Μονής, η πρώτη φάση του οποίου συμπληρώθηκε το 1966 και μέχρι το 1976 όταν το έργο αποπερατώθηκε είχε εγκατεστημένη ισχύ 180MW. Μέχρι το 1972 το σύνολο των πόλεων, χωριών και οικισμών του νησιού είχαν πρόσβαση στο ηλεκτρικό ρεύμα.

Η αλματώδης αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μειώθηκε προσωρινά μετά τα γεγονότα του πραξικοπήματος και της εισβολής το καλοκαίρι του 1974. Η γρήγορη ανάπτυξη όμως της οικονομίας του νησιού τα επόμενα χρόνια και κυρίως του ξενοδοχειακού τομέα και σε συνδυασμό με τις αυξημένες ανάγκες των νοικοκυριών λόγω της διείσδυσης των ηλεκτρικών συσκευών έκανε επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας νέου ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού ενέργειας.

Ο τρίτος αυτός σταθμός εγκαθιδρύθηκε και πάλι στην περιοχή της Δεκέλειας και θα αντικαθιστούσε σταδιακά τον παλαιό σταθμό ο οποίος εκτός από ότι ήταν πλέον αντισυμβαλλόμενος θα τελείωνε και η ωφέλιμη λειτουργία του. Η πρώτη μονάδα του σταθμού δυναμικότητας 60 MW τέθηκε σε λειτουργία το 1982, ενώ μέχρι και το 1993 όταν εντάχθηκε και η τελευταία μονάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανερχόταν σε 360 MW. Ο παλαιός σταθμός, ο οποίος λειτούργησε για πάνω από 30 χρόνια απενεργοποιήθηκε το 2002.

Επιπλέον, το 1997 ξεκίνησαν οι εργασίες για τη δημιουργία νέου σταθμού παραγωγής στην περιοχή του Βασιλικού (στην Εικ.1.2[1] παρουσιάζεται κατά τη πρώτη φάση λειτουργίας του). Ο σταθμός σήμερα περιλαμβάνει τρεις Ατμοστρόβιλους συνολικής ισχύος 390 MW καθώς και ένα αεριοστρόβιλο ισχύος 37,5MW. Στον ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό της Μονής λειτουργούν ακόμη 4 αεριοστρόβιλοι ισχύος 37,5MW έκαστος.



Εικόνα 1.2[1]: Σταθμός Βασιλικού

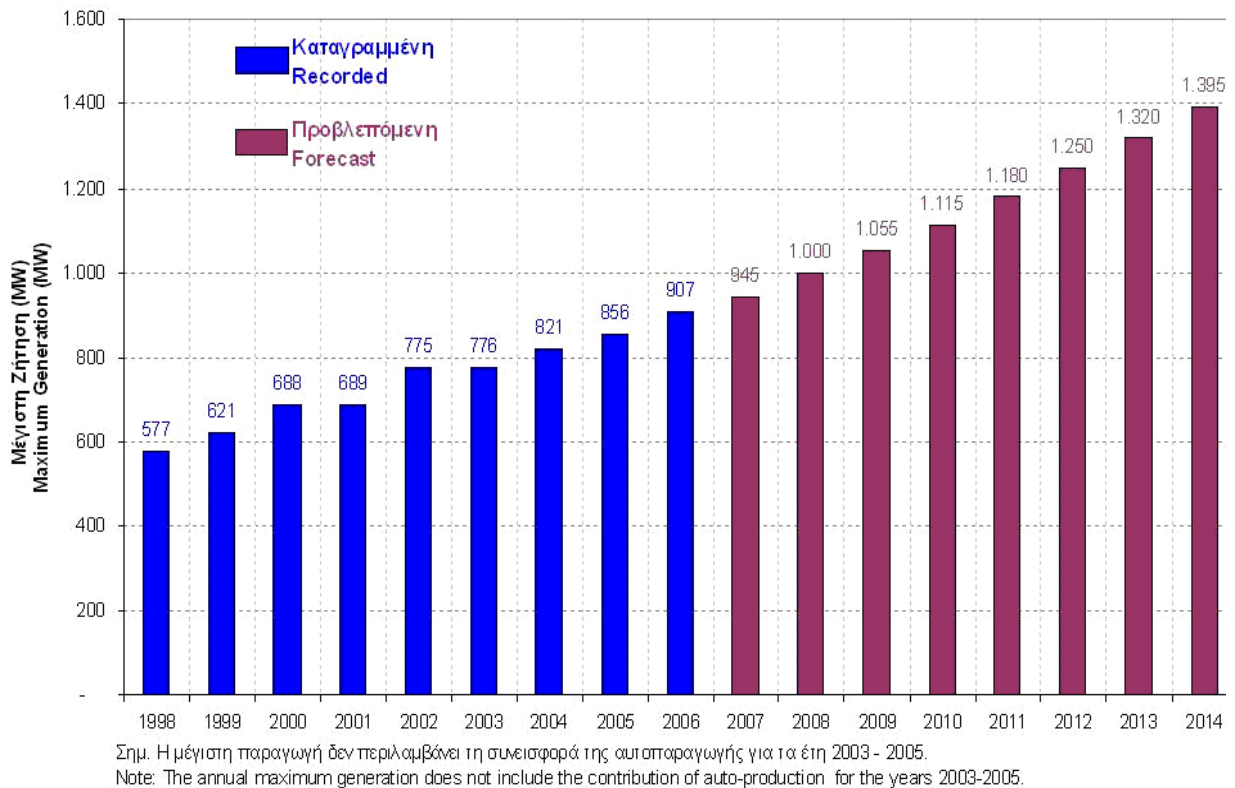
Μελλοντικές Προοπτικές

Μέχρι το τέλος της δεκαετίας, υπάρχει η πρόβλεψη για εγκατάσταση στον Ηλεκτροπαραγωγό Βασιλικού τριών ακόμη μονάδων. Οι Μονάδες αυτές θα είναι Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle), διπλής καύσης, ονομαστικής ισχύος 180 MW η κάθε μια, και θα μπορούν να καίνε φυσικό αέριο ή ντίζελ.

Ακόμη, από το 2011 και μετέπειτα προβλέπεται η χρήση του φυσικού αερίου (LNG) ως καυσίμου. Αυτό είναι μία σημαντική εξέλιξη αφού τα κόστη παραγωγής αναμένεται να μειωθούν κατά 50%. Γι αυτό το σκοπό, προβλέπεται η δημιουργία Ενεργειακού Κέντρου στην περιοχή του Βασιλικού, όπου εκεί θα εγκατασταθεί το τερματικό εισαγωγής και απουγροποίησης Φυσικού Αερίου.

Επίσης, τα επόμενα 10 χρόνια το μέγιστο φορτίο (MW) και η ενεργειακή κατανάλωση αναμένεται να διπλασιαστεί, ενώ κατά την ίδια περίοδο αναμένεται η ένταξη μονάδων Συνδυασμένου Κύκλου συνολικής ισχύος 1200MW. Τέλος, μέχρι το τέλος της δεκαετίας, υπάρχει πρόνοια για την δημιουργία αιολικών πάρκων ισχύος 120 – 150 MW, τα οποία αναμένεται ότι θα παράγουν ένα ποσοστό κοντά στο 5% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας του νησιού, κατά το έτος 2010.

Εικόνα 1.3[2]: Μακροπρόθεσμη Πρόβλεψη Μέγιστης Παραγωγής



1.2 Σύστημα Παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, στην Κύπρο λειτουργούν τρεις σταθμοί παραγωγής, των οποίων η ιδιοκτησία και ευθύνη λειτουργίας ανήκει στην Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου. Οι Σταθμοί αυτοί τροφοδοτούν όλη την Κύπρο με ηλεκτρική ενέργεια, εξαιρουμένων των περιοχών που βρίσκονται υπό τον έλεγχο των Τουρκικών δυνάμεων κατοχής. Στον Πίνακα 1.1[2] παρουσιάζεται η συνολική ικανότητα Παραγωγής

Πίνακας 1.1

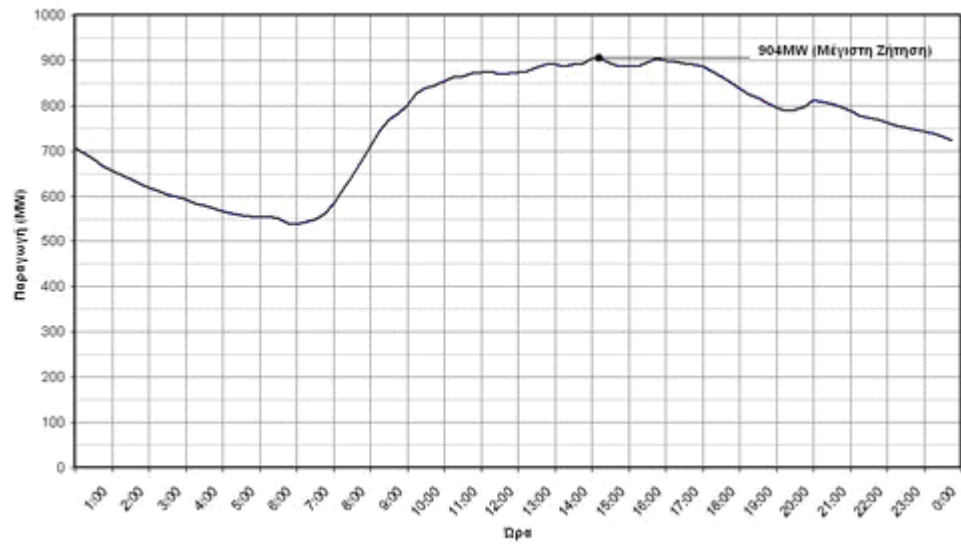
Ηλεκτροπαραγωγικός Σταθμός	Ατμοστρόβιλοι	Αεριοστρόβιλοι	Ολική Ονομαστική Ικανότητα Παραγωγής
Μονής	$6 \times 30 = 180 \text{ MW}$	$4 \times 37,5 = 150 \text{ MW}$	330 MW
Δεκέλειας	$6 \times 60 = 360 \text{ MW}$	-	360 MW
Βασιλικού	$3 \times 130 = 390 \text{ MW}$	37,5 MW	427,5 MW
ΣΥΝΟΛΟ	930 MW	187,5 MW	1.117,5 MW

Υφιστάμενο Σύστημα

Σταθμός Δεκέλειας: Ο Σταθμός Δεκέλειας αποτελείται από έξι (6) πετρελαϊκές μονάδες των 60 MW η κάθε μία με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ.

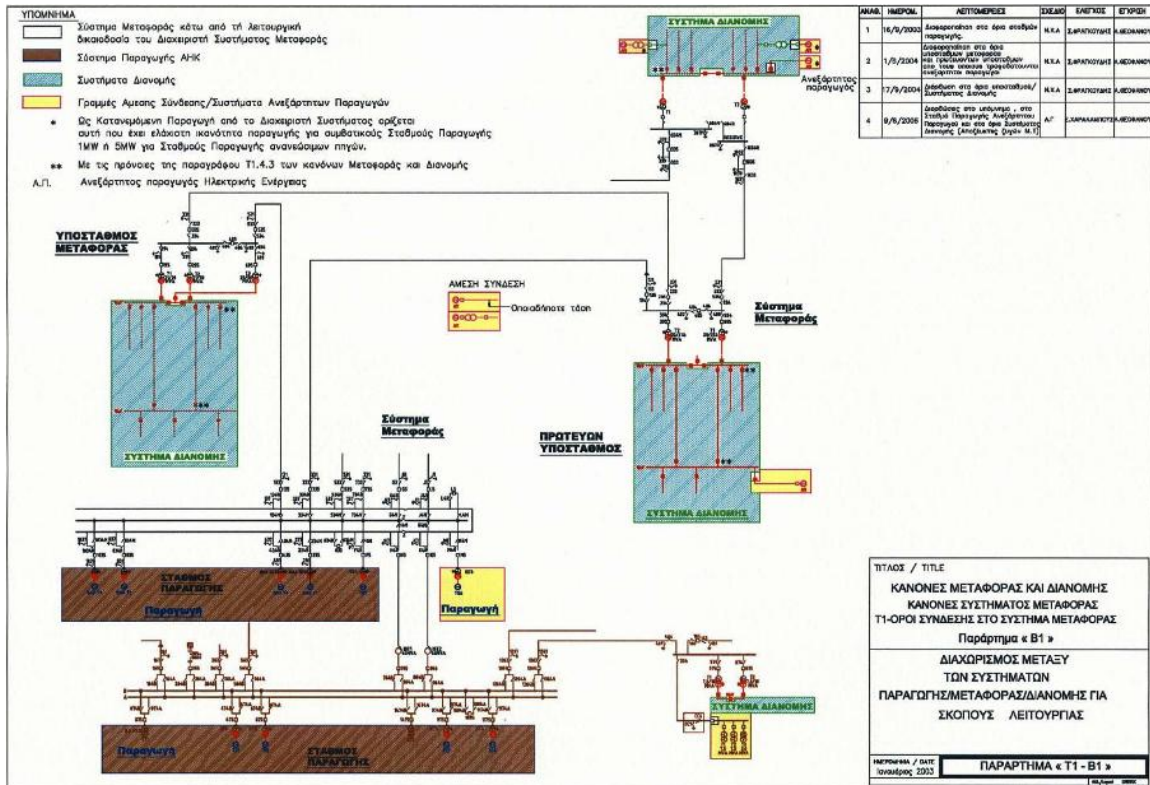
Σταθμός Μονής: Ο Σταθμός αυτός αποτελείται από (6) πετρελαϊκές μονάδες των 30 MW η κάθε μία με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ και από τέσσερις (4) αεριοστρόβιλους των 37,5 MW με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το ντίζελ.

Σταθμός Βασιλικού: Ο Σταθμός αυτός αποτελείται από (3) ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής ισχύος 130 MW η κάθε μία με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το μαζούτ και ένα αεριοστρόβιλο ισχύος 38 MW με χρησιμοποιούμενο καύσιμο το ντίζελ.



Εικόνα 1.4|2|: Διακύμανση Συνολικής Παραγωγής στις 22/08/06

1.3 Σύστημα Μεταφοράς



Εικόνα 1.5[2]: Σύστημα Μεταφοράς

Η Ηλεκτρική Ενέργεια που παράγεται από τους τρεις Ηλεκτροπαραγωγούς Σταθμούς της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου μεταφέρεται μέσω του δικτύου Μεταφοράς υψηλής τάσης σε Υποσταθμούς Μεταφοράς κοντά στα αστικά και βιομηχανικά ή άλλα κέντρα ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σύστημα Μεταφοράς στην Κύπρο αποτελείται από γραμμές 66 kV και 132kV. Επίσης υπάρχουν γραμμές με κατασκευή 132 kV που λειτουργούν σε 66 kV και ένα μικρό κομμάτι κατασκευής 220 kV γραμμής που λειτουργεί σαν 132 kV. Στους πίνακες 1.2-4 [1] παρατίθενται αναλυτικά τα στοιχεία για τις εναέριες γραμμές, τα υπόγεια καλώδια και τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπως αυτά ίσχυαν μέχρι το τέλος του 2004.

Πίνακας 1.2: Εναέριες Γραμμές

Περιγραφή	66 kV	132 kV	132 kV (Λειτουργία 66 kV)	220 kV (Λειτουργία 132 kV)
Μήκος Πορείας (km)	324,58	358,32	124,73	1,4
Μήκος Δικτύου (km)	324,58	711,62	230,37	2,8

Πίνακας 1.3: Υπόγεια Καλώδια

Περιγραφή	66 kV	132 kV	132 kV (Λειτουργία 66 kV)
Μήκος Πορείας km)	1,68	50,34	3,71
Μήκος Δικτύου (km)	1,68	76,42	3,71

Πίνακας 1.4: Υποσταθμοί Μεταφοράς

Περιγραφή	Αρ.	MVA
Ολικός Αριθμός Υποσταθμών Μεταφοράς	46	
Μετασχηματιστές 132/11 kV	56	1 744
Μετασχηματιστές 66/11 kV	66	622,5
Μετασχηματιστές 132/66 kV	12	585

1.4 Σύστημα Διανομής

Από τους υποσταθμούς μεταφοράς η υψηλή τάση μετατρέπεται σε μέση τάση 11kV η οποία με εναέρια και υπόγεια όδευση καταλήγει σε Υποσταθμούς Διανομής, οι οποίοι μέσω των μετασχηματιστών του δικτύου, υποβιβάζουν την τάση σε 415/240V,50Hz για την τροφοδότηση των καταναλωτών Χαμηλής Τάσης, οι οποίοι αποτελούν τη μεγάλη πλειονότητα των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας. Στους Πίνακες 1.5-6 [1] παρατίθενται αναλυτικά τα στοιχεία για τις γραμμές του Δίκτυου Διανομής και των μετασχηματιστών των Υποσταθμών Διανομής όπως αυτά ίσχυαν μέχρι το τέλος του 2004.

Πίνακας 1.5: Δίκτυο Διανομής

Περιγραφή	11 kV	415/240V
Εναέριες Γραμμές (km)	4 829,4	7 971,5
Υπόγεια Καλώδια (km)	2 167,7	1 888,2

Πίνακας 1.6: Υποσταθμοί Διανομής 11 kV/415V

Περιγραφή	Αρ.	MVA
Επίγειοι Μετασχηματιστές	3 702	1 917,11
Μετασχηματιστές επί πασσάλων	7 537	663,8

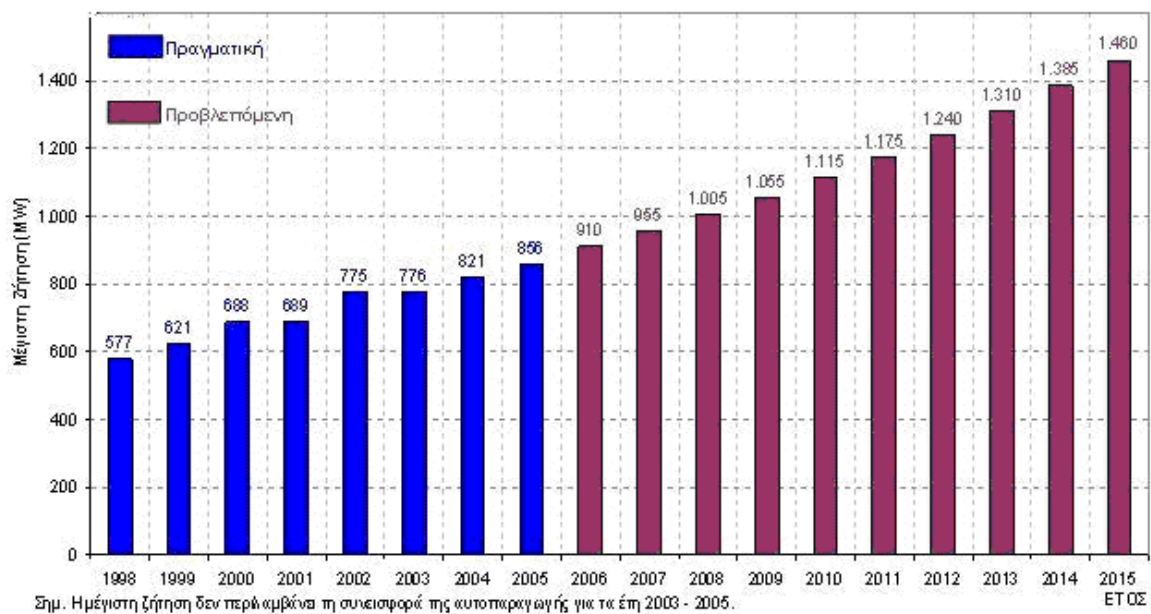
1.5 Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας

Το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο για την απρόσκοπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές. Ο Διαχειριστής του Συστήματος, Μεταφοράς μέσω Τηλετεματικών Μονάδων λαμβάνει συνεχώς δεδομένα για την κατάσταση του κάθε Ηλεκτροπαραγωγού Σταθμού και Υποσταθμού Μεταφοράς που αποτελούν το Σύστημα Παραγωγής και Μεταφοράς. Στην συνέχεια, αυτά τα δεδομένα μετατρέπονται από το λογισμικό εφαρμογών σε χρήσιμες πληροφορίες για τον ΔΣΜ, ο οποίος προβαίνει στις απαιτούμενες ενέργειες τόσο για την αξιοποίηση και το προγραμματισμό της λειτουργίας του συστήματος, όσο και για σκοπούς μελετών ανάπτυξης του συστήματος.

Μέρος αυτών των ενεργειών είναι η λήψη όλων των μέτρων που απαιτούνται, ώστε να διασφαλίζεται αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και διατήρηση της συχνότητας και των τάσεων σε όλα τα σημεία του συστήματος. Ακόμα, συντονίζει όλες τις λειτουργικές δραστηριότητες του συστήματος, ώστε να επιτυγχάνονται διαφοροποιήσεις στις διασυνδέσεις του εξοπλισμού με ασφάλεια και ταχύτητα. Επίσης, συντονίζει όλες τις απαιτούμενες ενέργειες για την άμεση αποκατάσταση της παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, μετά από έκτακτα περιστατικά ή διαταραχές στο σύστημα.

Μέρος των δεδομένων που λαμβάνει ο ΔΣΜ είναι και η συστηματική πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος (εικ.1.6). Με βάση αυτή την πρόβλεψη ο ΔΣΜ υπολογίζει την Διαθέσιμη Ημερήσια Παραγωγή και εισηγείται το βέλτιστο σχεδιασμό για τον αριθμό των μονάδων παραγωγής που θα πρέπει να διασυνδεθούν στο σύστημα, για να καλύψουν τη ζήτηση. Ο σχεδιασμός αυτός γίνεται πάντα σε συνδυασμό με το επίπεδο ενέργειας που πρέπει να παράγει η κάθε μονάδα, ώστε να ελαχιστοποιείται η κατανάλωση καυσίμου και τα λοιπά λειτουργικά κόστη και συνεπώς το κόστος παραγωγής.

Εικόνα 1.6[2]: Μακροπρόθεσμη πρόβλεψη για τη ζήτηση φορτίου

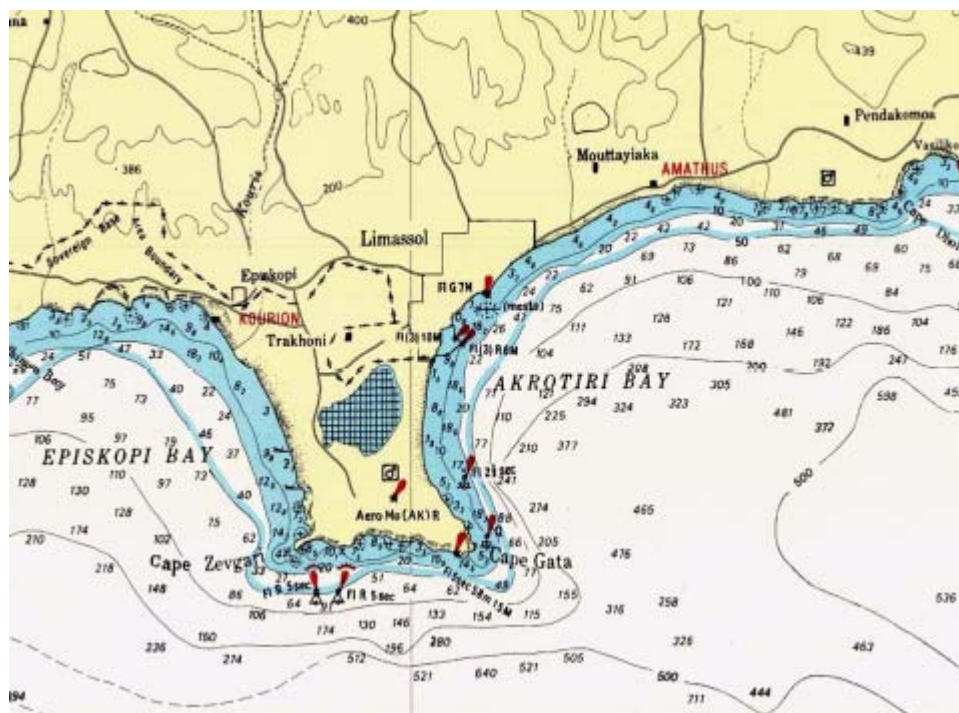


1.6 Αιολική Παραγωγή

Στο πλαίσιο των στόχων και δεσμεύσεων της Κυπριακής Δημοκρατίας έναντι της ΕΕ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ίση με 6% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το 2010, έχει θεσπιστεί νομοθεσία για ενθάρρυνση της χρήσης των ΑΠΕ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η νομοθεσία αυτή προνοεί χορηγίες ύψους μέχρι και 30%, σε επενδύσεις που σχετίζονται με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σε ότι αφορά την αιολική παραγωγή, έχουν γίνει εκτεταμένες μελέτες για το αιολικό δυναμικό του νησιού και τις περιοχές στις οποίες μπορούν να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα. Τα αιολικά δυναμικά όπως προκύπτει από αυτές τις μελέτες είναι 150 με 250 MW, ενώ εκτιμάται ότι με μέση ταχύτητα ανέμου 5.8 m/s ένα αιολικό πάρκο είναι οικονομικά βιώσιμο.

Μέχρι το 2010, υπάρχει πρόνοια για την δημιουργία αιολικών πάρκων ισχύος 120-150 MW, τα οποία ενδεικτικά εκτιμάται ότι θα παράγουν ένα ποσοστό κοντά στο 5% της συνολικής καταναλισκόμενη ενέργειας του νησιού. Αναμένεται επίσης η δημιουργία μικρών, μη εμπορικών, αιολικών συστημάτων με μέγιστη ικανότητα παραγωγής 30 KW. Τα συστήματα αυτά θα είναι είτε αυτόνομα, είτε συνδεδεμένα με το δίκτυο της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου οπότε και θα έχουν τη δυνατότητα της πώλησης του περισσεύματος της παραγόμενης τους ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1.7[3]:Χάρτης αιολικού δυναμικού παραθαλάσσια περιοχής Λεμεσού

2. Στρεφόμενη Εφεδρεία ΣΗΕ

2.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται και καταναλώνεται σε “τρέχοντα” χρόνο καθώς δεν υπάρχει κάποιο είδος αποθήκευσης της, για χρήση στο μέλλον. Για να διατηρείται η αξιοπιστία του συστήματος λοιπόν, θα πρέπει να διατηρείται μία διαρκής και σταθερή ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, παρά τον σωστό προγραμματισμό, πολλές φορές παρατηρείται αδυναμία για την κάλυψη του φορτίου είτε λόγω διακοπής της λειτουργίας μίας μονάδας που είναι διασυνδεδεμένη στο δίκτυο, είτε λόγω βλάβης σε κάποιο σημείο του δικτύου μεταφοράς, είτε λόγω αυξημένου φορτίου.

Ένας τρόπος για να εξασφαλίσουμε αυτή την ενεργειακή ισορροπία είναι να διατηρούμε την ισχύ που μπορούν να παράγουν οι γεννήτριες σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά της κατανάλωσης, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε διαταραχή που απειλεί την ευστάθεια του. Αυτή η επιπρόσθετη ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν οι γεννήτριες ονομάζεται λειτουργική εφεδρεία.

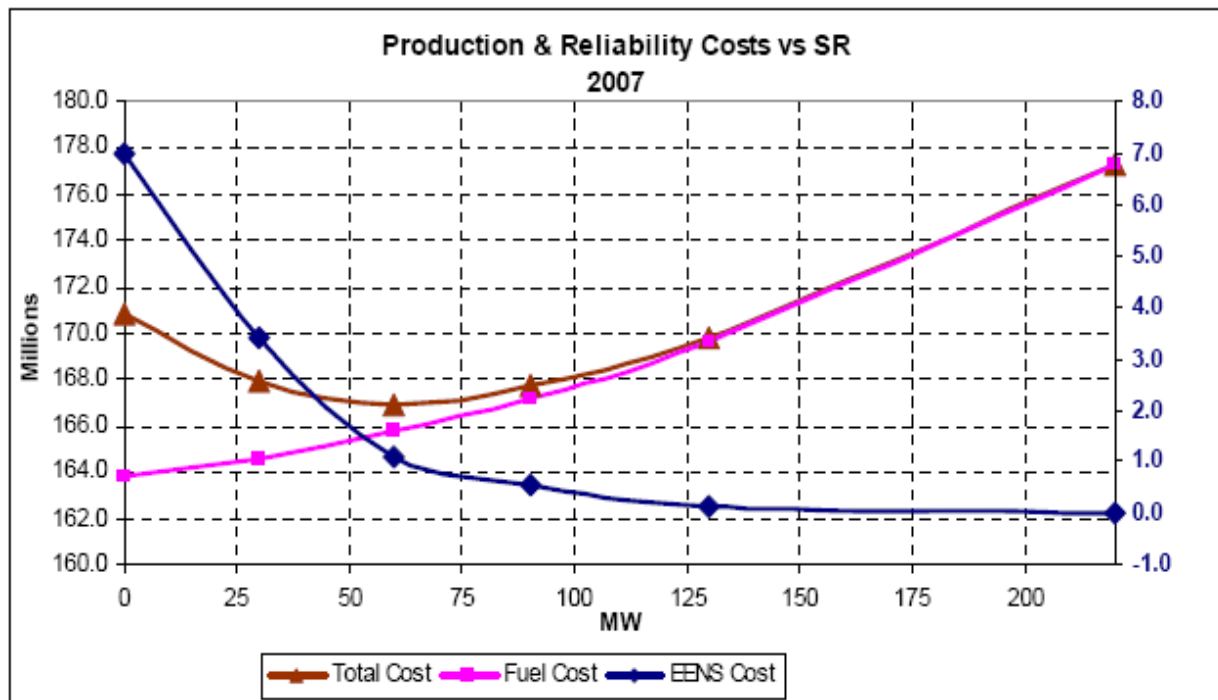
Το μέγεθος της απαιτούμενης εφεδρείας που θα πρέπει να διατηρεί το σύστημα χρήζει αντικείμενο πολλών μελετών. Κάποιες από αυτές υπολογίζουν την εφεδρεία, είτε με τυχαία και αιτιατά κριτήρια, είτε με προσομοιώσεις του φορτίου [5], είτε μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων [6], είτε με οικονομικά κριτήρια[7]. Οι διάφορες αυτές μελέτες αποτελούν υποβοηθητικά εργαλεία, αφού η τελική απόφαση για το ποσό της εφεδρείας που πρέπει να κρατηθεί εξαρτάται από την κρίση του Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς αφού θα πρέπει να συνυπολογίσει τον κίνδυνο απωλειών. Συνήθως, η απόφαση αυτή σχετίζεται με την αξιοπιστία του συστήματος και το κόστος με το οποίο επιβαρύνεται το σύστημα για να κρατήσει αυτή την επιπλέον εφεδρεία.

Ο κίνδυνος απωλειών φορτίου λόγω της ανεπαρκούς παραγωγής μπορεί να μειωθεί διατηρώντας μεγαλύτερο αριθμό γεννητριών διασυνδεδεμένων με το σύστημα αυξάνοντας έτσι τη παραγωγή της λειτουργικής εφεδρείας. Ωστόσο, ταυτόχρονα αυξάνεται και το λειτουργικό κόστος και μία υπερεκτίμηση για το μέγεθος της εφεδρείας, θα επιδράσει αρνητικά στο λογαριασμό του καταναλωτή. Αντίθετα, μία

υποτίμηση του μεγέθους της εφεδρείας που πρέπει να διατηρηθεί θα οδηγήσει το δίκτυο σε προβλήματα ευστάθειας και ασφάλειας. Συνεπώς, ένας οικονομικός και αποδοτικός προσδιορισμός για την κατανομή της εφεδρείας θα πρέπει να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα που επιφέρει η αύξηση της εφεδρείας στην αξιοπιστία του συστήματος με το μειονέκτημα του υψηλότερου λειτουργικού κόστους.

Στο Διάγραμμα 2.1 και τον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μία μελέτη που έγινε από την εταιρία ABB Inc και αφορά το ηλεκτρικό δίκτυο της Κύπρου[8]. Στην μελέτη αυτή προσομοιώνεται το ηλεκτρικό σύστημα της Κύπρου και υπολογίζεται το αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας για διάφορες τιμές της εφεδρείας. Παρατηρείται ότι το 2007 (Διάγραμμα 2.1) το αποδοτικότερο σημείο λειτουργίας βρίσκεται για λειτουργική εφεδρεία λίγο μεγαλύτερη των 50MW, ενώ το 2015 (Πίνακα2.1) για λειτουργική εφεδρεία ίση με 90MW.

Διάγραμμα 2.1



Fuel, ENS and Total costs vs. Spinning Reserves for 2007

Πίνακας 2.1

					2015 - Total Cost million Cy£			
Spin MW	Load GWh	ENS MWh	Fuel Cost million Cy£	Cost Cy£/MWh	ENS @ 1 Cy£/KWh	ENS @ 1.5 Cy£/KWh	ENS @ 3 Cy£/KWh	ENS @ 5 Cy£/KWh
0	7,859	3,929	109.108	13.883	113.037	115.002	120.895	128.753
30	7,859	1,255	110.731	14.090	111.986	112.613	114.495	117.005
60	7,859	415	111.208	14.150	111.623	111.830	112.452	113.282
90	7,859	64	111.503	14.188	111.567	111.599	111.694	111.822
130	7,859	1	111.929	14.242	111.930	111.931	111.933	111.935
220	7,859	0	114.531	14.573	114.531	114.531	114.531	114.531

Results for year 2015

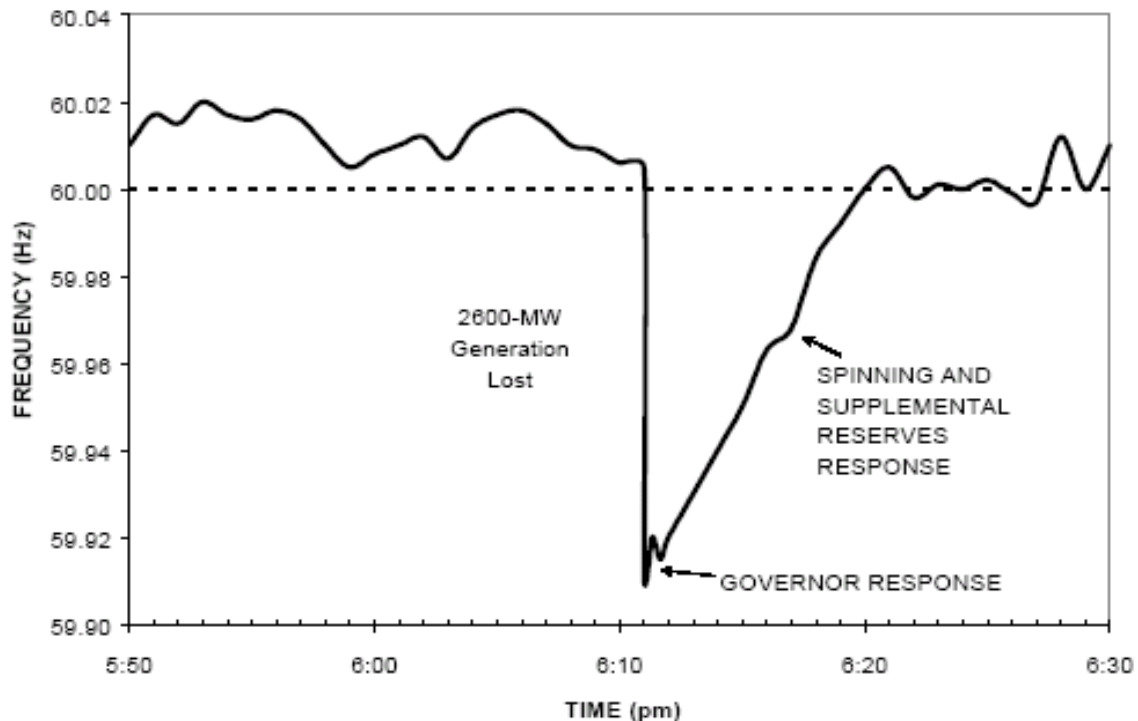
Σε περίπτωση που η διαταραχή του συστήματος διαρκέσει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, τότε η ευστάθεια και η ισορροπία εξαρτώνται από την ικανότητα παραγωγής των γεννητριών που είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο, και κατά πόσο είναι αυτή επαρκής, ώστε να μπορεί να καλύψει τόσο την προβλεπόμενη ζήτηση του φορτίου, όσο και την απαιτούμενη λειτουργική εφεδρεία.

Αν αυτό δεν καταστεί δυνατό, τότε θα έχουμε σοβαρές επιπτώσεις για τη τάση και τη συχνότητα του συστήματος η οποία και θα αποκλίνει από τα επιτρεπτά όρια. Το ηλεκτρικό δίκτυο των Ηνωμένων Πολιτειών αξιώνει την διατήρηση της συχνότητας στα 60 Hz, ενώ τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που ανήκουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση αξιώνουν την διατήρηση της συχνότητας στα 50 Hz με ένα περιθώριο ανεκτικότητας ± 0.5 Hz. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ΔΣΜ αξιώνουν ακόμα μικρότερα περιθώρια ανεκτικότητας όπως π.χ. στην Ιρλανδία όπου η συχνότητα θα πρέπει να κυμαίνεται από 49.8Hz έως 50.2Hz [9].

Σε περίπτωση λοιπόν που η λειτουργική εφεδρεία δεν επαρκεί για να καλύψει το φορτίο, θα έχουμε μείωση της συχνότητας κάτω από τα επιθυμητά επίπεδα και ο διαχειριστής του συστήματος θα πρέπει να προχωρήσει είτε στην αύξηση της παραγωγής (αύξηση εφεδρείας), είτε στην αποκοπή φορτίου. Αυτή η επιπλέον εφεδρεία ονομάζεται **Πρωτεύουσα Εφεδρεία (Primary Reserve)** και είναι απαραίτητη για να αντεπεξέλθει το σύστημα στην διακύμανση της συχνότητας μετά από μία διαταραχή. Η εφεδρεία αυτή παρέχεται ως **Στρεφόμενη Εφεδρεία (Spinning Reserve)** από μονάδες που είναι ήδη

ενταγμένες στο σύστημα ή ως Γρήγορη Εφεδρεία (Fast Response) από μονάδες που δεν είναι ενταγμένες στο σύστημα, αλλά έχουν την δυνατότητα να εκκινήσουν σε μικρό χρονικό διάστημα και να παρέχουν εφεδρεία (ψυχρές μονάδες γρήγορης εκκίνησης - cold fast start-up units). Στη περίπτωση που έχουμε μεγαλύτερη παραγωγή από τη ζήτηση οδηγούμαστε σε αύξηση της συχνότητας και ο Διαχειριστής θα πρέπει είτε να μειώσει την παραγωγή των γεννητριών, είτε να αυξήσει το φορτίο. Στο Διάγραμμα 2.2[10] απεικονίζεται η αντίδραση του ΔΣΜ ενός συστήματος ηλεκτρικής ενεργείας των ΗΠΑ σε μία διαταραχή της συχνότητας όταν αποσυνδέεται μία κύρια γεννήτρια από το σύστημα.

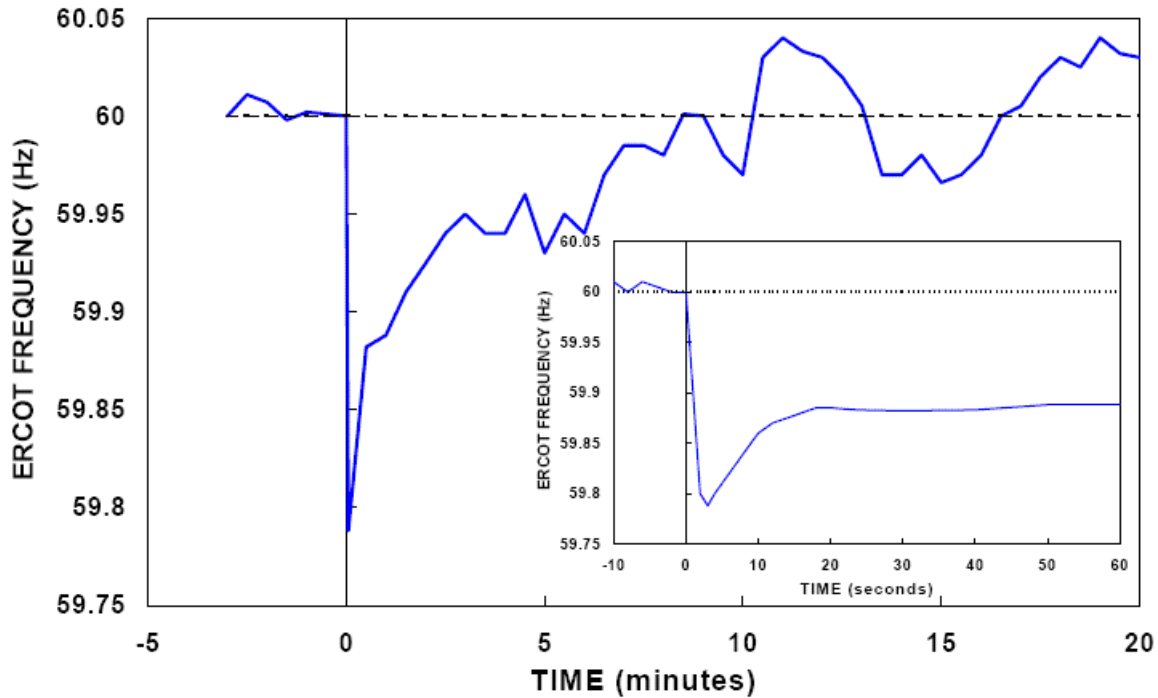
Διάγραμμα 2.2



Governor response and contingency reserves successfully restored the generation/load balance after the loss of 2600 MW of generation.

Στο Διάγραμμα 2.3[11] απεικονίζεται μία ακόμη περίπτωση. Παρατηρούμε ότι ενώ έχουμε απώλεια μίας μικρότερης γεννήτριας (653MW αντί 2600MW), ο χρόνος επαναφοράς της συχνότητας είναι κατά πολύ μεγαλύτερος. Αυτό συμβαίνει επειδή η ΠΕ δεν ήταν επαρκής για να αποτρέψει τη βύθιση της τάσης.

Διάγραμμα 2.3



Interconnection frequency before and after the loss of a 653-MW generator. The inset shows frequency for the first minute after the outage, and the larger figure shows frequency for the first 20 minutes after the outage.

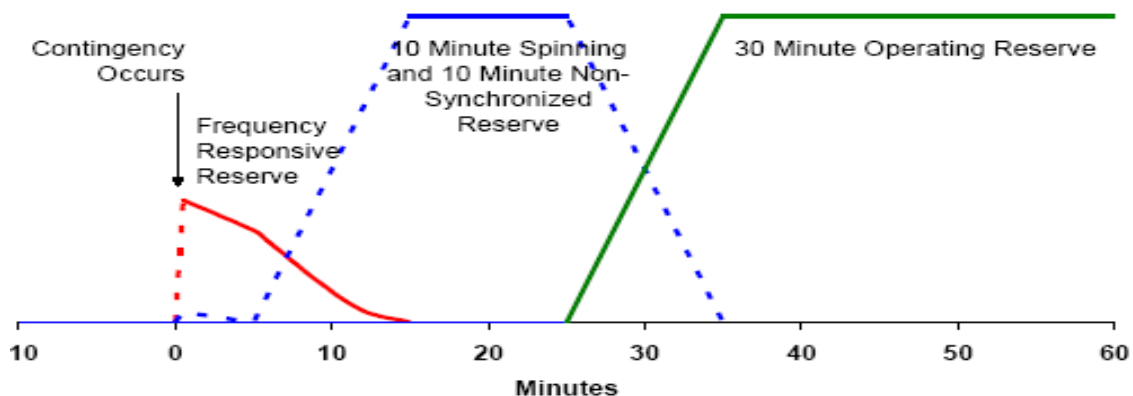
Οι επιπτώσεις από την ασταθή διακύμανση της συχνότητας είναι πολύ δυσμενείς και μπορεί να οδηγήσουν σε κατάρρευση ολόκληρου του συστήματος. Τα ηλεκτρικά δίκτυα είναι σχεδιασμένα για να λειτουργούν υπό συγκεκριμένες ποιοτικές προδιαγραφές που αφορούν την συχνότητα και την τάση. Ορισμένες παραγωγικές διαδικασίες του συστήματος είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στην μεταβολή είτε της συχνότητας, είτε της τάσης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην καταστροφή του εξοπλισμού τους. Για την αποφυγή δυσάρεστων περιστατικών, τοποθετούνται προστατευτικοί μηχανισμοί στο σύστημα (εγκαταστάσεις καταναλωτών, δίκτυο διανομής, δίκτυο μεταφοράς, σταθμούς παραγωγής), οι οποίοι ελέγχουν τα επίπεδα της συχνότητας και όταν αυτή ξεφύγει από τα επιθυμητά όρια αποσυνδέουν το φορτίο και τις γεννήτριες για να μη καταρρεύσει το ηλεκτρικό δίκτυο.

2.2 Τύποι Λειτουργικής Εφεδρείας

Οι δραματικές μεταβολές της συχνότητας μπορούν να αποφευχθούν μέσω της Λειτουργικής Εφεδρείας, η οποία δύναται να περιορίσει την απόκλιση της συχνότητας και της τάσης από τα επιθυμητά όρια. Οι λόγοι της μεταβολής της συχνότητας ποικίλουν και μπορεί να προέρχονται από μία λανθασμένη εκτίμηση για το φορτίο το οποίο πρέπει να καλυφθεί, έως την αποσύνδεση μίας γεννήτριας λόγω βλάβης ή από κάποιο άλλο σφάλμα σε κάποιο μέρος του δικτύου. Συνεπώς, η απαιτούμενη ποσότητα που χρειάζεται το σύστημα εξαρτάται από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται με το είδος του σφάλματος που προκάλεσε την διαταραχή στο σύστημα καθώς και το χρονοδιάγραμμα μέσα στο οποίο καλείται η εφεδρεία να ενεργήσει. Για το λόγο αυτό, η απαιτούμενη ποσότητα Λειτουργικής Εφεδρείας που θα πρέπει να χορηγηθεί από το σύστημα θα πρέπει να διακριθεί σε χρονικά διαστήματα ανάλογα με το μέγεθος της διαταραχής.

Τα χρονικά διαστήματα διαφέρουν ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρικό δίκτυο των ΗΠΑ, με πολύ μεγάλες μονάδες παραγωγής και που είναι διασυνδεδεμένο με άλλα γειτονικά ηλεκτρικά δίκτυα, θα είναι λιγότερο ευαίσθητο σε μια διαταραχή της συχνότητας από το δίκτυο ενός μικρού νησιού όπως η Κύπρος, που είναι απομονωμένο και με πολύ μικρότερες μονάδες. Πιο κάτω, παρατίθεται το Διάγραμμα 2.4[10] που παρουσιάζει την διακύμανση της τιμής της συχνότητας σε σχέση με το χρόνο και τα αντίστοιχα τμήματα της Λειτουργικής Εφεδρείας που επενεργούν για την κάθε περίπτωση για ένα ηλεκτρικό δίκτυο των ΗΠΑ.

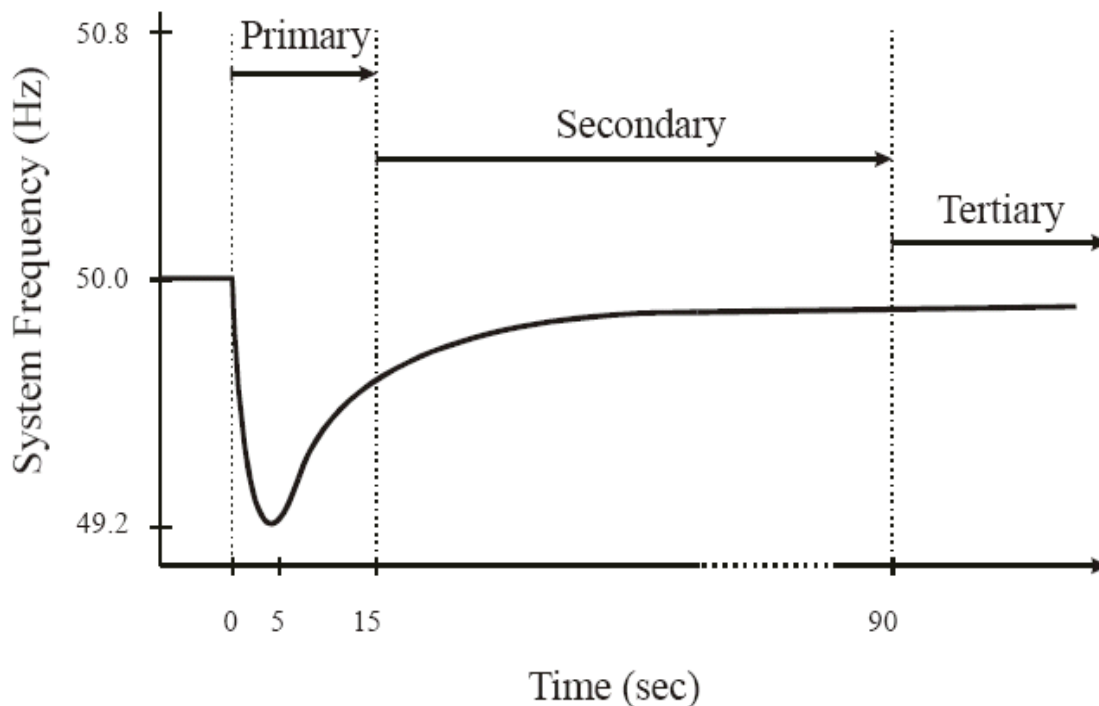
Διάγραμμα 2.4



Contingency reserves provide a coordinated response to a sudden loss of supply.

Στο Διάγραμμα 2.5 [12] παρουσιάζεται ένα αντίστοιχο διάγραμμα για το ηλεκτρικό δίκτυο της Ιρλανδίας. Το σύστημα της Ιρλανδίας παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με αυτό της Κύπρου (μεγάλο νησί, μικρό δίκτυο, μικρή εγκατεστημένη ισχύς). Για αυτό το λόγο, στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν οι ορολογίες που αφορούν αυτό το σύστημα.

Διάγραμμα 2.5



Το πρώτο στάδιο είναι ένα χρονικό διάστημα 15s και είναι αυτό που ακολουθεί την διαταραχή της συχνότητας – Πρωτεύουσα Εφεδρεία (**Primary Operating Reserve**), ενώ το δεύτερο διάστημα αφορά την μεταβατική περίοδο που μπορεί να διαρκέσει έως και 90s – Δευτερεύουσα Εφεδρεία (**Secondary Operating Reserve**). Σε περίπτωση που έχουμε μεγάλη βλάβη στο σύστημα (απώλεια μίας κύριας γεννήτριας) τότε η Λειτουργική Εφεδρεία θα πρέπει να λειτουργήσει και για διάστημα μεγαλύτερο των 90s – Τριτεύουσα Εφεδρεία (**Tertiary Operating Reserve**).

Πρωτεύουσα Λειτουργική Εφεδρεία (0-15s)

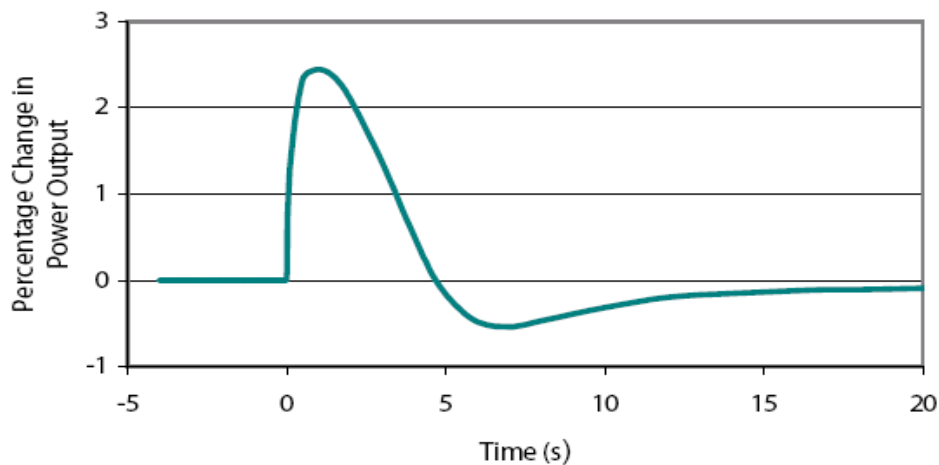
Η ΠΛΕ είναι η πιο κρίσιμη μορφή ΛΕ που παρέχεται για την ασφάλεια του συστήματος καθώς επενεργεί για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα αμέσως μετά την διαταραχή της συχνότητας. Στο Ηνωμένο Βασίλειο η ΠΛΕ ονομάζεται και ως υπηρεσίες ελέγχου συχνότητας (frequency control services), ενώ στις ΗΠΑ ως υπηρεσίες απρόοπτων περιστατικών (contingency services). Η πρωτεύουσα εφεδρεία διακρίνεται σε δύο μορφές:

- Αδρανειακή Αντίδραση (Inertial response) – η έμφυτη αντίδραση σε οποιαδήποτε διαταραχή της συχνότητας των γεννητριών που είναι διασυνδεδεμένες με το δίκτυο.
- Γρήγορη Αντίδραση (Fast Response) – αυτόματη αύξηση της παραγωγής των μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία,

Αδρανειακή Αντίδραση

Η διαταραχή της συχνότητας του συστήματος έχει ως συνεπακόλουθο την αλλαγή της συχνότητας των γεννητριών, που με τη σειρά της προκαλεί μεταβολή στην κινητική ενέργεια τους ενέργεια. Η ενέργεια που αποδίδεται ή απορροφάται από το σύστημα και σχετίζεται με αυτή την μεταβολή της κινητικής ενέργειας ονομάζεται Αδρανειακή Αντίδραση και οφείλεται στην έμφυτη αντίδραση των σύγχρονων γεννητριών στην αλλαγή της συχνότητας του συστήματος. Στο διάγραμμα 2.6[12] απεικονίζεται η αδρανειακή αντίδραση μίας θερμικής μονάδας παραγωγής σε μία απότομη πτώση της συχνότητας του συστήματος μετά την απώλεια μίας γεννήτριας.

Διάγραμμα 2.6



Γρήγορη Αντίδραση

Η Γρήγορη Αντίδραση συνήθως παρέχεται από έναν αυτοματοποιημένο χειρισμό ελέγχου, ο οποίος αυξάνει τα επίπεδα παραγωγής των συμβατικών γεννητριών, προκειμένου να αποτρέψει την περαιτέρω πτώση της συχνότητας. Επίσης, σε περίπτωση που η τιμή της συχνότητας φθάσει σε κρίσιμα επίπεδα, η ΓΑ μπορεί να παρέχεται με την μεγιστοποίηση της παραγωγής των γεννητριών που παράγουν μικρότερη ισχύ από τη μέγιστη δυνατή και είναι ήδη συνδεδεμένες με το σύστημα. Η εφεδρεία αυτή ανήκει στην κατηγορία της στρεφόμενης εφεδρείας (spinning reserve). Σε εξαιρετικά δυσάρεστα συμβάντα, ο ΔΣΜ μπορεί να προχωρήσει σε αποκοπή φορτίου για να επαναφέρει την συχνότητα.

Στην περίπτωση των ατμοηλεκτρικών μονάδων, η γρήγορη αντίδραση παρέχεται απελευθερώνοντας την λανθάνουσα ενέργεια που είναι αποθηκευμένη υπό μορφή ατμού στον λέβητα. Ωστόσο, αυτή η αυξημένη παραγωγή διατηρείται για μικρά χρονικά διαστήματα, αφού από ένα σημείο και μετά η πίεση του ατμού μειώνεται. Η διάρκεια αυτών των χρονικών διαστημάτων εξαρτάται από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται, κατασκευαστικές προδιαγραφές κ.α.

Δευτερεύουσα Λειτουργική Εφεδρεία (15-90s)

Η Δευτερεύουσα Εφεδρεία λειτουργεί για ένα διάστημα που ξεκινά από τα 15 δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή και μπορεί να φθάσει μέχρι τα 90s. Ο ρόλος της δευτερεύουσας εφεδρείας είναι να επαναφέρει την συχνότητα του συστήματος στα 50Hz. Αυτή η εφεδρεία σχεδιάζεται από τον ΔΣΜ και συνήθως, όπως και στη περίπτωση της Πρωτεύουσας Λειτουργικής Εφεδρείας, εξασφαλίζεται από την μεγιστοποίηση σε σύντομο χρονικό διάστημα της παραγωγής γεννητριών που είναι ήδη ενταγμένες στο σύστημα, αλλά λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα παραγωγής.

Τριτεύουσα Λειτουργική Εφεδρεία (>90s)

Κατά τη διάρκεια ενός πολύ σοβαρού περιστατικού, ο ρόλος της Τριτεύουσας Εφεδρείας είναι να αντικαταστήσει την παραγωγή από την απώλεια μίας κύριας γεννήτριας ή την ανταπόκριση στην απότομη αύξηση του φορτίου για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα των 90 δευτερολέπτων αμέσως μετά την διαταραχή. Η εφεδρεία

αυτή διαρκεί μέχρι το φορτίο να επανέλθει στα προβλεπόμενα επίπεδα ή να τεθούν σε λειτουργία μονάδες που είναι προγραμματισμένες να ενταχθούν στο σύστημα, αλλά χρειάζονται κάποιο χρόνο για να ξεκινήσουν (ψυχρές μονάδες αργής εκκίνησης - cold slow start-up units). Ο χρόνος αυτός κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως λίγες ώρες. Οι συγκεκριμένες μονάδες παρέχουν την Ενδιάμεση Εφεδρεία (Midterm Reserve).

Σύμφωνα με το κώδικα του ESBNG's [9] η Τριτεύουσα Εφεδρεία, ανάλογα με το χρονικό εύρος που διαρκεί διακρίνεται σε 4 μορφές

- Ζώνη 1 Τριτοβάθμιας Λειτουργικής Εφεδρείας (Band 1 Tertiary Operating Reserve)
– από 90 δευτερόλεπτα έως 5 λεπτά.
- Ζώνη 2 Τριτοβάθμιας Λειτουργικής Εφεδρείας (Band 2 Tertiary Operating Reserve)
– από 5 λεπτά έως 20 λεπτά.
- Εφεδρεία Αντικατάστασης (Replacement Reserve)
- από 10 λεπτά έως 4 ώρες
- Απρόοπτη Εφεδρεία (Contingency Reserve)
– για εφεδρεία που πρέπει να λειτουργήσει μέχρι και 24 ώρες μετά τη διαταραχή.

Συνήθως, η Τριτεύουσα Εφεδρεία παρέχεται από τις μονάδες που δεν λαμβάνουν μέρος στον αρχικό σχεδιασμό του συστήματος και μπορούν να ξεκινήσουν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Μονάδες όπως οι αεριοστρόβιλοι και οι υδροηλεκτρικές μονάδες έχουν αυτή την δυνατότητα και ονομάζονται ψυχρές μονάδες γρήγορης εκκίνησης. Το είδος αυτής της εφεδρείας ανήκει στην κατηγορία της Έτοιμης Εφεδρείας (Ready Reserve), η οποία είναι πολύ σημαντική για την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Στην Κύπρο λόγω του μικρού μεγέθους του ηλεκτρικού δικτύου, αυτές οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για εξασφάλιση της Δευτερεύουσας Εφεδρείας.

Σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, όπου σε καθημερινή βάση ο ΔΣΜ σχεδιάζει τον προγραμματισμό των μονάδων που θα ενταχθούν στο σύστημα, ο ρόλος της Τριτεύουσας Εφεδρείας είναι πολύ σημαντικός. Η ΤΕ συνεισφέρει στο σύστημα και βοηθά ώστε η παραγωγή να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά και για να καλύψει το μέγιστο φορτίο σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μίας γεννήτριας που είναι διασυνδεδεμένη με το δίκτυο λόγω βλάβης.

2.3 Επίδραση της Αιολικής Παραγωγής στην Εφεδρεία του συστήματος

Μέχρι το 2010, στο ηλεκτρικό σύστημα της Κύπρου, το 5% της συνολικής καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να παράγεται από τα Αιολικά Πάρκα [3]. Είναι πιθανό, η εισαγωγή του αιολικού δυναμικού στο σύστημα της Κύπρου να οδηγήσει στην ανάγκη για αύξηση της Λειτουργικής Εφεδρείας, λόγω της αβεβαιότητας που επιφέρει η μεταβλητότητα του ανέμου, αλλά και επειδή οι ανεμογεννήτριες θα αντικαταστήσουν μέρος της παραγωγής των συμβατικών γεννητριών.

Σε αντίθεση με μία συμβατική γεννήτρια, η αδρανειακή αντίδραση μίας Α/Γ που παράγει το ίδιο ποσό ενέργειας είναι ένας αστάθμητος παράγοντας, ο οποίος εξαρτάται από τα τεχνικά της χαρακτηριστικά. Σε περιόδους υψηλού ανέμου που έχουμε μεγαλύτερη αιολική διείσδυση, προκειμένου να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος, απαιτείται να κρατείται μεγαλύτερη ποσότητα Λειτουργικής Εφεδρείας για να αντισταθμίζεται η μικρότερη αδράνεια των γεννητριών. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο αυξάνεται ο αριθμός των Α/Γ που αντικαθιστούν τις συμβατικές γεννήτριες, τόσο μειώνεται ο αντίστοιχος αριθμός των γεννητριών που επωμίζονται το βάρος για την παραγωγή της ΛΕ

Παραδοσιακά, οι Ανεμογεννήτριες δεν παρέχουν εφεδρεία αφού συνήθως λειτουργούν υπό μέγιστη ισχύ για δεδομένη ταχύτητα του ανέμου καθώς σε αυτή τη περίπτωση το οριακό κόστος της αιολικής ενέργειας είναι πολύ μικρό. Έτσι, όταν γίνεται ο σχεδιασμός για την Λειτουργική Εφεδρεία δεν συνηθίζεται να συμπεριλαμβάνεται εφεδρεία που να προέρχεται από την αιολική παραγωγή, λόγω του αυξημένου ρίσκου που εμπεριέχει η τυχαία κατανομή του ανέμου. Καθώς λοιπόν η παραγόμενη ισχύς των Α/Γ είναι δύσκολο να προβλεφθεί, ο Διαχειριστής του Συστήματος θα πρέπει να διατηρεί επιπρόσθετη ποσότητα εφεδρείας, και άρα περισσότερες συμβατικές γεννήτριες διασυνδεδεμένες με το σύστημα, για να αντισταθμίσει τις απώλειες όταν η παραγωγή είναι χαμηλότερη από τα προβλεπόμενα όρια.

Αντίθετα, όταν έχουμε μεγαλύτερη αιολική παραγωγή από την αναμενόμενη, και με την προϋπόθεση ότι, για λόγους οικονομίας, αυτή απορροφάται από το σύστημα, τότε θα πρέπει να αποσυνδέσουμε γεννήτριες από το δίκτυο. Ωστόσο, για λόγους ασφαλείας θα πρέπει να διατηρούμε πάντα ένα συγκεκριμένο αριθμό συμβατικών γεννητριών στο

σύστημα, έστω και αν αυτές λειτουργούν στην ελάχιστη τιμή της παραγωγής τους, προκειμένου να διασφαλίζεται η αξιοπιστία του συστήματος. Στην περίπτωση λοιπόν, που στο σύστημα είναι διασυνδεδεμένος ο ελάχιστος αριθμός συμβατικών γεννητριών και έχουμε περαιτέρω αύξηση του ανέμου, τότε θα πρέπει να απορρίψουμε αιολική παραγωγή αποσυνδέοντας κάποιες από τις Α/Γ.

Επιπλέον, ένα ακόμη μειονέκτημα των Α/Γ είναι ότι κατά τη διάρκεια μίας ισχυρής διαταραχής της συχνότητας, είναι πιθανό να τις αποσυνδέσουμε από το σύστημα για να προστατέψουμε τον εξοπλισμό τους [13]. Αυτή η ιδιομορφία της αιολικής παραγωγής μπορεί να έχει πολύ αρνητικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία του συστήματος είναι ένας ακόμη λόγος που οδηγεί στην ανάγκη για αύξηση της λειτουργικής εφεδρείας.

Συμπερασματικά, καθώς αυξάνεται η αιολική διείσδυση στο σύστημα, αυξάνεται και η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής καθιστώντας το σύστημα ευάλωτο σε κάποια ισχυρή διαταραχή της συχνότητας. Θα πρέπει λοιπόν να θεσπιστούν κάποιοι κανόνες ως προς τον ελάχιστο αριθμό των συμβατικών γεννητριών που θα πρέπει να παραμένουν διασυνδεδεμένες με το δίκτυο, όπως επίσης και για το μέγεθος της απαιτούμενης εφεδρείας η οποία θα παρέχεται από αυτές, ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια και η ευστάθεια του συστήματος.

3. Βιβλιογραφική αναφορά σε μελέτες προσδιορισμού της εφεδρείας

3.1. Βέλτιστη κατανομή των υπηρεσιών πρωτογενούς εφεδρείας στην ενεργειακή αγορά [15]

3.1.1 Περιγραφή Μεθόδου

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος , ο οποίος λαμβάνοντας υπόψη του όρια ασφαλείας ως περιορισμούς, παρέχει μια βελτιστοποιημένη οικονομική εφαρμογή για τον υπολογισμό της παραγωγής, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος των υπηρεσιών της πρωτεύουσας εφεδρείας (Primary Reserve Services) και εξασφαλίζοντας την ασφαλή συμπεριφορά του συστήματος υπό τη παρουσία διαταραχών.

Ο αλγόριθμος λαμβάνει επίσης υπόψη του περιορισμούς ασφάλειας, οι οποίοι εξάγονται μέσω της μεθόδου των Δέντρων Απόφασης (ΔΑ) για τις εκάστοτε διαταραχές. Μέσω των ΔΑ εξάγεται κάθε φορά ένα ασφαλές ή ανασφαλές σημείο λειτουργίας το οποίο υπάγεται σε ένα σύνολο περιορισμών (Constraint Set-CS). Ο αλγόριθμος εκτελείται για κάθε προεπιλεγμένη διαταραχή και για κάθε CS που οδηγεί το σύστημα σε ασφαλές σημείο λειτουργίας. Κάθε φορά υπολογίζεται μία βέλτιστη κατανομή της απαιτούμενης Στρεφόμενης Εφεδρείας (Spinning Reserve), μειώνοντας έτσι το κόστος παροχής αυτών των υπηρεσιών.

Ως διαταραχές λαμβάνεται η αποσύνδεση της μονάδας με τη μεγαλύτερη παραγωγή και ένα 3-Φ βραχυκύκλωμα σε κρίσιμο ζυγό του συστήματος. Για κάθε λειτουργικό σημείο αυτές οι διαταραχές προσομοιώνονται με τη χρήση του Eurostag. Επίσης, για καλύτερα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή της μεθόδου των ΔΑ, το φορτίο χωρίζεται σε 3 ζώνες (Load zone (100-200MW), Medium zone (200-300MW), High zone (300-400MW)), ενώ το σύστημα θεωρείται ασφαλές όταν η συχνότητα είναι μεγαλύτερη των 49Hz. Η μέθοδος εφαρμόζεται στο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης.

3.1.2 Αλγόριθμος

Ο αντικειμενικός σκοπός της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι να καθορίσει μία οικονομική εφαρμογή για την απαιτούμενη παραγωγή των γεννητριών και των υπηρεσιών για τον έλεγχο της συχνότητας του συστήματος, ώστε αυτό να παραμένει ευσταθές υπό τη παρουσία διαταραχών. Αυτό προσεγγίζεται με 2 τρόπους: προσδιορίζοντας ταυτόχρονα την παραγωγή και τις υπηρεσίες ελέγχου της συχνότητας (coupled) ή ξεχωριστά (decoupled).

- Συζευγμένη οικονομική κατανομή –Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\min C_{TC}^t = \sum_{m=1}^M C_{G,m}^t (P_{G,m}^t) + \sum_{m=1}^N C_{PFC,m}^t (P_{PFC,m}^t)$$

- Αποζευγμένη οικονομική κατανομή – Αντικειμενική Συνάρτηση

$$\min C_{PGTC}^t = \sum_{m=1}^M C_{G,m}^t (P_{G,m}^t)$$

$$\min C_{TPFC}^t = \sum_{m=1}^N C_{PFC,m}^t (P_{PFC,m}^t)$$

όπου t: το χρονικό διάστημα

N : ο αριθμός των μονάδων παραγωγής που πλειοδοτούν στην αγορά των υπηρεσιών ελέγχου συχνότητας.

M : ο αριθμός των μονάδων παραγωγής που πλειοδοτούν στην αγορά ενέργειας

C_{TC}^t : το συνολικό κόστος της παραγωγής και των υπηρεσιών ελέγχου συχνότητας

C_{PGTC}^t : το συνολικό κόστος των ενεργών μονάδων παραγωγής

C_{TPFC}^t : το συνολικό κόστος των υπηρεσιών ελέγχου συχνότητας

$C_{G,m}^t$: το κόστος της ενέργειας που παρέχεται από τη ενεργό μονάδα m

$C_{PFC,m}^t$: το κόστος της στρεφόμενης εφεδρείας που παρέχεται από τη μονάδα m

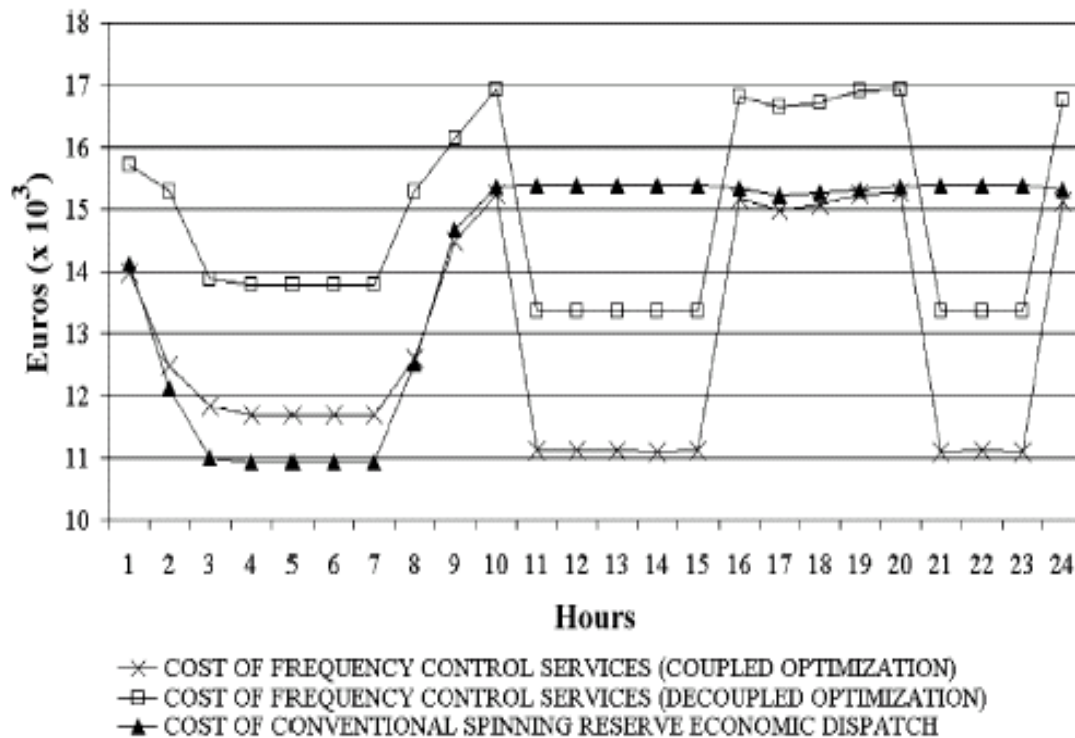
$P_{G,m}^t$: η παραγωγή που παρέχεται από τη ενεργό μονάδα m

$P_{PFC,m}^t$: η επιπλέον παραγωγή που παρέχεται από τη ενεργό μονάδα m για τον έλεγχο της συχνότητας

3.1.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο Διάγραμμα 3.1.1 [15] παρουσιάζεται μία σύγκριση του κόστους των υπηρεσιών ελέγχου της συχνότητας όταν έχουμε αποσύνδεση της κύριας γεννήτριας από το σύστημα. Παρατηρούμε ότι το κόστος της ξεχωριστής βελτιστοποίησης (decoupled method) είναι ακριβότερο περίπου κατά $2000^E/h$ από την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση (coupled method). Οι δύο αυτές εφαρμογές συγκρίνονται με μία τυπική οικονομική (Economic Dispatch –ED) εφαρμογή όπου λαμβάνει υπόψη της ως στρεφόμενη εφεδρεία την γεννήτρια με την μεγαλύτερη παραγωγή.

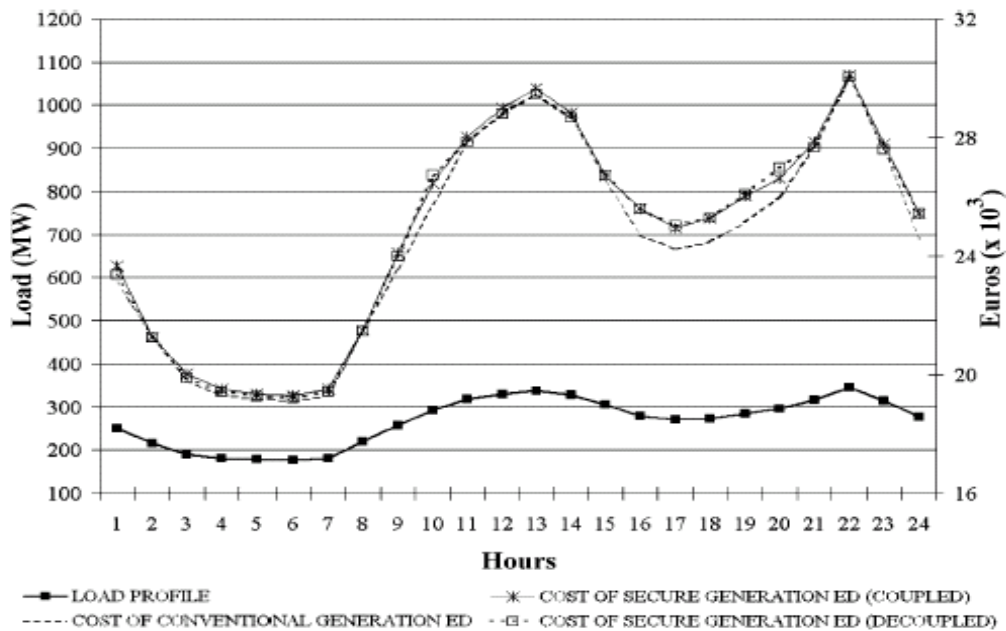
Διάγραμμα 3.1.1



Στο Διάγραμμα 3.1.2[15] παρουσιάζονται τα κόστη της παραγωγής για τις δύο εφαρμογές οι οποίες συγκρίνονται και πάλι με μία τυπική οικονομική εφαρμογή όπου λαμβάνει υπόψη της ως ΣΕ την γεννήτρια με την μεγαλύτερη παραγωγή. Παρατηρείται ότι το κόστος της εφαρμογής της συγκεκριμένης μεθόδου είναι υψηλότερο από αυτό μίας τυπικής ED και αυτό οφείλεται στους περιορισμούς ασφαλείας που τέθηκαν κατά τους

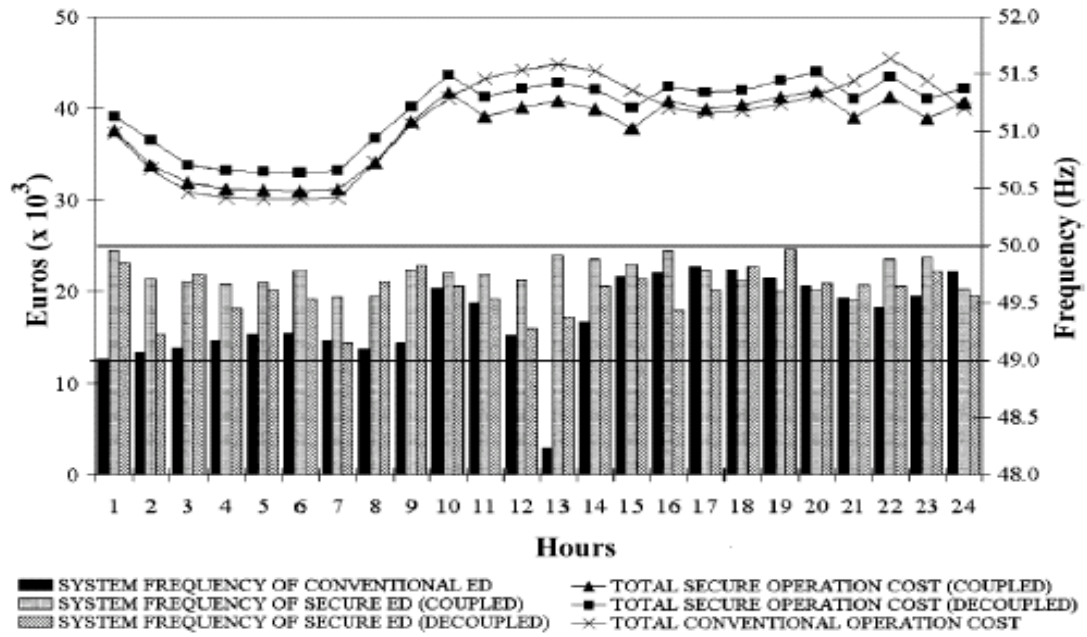
υπολογισμούς, οι οποίοι περιορίζουν την συμβολή στην παραγωγή, μονάδων όπως τις νηξελογεννήτριες και του συνδυασμένου κύκλου οι οποίες έχουν χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Διάγραμμα 3.1.2



Τέλος, στο διάγραμμα 3.1.3[15], στο πάνω μέρος παρουσιάζεται το λειτουργικό κόστος όπως υπολογίστηκε με τη χρήση της μεθόδου και συγκρίνεται με μία τυπική ED που λαμβάνει υπόψη της ως στρεφόμενη SR την γεννήτρια με την μεγαλύτερη παραγωγή. Το συνολικό κόστος αποτελείται από το κόστος της παραγωγής των γεννητριών και το κόστος των υπηρεσιών ελέγχου της πρωτογενούς συχνότητας. Στο κάτω μέρος παρουσιάζεται η διακύμανση της συχνότητας σε περίπτωση που έχουμε αποκοπή από το σύστημα της γεννήτριας με τη μεγαλύτερη παραγωγή. Παρατηρείται ότι σε αντίθεση με την τυπική μέθοδο ED, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων από την προτεινόμενη μέθοδο είναι πάντα ασφαλές ($f > 49\text{Hz}$).

Διάγραμμα 3.1.3



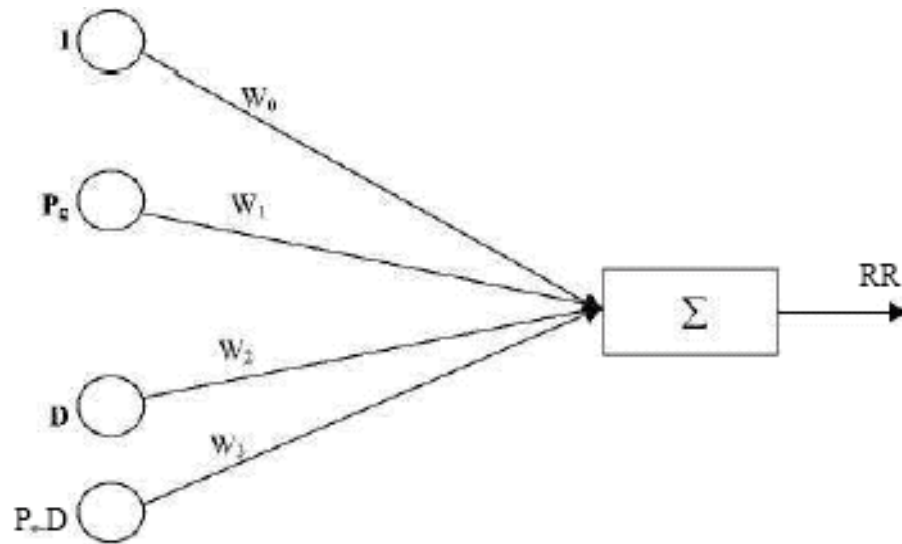
3.2. Καθορισμός της Εφεδρείας χρησιμοποιώντας Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα [16]

Αυτή η μελέτη παρουσιάζει μία εφαρμογή της θεωρίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Artificial Neural Network) για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης εφεδρείας (Ready Reserve – RR) σε περίπτωση που έχουμε αποσύνδεση μίας γεννήτριας από το σύστημα λόγω βλάβης ή έχουμε αυξημένες συνθήκες φορτίου.

Για το σχεδιασμό του μονοεπίπεδου ANN (n-είσοδοι, 1-έξοδος) χρησιμοποιούνται λειτουργικά συνδετικά δίκτυα (Functional Link Network). Τα FLN μετασχηματίζουν την σχέση των δύο μεταβλητών εισόδου (ονομαστική παραγωγή P_g και φορτίο D) σε μία μη γραμμική σχέση χρησιμοποιώντας ένα νέο αναβαθμισμένο σύνολο εισόδου (π.χ.: $P_g, D, P_g^2, D^2, P_g D, \dots$). Ακολουθώντας, με μία επαναληπτική διαδικασία απαλείφεται κάθε φορά ο μικρότερος όρος, μέχρις ότου να καταλήξουμε στο σύνολο με τη μεγαλύτερη σύγκλιση. Στη συνέχεια, αφού υπολογίσουμε τα αντίστοιχα βάρη για την κάθε μεταβλητή, υπολογίζουμε την απαιτούμενη ποσότητα RR που χρειάζεται να προσφερθεί στο σύστημα.

Στο διάγραμμα 3.2.1[16], παρουσιάζεται το FLN που έχει υπολογιστεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, ενώ στον πίνακα 3.2.1[16] συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για τον υπολογισμό της εφεδρείας όταν έχουμε απώλεια μίας ή περισσότερων γεννητριών με αυτά της στοχαστικής αιτιοκρατικής μεθόδου (Stochastic Deterministic)[5] και της όπισθεν παλινδρόμησης (Back Propagation algorithm)[6].

Διάγραμμα 3.2.1



Πίνακας 3.2.1

Comparison of RR as obtained using SD technique, back propagation and FLN algorithm

Outage of generator with rated power P_g (pu)	System load, D (pu)	Ready reserve required				
		From SD technique	Back propagation algorithm		Using FLN algorithm	
			RR (pu)	% Error	RR (pu)	% Error
0.8 ($G_1 \downarrow G_4$)	1.65	0.58	0.57	1.70	0.50	3.40
0.8 ($G_1 \downarrow G_4$)	1.55	0.48	0.47	2.10	0.46	4.20
0.1 (G_7)	1.75	0.00	Negative	0.00	Negative	0.00
0.2 (G_6)	1.75	0.08	0.09	12.5	0.09	12.5
1.25 ($G_1 \downarrow G_4 \downarrow G_5 \downarrow G_{10}$)	1.55	0.88	0.89	0.880	0.88	0.00
0.8 ($G_1 \downarrow G_4$)	1.75	0.65	0.64	1.50	0.66	1.50
0.8 ($G_1 \downarrow G_5$)	1.85	0.75	0.74	1.30	0.75	0.00

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα συμφωνούν με τις άλλες δύο μεθόδους με τις οποίες γίνεται σύγκριση. Τέλος, καταδεικνύεται ότι το FNL είναι μία σχετικά απλή μέθοδος η οποία μας παρέχει επαρκές πληροφορίες για το σωστό προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής και τη συμβολή τους για παραγωγή RR εφεδρείας όταν υπό αντίξοες συνθήκες η στρεφόμενη εφεδρεία δεν επαρκεί για να καλύψει το φορτίο. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος εξασφαλίζει την επάρκεια και την ασφάλεια του δικτύου αφού λαμβάνει υπ' όψη τις αβεβαιότητες του φορτίου και τις δυνατότητες παραγωγής των γεννητριών.

3.3. Διαδικασίες για καθορισμό της απαραίτητης παραγωγής για εφεδρεία [5]

Η μελέτη αυτή παρουσιάζει δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της απαραίτητης έτοιμης εφεδρείας (**Ready Reserve**) που πρέπει να παράγουν οι μονάδες του συστήματος. Η εφεδρεία αυτή είναι το τμήμα της λειτουργικής εφεδρείας που σχετίζεται με τις cold fast start-up μονάδες και είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος. Στην πρώτη μέθοδο ο υπολογισμός της RR εφεδρείας γίνεται με στοχαστικά και αιτιοκρατικά κριτήρια (**Stochastic Deterministic method**), ενώ στη δεύτερη μέθοδο ο υπολογισμός της εφεδρείας γίνεται με προσομοίωση πρόσφατων αρχείων (**Monte Carlo simulation method**)..

3.3.1 Στοχαστική –Ντετερμινιστική Μέθοδος

Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογισμός της RR εφεδρείας γίνεται με τυχαία και αιτιοκρατικά κριτήρια για διακριτά χρονικά διαστήματα. Κάθε φορά λαμβάνονται υπ' όψη επιμέρους στοιχεία του δικτύου όπως ο στοχαστικός χαρακτήρας του φορτίου, οι πιθανότητες της τρέχουσας παραγωγής των γεννητριών και η πιθανή διακοπή λειτουργίας μίας ή περισσότερων γεννητριών. Η τιμή της RR εφεδρείας υπολογίζεται κάθε φορά ως η διαφορά μεταξύ της παραγόμενης ισχύος της γεννήτριας που έχει αποκοπεί από το δίκτυο και της στρεφόμενης εφεδρείας (spinning reserve-SR).

$$(RR)_{\text{gr}i} = P_{T_i} - \sum_{T_i} (SR)_{T_i} [\text{MW}]$$

P_{T_i} - Η ισχύς των μονάδων παραγωγής που τίθενται εκτός λειτουργίας (MW)
 $(SR)_{T_i}$ - Η στρεφόμενη εφεδρεία των μονάδων παραγωγής T_i που παραμένουν ενταγμένες στο σύστημα
 T_i - Ο αριθμός των μονάδων που παραμένουν ενταγμένες στο σύστημα

Πίνακας 3.3.1

Η RR που απαιτείται για να αντισταθμίσει το έλλειμα ενέργειας που παρουσιάζεται όταν έχουμε αποκοπή γεννήτριας (η SR χρησιμοποιείται σε λιγότερο από 10 %)			Η RR που απαιτείται για να αντισταθμίσει το έλλειμα ενέργειας που παρουσιάζεται όταν έχουμε αποκοπή γεννήτριας (η SR χρησιμοποιείται σε λιγότερο από 10 %)		
hour	Outage of P_{T1} (290 MW)	Outage of P_{T2} (350 MW)	hour	Outage of P_{T1} (290 MW)	Outage of P_{T2} (350 MW)
1	33 / 57	93 / 117	13	138 / 157	198 / 217
2	7 / 20	67 / 80	14	159 / 173	219 / 233
3	-1 / 9	59 / 69	15	168 / 182	228 / 242
4	-8 / 5	52 / 65	16	199 / 225	259 / 285
5	-2 / 3	58 / 63	17	252 / 281	302 / 341
6	34 / 44	94 / 104	18	241 / 282	301 / 342
7	60 / 75	120 / 135	19	238 / 254	298 / 314
8	158 / 182	218 / 242	20	220 / 240	280 / 300
9	209 / 237	269 / 297	21	180 / 195	240 / 255
10	218 / 237	278 / 297	22	142 / 156	202 / 216
11	235 / 263	293 / 322	23	104 / 121	164 / 181
12	243 / 256	303 / 316	24	73 / 89	133 / 149

Η απαιτούμενη RR καθορίζεται μέσω ντετερμινιστικών και στοχαστικών μεθόδων (η δεύτερη στήλη υπολογίζει την RR λαμβάνοντας υπόψη τη στοχαστική φύση του φορτίου και την ικανότητα παραγωγής των υδροηλεκτρικών μονάδων)

Στο Πίνακα 3.3.1[5] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον υπολογισμό της εφεδρείας για ένα υδροηλεκτρικό σταθμό. Στην δεύτερη στήλη λαμβάνεται υπ' όψη ο στοχαστικός χαρακτήρας του φορτίου και οι δυνατότητες παραγωγής των γεννητριών.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι ο ακριβής υπολογισμός της απαιτούμενης RR εφεδρείας για κάθε διακριτό ωριαίο χρονικό διάστημα και το μικρότερο κόστος για την παροχή εφεδρείας, αφού υπολογίζει επακριβώς την απαιτούμενη ποσότητα με μεγάλη ακρίβεια για τις χειρότερες περιπτώσεις.(μεγάλες αλλαγές φορτίου).

Τα κυριότερα συμπεράσματα αυτής της εφαρμογής είναι ότι για την ευστάθεια ενός συστήματος απαιτείται ποσότητα εφεδρείας ίση με την μεγαλύτερη μονάδα παραγωγής, ενώ αυτή η ποσότητα θα πρέπει να διαμοιράζεται σε μικρές μονάδες για να διατηρείται η ισορροπία.

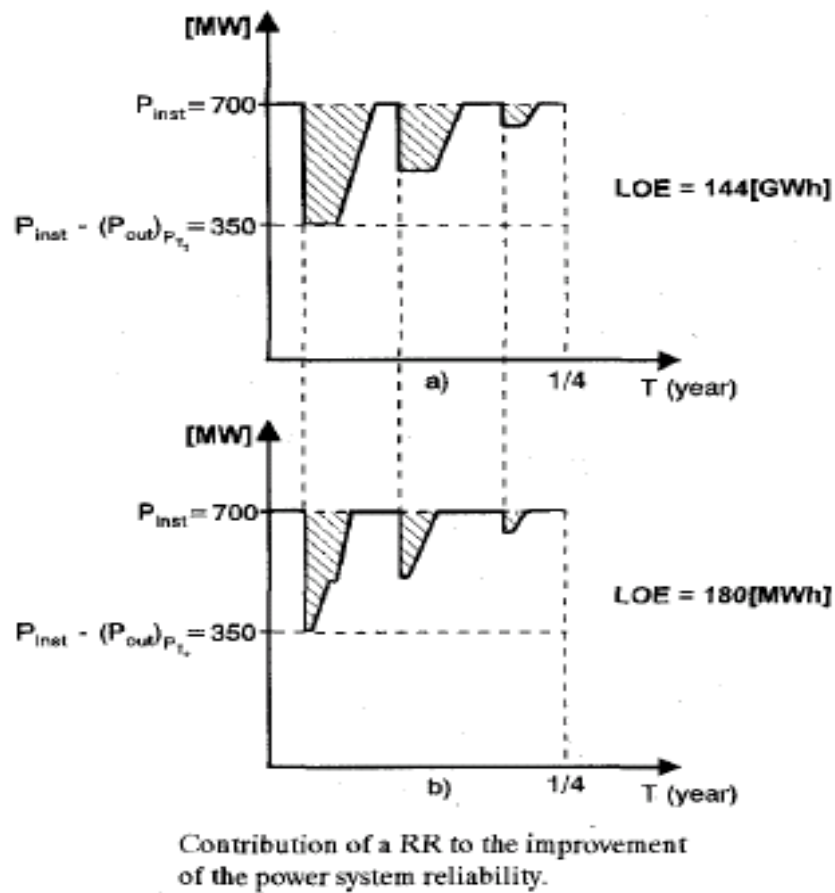
3.3.2 Μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo

Σε αυτή τη μέθοδο, μία επαναληπτική διαδικασία τροφοδοτείται από δεδομένα των τελευταίων χρόνων για τις ενδείξεις της μη τροφοδοτούμενης ζήτησης (**Demand Not Supplied**) λόγω της διακοπής της λειτουργίας μίας ή περισσότερων γεννητριών. Στην συνέχεια αυτά τα σενάρια αξιολογούνται στατιστικά και τροφοδοτούν το σενάριο το οποίο στην συνέχεια θα προσομοιωθεί. Τα δεδομένα λαμβάνουν υπ' όψη την στοχαστική φύση του φορτίου και άλλα ιδιαίτερα στοιχεία του δικτύου όπως την στρεφόμενη εφεδρεία, τις καιρικές συνθήκες κ.α. Για κάθε λειτουργικό σημείο των γεννητριών, μέσω της προσομοίωσης υπολογίζεται η αντίστοιχη μέση τιμή του φορτίου που δεν καλύφθηκε (MDNS), όπου από αυτή στην συνέχεια υπολογίζεται η ποσότητα της RR εφεδρείας που χρειάζεται για να αντισταθμιστούν τα ελλείμματα ενέργειας. Στον Πίνακα 3.3.2[5] παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για την ποσότητα της εφεδρείας που χρειάζεται για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις όπου έχουμε διακοπή της λειτουργίας των γεννητριών. Στο Διάγραμμα 3.3.1[5] παρουσιάζεται η συνεισφορά της RR εφεδρείας, όπως υπολογίστηκε με τη προσομοίωση Monte Carlo, στην αξιοπιστία του συστήματος. Παρατηρούμε ότι η προσθήκη της εφεδρείας μειώνει την απώλεια ενέργειας (**Loss Of Energy**).

Πίνακας 3.3.2

	Μέση Τιμή φορτίου που δεν καλύφθηκε (MDNS)		
	Απώλεια Γεν.1	Απώλεια Γεν.2	Απώλεια Γεν.3
Μέση (αναμενόμενη) τιμή	191	224	30
Εκτίμηση του διαστήματος για την RR με πιθανότητα 99.7%	172 - 210	197 – 251	20 - 40

Διάγραμμα 3.3.1



Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ο εμπλουτισμός της τεχνικής με ιδιαίτερα στοιχεία του δικτύου, οι ρεαλιστικότερες τιμές της απαιτούμενης RR εφεδρείας καθώς είναι πλησιέστερες με την πραγματική φύση του φορτίου και των γεννητριών καθώς και οι μικρότερες τιμές της εφεδρείας. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούμε να καθορίσουμε επακριβώς την απαιτούμενη εφεδρεία (αρνητικό αντίκτυπο στις οικονομικές μελέτες).

3.4. Προσομοίωση του συστήματος μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου της Κύπρου για υπολογισμό της εφεδρείας [8]

3.4.1 Περιγραφή Μελέτης

Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης που προσομοιώνει το σύστημα της Κύπρου για τα χρόνια 2007-2018. Τα αποτελέσματα θα αποτελέσουν την βάση για τον καθορισμό της απαιτούμενης Στρεφόμενης Εφεδρείας (Spinning Reserve – **SR**) που θα λαμβάνει μέρος στην λειτουργία του συστήματος, ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση μεταξύ κόστους παραγωγής – απωλειών ενέργειας.

Για κάθε χρόνο διεξάγονται δύο τύποι προσομοιώσεων για διάφορα επίπεδα της SR, μία με αιτιατά κριτήρια (deterministic) μία με πιθανοτικά κριτήρια (probabilistic). Οι αιτιοκρατικές προσομοιώσεις διεξάγονται με σκοπό να καθορίσουν την οικονομία των λειτουργιών για διάφορα επίπεδα SR, ενώ η πιθανοτική προσομοίωση (Monte Carlo) για να προσδιορίσει τις απώλειες φορτίου ή την μη τροφοδοτούμενη ενέργεια (**Energy Not Supplied – ENS**) και προκαλείται από την ανεπάρκεια της ΣΕ ή από την βλάβη κάποιας άλλης γεννήτριας που είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο.

Παρατηρήσεις-Παραδοχές

- Για την ανάλυση χρησιμοποιείται ο προσομοιωτής δικτύου της ABB.
- Η ανάλυση χωρίζεται σε 5 διακριτά χρονικά διαστήματα ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του νησιού. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς παραμένει σταθερή για κάθε διάστημα.
- Σε όλες τις περιπτώσεις ένα συγκεκριμένο ποσό της SR παρέχεται από τις μονάδες του ΣΚ
- Η ανάλυση διεξήχθη για την περίοδο 2007-2018 και τα δεδομένα ελήφθησαν από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς – ΔΣΜ (TSO).

Προσομοίωση με Αιτιατά Κριτήρια

Κατά την προσομοίωση με αιτιατά κριτήρια, κάθε ώρα οι δεσμευμένες μονάδες θα πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις για κάλυψη του φορτίου και διατήρηση

αξιόπιστης εφεδρείας. Η προσομοίωση καθορίζει τα ετήσια κόστη παραγωγής για διάφορα επίπεδα της ΣΕ και ορισμένα άλλα χαρακτηριστικά των μονάδων όπως η παραγωγή, ώρες λειτουργίας κ.α.

Προσομοίωση Monte Carlo

Το σύστημα προσομοίωσης Monte Carlo επιτρέπει τυχαίες βλάβες στις εγκαταστάσεις των γεννητριών ή του δικτύου μεταφοράς. Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων χρησιμοποιεί πιθανοτική κατανομή για τις βλάβες του εξοπλισμού. Η επιλογή ανάμεσα στις γεννήτριες που θα αποκοπούν από το σύστημα γίνεται με τυχαία δειγματοληψία, ενώ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μόνο μία γεννήτρια επιτρέπεται να τίθεται εκτός λειτουργίας. Κάθε γεννήτρια που λαμβάνεται με τη δειγματοληψία μοντελοποιείται με ένα Δείκτη Εξαναγκασμένης Βλάβης (**Forced Outage Rate**) και ένα χρονικό διάστημα για το οποίο διαρκεί η βλάβη (**Outage Duration**). Με σκοπό τη διατήρηση της ορθότητας των υπολογισμών για τους δείκτες κινδύνου διεξάγονται εκατοντάδες προσομοιώσεις. Επίσης, γίνεται η υπόθεση για σταθερό φορτίο και 20MW ως ΣΕ. Με αυτές τις υποθέσεις υπολογίζεται η μη τροφοδοτούμενη ενέργεια.

3.4.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

Το πιο αποδοτικό επίπεδο επιλέγεται εκείνο για το οποίο βελτιστοποιείται η σχέση μεταξύ του κόστους παραγωγής που υπολογίζεται με την αιτιοκρατική προσομοίωση και της ENS που υπολογίζεται με τη προσομοίωση Monte Carlo.

Η λειτουργική εφεδρεία εξετάζεται για 0, 30, 60, 90, 130 και 220MW. Αυτά τα μεγέθη επιλέχθηκαν επειδή αντιπροσωπεύουν την μέγιστη ικανότητα παραγωγής των διαφόρων μονάδων που είναι εγκατεστημένες στο σύστημα.

Στους Πίνακες 3.4.1-2[8] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας για το 2007 και 2011 από όπου μπορούμε να προσδιορίσουμε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Στο Διάγραμμα 3.4.1[8] αναπαριστώνται γραφικά τα αποτελέσματα για το έτος 2007. Παρατηρούμε ότι το πιο οικονομικό σημείο λειτουργίας βρίσκεται για ΣΕ 30-60MW.

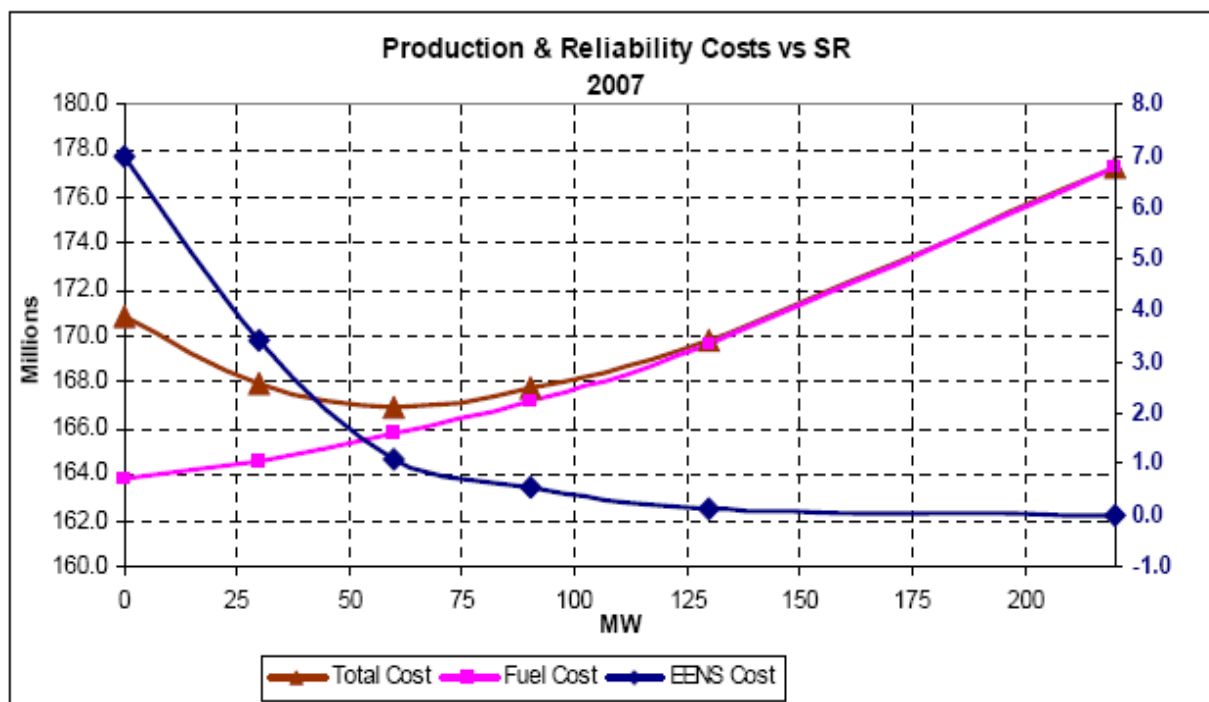
Πίνακας 3.4.1

					2007 - Total Cost million Cy£			
Spin MW	Load GWh	ENS MWh	Fuel Cost million Cy£	Cost Cy£/MWh	ENS @ 1 Cy£/KWh	ENS @ 1.5 Cy£/KWh	ENS @ 3 Cy£/KWh	ENS @ 5 Cy£/KWh
0	4,910	1,400	163.840	33.369	165.239	165.939	168.039	170.839
30	4,910	685	164.551	33.513	165.235	165.578	166.605	167.975
60	4,910	224	165.825	33.773	166.049	166.162	166.498	166.946
90	4,910	109	167.181	34.049	167.290	167.345	167.509	167.727
130	4,910	27	169.649	34.552	169.677	169.690	169.731	169.786
220	4,910	0	177.301	36.110	177.301	177.301	177.301	177.301

Πίνακας 3.4.2

					2011 - Total Cost million Cy£			
Spin MW	Load GWh	ENS MWh	Fuel Cost million Cy£	Cost Cy£/MWh	ENS @ 1 Cy£/KWh	ENS @ 1.5 Cy£/KWh	ENS @ 3 Cy£/KWh	ENS @ 5 Cy£/KWh
0	6,200	2,413	98.366	15.865	100.779	101.985	105.604	110.430
30	6,200	1,257	99.168	15.995	100.425	101.053	102.939	105.453
60	6,200	505	99.729	16.085	100.234	100.487	101.245	102.255
90	6,200	86	100.340	16.184	100.425	100.468	100.597	100.768
130	6,200	1	101.146	16.314	101.147	101.148	101.149	101.151
220	6,200	0	103.716	16.728	103.716	103.716	103.716	103.716

Διάγραμμα 3.4.1



Fuel, ENS and Total costs vs. Spinning Reserves for 2007

Αποτελέσματα Προσομοίωσης με Αιτιατά Κριτήρια

Στο Διάγραμμα 3.4.2 [8] παρουσιάζονται οι καμπύλες της ΣΕ για το 2009. Παρατηρούμε ότι για ΣΕ 0 MW, η πραγματική ΣΕ του συστήματος είναι μεγαλύτερη από 150MW για 1000h και από 100MW για 2000h. Αυτό συμβαίνει επειδή πρέπει να κρατούμε αναγκαστικά ένα αριθμό γεννητριών συνδεδεμένων στο δίκτυο ακόμα και για τις περιόδους με χαμηλό φορτίο. Στους Πίνακες 3.4.3-4 παρουσιάζονται μερικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας των μονάδων του συστήματος για δύο διαφορετικά επίπεδα εφεδρείας το 2008. Παρατηρούμε ότι οι Ατμοστρόβιλοι του Βασιλικού παραμένουν και για τα 2 επίπεδα της εφεδρείας η κύρια πηγή τροφοδότησης του συστήματος, ωστόσο η συνεισφορά τους μειώνεται από 118.8MW σε 107.3MW. Για τις μονάδες της Δεκέλειας παρατηρούμε ότι ενώ το επίπεδο της συνεισφοράς τους παραμένει αμετάβλητο, με την αύξηση της εφεδρείας ο αριθμός των επανεκκινήσεων τους μειώνεται περίπου κατά 450 φορές.

Πίνακας 3.4.3

Summary Table 2008 SR=0MW								
Plant	#unit	Total Gen MWh	Cap Factor	Fuel Cost m£	avg Cost £/MWh	Running Hours	Avg loading MW	Number of Starts
Dhek	6	2,028,416	64.1%	69.325	34.18	38,874	52.2	627
GTs	5	2,588	0.8%	0.179	69.10	69	37.5	26
Moni	6	374,611	25.4%	14.990	40.02	15,060	24.9	881
VASS	3	2,786,948	81.4%	91.739	32.92	23,462	118.8	6
VPSOCGT	2	27,435	2.1%	1.989	72.49	407	67.4	102
		5,219,997		178.221	34.14			1,642

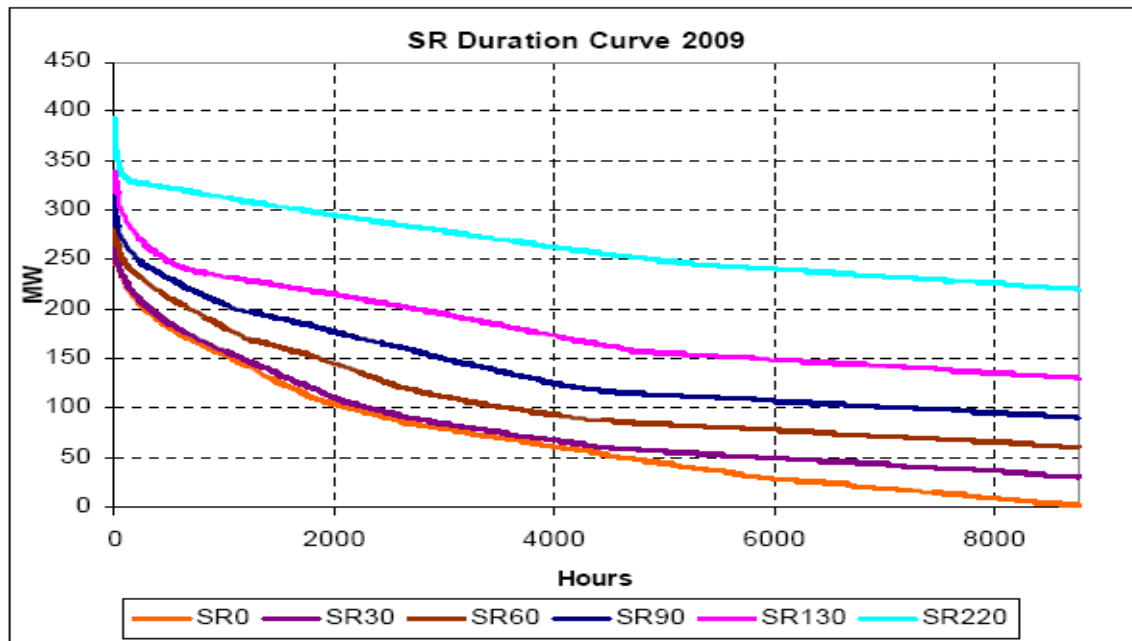
Generating units Performance Parameters for the year 2008 with SR=0MW

Πίνακας 3.4.4

Summary Table 2008 SR=130MW								
Plant	#unit	Total Gen MWh	Cap Factor	Fuel Cost m£	avg Cost £/MWh	Running Hours	Avg loading MW	Number of Starts
Dhek	6	1,955,786	61.8%	67.689	34.61	44,632	43.8	171
GTs	5	17,378	5.5%	1.961	112.84	1,749	9.9	365
Moni	6	607,680	41.2%	24.635	40.54	27,258	22.3	1456
VASS	3	2,518,610	73.5%	83.328	33.08	23,462	107.3	6
VPSOCGT	2	120,543	9.2%	9.670	80.22	2,731	44.1	361
		5,219,997		187.283	35.88			2,359

Generating units Performance Parameters for the year 2008 with SR=130MW

Διάγραμμα 3.4.2



Spinning Reserves Duration Curve for 2009 Simulations

Αποτελέσματα Προσομοίωσης Monte Carlo

Στους Πίνακες 3.4.5-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το 2007 και το 2008. Με την υπόθεση ότι το σύστημα λειτουργεί με 90MW ΣΕ παρατηρούμε ότι για το 2008 το φορτίο που απορρίπτεται είναι 184.16MW. Αυτό συμβαίνει περίπου 5 φορές το χρόνο και οι αναμενόμενες απώλειες κάθε φορά είναι 38.1MW. Στο Διάγραμμα 3.4.3[8] παρουσιάζονται οι πιθανότητες απωλειών φορτίου για το 2008 και με ΣΕ 60MW. Παρατηρούμε ότι η πιθανότητα το μη τροφοδοτούμενο φορτίο να είναι 414 MWh, είναι μία για κάθε 100 επαναλήψεις, ενώ για φορτίο ύψους 185 MWh, ο αριθμός αυξάνεται στο 5%. Επίσης, με βάση την αθροιστική πιθανότητα κατανομής, ο ΔΣΜ έχει 100% πιθανότητα να εξυπηρετήσει φορτίο με πιθανότητα αποκοπής μικρότερη ή ίση των 414 MWh.

Πίνακας 3.4.5

SR (MW)	ENS MWh	Avg Incident/year	Avg MW/Incident
0	1399.78	46.8	29.9
30	684.79	28.8	23.8
60	224.26	5.8	38.6
90	109.1	5.0	22.0
130	27.44	1.1	24.5
220	0	0	-

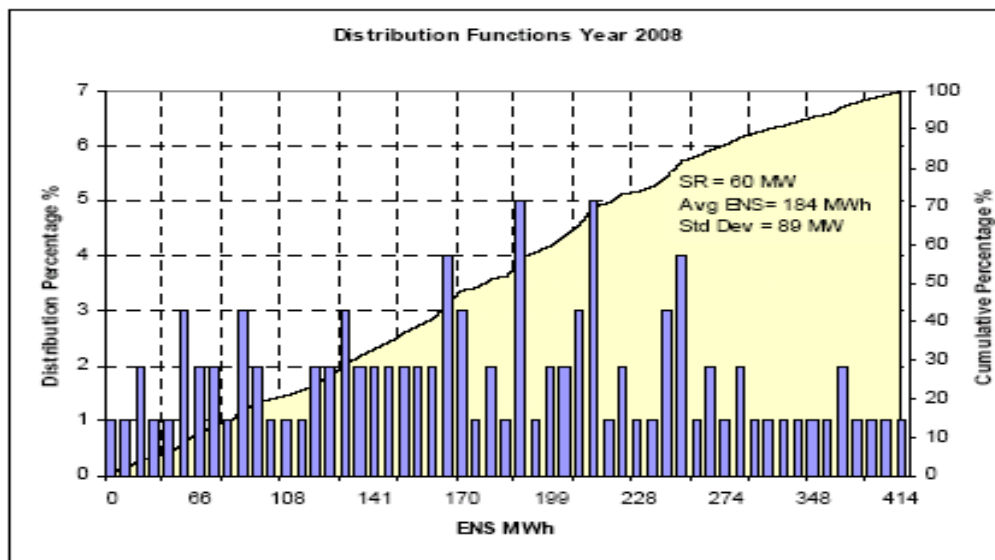
Load Shedding statistics 2007

Πίνακας 3.4.6

SR (MW)	ENS MWh	Avg Incident/year	Avg MW/Incident
0	1532.33	51.7	29.6
30	647.13	27.8	23.3
60	184.16	4.8	38.1
90	70.23	3.3	21.2
130	0.67	0.3	2.7
220	0	0	-

Load Shedding Statistics 2008

Διάγραμμα 3.4.3



Probability Functions 2008 SR=60MW

3.4.3 Κυριότερα Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα κυριότερα συμπεράσματα και παρατηρήσεις της μελέτης αυτής, καθώς είναι πολύ χρήσιμα για την εργασία μας αφού αφορούν την λειτουργία του συστήματος της Κύπρου για την επόμενη δεκαετία.

- Τα επόμενα 10 χρόνια το μέγιστο φορτίο (MW) και η ενεργειακή κατανάλωση αναμένεται να διπλασιαστεί. Την ίδια περίοδο αναμένεται η ένταξη μονάδων Συνδυασμένου Κύκλου (Combined Cycle) συνολικής ισχύος 1200MW.
- Με την υπόθεση ότι η τιμή του απορριπτόμενου φορτίου είναι μικρότερη από 1.5 Cy\$/KWh, τα επίπεδα της στρεφόμενης εφεδρείας που εξασφαλίζουν την πιο οικονομική λειτουργία του συστήματος συνοψίζονται στον πιο κάτω πίνακα:

Πίνακας 3.4.7

Summary Table: Economical Spinning Reserve Levels (MW)

Year	ECONOMICAL Spinning Reserves Levels MW
2008	30
2009	30
2010	30
2011	90
2012	90
2013	90
2014	90
2015	90
2016	90
2017	90
2018	90

- Τα κόστη παραγωγής από το 2011 και μετά αναμένεται να μειωθούν κατά 50% σε σύγκριση με την τετραετία 07-10 λόγω της χρήσης του φυσικού αερίου ως καύσιμο (LNG).
- Τα επίπεδα της ΣΕ είναι πιο χαμηλά την τριετία 08-10 ως αποτέλεσμα του καθημερινού προγραμματισμού και λειτουργίας πολλών μονάδων χαμηλής ισχύος με ψηλά κόστη καυσίμου.
- Τα επίπεδα της ΣΕ αυξάνονται τα επόμενα χρόνια κατά δύο κυρίως λόγους:

- α. Η προσθήκη μεγαλύτερων μονάδων παραγωγής από το 2011 αυξάνει τις απαιτήσεις για διατήρηση της ΣΕ.
- β. Οι πιο αποδοτικές και νέες μονάδες ΣΚ όπως και η χρησιμοποίηση φθηνότερου καυσίμου (LNG) έχει ως αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής να είναι μικρότερο από το κόστος της ENS.
- Η συνεισφορά στην παραγωγή από τις Ατμοηλεκτρικές μονάδες του σταθμού του Βασιλικού μειώνεται από 80% σε 20% το 2018, καθώς προστίθενται οι μονάδες του ΣΚ που έχουν χαμηλότερο κόστος.
 - Οι Αεριοστρόβιλοι που είναι εγκατεστημένοι σε Μονή. Βασιλικό και Βούρο θα είναι πολύ καλές υποψήφιες για να παρέχουν εφεδρεία 20-30 λεπτών αν εφοδιαστούν με κατάλληλα συστήματα ελέγχου. Αυτό θα μειώσει τις απώλειες φορτίου.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΝΤΡΩΝ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτή τη μελέτη, ερευνάται η διατύπωση κανόνων για αποκοπή φορτίου με σκοπό της διατήρησης της συχνότητας του συστήματος σε διάφορες συνθήκες φόρτισης και για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μίας μονάδας παραγωγής. Οι κανόνες αυτοί εξάγονται με τη βοήθεια τεχνικών αυτόματης μάθησης και συγκεκριμένα, των δέντρων απόφασης.

Τα δέντρα απόφασης ανήκουν στην κατηγορία επαγωγικής μάθησης, που είναι μία υποκατηγορία της αυτόματης μάθησης η οποία βοηθάει στην εξαγωγή πληροφορίας από μία βάση δεδομένων. Η μεθοδολογία των δέντρων απόφασης είναι μία γενική μη παραμετρική τεχνική, ικανή να παράγει ταξινομητές προκειμένου να εκτιμήσει νέες, άγνωστες καταστάσεις, ή να αποκαλύψει τους μηχανισμούς που χαρακτηρίζουν ένα πρόβλημα. Η βάση δεδομένων δημιουργείται με χρήση του λογισμικού Eurostag το οποίο προσομοιώνει δυναμικά το σύστημα της Κύπρου.

Γενικοί Κανόνες και Συμβολισμοί

Η κατασκευή των δένδρων απόφασης προϋποθέτει την ύπαρξη ενός συνόλου μάθησης, δηλαδή ενός αριθμού, έστω N , προταξινομημένων καταστάσεων. Χωρίς βλάβη της γενικότητας θα υποθέσουμε ότι κάθε κατάσταση χαρακτηρίζεται από ένα καθορισμένο αριθμό έστω n , ιδιοτήτων, και ότι οι N καταστάσεις είναι ταξινομημένες μόνο σε δύο κλάσεις. $\{+, -\}$.

Στα επόμενα, ένα σύνολο μάθησης (Learning Set) θα ορίζεται ως:

$$LS = \{(\vec{v}_1, c_1), (\vec{v}_2, c_2) \cdots (\vec{v}_N, c_N)\}$$

όπου τα στοιχεία του διανύσματος $\vec{v}_k$

$$\vec{v}_k = (u_{1k}, u_{2k}, \dots, u_{nk})^T$$

αναπαριστούν τις τιμές των ιδιοτήτων της κατάστασης s_k , η οποία χαρακτηρίζεται από τις ιδιότητές της:

$$s_k = [a_1 = u_{1k}] \cap [a_2 = u_{2k}] \cap \dots \cap [a_n = u_{nk}]$$

και όπου :

$$c_k \in \{+, -\}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το προταξινομημένο σύνολο μάθησης θεωρείται ότι είναι ένα αντιπροσωπευτικό στατιστικό δείγμα μεγέθους N , προερχόμενο από το συνολικό πληθυσμό των πιθανών καταστάσεων.

Το σύνολο ελέγχου (Test Set), ορίζεται σαν ένα παρόμοιο αλλά ανεξάρτητο δείγμα μεγέθους M :

$$TS = \{(\vec{v}_{N+1}, c_{N+1}), (\vec{v}_{N+2}, c_{N+2}) \dots (\vec{v}_{N+M}, c_{N+M})\}$$

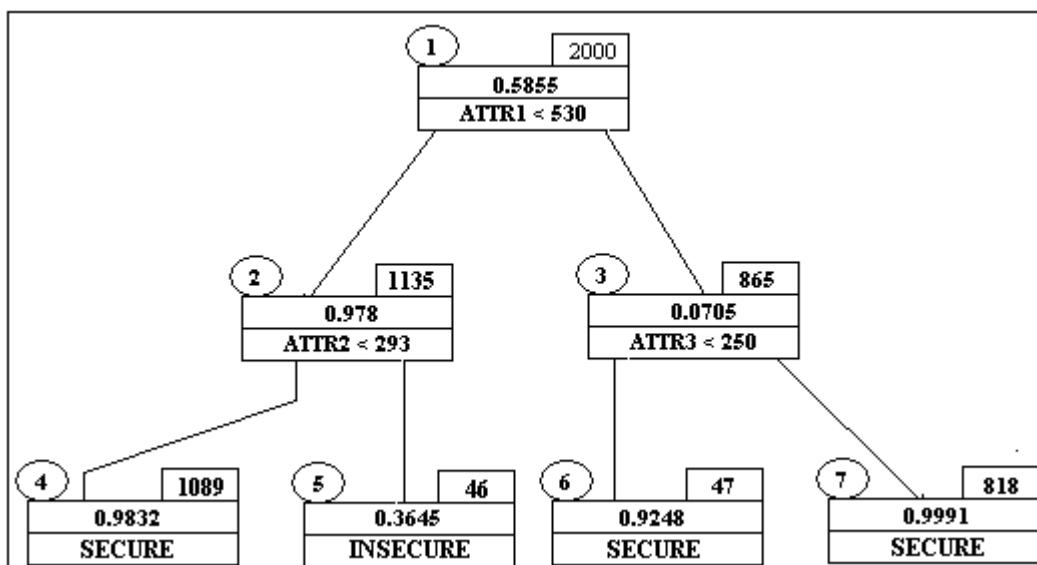
Το σύνολο ελέγχου χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της απόδοσης του δένδρου απόφασης.

4.2 Δέντρα Απόφασης

Το Δένδρο Απόφασης (ΔΑ) είναι ένα δένδρο κατασκευασμένο με δομή από πάνω προς τα κάτω. Ο πρώτος κόμβος του ΔΑ ονομάζεται ρίζα και ακολουθούν οι κόμβοι ελέγχου (ή ενδιάμεσοι κόμβοι) καθώς και οι τερματικοί κόμβοι. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι περιέχουν έναν έλεγχο και δημιουργούν δύο απογόνους. Ο ένας απόγονος (αριστερός) προκύπτει όταν επαληθεύεται ο έλεγχος, ενώ ο άλλος απόγονος (δεξιός) όταν δεν επαληθεύεται. Οι τερματικοί κόμβοι είναι αυτοί που οδηγούν στην ταξινόμηση της εξεταζόμενης περίπτωσης σε μία από τις προεπιλεγμένες κλάσεις.

Σε αυτή την εργασία, οι καταστάσεις που εξετάζουμε αντιστοιχούν σε λειτουργικές σημεία του συστήματος που χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο ιδιοτήτων, που περιλαμβάνουν μεταβλητές εισόδου ή ελέγχου π.χ. εφεδρεία μονάδων, συνολική εφεδρεία συστήματος, συνολικό φορτίο συστήματος, παραγωγή μονάδων, συνολική παραγωγή κλπ. Οι δύο κλάσεις αντιπροσωπεύουν τις αποδεκτές και μη αποδεκτές καταστάσεις του συστήματος ως προς το κριτήριο ασφάλειας της συχνότητας, όπως προκύπτει από την προσομοίωση του συστήματος στην επιλεγμένη διαταραχή. Στο Σχήμα 4.1 εικονίζεται ένα χαρακτηριστικό ΔΑ για την ταξινόμηση των λειτουργικών καταστάσεων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται για τους κόμβους του ΔΑ εξηγούνται στο Σχήμα 4.2.

Σχήμα 4.1: Δέντρο Απόφασης για την ταξινόμηση των λειτουργικών καταστάσεων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας



Ο δείκτης αποδοχής ενός κόμβου του ΔΑ του σχ.4.1 ορίζεται ως ο λόγος των αποδεκτών προταξινομημένων καταστάσεων ή συνόλων μέτρησης (measurement sets) σε ένα υποσύνολο E_n του κόμβου n προς το συνολικό αριθμό των συνόλων μέτρησης στο σύνολο E_n . Αν ο δείκτης αποδοχής ενός τερματικού κόμβου είναι μεγαλύτερος από 0.5, τότε τα σύνολα μέτρησης αυτού του κόμβου είναι ως επί το πλείστον αποδεκτής ποιότητας.

Το ΔΑ του σχ.4.1 έχει συνολικά 7 κόμβους, εκ των οποίων οι 3 είναι ενδιάμεσοι κόμβοι (κόμβοι 1, 2, 3) και οι 4 είναι τερματικοί (κόμβοι 4, 5, 6 και 7). Η ρίζα του ΔΑ (κόμβος 1) αποτελείται από 2000 προταξινομημένες καταστάσεις (σύνολο μάθησης), εκ των οποίων οι 58.55 % (1171/2000) ανήκουν στην κλάση $\{+\}$ (αποδεκτή ποιότητα) και το υπόλοιπο 41.45 % (829/2000) ανήκουν στην κλάση $\{-\}$ (μη αποδεκτή ποιότητα).

Τα σύνολα μέτρησης που καταλήγουν στον τερματικό κόμβο 7 είναι αποδεκτής ποιότητας (ο κόμβος 7 έχει δείκτη αποδοχής 99.91 %), ενώ τα σύνολα που καταλήγουν στον κόμβο 5 είναι μη αποδεκτής ποιότητας (δείκτη αποδοχής 36.45 %).

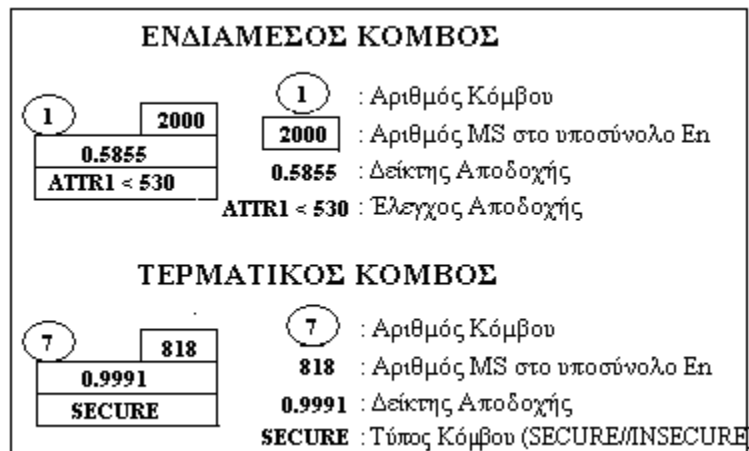
Με βάση το ΔΑ μπορούν να εξαχθούν τόσοι κανόνες, όσοι είναι και οι τερματικοί του κόμβοι. Έτσι, για το ΔΑ του σχήματος 1 εξάγονται 4 κανόνες με βάση τους οποίους μία λειτουργική κατάσταση του συστήματος είναι αποδεκτή ή όχι. Στον Πίνακα 4.1 καταγράφονται αυτοί οι κανόνες.

Πίνακας 4.1: Κανόνες του ΔΑ του Σχήματος 1

Κόμβος	Κανόνας
4	Αν $ATTR1 \leq 530$ και $ATTR2 \leq 293 \Rightarrow$ Αποδεκτός
5	Αν $ATTR1 \leq 530$ και $ATTR2 > 293 \Rightarrow$ Μη Αποδεκτός
6	Αν $ATTR1 > 530$ και $ATTR3 \leq 250 \Rightarrow$ Αποδεκτός
7	Αν $ATTR1 > 530$ και $ATTR3 > 250 \Rightarrow$ Μη Αποδεκτός

Σε περίπτωση που θέλουμε να ταξινομήσουμε ένα άγνωστο σύνολο μέτρησης, έστω το $MS=(ATTR1^*, ATTR2^*, ATTR3^*) = (600, 350, 206)$, ξεκινούμε από τη ρίζα του δέντρου. Επειδή $ATTR1^* > 530$ οδηγούμαστε στον κόμβο 3, όπου ελέγχεται η παράμετρος $ATTR3^*$. Επειδή $ATTR3^* < 250$, οδηγούμαστε στον κόμβο 6. Ο κόμβος 6 είναι τερματικός κόμβος με δείκτη αποδοχής 0.9248, δηλαδή το 92.48% των συνόλων μέτρησης που καταλήγουν στον κόμβο αυτό είναι αποδεκτά σημεία λειτουργίας. Επομένως, το $MS=(ATTR1^*, ATTR2^*, ATTR3^*) = (600, 350, 206)$ ταξινομείται ως αποδεκτό λειτουργικό σημείο του συστήματος.

Σχήμα 4.2: Συμβολισμός των κόμβων του ΔΑ



4.3 Αυτόματη Κατασκευή των Δένδρων Απόφασης

Για ένα δεδομένο σύνολο μάθησης, ο στόχος είναι η κατασκευή ενός σχεδόν βέλτιστου δένδρου απόφασης, με την έννοια ότι αυτό επιτυγχάνει μία καλή ισορροπία μεταξύ της πολυπλοκότητας και της ακρίβειας, δηλαδή μεταξύ του συνολικού αριθμού των κόμβων και της ικανότητας ταξινόμησης.

Ο τελικός στόχος της διαδικασίας κατασκευής είναι:

- Να επιλέξει τις κατάλληλες ιδιότητες ανάμεσα στις υποψήφιες (γενικά ο αριθμός των επιλεγμένων ιδιοτήτων είναι αρκετά μικρότερος από n , το συνολικό αριθμό των υποψηφίων ιδιοτήτων).
- Να κατασκευάσει το δένδρο απόφασης επί τη βάση αυτών των κατάλληλων ιδιοτήτων.

Αυτή η διαδικασία κατασκευής αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- i. Ξεκινώντας από τη ρίζα του δένδρου, με τη λίστα των υποψηφίων ιδιοτήτων και με το πλήρες σύνολο μάθησης, οι καταστάσεις μάθησης αναλύονται με σκοπό να επιλεγεί ένας έλεγχος ο οποίος οδηγεί σε μέγιστη αύξηση της καθαρότητας, ή ισοδύναμα, να περιέχει τη μέγιστη ποσότητα πληροφορίας ως προς τις ταξινομήσεις του. Η επιλογή γίνεται σε δύο στάδια:
 - a. Για κάθε ιδιότητα, έστω a_i , βρίσκει το βέλτιστο έλεγχο πάνω στις τιμές του, ερευνώντας εξονυχιστικά τις τιμές αυτής της υποψήφιας ιδιότητας για τις διαφορετικές καταστάσεις μάθησης. Στην περίπτωση των διαδοχικών αριθμητικών ιδιοτήτων, π.χ. συχνότητα συστήματος, το διάστημα τιμών που μπορεί να πάρει η κάθε ιδιότητα διακριτοποιείται σε ίσα βήματα. Το βήμα αυτό δίνει την βέλτιστη τιμή κατωφλίου u_{i*} , και προσδιορίζει τον έλεγχο
$$a_i < u_{i*} ?$$
 - b. Ανάμεσα στις διαφορετικές υποψήφιες ιδιότητες, επιλέγει την καλύτερη, a_* , μαζί με τη βέλτιστη τιμή της, u_{**} , για να διαχωρίσει το υποσύνολο που αντιστοιχεί στον κόμβο, π.χ. a_* μπορεί να είναι η εφεδρεία μίας μονάδας του Βασιλικού και u_{**} η βέλτιστη τιμή κατωφλίου 20MW.

Συμπερασματικά, το στάδιο α προσδιορίζει την βέλτιστη ιδιότητα και το στάδιο β τη βέλτιστη τιμή κατωφλιού.

- ii. Ο επιλεγμένος έλεγχος εφαρμόζεται στο σύνολο μάθησης του κόμβου και τον διαχωρίζει σε δύο υποσύνολα, που αντιστοιχούν στους δύο απογόνους του κόμβου. Ξεκινώντας με τη ρίζα του δένδρου και ολόκληρο το σύνολο μάθησης, τα δύο υποσύνολα

$$LS_1 = \{v_k \in LS \mid a_* < u_{**}\}$$

$$LS_2 = \{v_k \in LS \mid a_* \geq u_{**}\}$$

αντιστοιχούν στους δύο απογόνους της ρίζας του δένδρου.

- iii. Οι απόγονοι περιγράφονται ως τερματικοί ή ενδιάμεσοι κόμβοι επί τη βάση του κριτηρίου διακοπής διαχωρισμού.
- iv. Για τους ενδιάμεσους κόμβους, η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται αναδρομικά με σκοπό να κατασκευαστούν τα αντίστοιχα υποδένδρα.
- v. Για τους τερματικούς κόμβους, οι πιθανότητες των κλάσεων p_+ και p_- εκτιμώνται στη βάση του αντίστοιχου υποσυνόλου των καταστάσεων μάθησης, και στους τερματικούς κόμβους αποδίδεται η τάξη που πλειοψηφεί.

Επιλογή διαχωρισμών

Η δυσκολία του προβλήματος στην κατασκευή του ΔΑ βρίσκεται στην επιλογή των διαχωρισμών και στην απόφαση να θεωρηθεί ένας κόμβος τερματικός ή να συνεχίσει να διαχωρίζεται. Μία δημοφιλής μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επιλογή των κατάλληλων κριτηρίων διαχωρισμού και την βελτιστοποίηση του ελέγχου (6) βασίζεται στην εντροπία της πληροφορίας. Στη μέθοδο αυτή υπολογίζεται το κανονικοποιημένο κέρδος πληροφορίας του ελέγχου $C_c^T(E_n)$ μέσω της προγενέστερης εντροπίας ταξινόμησης H_c του E_n και της εντροπίας H_T του E_n σε σχέση με το διαχωρισμό που

προκαλείται από τον έλεγχο. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του C_c^T , τόσο πιο ενδιαφέρων είναι ο έλεγχος για το διαχωρισμό του κόμβου που αντιστοιχεί στο υποσύνολο E_n .

$$H_c(E_n) = -(f_s \log f_s + f_i \log f_i)$$

όπου f_s είναι η πιθανότητα μία τυχαία κατάσταση του συνόλου E_n να είναι ασφαλής και f_i η πιθανότητα να είναι μη ασφαλής.

Η εντροπία H_c είναι μέτρο της μη καθαρότητας ή της αβεβαιότητας της ταξινόμησης των πιθανών καταστάσεων του κάθε υποσυνόλου E_n

$$H_T(E_n) = -(f_y \log f_y + f_n \log f_n)$$

όπου f_y είναι η πιθανότητα ένα λειτουργικό σημείο του συνόλου E_n να είναι ασφαλής και f_n η πιθανότητα να είναι μη ασφαλής.

Η εντροπία H_T είναι ένας δείκτης του μέτρου της αβεβαιότητας του ελέγχου και έχει παρόμοιες ιδιότητες με τη H_c .

Το κανονικοποιημένο κέρδος της πληροφορίας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_c^T(E_n) = \frac{2I_c^T(E_n)}{H_T(E_n) + H_c(E_n)}$$

όπου το είναι ένα μέτρο της ικανότητας του ελέγχου να παράγει καθαρούς απογόνους

$$I_c^T(E_n) = H_c(E_n) - H_T(E_n)$$

Μία πιο λεπτομερή ανάλυση της μεθόδου περιγράφεται στις [20],[21].

Μέθοδος διακοπής διαχωρισμού

Ο διαχωρισμός ενός κόμβου σταματάει αν ισχύει μία από τις παρακάτω δύο συνθήκες:

1. Το τοπικό υποσύνολο των καταστάσεων μάθησης είναι επαρκώς καθαρό (δηλαδή οι καταστάσεις του ανήκουν ως επί το πλείστον σε μία από τις δύο κλάσεις). Ένας τέτοιος τερματικός κόμβος αποκαλείται “φύλλο” (“leaf”). Ο βαθμός της καθαρότητας της κλάσης που απαιτείται για τα φύλλα είναι μία παράμετρος για τον αλγόριθμο και ορίζει το ποσόν της λεπτομέρειας που θέλουμε να εκφράζει το ΔΑ.
2. Δεν υπάρχει πιθανότητα για αύξηση της ακρίβειας του ΔΑ με ένα στατιστικά σημαντικό τρόπο διαχωρίζοντας περαιτέρω αυτό τον κόμβο. Δηλαδή, με δεδομένο το βέλτιστο διχοτομικό διαχωρισμό αυτού του κόμβου, δεν υπάρχει αρκετή απόδειξη στο τοπικό υποσύνολο μάθησης, ότι αυτός ο έλεγχος θα μπορούσε πραγματικά να βελτιώσει τη συμπεριφορά του ΔΑ. Ένας τέτοιος κόμβος αποκαλείται στη συνέχεια “αδιέξοδος” (“deadend”) κόμβος. Αυτό το δεύτερο κριτήριο προστατεύει από τη κατασκευή μη αναγκαία περίπλοκων ΔΑ.

Πιο λεπτομερή ανάλυση της μεθόδου περιγράφεται στην [19].

Δημιουργία Βάσης Γνώσης

Τα Δ.Α χρειάζονται ένα σύνολο μάθησης με το οποίο θα εκπαιδευτούν ώστε να εξαχθούν οι κανόνες αποκοπής φορτίου. Το σύνολο αυτό μάθησης το παράγουμε προσομοιώνοντας το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις με τη βοήθεια του προγράμματος EUROSTAG.

Συγκεκριμένα επιλύεται η ροή φορτίου για διάφορες φορτίσεις και σχήματα παραγωγής και έπειτα προσομοιώνεται η διαταραχή (στη παρούσα διπλωματική εργασία η διαταραχή ορίζεται πάντοτε ως η απώλεια του Ατμοστροβίλου¹ του Βασιλικού). Έπειτα, λαμβάνονται οι τιμές της συχνότητας για κάθε λειτουργικό σημείο και στην συνέχεια, ανάλογα με την τιμή της συχνότητας μετά την διαταραχή, τα λειτουργικά σημεία διαχωρίζονται σε ανασφαλή και ασφαλή.

Οι υποψήφιες ιδιότητες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση των δένδρων απόφασης είναι η παραγωγή και η εφεδρεία των γεννητριών, το φορτίο του και η αιολική παραγωγή.

Σε αυτή τη μελέτη, στους τερματικούς κόμβους καταλήγουν λειτουργικές καταστάσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν στην πλειοψηφία τους μόνο αποδεκτές ή μη αποδεκτές καταστάσεις από πλευράς συχνοτήτων μετά την διαταραχή . Ανάλογα με τη περίπτωση που εξετάζεται και την επιτυχία της εκλογής των κατάλληλων κριτηρίων διαχωρισμού, οι τερματικοί κόμβοι περιλαμβάνουν ιδανικά αποκλειστικά αποδεκτές ή μη αποδεκτές καταστάσεις. Έτσι ο χειριστής ενός συστήματος μπορεί να εξετάσει σε “πραγματικό” χρόνο, την πιθανότητα η κατάσταση του συστήματος του να είναι αποδεκτή ή μη αποδεκτή σε περίπτωση των προεπιλεγμένων διαταραχών από την απλή σύγκριση λίγων τιμών που αντιπροσωπεύουν την κατάσταση με τις τιμές των κατωφλίων τους ή αλλιώς από την εξέταση μερικών απλών κανόνων “εάν.....τότε.....αλλιώς”.

5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΗΕ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ EUROSTAG

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή κάποιων κανόνων μέσω των οποίων ο ΔΣΜ να καθορίσει τη στρεφόμενη εφεδρεία που απαιτείται ώστε να διατηρείται η συχνότητα του συστήματος εντός ορίων μετά από μία διαταραχή. Η εξαγωγή των κανόνων γίνεται με την μεθοδολογία των Δέντρων Απόφασης όπως περιγράφεται αναλυτικά στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η βάση γνώσης που χρησιμοποιείται στα ΔΑ δημιουργείται με χρήση του λογισμικού **Eurostag**, το οποίο προσομοιώνει δυναμικά το ηλεκτρικό σύστημα της Κύπρου υπό την παρουσία διαταραχής.

5.1 Περιγραφή Eurostag

Με σκοπό την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των επενδύσεων και να ελαχιστοποιήσουν τα λειτουργικά κόστη, τόσο οι σχεδιαστές, όσο και οι ΔΣΜ ενός συστήματος και στην προκειμένη περίπτωση ενός ΣΗΕ, θα πρέπει να διαθέτουν ένα απαραίτητο λογισμικό πακέτο, ώστε με ταχύτητα και αξιοπιστία να είναι σε θέση να μπορούν να παράγουν τα κατάλληλα μοντέλα και προσομοιώσεις.

Το μοντέλο προσομοίωσης Eurostag, είναι ένα προϊόν που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Electricite de France & Tractebel, με σκοπό να πληροί τις πιο πάνω προϋποθέσεις. Το Eurostag είναι ένα καινοτόμο λογισμικό, με μεγάλες δυνατότητες και επιπλέον, είναι αρκετά φιλικό προς τον χρήστη. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του Eurostag.

5.1.1 Λειτουργία του Eurostag

Ανεξαρτήτως από το είδος της διαταραχής που παρατηρείται και το μέγεθος του ηλεκτρικού συστήματος, το Eurostag απεικονίζει τη συμπεριφορά του συστήματος μέχρι αυτό να επιστρέψει σε κατάσταση ευστάθειας. Ωστόσο, η ολοκληρωμένη προσομοίωση δεν οδηγεί σε οποιαδήποτε συμπεράσματα σχετικά με την ασφάλεια του συστήματος, αλλά παράγει μία βάση γνώσης η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια από τα ΔΑ για την εξαγωγή κανόνων που να διέπουν την ασφάλεια του συστήματος.

Ως αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται από το λογισμικό δημιουργεί ένα αυτοματοποιημένο έλεγχο, ο οποίος πληροί τα κριτήρια ακρίβειας που καθορίζονται από τον χρήστη. Με αυτό το τρόπο είναι εφικτή, μέσω της προσομοίωσης, η δημιουργία ενός πλήρους μοντέλου του συστήματος και η παρουσίαση της συσχέτισης μεταξύ των δυναμικών φαινομένων.

Επίσης, το λογισμικό του Eurostag είναι φιλικό προς τον χρήστη, επειδή του παρέχει τη δυνατότητα της γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων, αποφεύγοντας έτσι το κίνδυνο που επιφέρει η μεταφορά δεδομένων σε άλλο πρόγραμμα για δημιουργία των ζητούμενων διαγραμμάτων.

5.1.2 Εφαρμογές του Eurostag

Η χρήση του Eurostag, δίνει την δυνατότητα για ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Μία από αυτές τις εφαρμογές είναι ότι επιτρέπει την μελέτη μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, για μεγάλες χρονικές περιόδους, χωρίς την ανάγκη αλλαγής του αρχικού μοντέλου του συστήματος. Πιο κάτω παρατίθενται μερικά τυπικά παραδείγματα της χρήσης του Eurostag , που αφορούν την μελέτη ενός ΣΗΕ:

- Έλεγχος της διατήρησης του συγχρονισμού, μετά από διάφορες διαταραχές.
- Διαμόρφωση στρατηγικών σε περίπτωση απόρριψης φορτίου.
- Εύρεση του χρόνου κατά τον οποίο γίνεται η κρίσιμη διαταραχή.
- Ανάλυση της συμπεριφοράς του δικτύου, κάτω από ακραίες ή έκτακτες συνθήκες, όπως η κατάρρευση τάσης , η απώλεια συγχρονισμού κ.α.
- Ανάλυση επικίνδυνων απροόπτων όταν το σύστημα λειτουργεί υπό ασταθείς συνθήκες (προληπτική ασφάλεια).

- Μελέτη της δυναμικής ευστάθειας των μηχανών με την δυνατότητα ρυθμίσεων, καθώς και προσαρμογή του συστήματος μετάδοσης τους, γύρω από συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο του συστήματος.
- Σχεδιασμός και ρύθμιση των τοπικών συστημάτων ελέγχου (ρυθμιστές στροφών GOV και τάσης AVR, καθώς και έλεγχος των λήψεων των μετασχηματιστών TAPS).
- Σχεδιασμός και καθορισμός των συστημάτων προστασίας σταθμών παραγωγής και δικτύων διανομής.

5.1.3 Τεχνικές Προδιαγραφές

Βασισμένο σε ένα αλγόριθμο μεταβλητού χρονικά βήματος, το Eurostag είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την μελέτη βραχυπρόθεσμων, αλλά και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Με αυτό το τρόπο, μελέτες μεταβατικής ευστάθειας (φαινόμενα που διαρκούν από μερικά msec έως μερικά sec), καθώς και μακροπρόθεσμες δυναμικές μελέτες (αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποιες ώρες), καλύπτονται από την ίδια προσομοίωση.

Το Eurostag χωρίζεται στα πέντε βασικά μέρη ως ακολούθως:

- Από ένα πρόγραμμα ροής φορτίου, τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται ως σημείο εκκίνησης για την προσομοίωση.
- Από ένα διαδραστικό προσομοιωτή, που επιτρέπει στον χρήστη να απεικονίσει τις διάφορες μεταβλητές και να επεμβαίνει στη διαδικασία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.
- Από ένα γραφικό προ-επεξεργαστή, ο οποίος επιτρέπει την εισαγωγή νέων μοντέλων χρησιμοποιώντας μπλοκ διαγράμματα
- Από ένα γραφικό προ-επεξεργαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μετά το πέρας της προσομοίωσης.
- Από ένα τμήμα για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, μέσω παραμετρικού προσδιορισμού φίλτρων και δημιουργίας πινάκων.

Το Eurostag είναι γραμμένο σε Fortran 77 και σε C , και εγκαθίσταται σε σταθμούς εργασίας με UNIX, καθώς και σε προσωπικούς Η/Υ με λειτουργικό σύστημα WINDOWS.

Μοντελοποίηση του συστήματος και των δεδομένων

Η μοντελοποίηση παραμένει αναλλοίωτη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ανεξαρτήτως των φαινομένων που διαδραματίζονται. Το μοντέλο του Eurostag, αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Δίκτυο: Το Eurostag χρησιμοποιεί είτε μονογραμμική, είτε τριφασική αναπαράσταση του ηλεκτρικού δικτύου. Οι κόμβοι τάσεων διέπονται από την αλγεβρική εξίσωση $I=YU$, στην οποία U είναι το διάνυσμα των τάσεων των κόμβων, I το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται στους κόμβους και Y είναι η μήτρα αγωγιμότητας του δικτύου. Τα φορτία του συστήματος αναπαριστώνται από μία μη γραμμική εξίσωση, που καθορίζονται από το πρόγραμμα ροής φορτίου.
- Γεννήτριες: Οι σύγχρονες μηχανές περιγράφονται από τις κλασικές εξισώσεις του Park, στις οποίες ο δρομέας των μηχανών αναπαριστάται από τέσσερα ισοδύναμα ελίγματα. Μοντελοποιείται επίσης ο μαγνητικός κορεσμός και στους δύο άξονες. Αναφορικά με την μηχανική κίνηση των γεννητριών, οι κινήσεις του δρομέα καθορίζονται από την εξίσωση στρεφομένων μαζών, που συνδέει τη διαφορά ανάμεσα σε μηχανική και ηλεκτρική ροπή μέσω της μεταβολής της ταχύτητα περιστροφής.
Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας καθορίζονται “εξωτερικά” (αντιδράσεις και σταθερές χρόνου) ή “εσωτερικά” (αμοιβαίες επαγωγές και αντιστάσεις), ανάλογα με την επιλογή του χρήστη.
- Μηχανές Επαγωγής: Υπάρχουν δύο είδη μηχανών επαγωγής, το ένα μοντέλο ονομάζεται πλήρες μοντέλο (κυκλώματος δρομέα διπλού κλωβού), ενώ το άλλο αναφέρεται ως απλοποιημένο μοντέλο.
- Μετασχηματιστές: Υπάρχουν διάφοροι τύποι που χρησιμοποιούνται για τον απλό μετασχηματιστή όπως οι αυτομετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές με tap, αλλά και για πλήρη μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τις απώλειες σιδήρου και χαλκού, τον κορεσμό, τις τάσεις βραχυκύκλωσης και τους λόγους μετασχηματισμού.
- Γεγονότα: Αυτά είναι όλα τα επεισόδια, λειτουργίες και διαδικαστικές εντολές που λαμβάνουν χώρα κατά την προσομοίωση. Αυτά τα γεγονότα, μπορεί να είναι

προγραμματισμένα εκ των προτέρων ή να δημιουργούνται στο πρόγραμμα όταν ενεργοποιείται μια αυτόματη συσκευή ή να εισάγονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.

Μερικά από αυτά τα γεγονότα μπορεί να είναι:

- βραχυκυκλώματα
 - κλείσιμο γραμμών
 - επανένωση υποδικτύων
 - ένταξη γεννητριών
 - εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων
 - αλλαγή του ενεργού και αέργου φορτίου στους ζυγούς
 - απώλειες γεννητριών κ.α.
- Αυτόματες Συσκευές: Οι αντιδράσεις των αυτόματων συσκευών υπολογίζονται μετά από κάθε βήμα. Παρέχουν την δυνατότητα για δημιουργία γεγονότων όπως η απώλεια μίας γεννήτριας, το βραχυκύκλωμα σε κάποιο μέρος του δικτύου κ.α.
 - Macroblock: Ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τα δικά του μοντέλα (συστήματα ελέγχου, ρυθμιστές στροφών, ρυθμιστές τάσεως κ.τ.λ), μέσω ενός γραφικού προεπεξεργαστή, που χρησιμοποιεί απλουστευμένα στοιχεία ενός μπλοκ διαγράμματος. Αυτό ουσιαστικά , καταργεί την ανάγκη του προγραμματισμού σε Fortran. Τα προαναφερόμενα μοντέλα αποθηκεύονται σε ειδική βιβλιοθήκη , η οποία εξαρχής περιέχει και μερικά άλλα τυποποιημένα μοντέλα (IEEE , SVC , HVDC).

5.1.4 Περιγραφή Προσομοίωσης

Το Eurostag προσομοιώνει το ηλεκτρικό σύστημα και παράγει την ροή φορτίου όταν έχουμε μία διαταραχή. Τα δεδομένα που δημιουργούνται αποθηκεύονται υπό την μορφή των 3 ακόλουθων αρχείων:

- i. **.seq**: Περιλαμβάνει την διαταραχή που προκλήθηκε στο σύστημα, καθώς και τις παραμέτρους που ορίζουν την ακρίβεια της επαναληπτικής μεθόδου, που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.
- ii. **.dta**: Περιλαμβάνει τα δυναμικά δεδομένα του υπό εξέταση σεναρίου (ρυθμιστές στροφών και τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος, ρυθμιστές στροφών των ανεμογεννητριών σε περίπτωση που εντάσσεται στο σενάριο κ.λ.π)
- iii. **.ech**: Περιλαμβάνει την τοπολογία του δικτύου με τους ζυγούς τάσεων (και τις παραγόμενες ή καταναλισκόμενες ισχύς τους), τις γραμμές μεταφοράς του ρεύματος, τους μετασχηματιστές, τους πυκνωτές αντιστάθμισης, τα φορτία του συστήματος και τις σύγχρονες γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών. Οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων παρίστανται με την μορφή φορτίου, το οποίο απορροφά άεργο ισχύ και παρέχει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

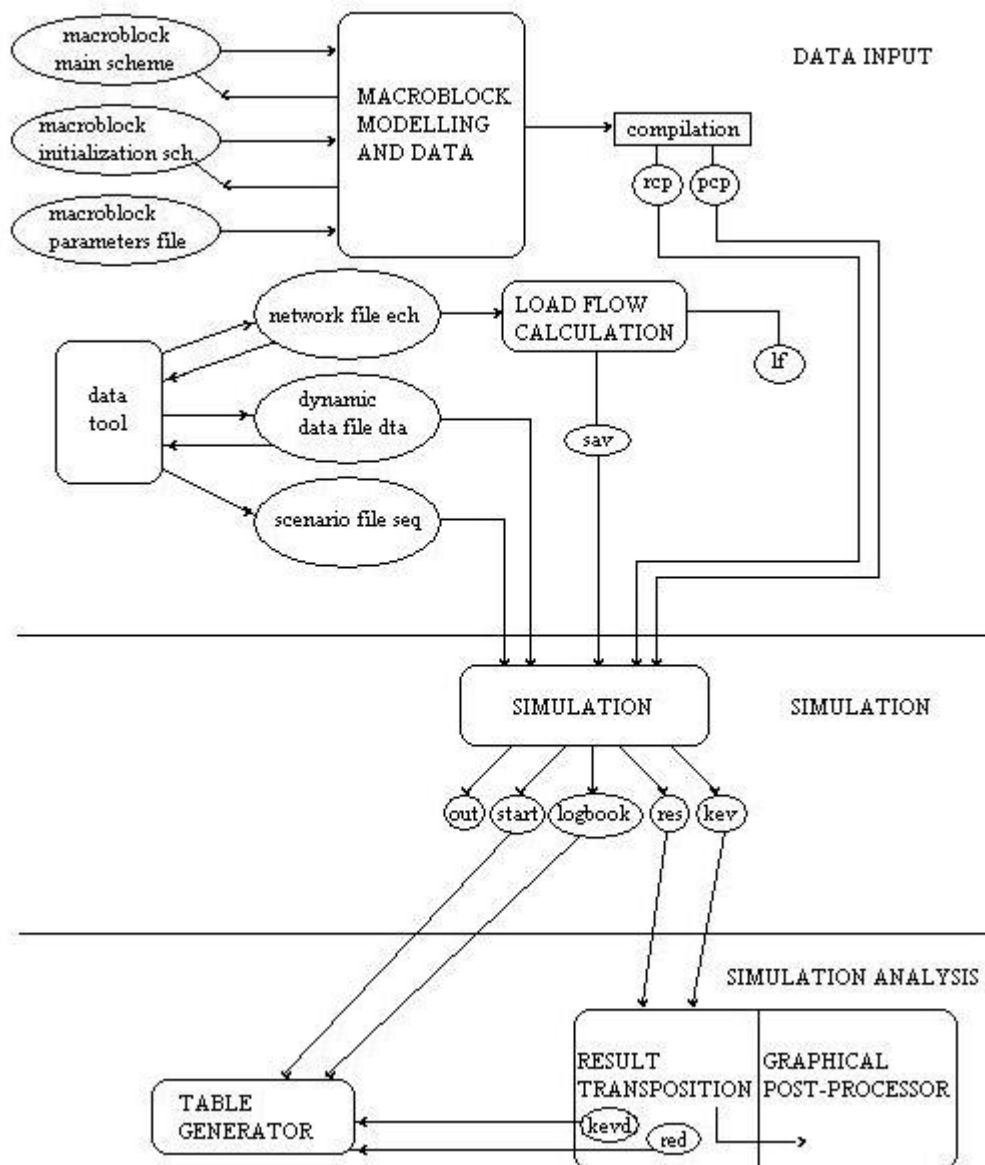
Από αυτά τα δεδομένα που υπάρχουν στο αρχείο **.ech** υπολογίζεται η ροή φορτίου και τα δεδομένα αποθηκεύονται σε 2 αρχεία. Το πρώτο είναι το αρχείο **.lf** το οποίο χρησιμοποιούμε στην συνέχεια για τους υπολογισμούς και το δεύτερο είναι το αρχείο **.sav** το οποίο προορίζεται για εσωτερική χρήση από το πρόγραμμα.

Στην συνέχεια το Eurostag, χρησιμοποιεί τα αρχεία **.sav**, **.dta** και **.seq**, λαμβάνοντας υπόψη και τα αρχεία **.rcp** και **.pcp**, για να προσομοιώσει την λειτουργία του συστήματος. Τα αρχεία **.rcp** και **.pcp**, δημιουργούνται μέσω του model editor (macroblock editor), αφού προηγουμένως γίνει μεταγλωττισμός (compilation) , των ρυθμιστών στροφών και τάσης.

Μετά το τέλος της προσομοίωσης , τα αποτελέσματα αποθηκεύονται στα αρχεία **.kevn** και **.res**, όπου στην συνέχεια επεξεργάζονται και αποθηκεύονται στα αρχεία **.kevd** και

.red. Τα αρχεία αυτά με την βοήθεια των αρχείων **.start** και **.logbook**, μπορούν να απεικονιστούν υπό μορφή διαγραμμάτων μέσω του γραφικού επεξεργαστή και υπό μορφή πινάκων μέσω του τμήματος δημιουργίας πινάκων. Στο αρχείο **.out** περιέχονται τα δυναμικά δεδομένα του αρχείου **.dta**, καθώς και μια περίληψη της προσομοίωσης, μαζί με τα μηνύματα σφαλμάτων, τα οποία τυγχάνει να συμβαίνουν κατά την εκτέλεση της επαναληπτικής μεθόδου.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται το απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα του Eurostag.



Σχήμα 5.1[1]: Λειτουργικό διάγραμμα Eurostag

5.2 Μοντελοποίηση του δικτύου της Κύπρου στο Eurostag

Σε αυτή την ενότητα, θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των στοιχείων, καθώς και των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου, όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση στο Eurostag..

Δίκτυο.

Το Eurostag χρησιμοποιεί είτε μονογραμμική, είτε τριφασική αναπαράσταση του δικτύου, με τους κόμβους των τάσεων να διέπονται από τις αλγεβρικές εξισώσεις $I=YU$, στις οποίες U αντιπροσωπεύει το διάνυσμα των τάσεων των κόμβων, I το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται στους κόμβους και Y είναι η μήτρα αγωγιμότητας του δικτύου. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, σε αυτή τη διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούμε μονογραμμική αναπαράσταση του δικτύου. Τα φορτία παριστάνονται από μια μη γραμμική εξίσωση, που είναι συνάρτηση της τάσης και της συχνότητας, όπως φαίνεται και από τις πιο κάτω σχέσεις:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^a \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^c$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^b \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^d$$

όπου:

P :η ενεργός ισχύς στον κάθε ζυγό.

P_0 :η ονομαστική ενεργός ισχύς του κάθε ζυγού.

Q :η άεργος ισχύς στον κάθε ζυγό.

Q_0 :η ονομαστική άεργος ισχύς του κάθε ζυγού.

U :η τάση του ζυγού του φορτίου.

U_0 :η ονομαστική τάση του ζυγού του φορτίου.

ω :η συχνότητα του δικτύου.

ω_0 :η ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

a, b, c, d : οι παράμετροι που καθορίζονται από τον τύπο του φορτίου.

Τα ονομαστικά μεγέθη των ενεργών και άεργων ισχύων, καθώς και των τάσεων των ζυγών στους οποίους συνδέονται τα φορτία, δηλώνονται στο αρχείο **.ech**, κατά την εισαγωγή των φορτίων στο σύστημα. Οι τιμές των παραμέτρων a , b , c και d που εισάγονται στο αρχείο **.dta**, αναγράφονται στον Πίνακα 5.2.1.

Πίνακας 5.2.1

Παράμετρος	Τιμή
a	1
b	2
c	1
d	0

Γεννήτριες.

Οι γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών της Κύπρου, είναι σύγχρονες μηχανές και συνεπώς περιγράφονται από τις κλασικές εξισώσεις του Park, με το δρομέα να παριστάνεται από τέσσερα ισοδύναμα ελίγματα. Μοντελοποιείται επίσης ο μαγνητικός κορεσμός και στους δύο άξονες, ενώ όσον αφορά τη μηχανική κίνηση των γεννητριών, οι κινήσεις του δρομέα καθορίζονται από την εξίσωση στρεφομένων μαζών, που συνδέει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και ηλεκτρική ροπή, με την μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής. Οι παράμετροι των γεννητριών που χρησιμοποιούνται στο Eurostag για την κάλυψη του συνολικού φορτίου, αναγράφονται στους Πίνακες 5.2.2-4[23].

Πίνακας 5.2.2.1: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Βασιλικού

Μονάδα	ID	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q
Ατμοστρόβιλος	S1	2.06	1.92	0.202	0.329	0.1595	0.164
Ατμοστρόβιλος	S2	2.06	1.92	0.202	0.329	0.1595	0.164
Ατμοστρόβιλος	S3	2.06	1.92	0.202	0.329	0.1595	0.164
Αεριοστρόβιλος	G1	2.22	2.08	0.213	-	-	-

Πίνακας 5.2.2.2: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Βασιλικού

Μονάδα	ID	T'_{do}	T''_{do}	T'_{qo}	T''_{qo}	H
Ατμοστρόβιλος	S1	9.00	0.057	1.000	0.095	4.20
Ατμοστρόβιλος	S2	9.00	0.057	1.000	0.095	4.20
Ατμοστρόβιλος	S3	9.00	0.057	1.000	0.095	4.20
Αεριοστρόβιλος	G1	5.43	-	-	-	6.06

Πίνακας 5.2.3.1: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Δεκέλειας

Μονάδα	ID	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q
Ατμοστρόβιλος	S1	1.87	1.840	0.223	0.245	0.144	0.144
Ατμοστρόβιλος	S2	1.87	1.863	0.223	0.245	0.144	0.144
Ατμοστρόβιλος	S3	1.84	1.710	0.265	0.290	0.190	0.190
Ατμοστρόβιλος	S4	1.84	1.710	0.265	0.290	0.190	0.190
Ατμοστρόβιλος	S5	1.75	1.586	0.274	0.377	0.222	0.222
Ατμοστρόβιλος	S6	1.75	1.586	0.274	0.377	0.222	0.222

Πίνακας 5.2.3.2: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Δεκέλειας

Μονάδα	ID	T'_{do}	T''_{do}	T'_{qo}	T''_{qo}	H
Ατμοστρόβιλος	S1	7.41	0.038	3.230	0.038	3.30
Ατμοστρόβιλος	S2	7.51	0.038	3.270	0.038	3.30
Ατμοστρόβιλος	S3	7.50	0.036	0.421	0.089	4.06
Ατμοστρόβιλος	S4	7.50	0.036	0.421	0.089	4.06
Ατμοστρόβιλος	S5	7.80	0.023	0.421	0.059	4.00
Ατμοστρόβιλος	S6	7.80	0.023	0.421	0.059	4.00

Πίνακας 5.2.4.1: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Μονής

Μονάδα	ID	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q
Αεριοστρόβιλος	G1	2.22	2.08	0.213	-	-	-
Αεριοστρόβιλος	G2	2.22	2.08	0.213	-	-	-
Αεριοστρόβιλος	G3	2.22	2.08	0.213	-	-	-
Αεριοστρόβιλος	G4	2.22	2.08	0.213	-	-	-
Ατμοστρόβιλος	S1	2.13	1.94	0.185	0.203	0.1305	0.126
Ατμοστρόβιλος	S2	2.04	1.94	0.186	0.205	0.1320	0.136
Ατμοστρόβιλος	S3	2.08	1.98	0.179	0.197	0.1290	0.133
Ατμοστρόβιλος	S4	1.80	1.71	0.202	0.222	0.1560	0.161
Ατμοστρόβιλος	S5	1.76	1.67	0.195	0.215	0.1530	0.161
Ατμοστρόβιλος	S6	1.74	1.65	0.194	0.213	0.1550	0.164

Πίνακας 5.2.4.2: Παράμετροι Μονάδων Σταθμού Μονής

Μονάδα	ID	T'_{do}	T''_{do}	T'_{qo}	T''_{qo}	H
Αεριοστρόβιλος	G1	5.43	-	-	-	6.06
Αεριοστρόβιλος	G2	5.43	-	-	-	6.06
Αεριοστρόβιλος	G3	5.43	-	-	-	6.06
Αεριοστρόβιλος	G4	5.43	-	-	-	6.06
Ατμοστρόβιλος	S1	9.00	0.029	4.00	0.028	5.49
Ατμοστρόβιλος	S2	9.21	0.029	4.00	0.029	5.49
Ατμοστρόβιλος	S3	9.52	0.029	4.12	0.030	5.49
Ατμοστρόβιλος	S4	8.87	0.029	3.85	0.029	4.84
Ατμοστρόβιλος	S5	8.50	0.030	3.65	0.030	4.84
Ατμοστρόβιλος	S6	9.00	0.030	3.87	0.030	4.84

όπου:

X_d : η επαγωγική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον ευθύ άξονα .

X_q : η επαγωγική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον εγκάρσιο άξονα .

X'_d : η μεταβατική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον ευθύ άξονα .

X'_q : η μεταβατική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον εγκάρσιο άξονα .

X''_d : η υπομεταβατική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον ευθύ άξονα .

X''_q : η υπομεταβατική αντίδραση μόνιμης κατάστασης στον εγκάρσιο άξονα .

T'_{do} : η μεταβατική χρονική σταθερά στον ευθύ άξονα.

T'_{qo} : η μεταβατική χρονική σταθερά στον εγκάρσιο άξονα.

T''_{do} : η υπομεταβατική χρονική σταθερά στον ευθύ άξονα.

T''_{qo} : η υπομεταβατική χρονική σταθερά στον εγκάρσιο άξονα.

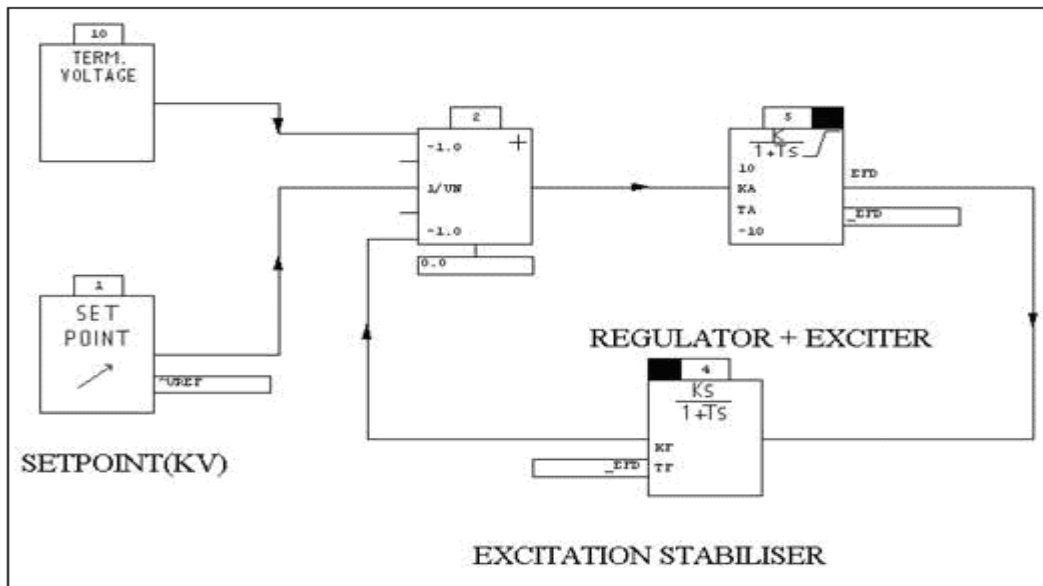
H : η αδρανειακή σταθερά

Παρατηρήσεις

- οι Αεριοστρόβιλοι παριστάνονται με το απλοποιημένο μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας, γι' αυτό δεν αναφέρονται οι παράμετροι X'_q , X''_d , X''_q , T'_{do} , T'_{qo} και T''_{qo} .
- Για τους Αεριοστρόβιλους της Μονής και τους δύο πρώτους Αεριοστρόβιλους της Δεκέλειας (S1 & S2):
 - ο Οι τιμές της παραμέτρου T'_{qo} είναι έξω από τα τυπικά όρια 0.2 έως 1.5 sec
 - ο Οι τιμές των παραμέτρων T''_{do} και T''_{qo} είναι έξω από τα τυπικά όρια 0.04 έως 0.2 sec
- Για τους 4 τελευταίους Αεριοστρόβιλους της Δεκέλειας (S3-S6):
 - ο Οι τιμές της παραμέτρου T''_{do} είναι έξω από τα τυπικά όρια 0.02 έως 0.2 sec

Ρυθμιστές Τάσης

Οι ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί της Μονής, της Δεκέλειας και του Βασιλικού, χρησιμοποιούν πανομοιότυπους ρυθμιστές τάσης στις σύγχρονες γεννήτριες τους. Η μοντελοποίηση των ρυθμιστών τάσης στο Eurostag έγινε με την μορφή μπλοκ διαγραμμάτων, στο Σχήμα απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή τάσης.



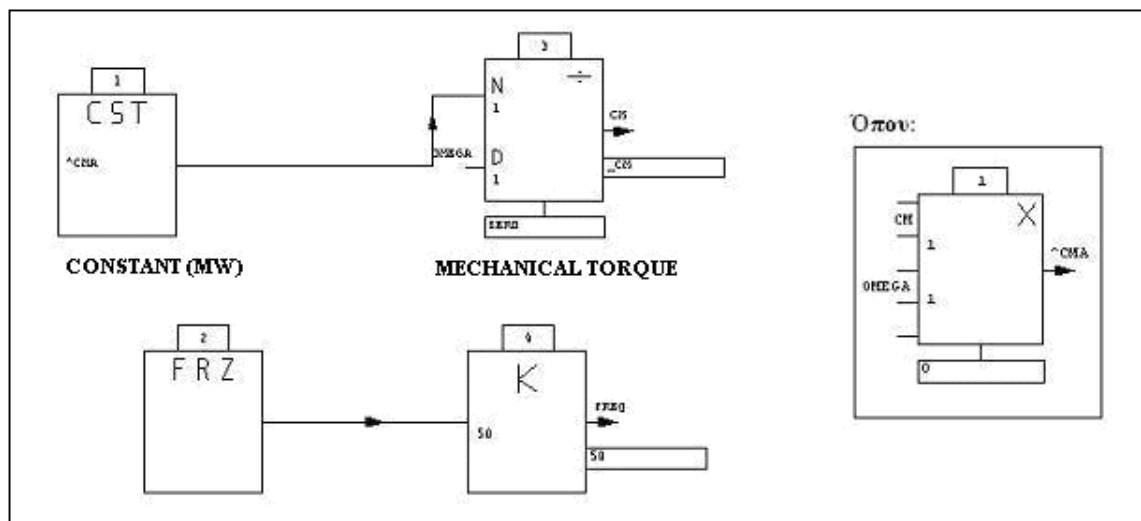
Σχήμα5.2.1: Μπλοκ διάγραμμα Ρεθιστώ Τάσης

Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων μοντελοποιούνται στο Eurostag ως ασύγχρονες γεννήτριες. Για την εισαγωγή τους στο αρχείο wcyprusn.ech, αρχικά υπολογίζεται η παραγωγή των γεννητριών και στην συνέχεια υπολογίζεται η αεργός και η ενεργός ισχύς τους. Τα δεδομένα αυτά εισάγονται υπό μορφή φορτίου στο αρχείο wcyprus.ech, από όπου θα γίνει ο υπολογισμός της ροής φορτίου. Η ενεργός ισχύς των Α/Π έχει αρνητική τιμή (απόδοση ενέργειας στο σύστημα), ενώ η αεργός ισχύς έχει θετική τιμή (απορρόφηση ενέργειας απο το σύστημα). Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η εξής: $Q_{wind} = 0,6P_{wind}$.

Στο αρχείο wcyprus.dta, η Α/Γ μοντελοποιείται ως μηχανή επαγωγής και εισάγονται τα δυναμικά τους χαρακτηριστικά.

Για την διατήρηση της συχνότητας στο δίκτυο, χρησιμοποιήσαμε ρυθμιστές στροφών. Η μοντελοποίηση των ρυθμιστών στροφών των Α/Π στο Eurostag έγινε, όπως και για τους υπόλοιπους ρυθμιστές, με την μορφή μπλοκ διαγραμμάτων. Στο Σχήμα απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή στροφών της Α/Γ.



Σχήμα 5.2.4: Μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή στροφών της Α/Γ.

Μετασχηματιστές.

Στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου, χρησιμοποιούνται κυρίως μετασχηματιστές με taps , με πλήρη μοντέλα που περιλαμβάνουν απώλειες σιδήρου, χαλκού , καθώς και τον μαγνητικό κορεσμό.

Για την σύνδεση των γεννητριών των τριών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών στο σύστημα, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ανύψωσης μέσης τάσης (11 με 22 KV), στην υψηλή τάση (66 με 132 KV).

Τέλος, για την σύνδεση των αιολικών πάρκων στο σύστημα, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές με λόγο μετασχηματισμού 0.4 KV / 11 KV, για την ανύψωση της τάσης λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε μέση τάση και ακολούθως μετασχηματιστές με λόγο μετασχηματισμού 11 KV / 132 KV, για την ανύψωση σε ψηλή τάση, με την οποία γίνεται κατά κύριο λόγο η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο.

Πυκνωτές Αντιστάθμισης.

Στους ζυγούς του συστήματος στους οποίους έχουμε τοποθετήσει τα αιολικά πάρκα που δόθηκαν, χρησιμοποιούμε πυκνωτές αντιστάθμισης της αέργου ισχύος. Οι πυκνωτές αυτοί δηλώνονται στο αρχείο wcyprus.ech, με την άεργο ισχύ Q_{cap} που παρέχουν στο σύστημα. Η τιμή της αέργου ισχύος του κάθε πυκνωτή στο κάθε Πάρκο, σχετίζεται με την ικανότητα αιολικής παραγωγής P_{wind} των Α/Γ. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με την ακόλουθη σχέση: $Q_{cap} = 0,4 \cdot P_{wind}$

6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΓΝΩΣΗΣ

Όπως αναλύεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο που αναφέρεται στα Δένδρα Απόφασης, για να εξαχθούν οι κανόνες για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος απαιτείται η δημιουργία μιας βάσης γνώσης, η οποία δημιουργείται από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος. Η Βάση Γνώσης που προκύπτει χωρίζεται στην συνέχεια σε δύο τυχαία υποσύνολα, το υποσύνολο εκπαίδευσης (learning set), που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του Δένδρου, και το υποσύνολο ελέγχου (testing set), που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της επίδοσης του.

Η Βάση Γνώσης αποτελείται από 8760 και 24000 λειτουργικά σημεία που καλύπτουν αντίστοιχα το εξεταζόμενο σενάριο. Συγκεκριμένα, εξετάζονται τα 2 ακόλουθα σενάρια:

- Σενάριο 1: Λειτουργία του συστήματος με Αιολική Παραγωγή συνολικής ισχύος 389.6 MW
- Σενάριο 2: Λειτουργία του συστήματος χωρίς Αιολική Παραγωγή.

Για τη δημιουργία της Βάσης Γνώσης μέσω της οποίας θα γίνει η εξαγωγή των λειτουργικών σημείων ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογισμός της παραγωγής των γεννητριών και της αιολικής παραγωγής.
2. Επίλυση Ροής Φορτίου.
3. Προσομοίωση της διαταραχής.
4. Καταγραφή των συχνοτήτων μετά τη διαταραχή.

Για τον υπολογισμό του φορτίου το οποίο πρέπει να καλυφθεί από το σύστημα βασιζόμαστε σε μία χρονοσειρά η οποία περιέχει την ζήτηση φορτίου για το 2005. Η διαταραχή που προσομοιώνεται κάθε φορά είναι η απώλεια του σταθμού Βασιλικός 1. Η διαταραχή αυτή, μπορεί να οδηγήσει σε πολύ χαμηλές της συχνότητας με δυσμενείς συνέπειες για την ασφάλεια και την ευστάθεια του συστήματος.

Στις επόμενες υποενότητες γίνεται μία περιληπτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός για την παραγωγή των γεννητριών και την αιολική παραγωγή, αλλά και η μέθοδος για την εξαγωγή των τιμών της συχνότητας για κάθε λειτουργικό σημείο του συστήματος, με τη χρήση του λογισμικού του Eurostag. Στην περίπτωση του υπολογισμού της αιολικής παραγωγής και της παραγωγής των γεννητριών, ο υπολογισμός γίνεται με βάση μία χρονοσειρά που περιλαμβάνει τη ζήτηση του φορτίου ανά ώρα που πρέπει να καλυφθεί. Σε περίπτωση που το σενάριο δεν προβλέπει αιολική διείσδυση, τότε το φορτίο καλύπτεται εξ ολοκλήρου από την παραγωγή των συμβατικών γεννητριών

6.1 Υπολογισμός Παραγωγής Γεννητριών

Το ποσό του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί από τις γεννήτριες ορίζεται ως η διαφορά της ζήτησης φορτίου από την δυνατότητα αιολικής παραγωγής. Στον Πίνακα 6.1 αναγράφονται κατά σειρά, η σειρά ένταξης στο σύστημα, ο σταθμός παραγωγής, το είδος της μονάδας και οι αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων της ελάχιστης παραγωγής (τεχνικό ελάχιστο), της μέγιστης συνεχούς λειτουργίας και της μέγιστης παραγωγής (τεχνικό μέγιστο) των γεννητριών.

Πίνακας 6.1

Σειρά Ένταξης	Σταθμός Παραγωγής	Είδος Μονάδας	Τεχνικό Ελάχιστο P_{min}^{tech} [MW]	Μέγιστη Συνεχής Λειτουργία P_{max}^{tech} [MW]	Τεχνικό Μέγιστο P_{max} [MW]
*	Βασιλικός	Ατμοστρόβιλος	60	119.6	130
*	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
*	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
1	Βασιλικός	Ατμοστρόβιλος	60	119.6	130
2	Βασιλικός	Ατμοστρόβιλος	60	119.6	130
3	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
4	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
5	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
6	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
7	Δεκέλειας	Ατμοστρόβιλος	30	55.2	60
8	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
9	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
10	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
11	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
12	Μονής	Ατμοστρόβιλος	18	27.6	30
13	Μονής	Αεριοστρόβιλος	4	34.5	37.5
14	Μονής	Αεριοστρόβιλος	4	34.5	37.5
15	Μονής	Αεριοστρόβιλος	4	34.5	37.5
16	Μονής	Αεριοστρόβιλος	4	34.5	37.5
17	Βασιλικός	Αεριοστρόβιλος	4	34.5	37.5

Ποιό κάτω καταγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά που διέπουν την διαδικασία για τον προσδιορισμό της κατανομής του φορτίου στις γεννήτριες του συστήματος:

- Για λόγους ασφαλείας και ανεξαρτήτως φορτίου, στο σύστημα είναι πάντα ενταγμένη μια μονάδα από κάθε σταθμό, έστω και αν αυτή η μονάδα λειτουργεί στο τεχνικό της ελάχιστο.
- Ο σχεδιασμός της σειράς ένταξης των μονάδων στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής. Σε κάθε κύκλο, και εφόσον το φορτίο δεν έχει καλυφθεί, εντάσσουμε κατά σειρά τις ακόλουθες μονάδες. Στην αρχή, εκτός των 3 μονάδων που προαναφέραμε, εντάσσονται οι υπόλοιποι Ατμοστρόβιλοι του Βασιλικού που έχουν το μικρότερο λειτουργικό κόστος και ακολουθούν κατά σειρά οι 5 Ατμοστρόβιλοι της Δεκέλειας, οι 5 Ατμοστρόβιλοι της Μονής, οι 4 Αεριοστρόβιλοι της Μονής και ο Αεριοστρόβιλος του Βασιλικού.
- Κατά την κατανομή της παραγωγής, το ανώτατο επίπεδο παραγωγής της κάθε μονάδας ορίζεται από το τεχνικό μέγιστο. Σε περίπτωση όμως, που και μετά την ένταξη και της τελευταίας μονάδας (Αεριοστρόβιλος του Βασιλικού) υπάρχει ποσότητα φορτίου που δεν έχει καλυφθεί, τότε ανακατανέμεται αυτή η ποσότητα στις γεννήτριες μεγιστοποιώντας την παραγωγή τους.

- Η μέγιστη παραγωγή σε συνεχή λειτουργία $P_{\max}^{tech}$ ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{\max}^{tech} = 0.92 \times P_{\max} \text{ όπου}$$

$P_{\max}$: η μέγιστη ικανότητα παραγωγής της κάθε γεννήτριας

- Σε περίπτωση που αναγκαστικά, λόγω εφεδρείας, οι γεννήτριες παράγουν περισσότερη ισχύ από όση απαιτεί το φορτίο, τότε, για λόγους ασφαλείας, απορρίπτεται αιολική παραγωγή.
- Ανάμεσα στους 3 Ατμοστρόβιλους του Βασιλικού γίνεται ανακατανομή του φορτίου, ώστε κάθε ώρα να παράγουν την ίδια ισχύ.
- Η ελάχιστη ποσότητα εφεδρείας $P_{\min}^{reserve}$ που κρατείται σε κάθε κύκλο ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{\min}^{reserve} = a \times P_{G \max} \text{ όπου}$$

a : μία τυχαία μεταβλητή που ανήκει στο διάστημα $[0.5, 1.5]$

$P_{G \max}$: η μέγιστη παραγωγή της μεγαλύτερης γεννήτριας που είναι ενταγμένη στο σύστημα (Ατμοστρόβιλος Βασιλικού).

6.2 Υπολογισμός Παραγωγής Ανεμογεννητριών

Στο σύστημα εντάσσονται συνολικά 13 Αιολικά Πάρκα. Όπως, προαναφέρθηκε η αιολική παραγωγή απορροφάται πάντοτε από το σύστημα, εκτός από την περίπτωση που έχουμε μικρή ζήτηση φορτίου, οπότε για να διατηρείται η αξιοπιστία του συστήματος (διατήρηση επαρκούς εφεδρείας), απορρίπτουμε αιολική παραγωγή. Η αιολική διείσδυση είναι ανάλογη με την ικανότητα παραγωγής των Ανεμογεννητριών και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και τα ονομαστικά μεγέθη των γεννητριών.

Ποιό κάτω περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της Αιολικής Παραγωγής:

- Αρχικά, γίνεται κανονικοποίηση των τιμών του ανέμου που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της αιολικής παραγωγής. Η κανονικοποίηση αυτή γίνεται για να έχουμε μία πιο αντιπροσωπευτική τιμή για την μεταβλητή του ανέμου. Οι τιμές που χρησιμοποιούμε είναι από μετρήσεις του ανέμου που έγιναν στις περιοχές που θα κατασκευαστούν τα υποψήφια Πάρκα. Η κανονικοποίηση γίνεται με βάση την κανονική κατανομή και για διασπορά ίση με $\sigma = 0.14$.
- Στην συνέχεια, γίνεται αναγωγή των τιμών του ανέμου ανάλογα με το ύψος της έλικας των Α/Γ του Πάρκου και σύμφωνα με την σχέση:

$$U_z = U_h \left(\frac{z}{h} \right)^a \quad \text{όπου:}$$

h : το ύψος που διεξήχθη η μέτρηση

z : το ύψος της έλικας της Α/Γ

U_h : ταχύτητα του ανέμου στο ύψος που διεξήχθη η μέτρηση

U_z : ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του έλικα της Α/Γ

a : σταθερά που εξαρτάται από το είδος του εδάφους

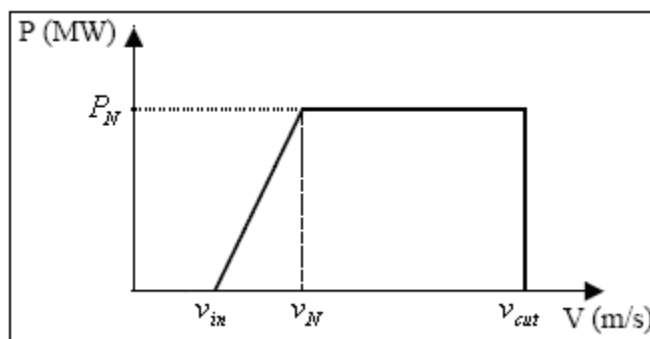
$\Rightarrow$ για χαμηλό χόρτο $a=0.13$

- Αφού έγινε μοντελοποίηση των τιμών του ανέμου, το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της αιολικής παραγωγής του κάθε πάρκου. Για τον υπολογισμό, εκτός από την μεταβλητή του ανέμου, χρειαζόμαστε επίσης την ονομαστική ισχύ για το κάθε πάρκο P_N , την ταχύτητα εκκίνησης v_{in} , την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας v_N και την ταχύτητα αποκοπής v_{cut} . Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται οι αντίστοιχες τιμές για τα αιολικά πάρκα, ενώ στο Σχήμα 6.1 απεικονίζεται η Καμπύλη Ισχύος μίας Α/Γ σταθερών στροφών.

Πίνακας 6.2

Πάρκο	v_{in} [m/s]	v_N [m/s]	v_{cut} [m/s]	P_N [MW]
1	3	14	22	12
2	3	14	22	34.5
3	3	13	28	9.6
5	2.5	13.5	28	10
9	3.5	12.5	20	51
10	3.5	12.5	20	40.5
11	3.5	13.5	25	60
24	2.5	13.5	28	10
26	2.5	13.5	28	24
27	2.5	13.5	28	42
28	2.5	13.5	28	30
29	2.5	13.5	28	24
30	2.5	13.5	28	42

Σχήμα 6.1: Καμπύλη Ισχύος Α/Γ



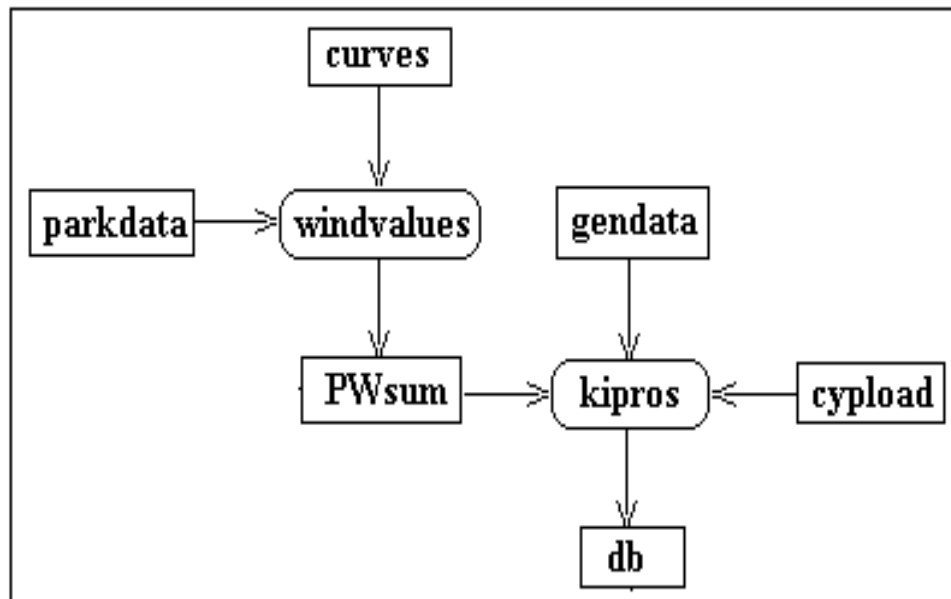
Η ζητούμενη παραγωγή του κάθε Α/Π υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & , \quad v < v_{in} \\ \frac{v - v_{in}}{v_N - v_{in}} P_N \text{ [MW]} & , \quad v_{in} \leq v < v_N \\ P_N \text{ [MW]} & , \quad v_N \leq v < v_{cut} \\ 0 & , \quad v \geq v_{cut} \end{cases}$$

- Τέλος, αφού έχουμε βρει την παραγωγή για το κάθε ένα από τα 13 Αιολικά Πάρκα ξεχωριστά, αθροίζουμε τις παραγωγές τους, για να υπολογίσουμε την συνολική αιολική παραγωγή ανά ώρα που είναι και το τελικό ζητούμενο.

Στο Σχήμα 2 που ακολουθεί απεικονίζεται το σε διάγραμμα η διαδικασία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της παραγωγής. Το πρόγραμμα windvalues υλοποιεί την διαδικασία που περιγράφηκε για τον προσδιορισμό της Αιολικής Παραγωγής. Το αρχείο curves περιέχει τις μετρήσεις των τιμών του ανέμου και το αρχείο parkdata, τα δεδομένα των Α/Π. Στο αρχείο PWsum αποθηκεύονται οι τιμές της Αιολικής Παραγωγής. Αντίστοιχα, το πρόγραμμα kipros υλοποιεί την διαδικασία που περιγράφηκε για τον προσδιορισμό της παραγωγής των γεννητριών. Στο αρχείο gendata περιέχονται τα δεδομένα των γεννητριών και στο αρχείο cypload η προβλεπόμενη ζήτηση του φορτίου. Τέλος, στο αρχείο db αποθηκεύονται τα δεδομένα για την ωριαία παραγωγή των γεννητριών και των ανεμογεννητριών.

Σχήμα 6.2: Διάγραμμα ροής για υπολογισμό της παραγωγής



6.3 Υπολογισμός της συχνότητας

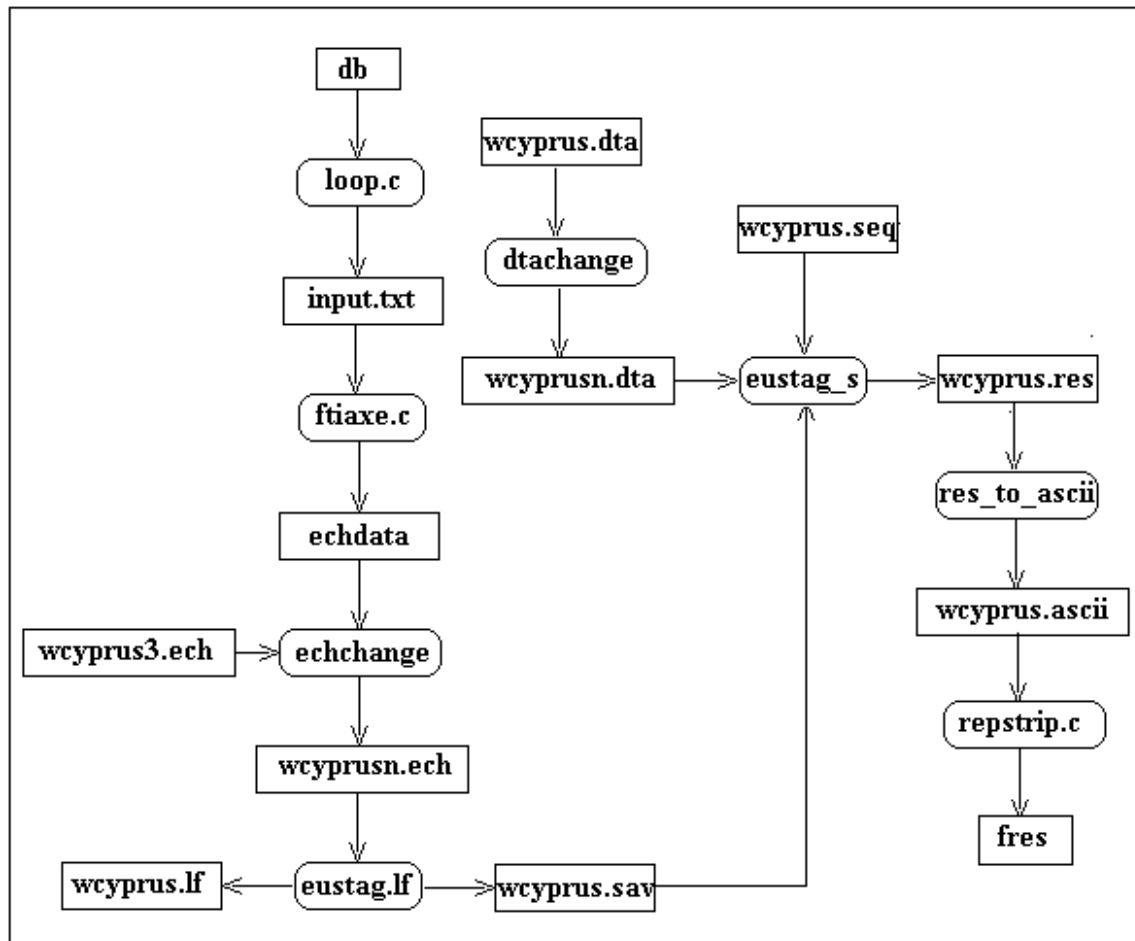
Στην προηγούμενη ενότητα έγινε η περιγραφή του τρόπου υπολογισμού της παραγωγής των σταθμών παραγωγής και της αιολικής παραγωγής. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, με την χρήση του Eurostag, υπολογίζουμε την ροή φορτίου και προσομοιώνουμε το σύστημα της Κύπρου υπό την επίδραση μίας διαταραχής. Στην συνέχεια, από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρίσκουμε την ελάχιστη τιμή της συχνότητας για κάθε χρονική περίοδο. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται αναλυτικά ως εξής:

1. Το πρόγραμμα loop.c τυπώνει ξανά τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της παραγωγής που βρίσκονται στο αρχείο db και τα τοποθετεί στο αρχείο input.txt.
2. Το πρόγραμμα ftiaxe.c επεξεργάζεται τα στοιχεία που περιέχονται στο αρχείο input.txt και με βάση το βασικό σενάριο loads υπολογίζει την ανηγμένη ενεργό και αεργό ισχύ των φορτίων καθώς και την ενεργό και αεργό ισχύ των Α/Γ. Τα αποτελέσματα αυτά, μαζί με τις τιμές της παραγωγής των γεννητριών τοποθετούνται στο αρχείο echdata.
3. Από τα δεδομένα του αρχείου echdata, το πρόγραμμα echchange τροποποιεί το βασικό σενάριο wcyprous.ech στο wcyprousn.ech, το οποίο είναι προσαρμοσμένο στις παραγωγές του υπό εξέταση σεναρίου.
4. Με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν στο αρχείο wcyprousn.ech το πρόγραμμα eustag.lf υπολογίζει την ροή φορτίου και τοποθετεί τα αποθηκεύει τα αποτελέσματα σε 2 αρχεία. Το πρώτο είναι το αρχείο wcyprousn.lf και το δεύτερο, είναι το αρχείο wcyprousn.sav το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά την προσομοίωση.
5. Στο αρχείο wcyprous.dta περιέχονται τα δυναμικά χαρακτηριστικά των γεννητριών και των Α/Γ. Το πρόγραμμα dtachange δημιουργεί ένα νέο αρχείο, το wcyprousn.dta, όπου τώρα υπάρχουν μόνο τα στοιχεία των μονάδων που έχουν λάβει μέρος στο σενάριο.
6. Με την εντολή eustag_s γίνεται η προσομοίωση της διαταραχής. Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι τα αρχεία wcyprousn.ech, wcyprousn.dta και wcyprousn.seq. Στο τελευταίο αρχείο βρίσκεται η διαταραχή με την οποία προσομοιώνεται το σύστημα. Στην περίπτωση μας, για όλα τα σενάρια η διαταραχή είναι η απώλεια του Ατμοστροβίλου του Βασιλικού.

7. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποθηκεύονται στο αρχείο `wcyprous.res`. Η εντολή `res_to_ascii` μετατρέπει το αρχείο σε κώδικα `ascii` για να μπορούμε να το διαβάσουμε και το αποθηκεύει στο `wcyprous.ascii`. Το αρχείο αυτό, για κάθε χρονική στιγμή που έγινε η προσομοίωση περιέχει 381 μεταβλητές (τάσεις, γωνίες ροής, φορτία, παραγωγή, συχνότητες, ...).
8. Το πρόγραμμα `restrip.c` χρησιμοποιεί τα δεδομένα του αρχείου `wcyprous.ascii` και υπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή την τιμή της χαμηλότερης συχνότητας, της χαμηλότερης τάσης και της τελικής τιμής της τάσης. Οι τιμές της συχνότητας, που είναι και το ζητούμενο, αποθηκεύονται στο αρχείο `fres`.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές που υπολογίσαμε για την παραγωγή των γεννητριών και των Α/Γ, όπως επίσης και τις τιμές της χαμηλότερης συχνότητας που περιέχονται στο αρχείο `fres`, μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στην κατασκευή των Δέντρων Απόφασης. Στο Σχήμα 6.3 που ακολουθεί, απεικονίζεται η διαδικασία που περιγράψαμε πιο πάνω.

Σχήμα 6.3: Διάγραμμα ροής για υπολογισμό της συχνότητας



7. Εφαρμογή των Δένδρων Απόφασης για την Εξαγωγή Κανόνων που να διασφαλίζουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των Δένδρων Απόφασης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου υπό την παρουσία μίας διαταραχής. Όπως προαναφέραμε σε προηγούμενα κεφάλαια, τα δεδομένα για το φορτίο βασίζονται στην ζήτηση φορτίου για το 2005, ενώ η διαταραχή ορίζεται πάντοτε ως η απώλεια της μονάδας του Βασιλικού 1, ισχύος 130MW.

Τα σενάρια που παρουσιάζονται είναι κατά σειρά τα εξής:

- **Σενάριο 1:** Λειτουργία ΣΗΕ με Αιολική Διείσδυση.
- **Σενάριο 2** Λειτουργία ΣΗΕ χωρίς Αιολική Διείσδυση.

Σε κάθε σενάριο, κύριος στόχος είναι η εξαγωγή κάποιων κανόνων οι οποίοι να διασφαλίζουν την ασφάλεια και την ευστάθεια του συστήματος αμέσως μετά το πέρας της διαταραχής. Κριτήριο για την ασφαλή λειτουργία του συστήματος αποτελεί η τιμή της συχνότητας μετά την διαταραχή η οποία δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 49Hz.

Για κάθε σενάριο, έχουμε 8760 και 24000 λειτουργικά σημεία αντίστοιχα που αποτελούν την βάση γνώσης. Το κάθε λειτουργικό σημείο χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα ιδιοτήτων που αφορά τις παραγωγές των μονάδων, την εφεδρεία, το φορτίο κ.α. Σημαντικός παράγοντας για την επιτυχή εξαγωγή κανόνων αποτελεί η ποιότητα των επιλεγόμενων ιδιοτήτων και η αντιπροσωπευτικότητα του συνόλου μάθησης.

Ως υποψήφιες ιδιότητες για την κατασκευή του δένδρου απόφασης θεωρούνται οι παραγωγές των μονάδων, η αιολική παραγωγή, το φορτίο και η εφεδρεία. Τέλος, σε κάθε σενάριο, για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα, το φορτίο χωρίζεται σε 3 ζώνες ανάλογα με τα επίπεδα φόρτισης του συστήματος.

Ζώνες Φόρτισης για τα Σενάρια 1&2:

- **Ζώνη Α:** Χαμηλό Φορτίο - Φορτίο $\leq 500\text{MW}$
- **Ζώνη Β:** Μεσαίο Φορτίο - $500\text{MW} < \text{Φορτίο} \leq 700\text{MW}$.
- **Ζώνη Γ:** Υψηλό Φορτίο - Φορτίο $> 700\text{MW}$

7.1 Σενάριο 1: Λειτουργία ΣΗΕ με Αιολική Διείσδυση

Στο πρώτο σενάριο εξετάζουμε την επίδραση της Αιολικής Παραγωγής στο υπάρχον σύστημα και συγκεκριμένα τι κανόνες απαιτούνται για να διατηρείται η συχνότητα εντός των επιτρεπτών ορίων όταν αποσυνδεθεί η μονάδα Βασιλικός 1. Τα λειτουργικά σημεία του συστήματος χωρίζονται σε τρεις ζώνες ανάλογα με τα επίπεδα φόρτισης του συστήματος και έτσι έχουμε συνολικά 3 Δέντρα Απόφασης για το πρώτο σενάριο.

7.1.1 Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο (Φορτίο $\leq 500\text{MW}$)

Στον Πίνακα 7.1.1 παρατίθεται ο διαχωρισμός των λειτουργικών σημείων σε ασφαλή και ανασφαλή σημεία ανάλογα με το σύνολο που ανήκουν (Σύνολο Μάθησης και Σύνολο Ελέγχου). Στον Πίνακα 7.1.2 αναφέρονται οι ιδιότητες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του ΔΑ, ενώ στο Σχήμα 7.1.1 απεικονίζεται το ΔΑ που προκύπτει για την Ζώνη Α.

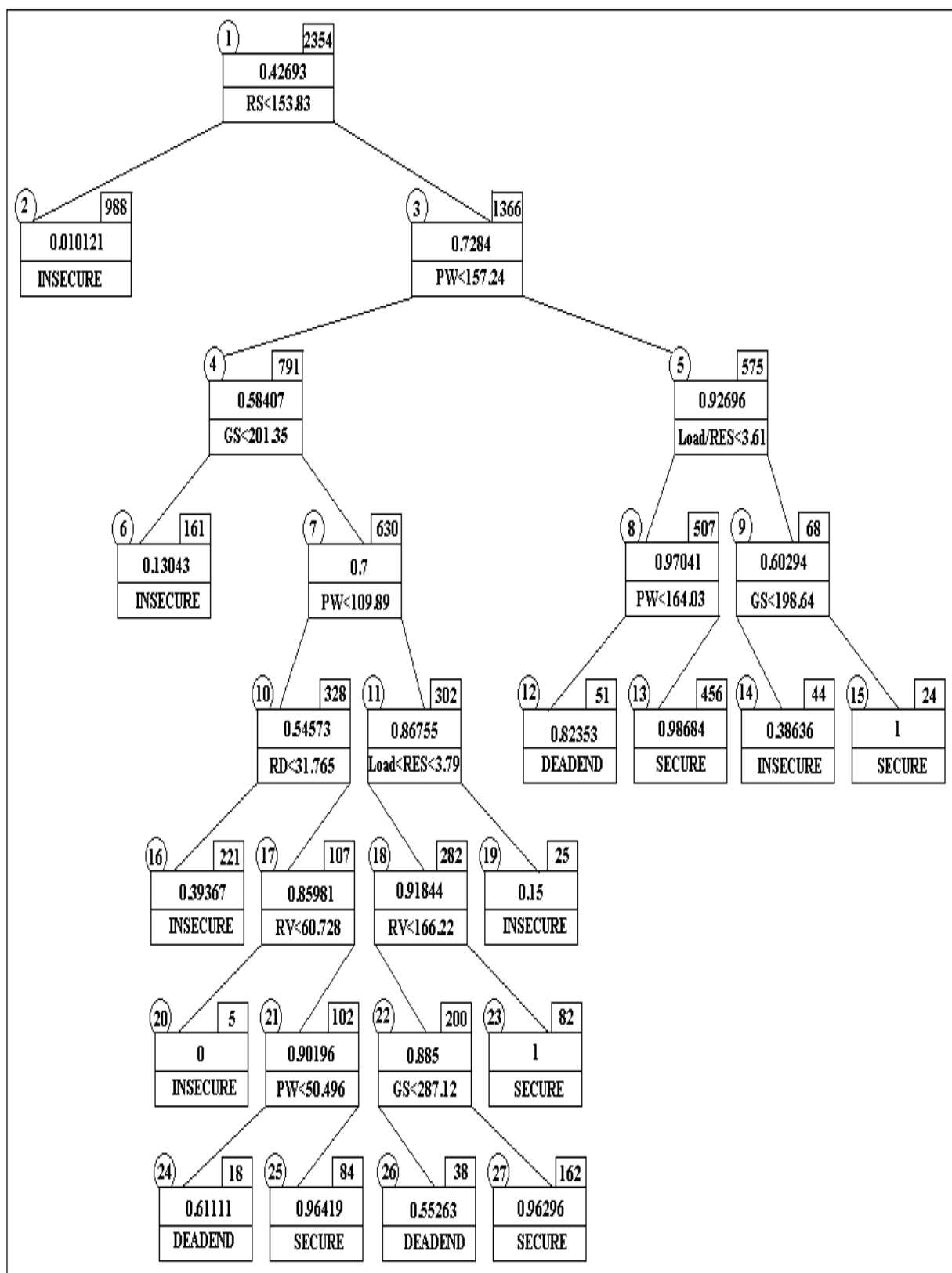
Πίνακας 7.1.1 Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Α

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	2354	2354
ΑΣΦΑΛΗ	1005	957
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	1348	1396

Πίνακας 7.1.2 Επιλεγμένες ιδιότητες για τη Ζώνη Α

RS	Η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων (MW)
GS	Η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων (MW)
PW	Η συνολική Αιολική Παραγωγή (MW)
Load/RES	Ο λόγος του Φορτίου προς την συνολική εφεδρεία
RV	Η συνολική εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού (MW)
RD	Η συνολική εφεδρεία της Δεκέλειας (MW)

Σχήμα 7.1.1: Δέντρο Απόφασης 1^{ου} Σεναρίου για Ζώνη Α



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτουν 5 Φύλλα που διασφαλίζουν την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι τα Φύλλα ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.1.3: Κανόνες 1^{ου} Σεναρίου για Ζώνη Α

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	13	if RS>152.83MW and PW>164.03MW and Load/RES<3.61
2	15	if RS>152.83MW and PW>157.24MW and Load/RES>3.61 and GS>198.64MW
3 ^α	23	if RS>152.83MW and 109.89<PW<157.24MW and Load/RES<3.79 and GS>201.35 and RV>166.22MW
3 ^β	27	if RS>152.83MW and 109.89<PW<157.24MW and Load/RES<3.79 and GS>287.12 and RV<166.22MW
4	25	if RS>152.83MW and 50.49<PW<109.89MW and GS>201.35 and RV>60.73MW and RD>31.76MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον πίνακα 7.1.4

Πίνακας 7.1.4: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης		
Δείγματα υποσυνόλου ελέγχου=2354	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή: 957	921	36
Ανασφαλή: 1396	112	1284
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης		
Βαθμός Επιτυχίας	93.71% (2205/2354)	
False Alarms	3.76% (36/957)	
Missed Alarms	8.02% (112/1396)	

7.1.2 Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο ($500\text{MW} < \text{Φορτίο} \leq 700\text{MW}$)

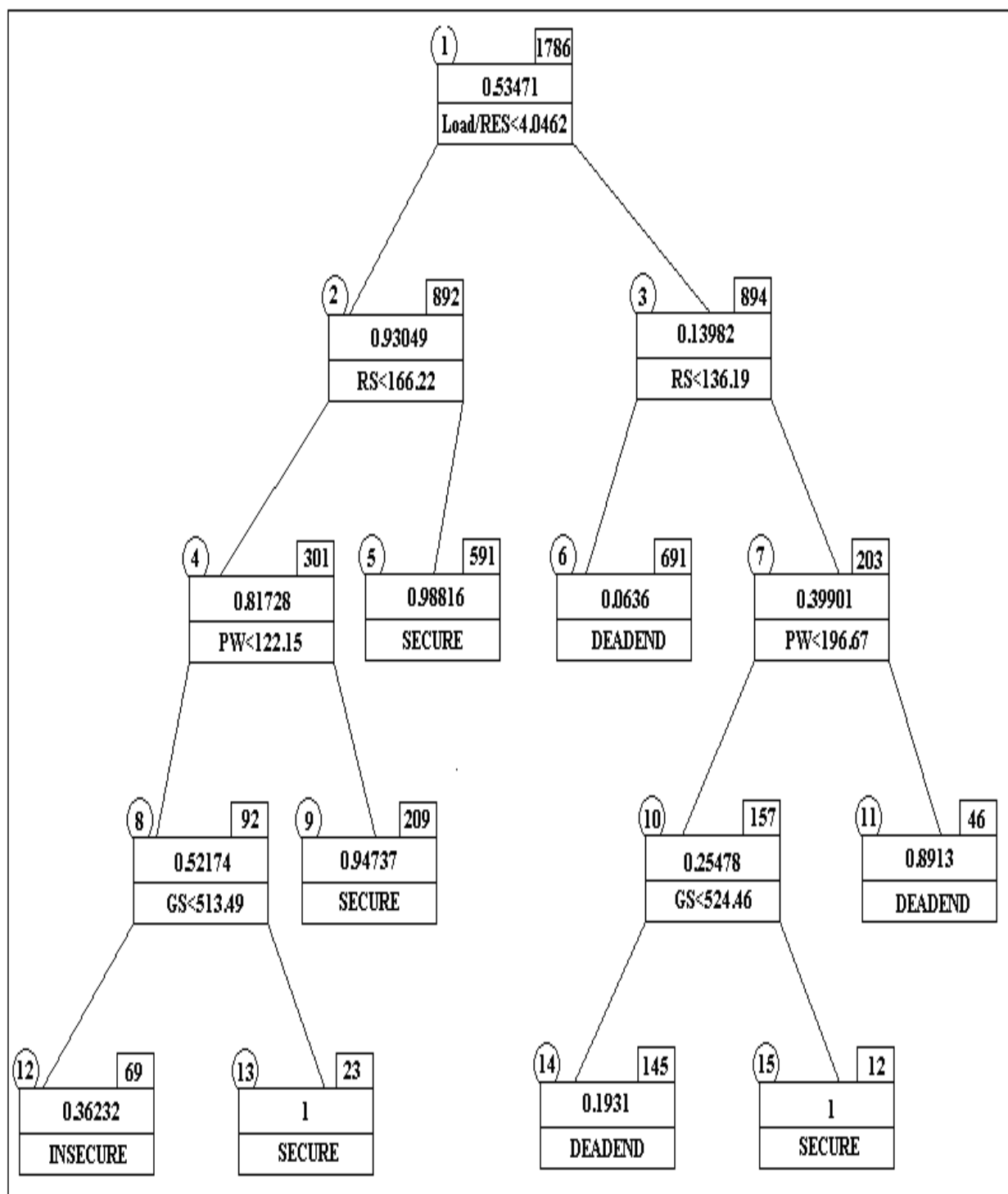
Πίνακας 7.1.5: Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Β

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	1786	1786
ΑΣΦΑΛΗ	955	942
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	831	844

Πίνακας 7.1.6: Επιλεγμένες ιδιότητες για τη Ζώνη Β

RS	Η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων (MW)
GS	Η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων (MW)
PW	Η συνολική Αιολική Παραγωγή (MW)
Load/RES	Ο λόγος του Φορτίου προς την συνολική εφεδρεία

Σχήμα 7.1.2: Δέντρο Απόφασης 1^ο Σεναρίου για Ζώνη Β



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτουν 4 Φύλλα που διασφαλίζουν την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι τα Φύλλα ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.1.7: Κανόνες 1^{ου} Σεναρίου για Ζώνη Β

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	15	if Load/RES>4.0462 and RS>136.19MW and PW<196.67MW and GS>524.46MW
2	5	if Load/RES<4.0462 and RS>166.22MW
3	9	if Load/RES<4.0462 and RS<166.22MW and PW>122.15MW
4	13	if Load/RES<4.0462 and RS<166.22MW and PW<122.15MW and GS>513.49MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 7.1.8

Πίνακας 7.1.8: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης			
Δείγματα ελέγχου=1786	υποσυνόλου	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή:	942	877	65
Ανασφαλή:	844	54	790
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης			
Βαθμός Επιτυχίας		93.34 % (1667/1786)	
False Alarms		6.9 % (65/942)	
Missed Alarms		6.4 % (54/844)	

7.1.3 Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο (Φορτίο>700MW)

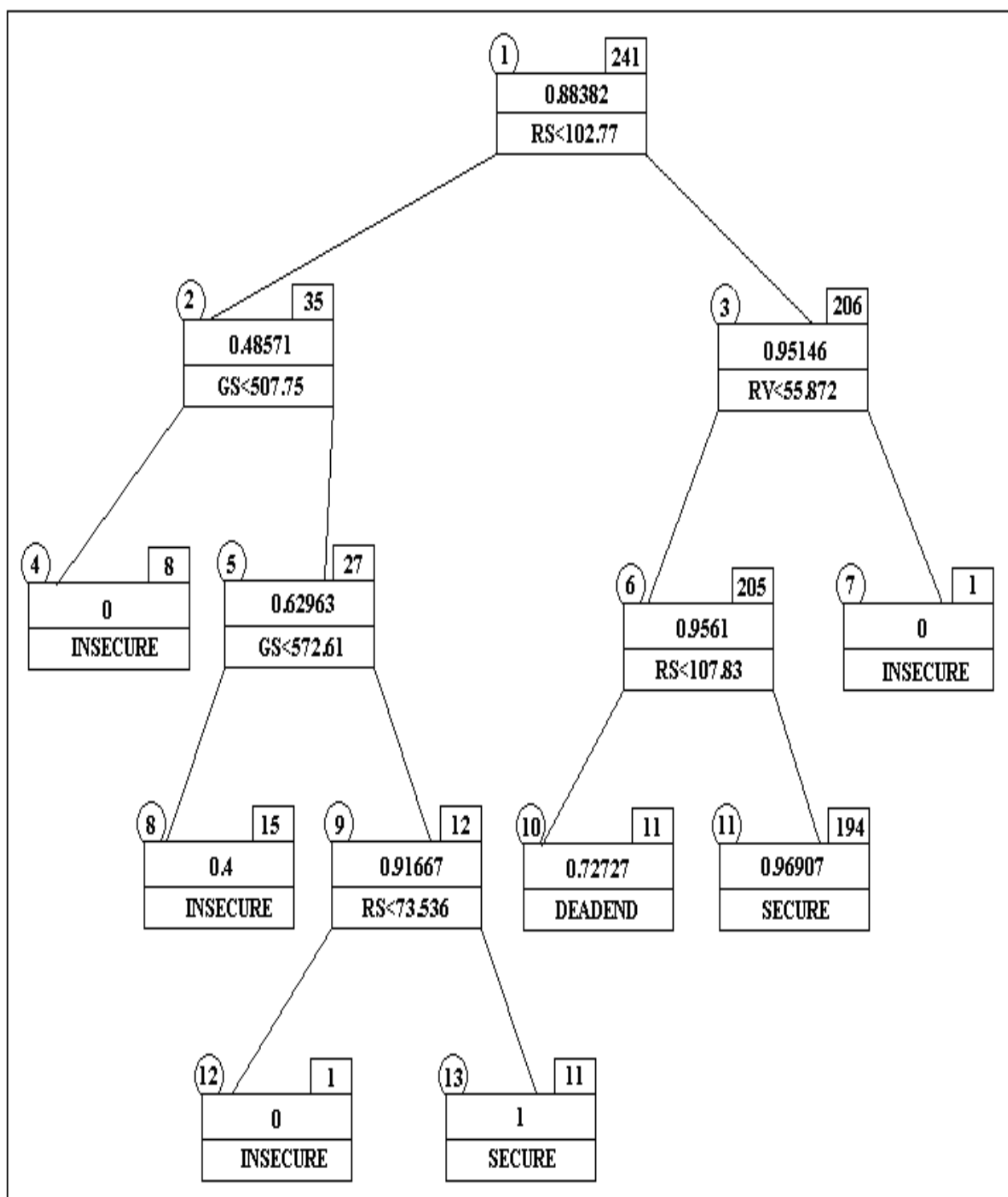
Πίνακας 7.1.9: Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Γ

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	241	240
ΑΣΦΑΛΗ	213	209
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	27	31

Πίνακας 7.1.10: Επιλεγμένες ιδιότητες για τη Ζώνη Γ

RS	Η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων (MW)
GS	Η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων (MW)
RV	Η συνολική εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού (MW)

Σχήμα 7.1.3: Δέντρο Απόφασης 1^ο Σεναρίου για Ζώνη Γ



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτουν 2 Φύλλα που διασφαλίζουν την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι τα Φύλλα ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.1.11: Κανόνες 1^ο Σεναρίου για Ζώνη Γ

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	11	if RS>107.83MW and RV<55.87MW
2	13	if 73.54<RS<102.77MW and GS>572.61MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 7.1.12

Πίνακας 7.1.12: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης		
Δείγματα υποσυνόλου ελέγχου=240	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή: 209	203	6
Ανασφαλή: 31	25	6
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης		
Βαθμός Επιτυχίας	87.08% (209/240)	
False Alarms	2.87% (6/209)	
Missed Alarms	80.65% (25/31)	

7.2 Σενάριο 2: Λειτουργία ΣΗΕ χωρίς με Αιολική Διείσδυση.

Στο δεύτερο σενάριο εξετάζουμε τις ίδιες συνθήκες φόρτισης με το πρώτο σενάριο αλλά χωρίς την επίδραση της Αιολικής Παραγωγής. Τα λειτουργικά σημεία του συστήματος, όπως και στο πρώτο σενάριο, χωρίζονται σε τρεις ζώνες ανάλογα με τα επίπεδα φόρτισης του συστήματος και έτσι έχουμε συνολικά 3 Δέντρα Απόφασης για το δεύτερο σενάριο.

7.2.1 Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο (Φορτίο $\leq 500\text{MW}$)

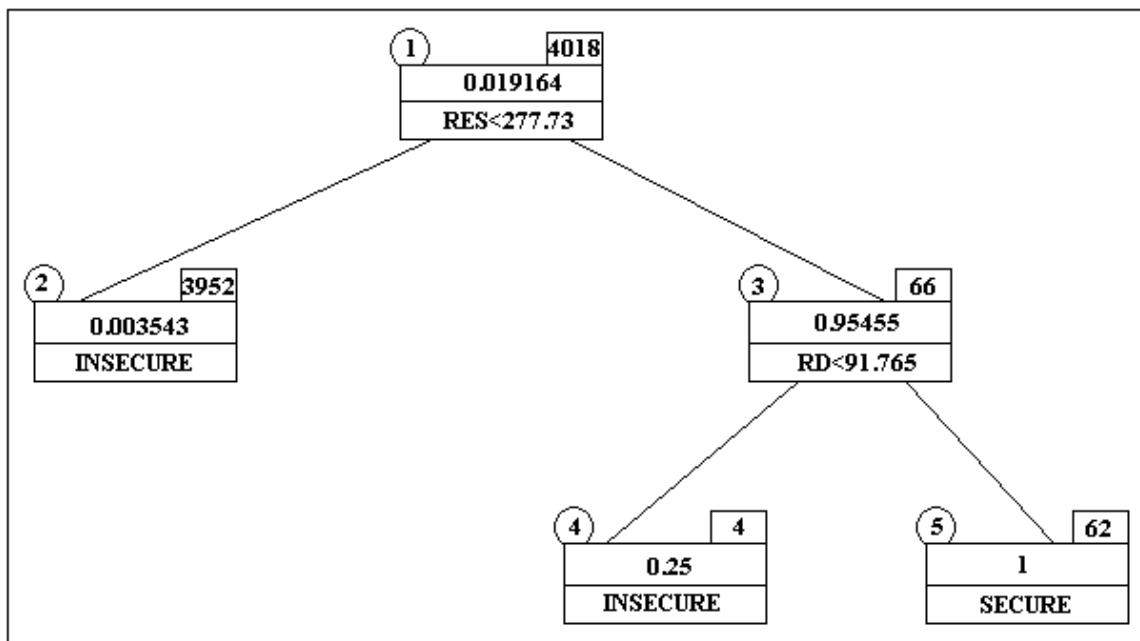
Πίνακας 7.2.1 Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Α

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	4018	4018
ΑΣΦΑΛΗ	77	105
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	3940	3912

Πίνακας 7.2.2 Επιλεγμένη ιδιότητα για τη Ζώνη Α

RES	Η συνολική εφεδρεία του συστήματος (MW)
RD	Η συνολική εφεδρεία της Δεκέλειας (MW)

Σχήμα 7.2.1: Δέντρο Απόφασης 2^ο Σεναρίου για Ζώνη Α



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτει 1 Φύλλο που διασφαλίζει την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι το Φύλλο ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.2.3: Κανόνες 2^ο Σεναρίου για Ζώνη Α

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	5	if RES>277.73MW and RD>91.76MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 7.2.4

Πίνακας 7.2.4: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης		
Δείγματα υποσυνόλου ελέγχου=4018	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή: 105	87	18
Ανασφαλή: 3912	0	3912
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης		
Βαθμός Επιτυχίας	99.55% (3999/4018)	
False Alarms	17.14% (18/105)	
Missed Alarms	0% (0/3912)	

7.2.2 Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο ($500\text{MW} < \text{Φορτίο} \leq 700\text{MW}$)

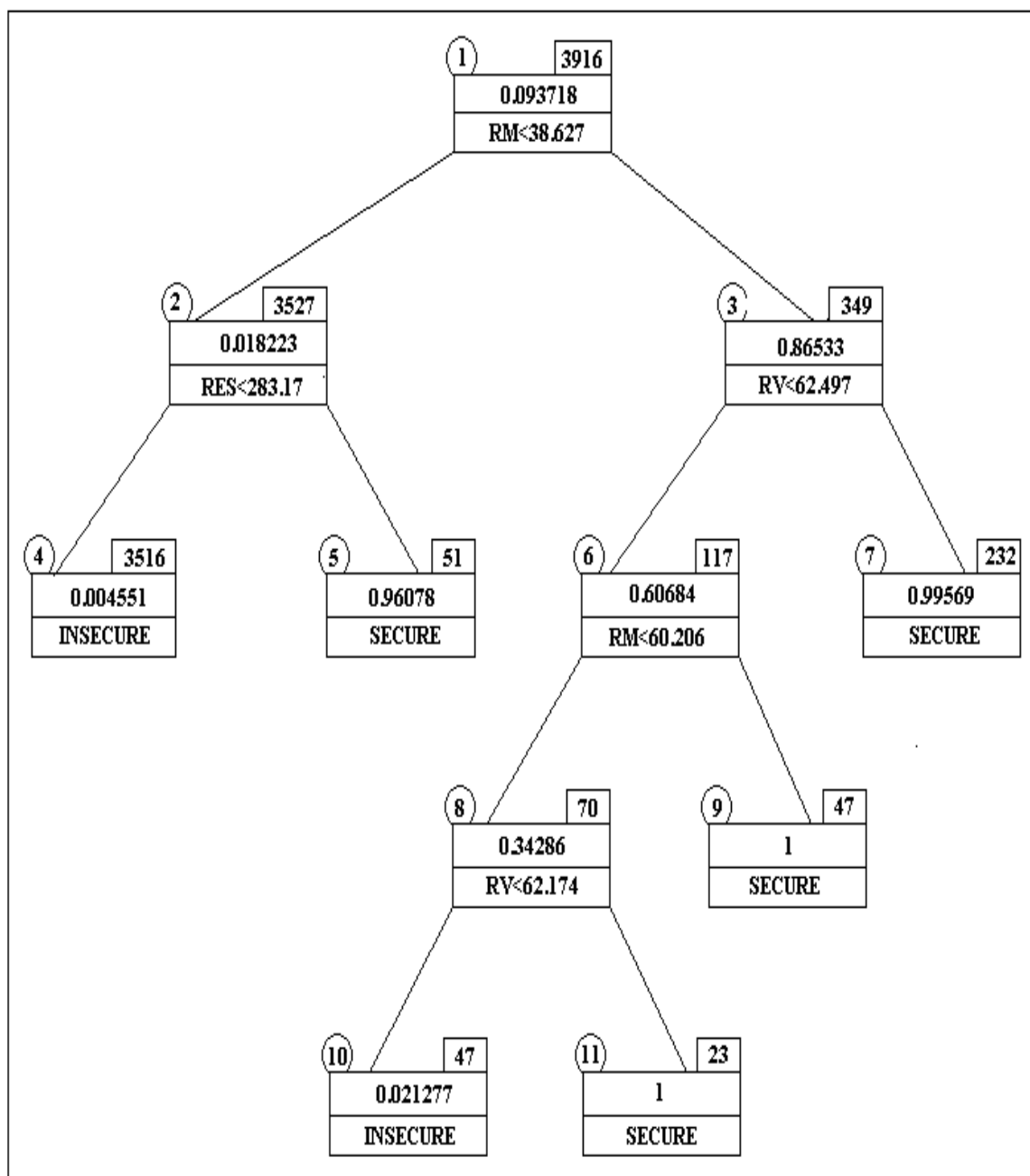
Πίνακας 7.2.5 Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Β

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	3916	3916
ΑΣΦΑΛΗ	367	375
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	3549	3541

Πίνακας 7.2.6: Επιλεγμένες ιδιότητες για τη Ζώνη Β

RES	Η συνολική εφεδρεία του συστήματος (MW)
RD	Η συνολική εφεδρεία της Δεκέλειας (MW)
RM	Η συνολική εφεδρεία της Μονής (MW)

Σχήμα 7.2.2: Δέντρο Απόφασης 2^ο Σεναρίου για Ζώνη Β



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτουν 4 Φύλλα που διασφαλίζουν την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι τα Φύλλα ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.2.7: Κανόνες 2^{ου} Σεναρίου για Ζώνη Β

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	5	if RM<38.63MW and RES>283,17MW
2	7	if RM>38.63MW and RV>62.497MW
3	9	if RM>60.206MW and RV<62.497MW
4	11	if 38.63<RM<60.21MW and 62.17<RV<62.497MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 7.2.8

Πίνακας 7.2.8: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης		
Δείγματα υποσυνόλου ελέγχου=3916	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή: 375	355	20
Ανασφαλή: 3541	4	3537
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης		
Βαθμός Επιτυχίας	99.39% (3892/3916)	
False Alarms	5.33% (20/355)	
Missed Alarms	0.11 % (4/3541)	

7.2.3 Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο (Φορτίο>700MW)

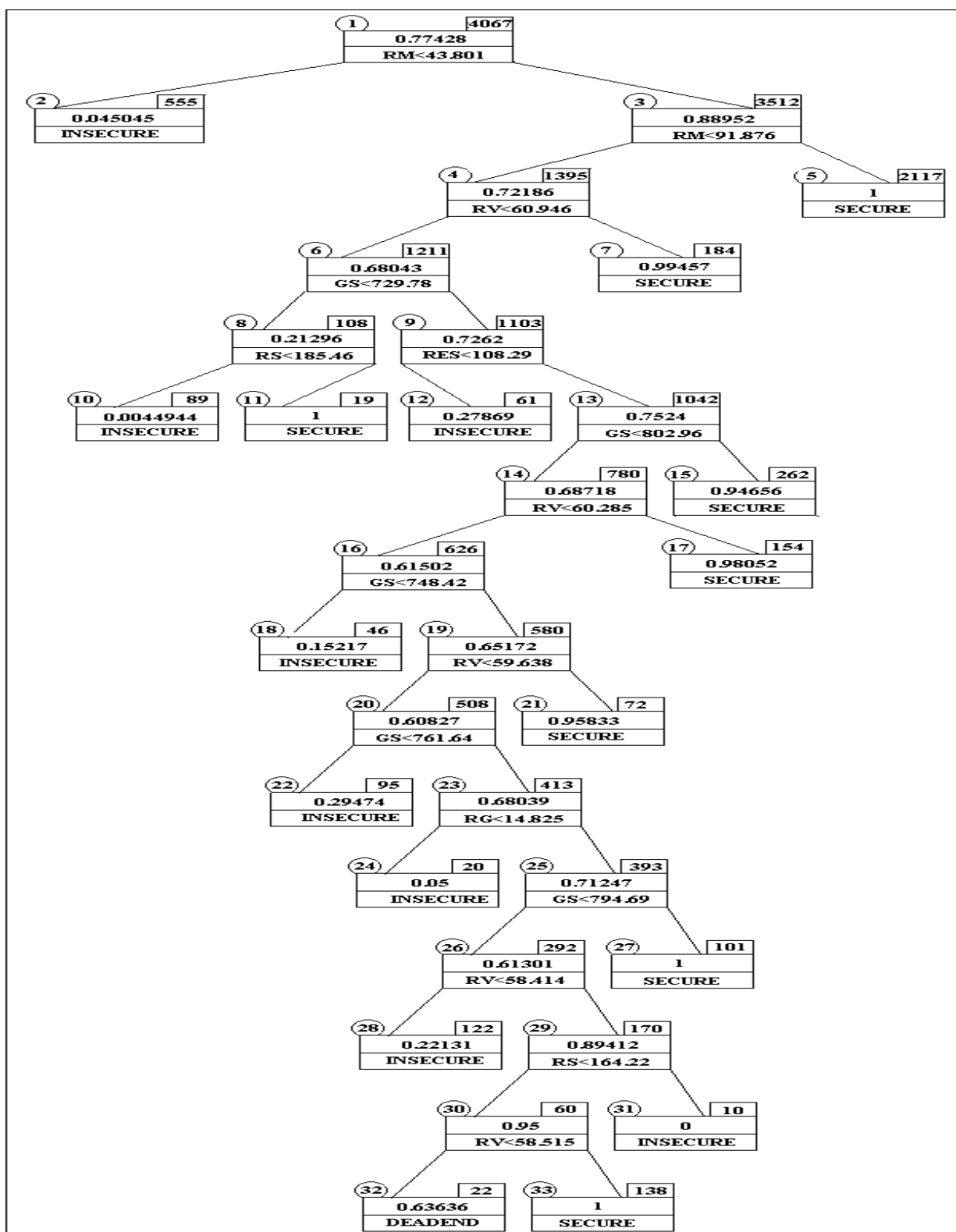
Πίνακας 7.2.9 Διαχωρισμός των Λειτουργικών σημείων για τη Ζώνη Γ

	Σύνολο μάθησης	Σύνολο ελέγχου
Αριθμός Λειτουργικών Σημείων	4067	4067
ΑΣΦΑΛΗ	3149	3166
ΑΝΑΣΦΑΛΗ	917	900

Πίνακας 7.2.10: Επιλεγμένες ιδιότητες για τη Ζώνη Γ

RM	Η συνολική εφεδρεία της Μονής (MW)
RV	Η συνολική εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού (MW)
GS	Η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων (MW)
RS	Η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων (MW)
RES	Η συνολική εφεδρεία του συστήματος (MW)
RG	Η συνολική παραγωγή των Αεριοστροβίλων (MW)

Σχήμα 7.2.3: Δέντρο Απόφασης 2^{ου} Σεναρίου για Ζώνη Γ



Από το Δέντρο Απόφασης προκύπτουν 8 Φύλλα που διασφαλίζουν την ευστάθεια και την ασφάλεια του συστήματος. Οι κανόνες οι οποίοι πρέπει να ισχύουν προκειμένου να είναι τα Φύλλα ασφαλή είναι οι εξής:

Πίνακας 7.2.11: Κανόνες 2^ο Σεναρίου για Ζώνη Γ

A/A	Φύλλο	Συνθήκες
1	5	RM>91.88MW
2	7	if 43.8<RM<91.88MW and RV>60. 946MW
3	11	if 43.8<RM<91.88MW and RV<60. 946MW and GS<729.78MW and RS>185.46MW
4	15	if 43.8<RM<91.88MW and RV<60. 946MW and GS>802.96MW and RES>108.29MW
5	17	if 43.8<RM<91.88MW and 60.285<RV<60.946MW and 729.78<GS<802.96MW and RES>108.29MW
6	21	if 43.8<RM<91.88MW and 59.638<RV<60.285MW and 748.42<GS<802.96MW and RES>108.29MW
7	27	if 43.8<RM<91.88MW and RV< 59.638MW and 794.69<GS<802.96MW and RES>108.29MW and RG>14.825MW
8	33	if 43.8<RM<91.88MW and 58.515<RV< 59.638MW and RS<164.22MW and 761.64<GS<794.69MW and RES>108.29MW and RG>14.825MW

Η αξιολόγηση της ταξινόμησης που πραγματοποιεί το παραπάνω δένδρο ελέγχεται με τη χρήση του υποσυνόλου ελέγχου και τα αποτελέσματά της φαίνονται στον Πίνακα 7.2.12

Πίνακας 7.2.12: Αξιολόγηση της επίδοσης του Δένδρου Απόφασης

Ταξινόμηση του Υποσυνόλου Ελέγχου από το δένδρο απόφασης		
Δείγματα υποσυνόλου ελέγχου=4067	Ασφαλή (πρόβλεψη δένδρου)	Ανασφαλή (Πρόβλεψη δένδρου)
Ασφαλή: 957	921	36
Ανασφαλή: 1396	112	1284
Αξιολόγηση της Επίδοσης της Ταξινόμησης		
Βαθμός Επιτυχίας	93.71% (/4067)	
False Alarms	3.76% (36/957)	
Missed Alarms	8.02% (112/1396)	

7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σενάριο 1: Λειτουργία ΣΗΕ με Αιολική Διείσδυση

Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο (Φορτίο $\leq 500\text{MW}$)

Με βάση τους κανόνες που προκύπτουν από το Δένδρο Απόφασης για τη ζώνη χαμηλού φορτίου, παρατηρούμε ότι οι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται η ευστάθεια της συχνότητας του συστήματος καθώς μειώνεται η Αιολική Παραγωγή είναι κατά σειρά οι εξής: η εφεδρεία όλων των Ατμοστροβίλων του συστήματος, η συνολική εφεδρεία ως ποσοστό επί της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος ή του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί, η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος, η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού και η εφεδρεία των μονάδων της Δεκέλειας.

Ένα πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ανεξάρτητα από το μέγεθος της Αιολικής Παραγωγής, η Εφεδρεία όλων των Ατμοστροβίλων του συστήματος θα πρέπει να είναι πάντοτε μεγαλύτερη από 153MW προκειμένου η συχνότητα να διατηρείται εντός των επιτρεπτών ορίων. Επίσης, στην περίπτωση που η Αιολική παραγωγή είναι μεγαλύτερη από 164MW θα πρέπει η συνολική εφεδρεία του συστήματος να είναι μεγαλύτερη από το 21.69% της παραγωγής ή το 27.7% του φορτίου.

Ακόμα, όταν η Αιολική Παραγωγή κυμαίνεται από 110MW έως 157MW θα πρέπει η συνολική εφεδρεία του συστήματος να είναι μεγαλύτερη από το 20.88% της παραγωγής ή το 26.38% του φορτίου, ενώ όσο αφορά την παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος και την εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού ξεχωρίζουμε δύο περιπτώσεις. Όταν η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων είναι μεγαλύτερη από 201MW τότε η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 166MW, ενώ όταν η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων είναι μεγαλύτερη από 287MW τότε αντίστοιχα, η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού θα πρέπει να είναι μικρότερη από 166MW.

Επιπλέον, όταν η Αιολική Παραγωγή κυμαίνεται από 50MW έως 110MW θα πρέπει η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού να είναι μεγαλύτερη από 61MW και η παραγωγή των Ατμοστροβίλων μεγαλύτερη από 201MW, ενώ σε αυτή τη περίπτωση αρχίζει να επιδρά και η εφεδρεία των μονάδων της Δεκέλειας η οποία θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 32MW.

Τέλος, στην περίπτωση που η Αιολική Παραγωγή είναι μεγαλύτερη από 157MW και η συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μικρότερη από το 21.69% της παραγωγής ή το 27.7% του φορτίου τότε θα πρέπει η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος να είναι μεγαλύτερη από 199 MW.

Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο ($500\text{MW} < \text{Φορτίο} \leq 700\text{MW}$)

Από το ΔΑ που προκύπτει για το πρώτο σενάριο όταν το φορτίο κυμαίνεται από 500MW έως 700MW παρατηρούμε ότι, σε αυτή τη περίπτωση οι παράμετροι από τους οποίους εξαρτάται η ευστάθεια της συχνότητας του συστήματος είναι η συνολική εφεδρεία ως ποσοστό επί της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος ή του φορτίου που πρέπει να καλυφθεί, η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων του συστήματος, η Αιολική Παραγωγή και η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος.

Όταν η συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μικρότερη από το 19.82% της παραγωγής ή το 24.71% του φορτίου θα πρέπει η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων του συστήματος να είναι μεγαλύτερη από 136MW, η Αιολική Παραγωγή δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 197MW και η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 524MW.

Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μεγαλύτερη από το 19.82% της παραγωγής ή το 24.71% του φορτίου, τότε διαχωρίζουμε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη από αυτές, η ευστάθεια του συστήματος διασφαλίζεται αρκεί η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων του συστήματος να είναι μεγαλύτερη από 166MW. Αν όμως η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων του συστήματος είναι μικρότερη από 166MW οδηγούμαστε στην δεύτερη περίπτωση όπου τώρα η ευστάθεια του συστήματος εξαρτάται από το ύψος της Αιολικής Παραγωγής. Αν η Αιολική Παραγωγή είναι μεγαλύτερη από 122MW τότε το σύστημα παραμένει ασφαλές. Όταν όμως η Αιολική Παραγωγή είναι μικρότερη από 122MW τότε το σύστημα για να παραμένει ασφαλές θα πρέπει η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων να είναι μεγαλύτερη από 513MW.

Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο (Φορτίο>700MW)

Όταν έχουμε υψηλό φορτίο παρατηρούμε ότι, η ευστάθεια του συστήματος δεν επηρεάζεται πλέον από την παράμετρο της Αιολικής Παραγωγής, αλλά ούτε και από το ποσοστό της συνολικής εφεδρείας του συστήματος από την συνολική παραγωγή. Σε αυτή την περίπτωση οι παράμετροι που επηρεάζουν την ευστάθεια της συχνότητας του συστήματος είναι η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων, η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού καθώς και η συνολική παραγωγή των Ατμοστροβίλων του συστήματος.

Με βάση το ΔΑ για τη ζώνη αυτή προκύπτουν δύο συνθήκες. Στην πρώτη συνθήκη, αν η συνολική εφεδρεία των Ατμοστροβίλων είναι μεγαλύτερη από 108MW τότε η εφεδρεία των μονάδων του Βασιλικού θα πρέπει να είναι μικρότερη από 56MW, ενώ από την δεύτερη συνθήκη προκύπτει ότι εάν η εφεδρεία των Ατμοστροβίλων κυμαίνεται από 73 έως 103MW, τότε η παραγόμενη ισχύς των Ατμοστροβίλων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 573MW.

Σενάριο 2: Λειτουργία ΣΗΕ χωρίς Αιολική Διείσδυση.

Ζώνη Α: Χαμηλό Φορτίο ($\text{Φορτίο} \leq 500\text{MW}$)

Από το ΔΑ προκύπτει ότι αν η συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μεγαλύτερη από 278MW, τότε η εφεδρεία της Δεκέλειας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 92MW προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η συχνότητα. Παρατηρούμε ότι επειδή το φορτίο είναι χαμηλό και δεν υπάρχει Αιολική διείσδυση, το σύστημα διασφαλίζει την ευστάθεια του διατηρώντας ένα ποσοστό εφεδρείας από τον σταθμό της Δεκέλειας.

Ζώνη Β: Μεσαίο Φορτίο ($500\text{MW} < \text{Φορτίο} \leq 700\text{MW}$)

Σε αυτή την περίπτωση και καθώς το φορτίο είναι αυξημένο, παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στην ευστάθεια του συστήματος διαδραματίζει η συνολική εφεδρεία του σταθμού της Μονής, ο οποίος είναι ο σταθμός με την μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ.

Από το ΔΑ προκύπτει ότι εάν η εφεδρεία του σταθμού της Μονής είναι μικρότερη από 39MW τότε η ευστάθεια εξασφαλίζεται αν η συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μεγαλύτερη από 283MW ή η εφεδρεία του Βασιλικού να διατηρείται πάνω από 62MW. Ακόμα, αν η εφεδρεία του σταθμού της Μονής είναι μεγαλύτερη από 60MW τότε θα πρέπει η εφεδρεία του Βασιλικού να μη ξεπερνά τα 62MW, ενώ αν η εφεδρεία της Μονής κυμαίνεται από 39MW έως 60MW η εφεδρεία του Βασιλικού θα πρέπει επίσης να κυμαίνεται στα 62MW.

Ζώνη Γ: Υψηλό Φορτίο ($\text{Φορτίο} > 700\text{MW}$)

Όπως και στην προηγούμενη ζώνη (ζώνη Μεσαίου Φορτίου), καθοριστικός παράγοντας για την διατήρηση της συχνότητας πάνω από τα επιτρεπτά όρια είναι η ποσότητα της εφεδρείας του σταθμού της Μονής. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς όσο μεγαλώνει η ζήτηση, εντάσσονται σταδιακά οι μικρότερες μονάδες και πιο συγκεκριμένα, οι μονάδες της Μονής.

Από το ΔΑ προκύπτει ότι, εάν η συνολική εφεδρεία του σταθμού της Μονής διατηρείται πάνω από 92MW τότε το σύστημα παραμένει πάντοτε ασφαλές ανεξάρτητα από άλλες συνθήκες. Στην περίπτωση όμως που η εφεδρεία της Μονής είναι μικρότερη από 92MW και πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται από 44MW έως 92MW, τότε η διατήρηση της συχνότητας εντός των επιτρεπτών ορίων εξαρτάται από άλλους παράγοντες όπως η

εφεδρεία του Βασιλικού, η παραγόμενη ισχύς των Ατμοστροβίλων, η εφεδρεία των Ατμοστροβίλων, η συνολική εφεδρεία του συστήματος και η εφεδρεία των Αεριοστροβίλων. Στον πίνακα 7.2.11 αναγράφονται αναλυτικά οι κανόνες που πρέπει να ισχύουν στην περίπτωση που η εφεδρεία της Μονής ανήκει στο διάστημα [44,92).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου, <http://www.eac.com.cy>
- [2] Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς. <http://www.dsm.org.cy>
- [3] Ίδρυμα Ηλεκτρικής Ενέργειας Κύπρου, <http://www.cie.org.cy>
- [4] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας Κύπρου, <http://www.cera.org.cy>
- [5] Halilcevic S, “Procedures for definition of generation ready reserve capacity”.
- [6] Halilcevic S, “An on-line determination of the ready reserve power”
- [7] Oscar E. Moya, “A Spinning Reserve, Load Shedding, and Economic Dispatch Solution by Bender’s Decomposition”
- [8] ABB Inc-Power System Division, “Cyprus TSO market simulation study report”
- [9] ESBNG, “Grid Code Version 1.1”
- [10] B. J. Kirby, “Spinning reserve from responsive loads”
- [11] Eric Hirst, “Price-responsive demand as reliability resources”
- [12] “Operating Reserve Requirements as Wind Power Penetration Increases in the Irish Electricity System”
- [13] Persaud, S., Fox, B. and Flynn, D., "Impact of wind power variability on the dynamic operation of thermal power systems"
- [14] José Fernando Prada, “The value of reliability in power systems- Pricing operating reserves”
- [15] K.A Papadogiannis , N.N.Hatziargyriou, “Optimal Allocation of Primary Reserve Services in Energy Markets”.
- [16] L.D. Arya, D.K. Sakravidia, D.P. Kothari, “Ready reserve power determination using artificial neural network”.
- [17] E.M.Voumvoulakis, A.E.Gavoyiannis, N.D.Hatziargyriou, “Decision Trees for Dynamic Security Assessment and Load Shedding Scheme”
- [18] E.M.Voumvoulakis, N.D.Hatziargyriou,” Dynamic Security Assessment and Load Shedding Schemes Using Self Organized Maps and Decision Trees”
- [19] Ν.Χατζηαργυρίου, ΚΕΝΤΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
- [20] L.Wehenkel, P. M., “Decision trees and transient stability of electric power systems”
- [21] L.Wehenkel, “Automatic Learning Techniques in Power Systems”

[22] Ν.Χατζηαργυρίου, Ε.Βουμβουλάκης, Κ.Βουρνάς, Α.Ρήγος, Β.Νομικός, “ Εξαγωγή κανόνων διαχείρισης φορτίου με κριτήριο την τάση σε κρίσιμες καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος”

[23] Eurostag manual