ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΕΦΕΔΡΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΠΛΑΤΑΝΙΩΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ – ΑΝΔΡΕΑΣ

Καθηγητής: ΤΟΛΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

A@HNA 2018

## Ευχαριστίες

Πρώτιστα, θέλω να εκφράσω την εκτίμηση μου προς τον υποψήφιο διδάκτορα Τσαλαβούτη Βασίλειο, η συνεισφορά του οποίου στην παρούσα διπλωματική υπήρξε καθοριστική. Εν συνέχεια, επιθυμώ να υπογραμμίσω τον σεβασμό μου προς τον κύριο Τόλη Αθανάσιο και επιβλέποντα καθηγητή, μέσω του οποίου αποφάνθηκα για το αντικείμενο που θα ήθελα να ακολουθήσω στην μετέπειτα πορεία μου.

Δεν θα μπορούσα να αφήσω εκτός του παρόντος εδαφίου τους γονείς μου Κική και Γιώργο για την ατέρμονη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια στον εκπαιδευτικό μου βίο. Ξεχωριστά, όπως της αξίζει θα αναφερθώ στην φίλη μου Αλεξάνδρα, η οποία υπήρξε έρεισμα και πηγή έμπνευσης στις προσπάθειες μου για ανέλιξη.

Τέλος, η διαδρομή μου τα τελευταία 5 χρόνια, μέσω της συναναστροφής και επικοινωνίας με τους ακαδημαϊκούς του ιδρύματός μας, με όπλισε με τα απαραίτητα εφόδια προκειμένου σε ένα δυνατό ξεκίνημα ως Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ.

Δημήτρης-Ανδρέας Πλατανιώτης

Φεβρουάριος 2018

## Έποψη

Ζητούμενο του παρόντος αποτελεί η υλοποίηση πιθανοτικής μεθόδου που λαμβάνει υπόψη τη διαθεσιμότητα των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την επίλυση του βραχυπρόθεσμου προβλήματος ένταξης μονάδων (Unit Commitment Problem – UCP). Η παράμετρος της διαθεσιμότητας εισάγεται με τελικό στόχο την εκτίμηση της στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα της περιόδου που μελετάται, ικανοποιώντας σε κάθε περίπτωση το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας που ορίζεται για το σύστημα παραγωγής.

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων επιλύθηκε από τον εξελικτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης IRC – FROFI. Ο αλγόριθμος συνδυάζει τον εξελικτικό αλγόριθμο FROFI και έναν ευρετικό μηχανισμό, ο οποίος επιδιορθώνει τις υποψήφιες λύσεις του προβλήματος.

Το ποσό της ωριαίας στρεφόμενης εφεδρείας υπολογίσθηκε υλοποιώντας τους περιορισμούς αξιοπιστίας του συστήματος. Ειδικότερα, οι δύο δείκτες που ορίζουν την αξιοπιστία του συστήματος είναι η πιθανότητα απώλειας φορτίου και η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια. Οι ανωτέρω δείκτες εκφράζουν την πιθανότητα αδυναμίας του συστήματος να καλύψει το ζητούμενο φορτίο και την ενέργεια που αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί σε ημερήσια βάση αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα στο πρώτο μέρος επικεντρώνονται στη σύγκριση αναλυτικής και πιθανοτικής προσέγγισης στην εκτίμηση της στρεφόμενης εφεδρείας, ενώ στο δεύτερο πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας για τα διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας συναρτήσει της διαθεσιμότητας των μονάδων. Τέλος, τα αριθμητικά αποτελέσματα που συνοψίζονται στα συμπεράσματα φανερώνουν την αποδοτικότητα την προτεινόμενης μεθόδου.

## Διάρθρωση διπλωματικής

Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής συνοψίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τις τεχνικές εκτίμησης στρεφόμενης εφεδρείας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης περιγράφονται οι αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει την μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Ειδικότερα, παρουσιάζεται υπό μορφή εξισώσεων η αντικειμενική συνάρτηση καθώς και οι περιορισμοί του προβλήματος.

Εν συνεχεία στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων. Φαίνεται επίσης η προγραμματιστική πορεία που ακολουθήθηκε και η μέθοδος ένταξης τεχνικών και περιορισμών αξιοπιστίας.

Στο κεφάλαιο τέσσερα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζεται η τεχνικοοικονομική σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων εκλογής αποθέματος. Έπειτα, ακολουθεί ανάλυση ευαισθησίας για τα διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας που μελετήθηκαν καθώς και ανάλυση της επίδρασης της διαθεσιμότητας των θερμικών μονάδων στα ολικά κόστη.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο σχολιάζονται τα αποτελέσματα και συνοψίζονται οι απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου στην αξιοποίηση της κάτωθι ανάλυσης για ερευνητικούς αλλά και πρακτικούς σκοπούς.

## Abstract

The present thesis concerns the implementation of a probabilistic approach that takes into account the availability of conventional power units in order to solve the shortterm unit commitment problem (UCP). The availability parameter is introduced with the ultimate aim of assessing the spinning reserve capacity for each hour of the dispatch period, satisfying in each case the desirable reliability level of the production system.

The unit commitment problem was solved by the constrained optimization evolutionary algorithm IRC – FRORI. This algorithm combines a state of the art Evolutionary Algorithm and a heuristic repair mechanism which repairs the solution vectors in case they violate the constraints of the problem.

The amount of the hourly spinning reserve was calculated by implementing the reliability constraints of the system. In particular, the two indicators that define the reliability of the system are the loss of load probability and the expected non-served energy. The above indicators reflect the possibility of the system failing to cover the demanded load and the energy expected not to be served on a daily basis respectively.

The results in the first part focus on the comparison of a deterministic and the probabilistic approach to the estimation of the spinning reserve capacity, while in the second part, a sensitivity analysis is performed on the different reliability levels through the availability of the units. Finally, the numerical results summarized in the conclusions show the efficiency of the proposed method.

# Περιεχόμενα

1	Εια	σαγ	ωγή	11
	1.1	Ανά	άγκη για αξιοπιστία συστήματος	11
	1.2	Μέ	θοδοι εκτίμησης ποσού στρεφόμενης εφεδρείας	12
	1.3	Πρά	όβλημα ένταξης μονάδων (ΠΕΜ) UCP και τεχνικές βελτιστοπο	ίησης13
	1.3.	1	Βιβλιογραφία αλγορίθμων βελτιστοποίησης του ΠΕΜ	14
	1.4	Εξε	ελικτικοί αλγόριθμοι & Διαφορική εξέλιξη (DE)	14
	1.5	Περ	οί βελτιστοποίησης	15
	1.5.	1	Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς	15
	1.5.	2	Τεχνικές διαχείρισης περιορισμών	16
	1.6	Εισ	αγωγή στην ΔΕ	17
	1.6.	1	Αρχικοποίηση του πληθυσμού της DE	17
	1.6.	2	Μετάλλαξη (Mutation) και διαφορά διανυσμάτων	
	1.6.	3	Διασταύρωση (Crossover)	19
	1.6.	4	Επιλογή (Selection)	
	1.6.	5	Παράμετροι ελέγχου της DE	
	1.7	Καν	νόνας Εφικτότητας – Feasibility Rule [36]	
	1.8	FRO	OFI	
	1.8.	1	Μηχανισμοί FROFI	
	1.8.	2	DE διαδικασίες στον FROFI	
	1.8.	3	Μηχανισμός αντικατάστασης	
	1.8.	4	Στρατηγική μετάλλαξης	
	1.9	IRC	C – FROFI	
2	M	ΟN	ΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	25
	2.1	Μα	θηματική κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης	27
	2.2	BA	ΣΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
	2.2.	1	Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος	
	2.2. εφε	2 δρεία	Θεωρητικό υπόβαθρο για περιορισμό απαιτούμενης στ <sub>ι</sub> ας	ρεφόμενης 29
	2.2.	3	Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (ramp ra	utes)30
	2.2.	4	Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδα	ov31
	2.3	ПЕ	ΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	
	2.3.	1	Υλοποίηση των περιορισμών αξιοπιστίας	

2.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ	33
2.4	.1 Περιγραφή πίνακα πιθανότητας απώλειας φορτίου	33
2.4	.2 LOLP & EUE	34
3 YI	ΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΌ ΜΟΝΤΕΛΟ	. 36
3.1	Εισαγωγή δεδομένων συστήματος	38
3.2	Μοντέλα ζήτησης	39
3.2	.1 Υπόβαθρο για αβεβαιότητα πρόβλεψης φορτίου	39
3.2	.2 Σταθερή ζήτηση προβλήματος	40
3.3	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΌΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	41
3.4	Προσεγγίσεις για εκτίμηση ποσού στρεφόμενης εφεδρείας	43
3.4	.1 Ντετερμινιστική μέθοδος ορισμού ποσού στρεφόμενης εφεδρείας	44
3.4	.2 Πιθανοτική μέθοδος στην εκτίμηση στρεφόμενης εφεδρείας	44
3.5	Διόρθωση περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδα	ov46
3.6	Διόρθωση της πλεονάζουσα ισχύος – Repair excess capacity	47
3.6	.1 Σταθερό ποσό στρεφομένης εφεδρείας	47
3.6	.2 Αποδέσμευση μονάδων με έλεγχο αξιοπιστίας	47
3.7	Διόρθωση ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (ramp rates)	51
3.8	Διόρθωση ισοζυγίου ισχύος	51
3.9	Αντικειμενική συνάρτηση και διαδικασίες IRC – FROFI	52
3.10	Κριτήριο τερματισμού – Λοιπές διαδικασίες αλγορίθμου	52
4 A]	ΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	. 54
4.1	Αποτίμηση δύο προσεγγίσεων	55
4.1	.1 Τεχνικοοικονομική σύγκριση αποθεμάτων των 2 προσεγγίσεων	55
4.1	.2 Τεχνική ανάλυση των μεθόδων	56
4.2 αξιοπ	Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής ως προς τις τιμές των δειι ποτίας	κτών 60
4.2	.1 Μεταβολή επιπέδων αξιοπιστίας για LT=1	60
4.3	Επίδραση του χρονικού διαστήματος LT στην αντικειμενική	65
4.3	.1 Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής στις τιμές του LT	66
5 Συ	ρμπεράσματα – Επίλογος	.71
5.1	Ντετερμινιστική – Πιθανοτική Μέθοδος	71
5.2	Επίδραση του επιπέδου αξιοπιστίας	71
5.3	Επίδραση του διαστήματος LT	72

6	Βιβλιογραφία	.7	3
---	--------------	----	---

# Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Πίνακας Συμβόλων	25
Πίνακας 3.1: Πίνακας αριθμητικών τιμών παραμέτρων συστήματος	38
Πίνακας 3.2: Αναμενόμενος ρυθμός βλάβης μονάδων	39
Πίνακας 4.1: Οικονομική σύγκριση των 2 προσεγγίσεων	59
Πίνακας 4.2: Οικονομικά αποτελέσματα για Lmax=0.5%	60
Πίνακας 4.3: Οικονομικά αποτελέσματα για EUE=0.1%	63
Πίνακας 4.4: Οικονομικά αποτελέσματα συναρτήσει του LT	66

# Ευρετήριο Σχημάτων

## 1 Εισαγωγή

Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου για τη διαχείριση και διοίκηση της παγκόσμιας κοινότητας σε όλους τους επιστημονικούς κλάδους αποτελεί επιτακτική ανάγκη λόγω του ρυθμού ανάπτυξης των σύγχρονων κοινωνιών. Ακρογωνιαίο λίθο της ανωτέρω ανάλυσης θα αποτελέσει η αποδοτικότερη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, καθότι η τελευταία είναι η σημαντικότερη πηγή ενέργειας του συστήματος. Εστιάζουμε λοιπόν το ενδιαφέρον μας στην εύρεση κατάλληλων μεθόδων και συστημάτων για την βέλτιστη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μιας οικονομίας.

Στα πλαίσια της βέλτιστης παραγωγής και διακίνησης της ηλεκτρικής ενέργειας εντάσσεται και το πρόβλημα ένταξης μονάδων, το οποίο αφορά στην εύρεση του βέλτιστου οικονομικά προγράμματος λειτουργίας των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, με στόχο την κάλυψη του ζητούμενου φορτίου. Για την ανάπτυξη μιας επαρκούς μεθόδου, ως μηχανικοί στο σύστημα λήψης αποφάσεων, είναι απαραίτητη η ακριβής ερμηνεία του προβλήματος ένταξης μονάδων, η μοντελοποίηση αυτού και τέλος η δημιουργία κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου προκειμένου στην ταχεία, σταθερή και βέλτιστη παραγωγή εφικτών λύσεων. Προφανώς και πρόκειται για ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, με πολλούς αστάθμητους παράγοντες, όπως η αβεβαιότητα πρόβλεψης φορτίου, η πιθανή αστοχία των μονάδων ή του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Παρ' όλα ταύτα η ανάλυση γίνεται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος χωρίς να χάνεται η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Ο βίος του σύγχρονου ατόμου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθότι η τελευταία του δίνει τη δυνατότητα να εξυπηρετείται από ιατρικά μηχανήματα στο χώρο του, να είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο μέσω των συσκευών του, να θερμαίνει το περιβάλλον που διαμένει και πιθανά στο μέλλον καθολικά να κινεί το αμάξι του. Βάσει των παραπάνω κρίνεται σαφής η μεγάλη ανάγκη να μελετηθεί και να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να εξασφαλισθεί η ασφαλής και οικονομική λειτουργία τως. Στο πλαίσιο αυτό εισάγουμε το ιδιαιτέρως σημαντικό ζήτημα της εκτίμησης αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.1 Ανάγκη για αξιοπιστία συστήματος

Βασικός λόγος ύπαρξης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η οικονομική και αξιόπιστη παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος στους καταναλωτές. Η αξιοπιστία επιτυγχάνεται με την (παράλληλη) διατήρηση εφεδρικών – περίσσιων ποσών ισχύος προκειμένου στην επαρκή και συνεχή κάλυψη του συστήματος σε περίπτωση αστοχίας ή διακοπής λειτουργίας μιας μονάδας. Ζητούμενο λοιπόν και αντικείμενο του παρόντος αποτελεί η εύρεση κατάλληλου ποσοστού ισχύος που θα πρέπει να είναι κάθε ώρα σε στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή άμεσα διαθέσιμο, με το

χαμηλότερο δυνατό κόστος, αλλά και ικανοποιώντας τον περιορισμό του δείκτη αξιοπιστίας του συστήματος.

Ο σημαντικότερος παράγοντας κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι ο καθορισμός επαρκούς εγκατεστημένης ισχύος. Ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα στον οποίο βασίζεται η απόφαση του σχεδιαστή, ορίζεται η στατική και η λειτουργική απαίτηση ισχύος[1]. Η πρώτη αφορά στην εκτίμηση των απαιτήσεων ισχύος για μακροπρόθεσμο προγραμματισμό ενός συστήματος, ενώ η λειτουργική απαίτηση ισχύος σχετίζεται με την κάλυψη βραχυπρόθεσμων απαιτήσεων ισχύος σε ένα σύστημα. Η τελευταία αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

### 1.2 Μέθοδοι εκτίμησης ποσού στρεφόμενης εφεδρείας

Οι τεχνικές που έχουν μέχρι στιγμής αναπτυχθεί για την εκτίμηση της εφεδρείας για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται, (ώρα, μήνας, έτος) συνοψίζονται σε δύο κατηγορίες, τις ντετερμινιστικές/ αναλυτικές και τις πιθανοτικές. [2]-[4]. Ντετερμινιστικά κριτήρια που εφαρμόζονται κατά κόρον στη βιομηχανία, είναι ο καθορισμός του αποθέματος ίσος με ένα ποσοστό επί της ζήτησης ισχύος ή ίσος με το μέγεθος της μεγαλύτερης εν ενεργεία μονάδος. Παρ' ότι η προσέγγιση αυτή απλοποιεί τα πράγματα σε επίπεδο υπολογισμών, δεν συμπεριλαμβάνει σενάρια όπως η μη προγραμματισμένη διακοπή λειτουργίας μιας μονάδος, ο κορεσμός του δικτύου διακίνησης ή η εσφαλμένη πρόβλεψη φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μια προπαμπιλιστική προσέγγιση θα μπορούσε να εισάγει τη στοχαστικότητα του συστήματος, λαμβάνοντας υπ' όψη τα ανωτέρω φαινόμενα στη διαδικασία εκτίμησης επαρκούς ποσού στρεφόμενης εφεδρείας. Το μέγεθος που συγκεντρώνει την ανωτέρω πληροφορία καθορίζει το ρίσκο του συστήματος [5]. Με τον όρο ρίσκο ορίζουμε την πιθανότητα αδυναμίας από πλευράς συστήματος κάλυψης της ζητούμενης ισχύος ή της ύπαρξης μηδενικού αποθέματος κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος στο μέλλον[1]. Το διάστημα αυτό είναι γνωστό στην αγγλική ορολογία ως "lead time" (LT) και θεωρείται ότι τυχόν βλάβες σε κάποια μονάδα δεν επιδιορθώνονται μέσα σε αυτό. Πρόκειται για ένα σημαντικό μέγεθος, όπως θα δούμε στην συνέχεια καθώς επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των μονάδων. Επιπλέον αναφέρουμε ότι για μία συμβατική εκτίμηση του αποθέματος ισχύος θεωρούμε ότι οι ενεργές μονάδες, εκείνες δηλαδή που αποδίδουν καθαρή ισχύ στο σύστημα, προσδίδουν την ισχύ τους μέσω σύνδεσης με το κοινό καλώδιο διακίνησης ηλεκτρικής ενέργειας, οι πιθανές βλάβες της οποίας γενικά δεν λαμβάνονται υπόψη [5]. Τέλος, για την επαρκή εισαγωγή του αναγνώστη στην ανάλυση μας, στην εκλογή του βέλτιστου ποσού στρεφόμενης εφεδρείας θεωρούμε μόνον τις πιθανές διακοπές λειτουργίας μονάδων, ενώ η αβεβαιότητα στη πρόβλεψη του φορτίου ή οι πιθανές βλάβες στις γραμμές μεταφοράς δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

## 1.3 Πρόβλημα ένταξης μονάδων (ΠΕΜ) UCP και τεχνικές βελτιστοποίησης

Η θέση από την οποία θα εξετάσουμε τον πρόβλημα ένταξης μονάδων (UCP) (προγραμματισμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) είναι εκείνη του λειτουργού. Ο φορέας δηλαδή που προβλέποντας την βραχυπρόθεσμη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, αποφασίζει το βέλτιστο προγραμματισμό των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας που βρίσκονται στην επικράτειά του. Με τον όρο βέλτιστο ορίζουμε την οικονομικότερη τελικά λύση που διαμορφώνεται από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με βασική προϋπόθεση, την κάλυψη της ζήτησης για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος που μελετάται.

Τα δύο κόστη που θα λαμβάνουμε υπ' όψη στην εκλογή της βέλτιστης απόφασης είναι εκείνα του καυσίμου και της ψυχρής/ θερμής εκκίνησης (cold/ hot start up) κάθε μονάδας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την καύση ορυκτών καυσίμων λ.χ. λιγνίτη, υδρογονανθράκων καθώς και ανανεώσιμων πηγών. Στην υπάρχουσα κατάσταση, σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η σχεδόν αδύνατη μακροχρόνια αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την ανάγκη για άμεση κατανάλωση αυτής. Επιτακτική ανάγκη αποτελεί λοιπόν η αποδοτικότερη αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων μιας και η πλειοψηφία των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής παγκοσμίως σήμερα, καταναλώνουν τέτοια καύσιμα. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία εστιάζουμε σε συστήματα παραγωγής που περιλαμβάνουν μόνο θερμικές/ συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας.

Η ένταξη μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε μια οικονομία αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (constrained optimization) στο οποίο ζητείται ο προσδιορισμός του προγράμματος λειτουργίας ή μη των μονάδων που βρίσκονται στο σύστημα, για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, είκοσι τεσσάρων ωρών, υπό ορισμένους λειτουργικούς περιορισμούς. Στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους που απαιτείται για την κάλυψη της βραχυπρόθεσμης προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανωτέρω διαδικασία συνάγεται από μικρές οικονομίες για κάθε μία ώρα του εικοσιτετραώρου καθώς τελικά οδηγούν σε σημαντική ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους για το συνολικό χρονικό διάστημα που μελετάται.

Ειδικότερα το ΠΕΜ χωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα [6]: Στο πρώτο μέρος καθορίζεται, για το ζητούμενο χρονικό διάστημα, ένα πρόγραμμα με ενδείξεις μηδέν (0) και ένα (1) όπου προσδιορίζεται για κάθε ώρα του διαστήματος αν μια μονάδα είναι εκτός λειτουργίας ή σε λειτουργία αντίστοιχα. Στην συνέχεια, στις ανωτέρω ενδείξεις καθορίζονται για κάθε ώρα τα ακριβή ποσά ισχύος που προσδίδει κάθε μονάδα προκειμένου στην μείωση του κόστους καυσίμου με ταυτόχρονη εξυπηρέτηση του ζητούμενου φορτίου. Το δεύτερο μέρος του ΠΕΜ ονομάζεται πρόβλημα κατανομής φορτίου (ΠΚΦ) (Economic/ Load Dispatch)[7].

### 1.3.1 Βιβλιογραφία αλγορίθμων βελτιστοποίησης του ΠΕΜ

Η εύρεση μιας ακριβής λύσης του ΠΕΜ θα μπορούσε να επιτευχθεί από μία ολοκληρωμένη απαρίθμηση όλων των δυνατών συνδυασμών των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για όλα τα πιθανά επίπεδα απόδοσης καθαρής ισχύος από την καθεμιά. Η προσέγγιση αυτή όμως, λόγω των αποτρεπτικών χρονικών υπολογιστικών απαιτήσεων [8], έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ποικίλων μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις αναλυτικές/ ντετερμινιστικές και τις στοχαστικές/ μετά-ευρετικές. Οι μέθοδοι που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία των αναλυτικών περιλαμβάνουν την λίστα προτεραιότητας (Priority List – PL) [9], τη μέθοδο branch-and bound (B& B) [10], το δυναμικό προγραμματισμό (Dynamic Programming – DP) [11], το μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Mixed-Integer Linear Programming – MILP) [12], τη μέθοδο Lagrangian Relaxation (LR) [13], καθώς και συνδυασμό αυτών όπως η LR – MILP [14].

Λόγω της ανεπάρκειας των ανωτέρω μεθόδων στην διαγείριση ΠΕΜ πολλών διαστάσεων με πολύπλοκα πεδία τιμών, έγουν μελετηθεί ποικίλες στογαστικές μέθοδοι ή μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι (meta-heuristics). Με τον όρο στοχαστικές εννοούμε μεθόδους οι οποίες δεν εγγυώνται πάντοτε την ακριβή και βέλτιστη λύση ενός προβλήματος, αλλά μία επαρκή λύση σε σχετικά σύντομο υπολογιστικό χρόνο. Έτσι, στην κατηγορία αυτή ανήκουν προσεγγίσεις όπως η προσομοιωμένη ανόπτηση (Simulated Annealing – SA) [15], γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithm – GA) [16]-[18], βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization -PSO) [19], [20], εξελικτικός προγραμματισμός (Evolutionary Programming – EP) [21], βελτιστοποίηση αποικιών μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO) [22], διαφορική εξέλιξη (Differential Evolution – DE) [23], [24], αλγόριθμος εξελικτικής κβαντικής έμπνευσης (Quantum Inspired Evolutionary Algorithm - QEA) [25] και τέλος ο αλγόριθμος βαρυτικής δυαδικής αναζήτησης (Binary Gravitational Search Algorithm – BGSA) [26]. Στις ανωτέρω τεχνικές χρησιμοποιούνται στοχαστικοί αλγόριθμοι με δυαδική ή ακέραιη κωδικοποίηση για τον καθορισμό του προγράμματος ένταξης μονάδων, ενώ το πρόβλημα κατανομής φορτίου επιλύεται με επαναληπτικές διαδικασίες όπως η μέθοδος λάμδα (Lambda iteration method) [8]. Τέλος, εκτός από τις δύο αυτές κατηγορίες, έχουν αναπτυχθεί υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν αναλυτικές και στοχαστικές τεχνικές με στόχο τη μείωση του χώρου εφικτών λύσεων σε ΠΕΜ μεγάλων διαστάσεων. Αναφέρουμε ορισμένες για λόγους πληρότητας LR & GA[27], LR & PSO [28], GA & SA[29].

## 1.4 Εξελικτικοί αλγόριθμοι & Διαφορική εξέλιξη (DE)

Μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι. Χρησιμοποιώντας τον όρο εξελικτικός αλγόριθμος αναφερόμαστε στη διαδικασία δημιουργίας και εξέλιξης ενός πληθυσμού. Στη συνέχεια, ο πληθυσμός αυτός εισάγεται τυχαία στο χώρο λύσεων με στόχο την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος. Οι ρίζες των εξελικτικών αλγορίθμων βρίσκονται στην περίοδο του 1950, όπου εφευρέθηκε η ιδέα χρήσης της θεωρίας εξέλιξης του Δαρβίνου για αυτοματοποιημένη επίλυση προβλημάτων. Έτσι λοιπόν το 1960, ο Lawrence J. Fogel παρουσιάζει την πρώτη μέθοδο εξελικτικού προγραμματισμού (Evolutionary Programming – EP) στην Αμερική, παράλληλα στη Γερμανία οι I. Rechenberg και H.-P. Schwefel εισάγουν τις εξελικτικές στρατηγικές (Evolutionary Strategies – ESs), ενώ έπειτα από μία δεκαετία οι John Henry Holland, Ann Arbor από το πανεπιστήμιο του Michigan, χρησιμοποιώντας την εξελικτική θεωρία του Δαρβίνου, εμφανίζουν τους γενετικούς αλγορίθμους (GA) [30].

Η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης αναπτύχθηκε για πρώτη φορά το 1995 από τους Storn και Price [31]. Ως αναφέρθηκε προηγουμένως η τεχνική της διαφορικής εξέλιξης εντάσσεται στην κατηγορία των μετά-ευρετικών/ στοχαστικών μεθόδων βελτιστοποίησης με βασικό πλεονέκτημα την απλότητά της, γεγονός που την καθιστά εύκολη στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης σε ποικίλα επιστημονικά πεδία.

### 1.5 Περί βελτιστοποίησης

Ξεκινώντας παραγωγικά, βελτιστοποίηση είναι η προσπάθεια μεγιστοποίησης των επιθυμητών ιδιοτήτων ενός συστήματος με παράλληλη ελαγιστοποίηση των ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών του[32]. Απλούστερα, είναι η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, η οποία υπόκειται ή όχι σε ορισμένους περιορισμούς. Συνήθως, οι παράμετροι που σχετίζονται με την επίδοση ενός συστήματος παρουσιάζονται ως ένα διάνυσμα  $\vec{X} = [x_1, x_2, x_3, ..., x_D]$ . Η εκτίμηση του πόσο «καλή» είναι η εκάστοτε λύση γίνεται μέσω την αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) του συστήματος. Μαθηματικά, η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία ζητείται η εύρεση του ολικού ακρότατου μια συνάρτησης ή αλλιώς, ενός διανύσματος  $\vec{X}^*$  που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση  $f(\vec{X})(f: \Omega \subseteq \mathbb{R}^D \to \mathbb{R})$ , δηλαδή  $f(\vec{X}^*) < f(\vec{X}) \forall X \in \Omega$ . Σε προβλήματα χωρίς περιορισμούς θα είναι  $\Omega \equiv R^{D}$ . Με τον όρο ελαχιστοποίηση καλύπτουμε και την μιας αντικειμενικής εφόσον  $\max\{f(\vec{X})\} =$ περίπτωση μεγιστοποίησης  $-\min\{-f(\vec{X})\}$ . Η μη γραμμικότητα και η μη παραγωγησιμότητα των αντικειμενικών συναρτήσεων, εκτός του ότι εισήγαγε την αναγκαιότητα για χρήση εξελικτικών αλγορίθμων λόγω αδυναμίας υπολογισμού των παραγώγων από της κλασσικές μαθηματικές μεθόδους, περιπλέκει το ζήτημα εύρεσης ολικών ακρότατων λόγω ύπαρξης πολλών τοπικών. Ένα τοπικό ελάχιστο συμβολίζουμε  $f_l = f(\vec{X}_l)$  και ορίζουμε ως  $\exists \varepsilon > 0 \forall \vec{X} \in \Omega: \left| \vec{X} - \vec{X}_l \right| < \varepsilon \Rightarrow f_l \le f(\vec{X}).$ 

### 1.5.1 Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς

Στη διαδικασία επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης υπό περιορισμός (constrained optimization) με εξελικτικούς αλγόριθμους, υψίστης σημασίας διεργασία αποτελεί η αποτελεσματική διαχείριση των περιορισμών και της αντικειμενικής

συνάρτησης. Στην παρούσα φάση, χωρίς βλάβη της γενικότητας, για προβλήματα ελαχιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μορφή

$$\min f(\vec{x}) , x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_D] \in \Omega, L_i \le x_i \le U_i$$

υπό τους περιορισμούς:

$$g_j(\vec{x}) \le 0, j = 1, ..., l$$
  
 $h_j(\vec{x}) = 0, j = l + 1, ..., m$ 

όπου  $\vec{x}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης με πλήθος D,  $L_i$ ,  $U_i$  είναι τα φυσικά ή τεχνικά ελάχιστα ή μέγιστα αντίστοιχα όρια για κάθε μία από της μεταβλητές απόφασης και l, (m - l) είναι το πλήθος των περιορισμών ανισότητας και ισότητας αντίστοιχα. Στην βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς, ο βαθμός παραβίασης του περιορισμού j για κάθε άτομο του πληθυσμού υπολογίζεται ως εξής:

$$G_{j}(\vec{x}) = \begin{cases} \max\{0, g_{j}(\vec{x})\} & 1 \le j \le l \\ \max\{0, |h_{j}(\vec{x})| - \delta\} & l + 1 \le j \le m \end{cases}$$
(1.1)

,όπου το δ είναι μία θετική ποσότητα για τη χαλάρωση του περιορισμού ισότητας σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Έπειτα, το άθροισμα  $G(\vec{x}) = \sum_{j=1}^{m} G_j(\vec{x})$  αντιπροσωπεύει το βαθμό παραβίασης όλων των περιορισμών από την υποψήφια λύση  $\vec{x}$ . Μέσω λοιπόν της σχέσεως (1.1) συνάγουμε ότι ένα διάνυσμα μεταβλητών απόφασης  $\vec{x}$  θα ονομάζεται εφικτό (feasible) όταν  $G(\vec{x}) = 0$ , ενώ σε άλλη περίπτωση ανέφικτο (infeasible).

#### 1.5.2 Τεχνικές διαχείρισης περιορισμών

Λόγω της ύπαρξης περιορισμών σε διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι διαχείρισης περιορισμών σε συνεργασία με εξελικτικούς αλγόριθμους. Οι κυριότερες εξ αυτών κατηγοριοποιούνται ως εξής: μέθοδοι βασισμένοι στη συνάρτηση ποινής (penalty function) [33], μέθοδοι βασισμένοι στην προτίμηση εφικτών λύσεων συγκριτικά με ανέφικτες [34] και μέθοδοι πολλαπλών κριτηρίων (πολυκριτηριακής) βελτιστοποίησης (multi-objective optimization) [35]. Συγκεκριμένα, μετά τη παραγωγή απογόνων από τον εξελικτικό κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης, ζητούμενο των μεθόδων διαχείρισης περιορισμών είναι ο καθορισμός ενός κριτηρίου σύγκρισης μεταξύ απογόνων και γονέων. Στις μεθόδους με συνάρτηση ποινής κατασκευάζεται μία αντικειμενική συνάρτηση προσθέτοντας έναν όρο ποινής ανάλογα με την παραβίαση περιορισμών και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των ατόμων. Στις μεθόδους που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία, η σύγκριση μεταξύ των ατόμων πραγματοποιείται είτε μέσω του βαθμού παραβίασης περιορισμών είτε μέσω της τιμής της αντικειμενικής. Έως ένα βαθμό, οι εφικτές λύσεις προτιμώνται έναντι των ανέφικτων. Επιπρόσθετα, πολυκριτηριακές τεχνικές χρησιμοποιούν περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις λ.χ.  $(f(\vec{x}), G(\vec{x}))$  και έπειτα χρησιμοποιείται συνήθως σχήμα Pareto για τη σύγκριση των ατόμων.

Γενικά ένας εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς οφείλει να εισάγει στα πρώτα στάδια τα άτομα στον χώρο αποδεκτών λύσεων και τελικά να βρίσκει τη βέλτιστη λύση. Για την υλοποίηση του πρώτου, η σύγκριση των ατόμων εξαρτάται κυρίως από τους περιορισμούς στις περισσότερες μεθόδους διαχείρισης περιορισμών, γεγονός που παραμελεί την πληροφορία της αντικειμενικής συνάρτησης και επομένως δρα αρνητικά στην εύρεση του ολικού βέλτιστου.

Ως μία προσπάθεια για την αντιμετώπιση της παραπάνω αδυναμίας προτάθηκε από τον Y.Wang [36] η μέθοδος με την ονομασία Κανόνας Εφικτότητας με ενσωμάτωση πληροφορίας της αντικειμενικής συνάρτησης (Feasibility Rule with the incorporation of Objective Function Information – FROFI). Η μέθοδος FROFI πρακτικά είναι ένας εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (Constrained Optimization Evolutionary Algorithm – COEA). Περιλαμβάνει έναν εξελικτικό αλγόριθμο (Διαφορική Εξέλιξη) και έναν τρόπο διαχείρισης περιορισμών (Κανόνες Εφικτότητας). Τέλος, κρίθηκε σκόπιμο η ανάλυση του αλγόριθμου FROFI να πραγματοποιηθεί μετά την θεμελίωση των δύο προαναφερθέντων.

### 1.6 Εισαγωγή στην ΔΕ

Η μέθοδος της διαφορικής εξέλιξης είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης πραγματικών μεταβλητών, που λειτουργεί κυκλικά όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι τέσσερις βασικές διεργασίες της DE.



Σχήμα 1.1: Βασικά στάδια του αλγορίθμου Διαφορικής Εξέλιζης [30]

### 1.6.1 Αρχικοποίηση του πληθυσμού της DE

Η DE αναζητά το ολικό βέλτιστο μιας αντικειμενικής συνάρτησης σε ένα χώρο πραγματικών αριθμών  $R^D$ . Η πρώτη διαδικασία που λαμβάνει χώρα είναι η τυχαία αρχικοποίηση των ατόμων του πληθυσμού NP, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύεται από ένα διάνυσμα D διαστάσεων με πραγματικές τιμές. Τα διανύσματα αυτά αποτελούν τις υποψήφιες λύσεις του προβλήματος και αποκαλούνται γονίδια ή χρωμοσώματα. Ο αρχικός αυτός πληθυσμός ατόμων φυσικά μέσω της εξέλιξης- καλυτέρευσης θα μεταλλαχθεί, οπότε εισάγουμε το δείκτη G =

0,1,..., G<sub>max</sub> που συμβολίζει τον αριθμό της γενιάς που βρίσκεται ο εκάστοτε πληθυσμός. Συμβολίζουμε λοιπόν μία υποψήφια λύση του πληθυσμού, του ατόμου *i* στη γενιά G ως:

$$\vec{X}_{i,G} = \begin{bmatrix} x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G} \end{bmatrix}, \qquad i = 1, \dots, NP$$
(1.2)

Για κάθε παράμετρο του ανωτέρου διανύσματος θα πρέπει να υπάρχουν φυσικά αριθμητικά όρια, ανάλογα με την ποσότητα την οποία αυτή αντιπροσωπεύει. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, οι τιμές αυτές ορίζονται από την ελάχιστη και μέγιστη παραγωγική ικανότητα κάθε μονάδας, ενώ συμβολίζουμε  $\vec{X}_{min} = [x_{1,min}, x_{2,min}, ..., x_{D,min}], \quad \vec{X}_{max} = [x_{1,max}, x_{2,max}, ..., x_{D,max}]$  αντίστοιχα. Κατά την αρχικοποίηση του πληθυσμού, οφείλουμε να καλύψουμε όσο τον δυνατό ομοιόμορφα το πεδίο αναζήτησης λύσεων, με αποτέλεσμα το σχήμα που χρησιμοποιείται αρχικά για το στοιχείο *j* του ατόμου *i* την γενιά G = 0 να λαμβάνει τη μορφή

$$x_{j,i,0} = x_{j,min} + rand_{i,j}[0,1] \cdot (x_{j,max} - x_{j,min})$$
(1.3)

όπου η  $rand_{i,j}[0,1]$  είναι μια γεννήτρια τυχαίων ομοιόμορφα κατανεμημένων αριθμών μεταξύ 0 και 1.

#### 1.6.2 Μετάλλαξη (Mutation) και διαφορά διανυσμάτων

Βιολογικά, με τον όρο μετάλλαξη αναφερόμεθα σε οποιαδήποτε μεταβολή μπορεί να συμβεί στο γενετικό υλικό ενός οργανισμού. Στους εξελικτικούς, και ειδικότερα στη βιβλιογραφία της διαφορικής εξέλιξης, στο πιο απλό σχήμα μετάλλαξης, το διάνυσμα μετάλλαξης (mutant/ donor vector)  $\vec{V}$  προκύπτει από την διανυσματική πρόσθεση τριών διανυσμάτων τυχαία επιλεγμένων από τον πληθυσμό ως:

$$\vec{V}_{i,G} = \vec{X}_{r_1^i,G} + F \cdot (\vec{X}_{r_2^i,G} - \vec{X}_{r_3^i,G})$$
(1.4)

Οι δείκτες  $r_1, r_2, r_3$  επιλέγονται τυχαία από το συνολικό σώμα του πληθυσμού [1, NP], και όπως φαίνεται από την εξίσωση (1.4) η διαφορά που προστίθεται στο διάνυσμα βάσης  $\vec{X}_{r_1^i}$ , για να προκύψει το mutant, καθορίζεται από μία εκ των παραμέτρων ελέγχου της DE, του παράγοντα F ο οποίος συνήθως κείται στο διάστημα [0.4,1]. Στο σχήμα 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάνυσμα μετάλλαξης, όπως αυτό υπολογίζεται μέσω της σχέσεως 1.4.



Σχήμα 1.2: Απλό σχήμα μετάλλαξης DE της εξ (1.4) [30]

#### 1.6.3 Διασταύρωση (Crossover)

Η συγκεκριμένη διαδικασία λαμβάνει χώρα με στόχο τη διατήρηση της ποικιλομορφίας κατά την εξέλιξη ενός πληθυσμού. Έχοντας λοιπόν το διάνυσμα  $\vec{V}_i$  από τη μετάλλαξη, συμβαίνει ανασυνδυασμός στοιχείων με το αντίστοιχο διάνυσμα του γονέα *i* το οποίο καλείται parent/ target vector  $\vec{X}_{i,G}$  και προκύπτει τελικά ο απόγονος (offspring/ trial vector)  $\vec{U}_i$ .

$$\vec{U}_{i,G} = \left[ u_{1,i,G}, u_{2,i,G}, u_{3,i,G}, \dots, u_{D,i,G} \right]$$
(1.5)

Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι για την ανταλλαγή στοιχείων μεταξύ μεταλλαγμένου και γονέα: η εκθετική (two- point modulo) και η διωνυμική (uniform) διασταύρωση[37]. Προκειμένου στην υλοποίηση των δύο ανωτέρω μεθόδων απαιτείται η εισαγωγή μιας ακόμα μεταβλητής ελέγχου, ο βαθμός διασταύρωσης (crossover rate) Cr. Ειδικότερα, για το σχήμα της διωνυμικής μεθόδου, το κάθε ένα από τα D στοιχεία του κάθε απογόνου προκύπτει από την σύγκριση τυχαία παραγόμενων αριθμών στο διάστημα [0,1] με την τιμή της παραμέτρου Cr βάσει του παρακάτω σχήματος:

$$u_{j,i,G} = \begin{cases} v_{j,i,G} \text{ if } (rand_{i,j} \leq Cr \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,G} \text{ otherwise} \end{cases}$$
(1.6)



Σχήμα 1.3: Πιθανά διανύσματα απογόνων (trial v.) από διωνυμική διασταύρωση σε χώρο 2D[30]

Όπως στην μετάλλαξη ο όρος  $rand_{i,j}$  είναι μία γεννήτρια ομοιόμορφα κατανεμημένων αριθμών μεταξύ 0,1. Παρατηρούμε ότι η εξίσωση (1.6) μέσω της ισότητας  $j = j_{rand}$ , υποχρεώνει τον κάθε απόγονο να λαμβάνει τουλάχιστον ένα στοιχείο από το μεταλλαγμένο διάνυσμα, έτσι ώστε κανένας απόγονος να μην είναι ταυτόσημος με τον γονέα. Η παράμετρος Cr ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την πιθανότητα που έχει κάθε στοιχείο του διανύσματος του απογόνου να υιοθετηθεί από το μεταλλαγμένο διάνυσμα. Τέλος, στο σχήμα 1.3 οι τρεις περιπτώσεις διωνυμικής διασταύρωσης που παρουσιάζονται στο χώρο για διανύσματα δύο διαστάσεων μεταξύ γονέα  $\vec{X}_{i,G}$ , μεταλλαγμένου  $\vec{V}_{i,G}$  και απογόνου  $\vec{U}_{i,G}$  είναι οι εξής:

- 1.  $\vec{U}_{i,G} = \vec{V}_{i,G}$ , δηλαδή και τα δύο στοιχεία j = 1, j = 2 του διανύσματος είναι υιοθετημένα από το μεταλλαγμένο.
- 2.  $\vec{U}'_{i,G}$ , όπου το στοιχείο j = 1 υιοθετείται από το  $\vec{V}_{i,G}$  και το j = 2 από το  $\vec{X}_{i,G}$ .
- 3.  $\vec{U}''_{i,G}$ , όπου το στοιχείο j = 1 υιοθετείται από το  $\vec{X}_{i,G}$  και το j = 2 από το  $\vec{V}_{i,G}$ .

#### 1.6.4 Επιλογή (Selection)

Η διαδικασία της επιλογής είναι εκείνη που σταδιακά οδηγεί στη βελτίωση των ιδιοτήτων του πληθυσμού και τελικά στη μέγιστη δυνατή βελτιστοποίηση του ζητούμενου. Η αξιολόγηση λοιπόν και η επιβίωση των διανυσμάτων που προκύπτουν καθορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που επιφέρουν. Στην DE για τη διατήρηση σταθερού αριθμού ατόμων του πληθυσμού, εκτελείται σύγκριση μεταξύ γονέα (parent/target) και απογόνου (offspring/trial) και επιβιώνει στην επόμενη γενιά G = G + 1, εκείνος του οποίου, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει χαμηλότερη τιμή, συγκεκριμένα:

$$\vec{X}_{i,G+1} = \begin{cases} \vec{v}_{i,G} \text{ if } f(\vec{v}_{i,G}) \le f(\vec{X}_{i,G}) \\ \vec{X}_{i,G} \text{ if } f(\vec{v}_{i,G}) > f(\vec{X}_{i,G}) \end{cases}$$
(1.7)

Από το ανωτέρω σχήμα λοιπόν φαίνεται η σταδιακή εξέλιξη του πληθυσμού μεταξύ γενεών, που μπορεί να παραμείνει σταθερή, αλλά σε καμία περίπτωση δεν επιδεινώνεται.

## 1.6.5 Παράμετροι ελέγχου της DE

Οι παράμετροι ελέγχου της διαφορικής εξέλιξης είναι στον αριθμό τρεις: το μέγεθος του πληθυσμού NP, ο παράγοντας F στη διαδικασία μετάλλαξης και η σταθερά διασταύρωσης Cr. Στην εργασία [30] πραγματοποιείται εκτενής μελέτη για τις τιμές των ανωτέρω παραμέτρων. Επιγραμματικά αναφέρουμε ότι μία από τις προτεινόμενες τιμές του πληθυσμού στη βιβλιογραφία [31] είναι η 5 – 10D, όπου D είναι ο αριθμός των διαστάσεων του προβλήματος. Εν συνεχεία, μία αποδοτική τιμή για την παράμετρο της μετάλλαξης F είναι από 0.4 – 1.0. Τέλος, ως αναφέρθηκε προηγουμένως αύξηση της τιμής της παραμέτρων στοιχείων από το μεταλλαγμένο διάνυσμα στον απόγονο.

## 1.7 Κανόνας Εφικτότητας – Feasibility Rule [36]

Η συγκεκριμένη τεχνική προτάθηκε από τον Deb [34] και λειτουργεί ως μέθοδος διαχείρισης περιορισμών. Ανήκει στην δεύτερη κατηγορία που αναφέρθηκε παραπάνω και μεταχειρίζεται τα άτομα των πληθυσμών ως εξής:

- 1. Μεταξύ δύο ανέφικτων λύσεων, προτιμάται εκείνη με το χαμηλότερο βαθμό παραβίασης περιορισμών.
- 2. Μεταξύ μιας ανέφικτης και μιας εφικτής λύσης, προτιμάται η εφικτή.
- 3. Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων, προτιμάται εκείνη με την καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης.

Στην περίπτωση που η μέθοδος αυτή συνδυαστεί με την διαφορική εξέλιξη, όπως προαναφέρθηκε στην υποπαράγραφο 1.5.2, επηρεάζουν τη σύγκριση μεταξύ γονέα και απογόνου που πλέον δεν πραγματοποιείται βάσει της τιμής της αντικειμενικής, αλλά βάσει των τριών κανόνων της μεθόδου Feasibility Rule.

## 1.8 FROFI

Η αναφορά στη διαφορική εξέλιξη πραγματοποιήθηκε με στόχο την ομαλή εισαγωγή στο υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση και τη διαχείριση των περιορισμών του ΠΕΜ. Ο FROFI ανήκει στην οικογένεια των εξελικτικών αλγορίθμων για βελτιστοποίηση προβλημάτων υπό περιορισμούς. Στον FROFI ο αλγόριθμος της DE χρησιμοποιείται ως μηχανή αναζήτησης της βέλτιστης λύσης ενώ

ο κανόνας εφικτών λύσεων (feasibility rule) [34] χρησιμοποιείται για τη σύγκριση των ατόμων του πληθυσμού. Κατά την διαδικασία της εξέλιξης, αν ένας απόγονος που παράχθηκε από τη διασταύρωση της DE είναι χειρότερος από τον γονέα βάσει του κανόνα εφικτότητας, αλλά έχει καλύτερη τιμή αντικειμενικής, τότε ο απόγονος αποθηκεύεται σε ένα προκαθορισμένο αρχείο Α. Στη συνέχεια, τα άτομα που ευρίσκονται στον τελευταίο χρησιμοποιούνται για την αντικατάσταση άλλων ατόμων του πληθυσμού μέσω ενός μηχανισμού αντικατάστασης (replacement mechanism). Επιπλέον, στην εργασία [36] προτείνεται μία επιπλέον διαδικασία, στρατηγική μετάλλαξης, η οποία και χρησιμοποιείται όπως θα δούμε, και ουσιαστικά βοηθά των αλγόριθμο να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα ανέφικτων περιοχών. Σημειώνουμε επίσης ότι στο μηχανισμό αντικατάστασης και στη στρατηγική μετάλλαξης του FROFI, η σύγκριση μεταξύ των ατόμων γίνεται βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης.

#### 1.8.1 Μηχανισμοί FROFI

Όπως κάθε εξελικτικός, η πρωταρχική διαδικασία που υλοποιείται είναι η αρχικοποίηση του πληθυσμού του FRORI, με την ίδια ακριβώς διαδικασία που περιγράφθηκε στην DE. Έτσι, ο αρχικός πληθυσμός με NP άτομα την γενιά G = 1 συμβολίζεται:

$$Pop_1 = [\vec{x}_{1,G=1}, \dots, \vec{x}_{NP,G=1}]$$
(1.8)

όπου, το κάθε *i* άτομο του πληθυσμού στην *G* γενιά, αποτελεί υποψήφια λύση του προβλήματος:

$$\vec{x}_{i,G} = \left[ x_{1,i,G}, x_{2,i,G}, x_{3,i,G}, \dots, x_{D,i,G} \right]$$
(1.9)

Τα όρια στα οποία κείται η τιμή των παραμέτρων των διανυσμάτων υποψήφιων λύσεων καθορίζονται από την μέγιστη και ελάχιστη καθαρή ισχύ που μπορούν να προσδίδουν στο σύστημα. Ο αρχικοποιημένος πληθυσμός εξελίσσεται με την πάροδο των γενεών μέσω των μηχανισμών που περιγράφονται στη συνέχεια.

#### 1.8.2 DE διαδικασίες στον FROFI

Για την διατήρηση όσο το δυνατόν τυχαιότητας κατά τη μετάλλαξη, χρησιμοποιούνται δύο στρατηγικές μετάλλαξης με ίση πιθανότητα (0.5) ώστε να συμβούν. Τα σχήματα λοιπόν μετάλλαξης που εφαρμόζονται στο άτομο *i* του πληθυσμού  $i \in [1, NP]$ , του γονέα (parent/target vector) της γενιάς G = gen για την παραγωγή του διανύσματος μετάλλαξης είναι τα εξής:

1. DE/current-to-rand/1

$$\vec{v}_{i,gen} = \vec{x}_{i,gen} + U(0,1) \cdot \left(\vec{x}_{r1,gen} - \vec{x}_{i,gen}\right) + F \\ \cdot \left(\vec{x}_{r2,gen} - \vec{x}_{r3,gen}\right)$$
(1.10)

2. DE/rand-to-best/1

$$\vec{v}_{i,gen} = \vec{x}_{i,gen} + U(0,1) \cdot \left(\vec{x}_{best,gen} - \vec{x}_{r1,gen}\right) + F \\ \cdot \left(\vec{x}_{r2,gen} - \vec{x}_{r3,gen}\right)$$
(1.11)

Όπου  $r_1, r_2, r_3$  είναι τρεις διαφορετικοί δείκτες του πληθυσμού, U(0,1) μία γεννήτρια ομοιόμορφα κατανεμημένων αριθμών στο [0,1], ενώ με F συμβολίζουμε την παράμετρο της μετάλλαξης που εισάγει η DE. Η τιμή της παραμέτρου F εκλέγεται τυχαία κάθε φορά παίρνοντας μία από τις διακριτές τιμές (1.0, 0.8, 0.6). Επιπλέον, αναφέρουμε ότι στην στρατηγική DE/rand-to-best/1 στο άτομο  $\vec{x}_{best,gen}$  αντιστοιχεί η ολική ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, ανεξαρτήτως του βαθμού παραβίασης περιορισμών του.

Η διαδικασία της διασταύρωσης υλοποιείται με την ίδια ακριβώς λογική της DE, όπου τα στοιχεία του απογόνου παράγονται από ένα διωνυμικό σχήμα μέσω της ακόλουθης σχέσεως:

$$u_{j,i,G} = \begin{cases} v_{j,i,G} \text{ if } (rand_{i,j} \leq Cr \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{j,i,G} \text{ otherwise} \end{cases}$$
(1.12)

Όπου, j = 1, ..., D ενώ η παράμετρος ελέγχου της διασταύρωσης Cr εκλέγεται τυχαία κάθε φορά λαμβάνοντας μία εκ των διακριτών τιμών (0.1,0.2,1.0). Σημειώνουμε εδώ ότι η διαδικασία διασταύρωσης (crossover operator) εφαρμόζεται μόνο στην πρώτη διαδικασία στρατηγικής που περιγράφθηκε.

Ο κανόνας εφικτότητας (Feasibility Rule) εφαρμόζεται όπως ακριβώς περιγράφηκε στο εδάφιο (1.7). Υπενθυμίζουμε ότι βάσει αυτού, αν ένας απόγονος – άτομο δεν επιλέγεται να επιβιώσει στην επόμενη γενιά, λόγω παραβίασης περιορισμών, αλλά η τιμή της αντικειμενικής του είναι μικρότερη του γονέα, τότε αποθηκεύεται σε ένα προκαθορισμένων διαστάσεων αρχείο A, και πιθανά σε μελλοντικές γενεές να αντικαταστήσει κάποιο άτομο του πληθυσμού μέσω του μηχανισμού αντικατάστασης.

### 1.8.3 Μηχανισμός αντικατάστασης

Στόχο της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί η διατήρηση της ποικιλομορφίας του πληθυσμού στα πρώτα στάδια του αλγορίθμου, καθώς και η ταχύτερη σύγκλιση αυτού σε μεταγενέστερα στάδια. Η διαδικασία έχει ως εξής:

Αρχικά, όλα τα άτομα της τρέχουσας γενιάς κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά βάσει της τιμής της αντικειμενικής τους συνάρτησης και χωρίζονται σε MRN (δίνεται

από το χρήστη) ίσα μέρη. Το άτομο με τη μεγαλύτερη παραβίαση περιορισμού από την πρώτη κατάταξη ( $\vec{x}_a$ ) συγκρίνεται με το άτοπο που έχει την ελάχιστη παραβίαση περιορισμού από τον πίνακα A ( $\vec{x}_b$ ) βάσει της αντικειμενικής τους. Αν  $f(\vec{x}_b) < f(\vec{x}_a)$ , τότε το άτομο ( $\vec{x}_b$ ) αντικαθιστά στον πληθυσμό το ( $\vec{x}_a$ ) και διαγράφεται από το μητρώο A. Η διαδικασία αντικατάστασης τερματίζεται αν ανανεωθούν όλα τα MRN μέρη ή αν ο πίνακας A αδειάσει. Συμπερασματικά, ο αριθμός MRN καθορίζει το πλήθος πιθανών αντικαταστάσεων σε κάθε γενιά.

#### 1.8.4 Στρατηγική μετάλλαξης

Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα στην περίπτωση όπου όλες οι υποψήφιες λύσεις – άτομα του πληθυσμού είναι ανέφικτες. Εκλέγεται λοιπόν τυχαία ένα άτομο  $(\vec{x}_c)$  από τον πληθυσμό. Επιλέγεται επίσης τυχαία μία διάσταση έστω k του  $(\vec{x}_c)$  και λαμβάνει μία τυχαία εφικτή τιμή ανάμεσα στα επιτρεπόμενα όρια. δημιουργείται λοιπόν ένα μεταλλαγμένο διάνυσμα  $(\vec{x}_d)$  και στη συνέχεια, αν  $f(\vec{x}_d) < f(\vec{x}_e)$ , όπου  $(\vec{x}_e)$  το άτομο με τη μεγαλύτερη παραβίαση περιορισμού του πληθυσμού, τότε το  $(\vec{x}_d)$  αντικαθιστά το  $(\vec{x}_e)$ .

#### 1.9 IRC – FROFI

Για την επίλυση του προβλήματος δέσμευσης μονάδων με τη χρήση πιθανοτικών δεικτών για την εκτίμηση της στρεφόμενης εφεδρείας, χρησιμοποιήθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος IRC – FROFI που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Energy Logistics Units (ELU) του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Στη μέθοδο αυτή τα δύο υπό-προβλήματα ένταξης μονάδων (UC) και κατανομής φορτίου (ED) λύνονται παράλληλα. Το διάνυσμα κάθε υποψήφιας λύσης περιλαμβάνει τα ακριβή ποσά ισχύος που προσδίδει κάθε μονάδα για κάθε ώρα, ενώ μία συνάρτηση μετασχηματισμού καθορίζει το αν μια μονάδα είναι ενεργή (on – ένδειξη 1) ή κλειστή (off – ένδειξη 0). Η ενδελεχής ανάλυση του υπολογιστικού αυτού εργαλείου παρατίθεται στο κεφάλαιο 3.

## 2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Σύμβολο	Μονάδες	Περιγραφή Συμβόλου
Ν		Αριθμός μονάδων παραγωγής
Т	h	Χρονικό διάστημα μελέτης
i		Δείκτης θερμικής μονάδος
t	h	Δείκτης ώρας περιόδου
$a_i, b_i, c_i$	\$/h,\$/MWh,\$/MWh <sup>2</sup>	Συντελεστές κόστους καυσίμου της μονάδος <i>i</i>
$P_i^t$	MW	Παραγόμενη ισχύς της μονάδος <i>i</i> την ώρα <i>t</i>
Pmax <sub>i</sub>	MW	Μέγιστη ικανότητα παραγωγής ισχύος της μονάδος <i>i</i>
Pmin <sub>i</sub>	MW	Ελάχιστη ικανότητα παραγωγής ισγύος της μονάδος <i>i</i>
$ST_i^t$	on=1, off=0	Κατάσταση λειτουργίας της μονάδος i την ώρα t
$FC_i$	\$	Κόστος καυσίμου της μονάδος i
$SUC_i^t$	\$	Κόστος εκκίνησης της μονάδος i την ώρα t
SCH <sub>i</sub>	\$	Κόστος θερμής εκκίνησης της μονάδος i την ώρα t
SCC <sub>i</sub>	\$	Κόστος ψυχρής εκκίνησης της μονάδος i την ώρα t
$P_D^t$	MW	Προβλεπόμενη ζήτηση ισχύος την ώρα t
$P_R^t$	MW	Στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα t
$Ton_i^t$	h	Χρονικό διάστημα λειτουργίας της μονάδος i την ώρα t
Toff <sub>i</sub> <sup>t</sup>	h	Χρ. διάστημα μη λειτουργίας της μονάδος <i>i</i> την ώρα <i>t</i>
MUT <sub>i</sub>	h	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της μονάδος <i>i</i>
<i>MDT<sub>i</sub></i>	h	Ελάχιστος χρόνος κράτησης της μονάδος <i>i</i>
Tcold <sub>i</sub>	h	Χρονικό διάστημα ψύξης της μονάδος <i>i</i>
RU <sub>i</sub>	MW/h	Ρυθμός ανάληψης φορτίου της μονάδος <i>i</i>

Πίνακας 2.1: Πίνακας Συμβόλων

RD <sub>i</sub>	MW/h	Ρυθμός απόρριψης φορτίου της μονάδος <i>i</i>
LOLP <sub>t</sub>	%	Δείκτης πιθανότητας απώλειας φορτίου
EUE <sub>t</sub>	MWh	Δείκτης αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας
$U_i(LT)$		Διαθεσιμότητα της μονάδος <i>i</i> για το χρ. διάστημα <i>LT</i>
L <sub>max</sub>		Επίπεδο αξιοπιστίας απώλειας φορτίου
EUE <sub>max</sub>	MWh	Επίπεδο αξιοπιστίας αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας
$\lambda_{\iota}$	$\frac{f}{h}$	Αναμενόμενος ρυθμός βλάβης της μονάδος <i>i</i>

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή, το μοντέλο του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αφορά μόνον στις θερμικές μονάδες, μη λαμβάνοντας υπόψη το δίκτυο μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς θεωρείται ότι όλες οι μονάδες συνδέονται σε μοναδικό ζυγό και η ζήτηση καλύπτεται από αυτόν όπως παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 2.1: Συμβατικό μοντέλο συστήματος παραγωγής ενέργειας

Ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα μη γραμμικό πρόβλημα μεγάλης κλίμακας στο οποίο περιέχονται συνεχείς και διακριτές μεταβλητές και ένα πλήθος περιορισμών, ανισότητας και ισότητας, γραμμικών και μη, εξαρτώμενων ή όχι από το χρόνο. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης κόστους με ταυτόχρονη ικανοποίηση των περιορισμών.

## 2.1 Μαθηματική κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αντιπροσωπεύει το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος, το οποίο αποτελείται από το κόστος καυσίμου και τον κόστος θερμής/ ψυχρής εκκίνησης των μονάδων.

Κόστος καυσίμου και εκκίνησης

Για την εισαγωγή του κόστους καυσίμου, χρησιμοποιείται μία τετραγωνική συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος  $P_i^t$  και δίδεται από το τριώνυμο:

$$FC_{i}(P_{i}^{t}) = a_{i} + b_{i} \cdot P_{i}^{t} + c_{i} \cdot (P_{i}^{t})^{2}$$
(2.1)

Όπου  $a_i, b_i, c_i$  είναι οι συντελεστές της τετραγωνικής συνάρτησης της μονάδος i.

Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του κόστους εκκίνησης διακρίνουμε τις εξής δύο περιπτώσεις:

Η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας για μεγάλο διάστημα με αποτέλεσμα κατά την εκκίνησή της να εισάγεται στην αντικειμενική κόστος ψυχρής εκκίνησης. Η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας για μικρό χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα κατά την εκκίνησή της να εισάγεται στην αντικειμενική κόστος θερμής εκκίνησης.

Χρησιμοποιείται λοιπόν σχήμα βηματικής συνάρτησης που περιγράφεται από την εξίσωση:

$$SUC_{i}^{t} = \begin{cases} SCH, & if \ MDT \leq Toff_{i}^{t} \leq MDT + Tcold_{i} \\ SCC, & if \ MDT + Tcold_{i} \leq Toff_{i}^{t} \end{cases}$$
(2.2)

Όπου,

 $Tof f_i^t$  είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο η μονάδα *i* ήταν συνεχώς κλειστή:

$$Toff_{i}^{t} = \begin{cases} 0, if \ ST_{i}^{t} = 1\\ 1, if \ ST_{i}^{t} = 1 \end{cases}$$
(2.3)

Βάσει λοιπόν της ανωτέρω ανάλυσης, τελικά η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ορίζεται ως:

$$\min TOC = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} [FC(P_i^t) + SUC_i^t \cdot (1 - ST_i^{t-1})] \cdot ST_i^t$$
(2.4)

όπου,

t είναι η κάθε ώρα του διαστήματος που εξετάζεται.

Ν είναι το πλήθος των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.

#### 2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

#### 2.2.1 Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος

Ο θεμελιώδης περιορισμός ισοζυγίου ισχύος αναφέρεται στην ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος. Βάσει λοιπόν αυτού, η συνολική παραγόμενη ισχύς σε κάθε ώρα κατανομής, θα πρέπει να ισούται με το φορτίο της συγκεκριμένης ώρας:

$$\sum_{i=1}^{N} ST_{i}^{t} \cdot P_{i}^{t} = P_{D}^{t}, \quad t = 1, \dots, T$$
(2.5)

## 2.2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο για περιορισμό απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας

Ο συγκεκριμένος περιορισμός αφορά στη διατήρηση πλεονάζουσας ισχύος για κάθε ώρα, προκειμένου στην μείωση της πιθανότητας αδυναμίας του συστήματος να εξυπηρετήσει το φορτίο που διαμορφώνεται από τους καταναλωτές. Ο βαθμός αξιοπιστίας ενός συστήματος είναι ανάλογος με το κόστος επένδυσης κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία του. Ορίζουμε μία ευθέως ανάλογη σχέση μεταξύ αξιοπιστίας του συστήματος και ισχύος στρεφόμενης εφεδρείας. Η εύρεση του βέλτιστου ισοζυγίου μεταξύ οικονομικών και περιορισμών αξιοπιστίας έχει συμβάλει στην ανάπτυξη ως επί το πλείστον αναλυτικών – ντετερμινιστικών τεχνικών. Τυπικά κριτήρια είναι[1]:

- Σχεδιασμός παραγωγικής ικανότητας: Η εγκατεστημένη ισχύς ισούται με τη μέγιστη προβλεπόμενη ζήτηση ισχύος συν ένα ποσοστό της ζήτησης αυτής.
- Λειτουργική ικανότητα: Η εγκατεστημένη ισχύς ισούται με τη μέγιστη προβλεπόμενη ζήτηση ισχύος συν ένα απόθεμα ισχύος το οποίο ισούται με την ικανότητα της μεγαλύτερης εν ενεργεία μονάδος ή και περισσότερων.
- Σχεδιασμός δικτύου ικανότητας: Είναι γνωστό ως (n 1), (n 2) κριτήριο ανάλογα με την απαιτούμενη πλεονάζουσα απαραίτητη ισχύ, και αφορά στην κατασκευή κυκλωμάτων δικτύων, όπου το μικρότερο από άποψη εγκατεστημένης ισχύς, θα πρέπει να καλύπτει το μέγιστο προβλεπόμενο φορτίο.

Όπως είναι εμφανές τα παραπάνω κριτήρια έχουν παρόμοια λογική με στόχο το συνυπολογισμό πιθανών αστοχιών του συστήματος. Η βασική αδυναμία των ανωτέρω είναι ότι δεν συμπεριλαμβάνεται η πιθανοτική ή στοχαστική συμπεριφορά του συστήματος, δηλαδή η ζήτηση των καταναλωτών ή πιθανή αστοχία ορισμένων παραγωγικών μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία. Τυπικές πιθανοτικές μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη:

- Διακοπές λειτουργίας μονάδων συναρτήσει μεγέθους και τύπου καυσίμου.
- Πιθανή βλάβη στους ζυγούς μεταφοράς.
- Τεχνικές για προβλέψεις φορτίου προκειμένου στη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού ή και λειτουργίας.

## 2.2.2.1 Περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας

Βάσει λοιπόν της παραπάνω ανάλυσης, στον συγκεκριμένο περιορισμό θα εξετάσομε δύο περιπτώσεις:

1. Χρήσης αναλυτικής προσέγγισης για την εκτίμηση του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας, όπου η τελευταία καθορίζεται ως ένα ποσοστό της ζήτησης για

κάθε ώρα του διαστήματος που μελετάται. Έτσι ο περιορισμός στρεφόμενης εφεδρείας λαμβάνει τη μορφή:

$$\sum_{i=1}^{N} ST_i^t \cdot Pmax_i \ge P_D^t + P_R^t \tag{2.6}$$

Ο περιορισμός αυτός αναφέρεται στο γεγονός ότι κάθε ώρα, το άθροισμα της μέγιστης ισχύος των μονάδων που είναι εν ενεργεία, οφείλει να είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα της προβλεπόμενης ζήτησης της ώρας αυτής συν ενός ποσοστού της τελευταίας, 10%.

2. Χρήση πιθανοτικής τεχνικής για την εκλογή του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε βασιζόμενη στην εργασία [38] και αποτελεί τον βασικό πυλώνα της διπλωματικής αυτής. Ο καθορισμός της πλεονάζουσας ισχύος, για κάθε ώρα, προκύπτει από την ικανοποίηση του δείκτη απώλειας φορτίου. Ο περιορισμός λοιπόν λαμβάνει την μορφή της εξίσωσης (2.6) χωρίς τον όρο P<sup>t</sup><sub>R</sub> και απαιτείται ο πιθανοτικός δείκτης απώλειας φορτίου να είναι μικρότερος από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, που ορίζει και την αξιοπιστία του συστήματος. Οι πιθανοτικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος και συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο του UCP αναλύονται στην υποενότητα 2.4.2.

Στην νέα λοιπόν προσέγγιση καταστούμε σαφές ότι, οι μονάδες που αποδίδουν ενεργό ισχύ στο σύστημα κάθε ώρα, θα πρέπει

- Α. να ικανοποιούν τη βραχυπρόθεσμη προβλεπόμενη ζήτηση και
- Β. να ικανοποιούν τους δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος.

Με την ικανοποίηση συνεπώς των δύο αυτών περιορισμών η πλεονάζουσα παραγόμενη ισχύς θα αποτελεί τη ζητούμενη στρεφόμενη εφεδρεία, για τα διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας που θα εξετάσουμε.

#### 2.2.3 Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (ramp rates)

Κάθε μονάδα υπόκειται σε τεχνικούς περιορισμούς αναφορικά με τα όρια που της επιτρέπεται να αυξάνει ή να μειώνει την ισχύ αποδίδει από τη μία ώρα στην άλλη. Σε περίπτωση που η μονάδα i βρίσκεται σε λειτουργία την ώρα t ( $ST_i^t = 1$ ), τα τεχνικά όρια της συγκεκριμένης μονάδος καθορίζονται ως εξής:

$$Pmin_i^t \le P_i^t \le Pmax_i^t \tag{2.7}$$

όπου:

$$Pmin_{i}^{t} = \begin{cases} Pmin_{i} & \text{if } ST_{i}^{t-1} = 0\\ \max(Pmin_{i}, P_{i}^{t-1} - RD_{i}), & \text{if } ST_{i}^{t-1} = 1 \end{cases}$$
(2.8)

$$Pmax_{i}^{t} = \begin{cases} Pmax_{i} & if \ ST_{i}^{t-1} = 0\\ max(Pmax_{i}, P_{i}^{t-1} + RU_{i}), & if \ ST_{i}^{t-1} = 1 \end{cases}$$
(2.9)

#### 2.2.4 Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων

Επιπλέον τεχνικοί και οικονομικοί λόγοι επιβάλλουν τη συνεχή λειτουργία μιας μονάδας για ένα ελάχιστο πλήθος συνεχόμενων ωρών άπαξ και τεθεί σε λειτουργία. Αντίστοιχα, ορίζεται και ελάχιστος χρόνος για κράτηση μιας μονάδος εκτός λειτουργίας, άπαξ και τεθεί εκτός λειτουργίας. Ο ανωτέρω περιορισμός υλοποιείται μέσω των εξισώσεων:

$$Ton_i^t \ge MUT_i \tag{2.10}$$

$$Toff_i^t \ge MDT_i$$
 (2.11)

όπου:

$$Ton_{i}^{t} = \begin{cases} 0, & if \ ST_{i}^{t} = 0\\ 1, & if \ ST_{i}^{t} = 1 \end{cases}$$
(2.12)

Επιπλέον αναφέρουμε ότι τα μεγέθη με δείκτες  $Ton_i^{t=1}$ ,  $Toff_i^{t=1}$  καθορίζουν την αρχική κατάσταση των μονάδων από άποψη ωρών λειτουργίας.

### 2.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο θεμελιώδης στόχος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τροφοδότηση των καταναλωτών, μικρών ή μεγάλων, με όσο το δυνατόν πιο οικονομικό και αξιόπιστο τρόπο. Αξιοπιστία ορίζεται η πιθανότητα μιας συσκευής ή ενός συστήματος να πραγματοποιεί την αποστολή του στο χρονικό πλαίσιο που σχεδιάστηκε υπό ορισμένες λειτουργικές συνθήκες [39]. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής, αναπτύσσεται μία μέθοδος με ενσωμάτωση αξιοπιστίας στην διαδικασία αναζήτησης περιορισμών του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού ηλεκτροπαραγωγής. Λαμβάνεται υπόψη η διαθεσιμότητα των μονάδων και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση αξιοπιστίας είναι οι ακόλουθοι [1]:

• Πιθανότητα απώλειας φορτίου (Loss of Load Probability – LOLP)

Δείκτης που εκφράζει την πιθανότητα (%) το σύστημα να μην μπορέσει να καλύψει τη ζήτηση για το χρονικό διάστημα που εξετάζεται και υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος.

 Αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια (Expected Unserved Energy – EUE) Δείκτης εκφρασμένος σε μονάδες ενέργειας (MWh) που αναφέρεται στο ποσό ενέργειας που αναμένεται να μην καλυφθεί από το δίκτυο και υπολογίζεται για ολόκληρο το χρονικό διάστημα.

Για τα διάφορα σενάρια που θα εξετάσουμε στη συνέχεια, τίθενται από το χρήστη του κώδικα τα ανώτερα επιτρεπόμενα όρια των δεικτών αυτών Lmax, EUEmax αντίστοιχα, που καθορίζουν το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος.

### 2.3.1 Υλοποίηση των περιορισμών αξιοπιστίας

Για την εισαγωγή των δεικτών αξιοπιστίας στη μοντελοποίηση του προβλήματος, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο καθορίζει και το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος. Συγκεκριμένα προκύπτει:

$$LOLP_t \le Lmax$$
 (2.13)

Αντίστοιχα, ο περιορισμός της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας

υλοποιείται μέσω τη σχέσης:

$$EUE_{tot} \le EUEmax$$
 (2.14)

Ακολουθεί εκτενής ανάλυση για τη μέθοδο υπολογισμού των ανωτέρω μεγεθών.

### 2.3.1.1 Διαθεσιμότητα μονάδων παραγωγής

Ξεκινώντας, μη διαθεσιμότητα (unavailability) μιας μονάδας παραγωγής U ορίζεται η πιθανότητα βλάβης της μονάδας σε μια χρονική στιγμή στο μέλλον. Η πιθανότητα αυτή προκύπτει ανάλογα με το μοντέλο αναπαράστασης που χρησιμοποιείται σε κάθε πρόβλημα. Οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι σύνηθες να παρουσιάζονται από ένα μοντέλο δύο καταστάσεων που περιλαμβάνει κατάσταση λειτουργίας και κατάσταση βλάβης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Συμβατικό μοντέλο δύο καταστάσεων μιας μονάδας

Η βασική θεωρία για χρονικά εξαρτημένες πιθανότητες, που αναλύει το υπόβαθρο του ανωτέρω σχήματος βρίσκεται στο βιβλίο [40]. Βάσει του ανωτέρω μοντέλου, στο πρόβλημα έχουμε δύο πιθανές καταστάσεις:

- Κατάσταση λειτουργίας : η μονάδα είναι διαθέσιμη να προσδίδει ισχύ στο σύστημα.
- Κατάσταση βλάβης : η μονάδα δεν είναι διαθέσιμη λόγω μη προγραμματισμένης διακοπής λειτουργίας.

Ως εκ του σχήματος φαίνεται ότι η μετάβαση της μονάδος i από την κατάσταση λειτουργίας στην κατάσταση βλάβης γίνεται μέσω του αναμενόμενου ρυθμού βλάβης  $\lambda_i$  και μέσω του αναμενόμενου ρυθμού επισκευής  $\mu_i$  αντίστροφα. Η μη διαθεσιμότητα μιας μονάδος είναι συνάρτηση του χρονικού διαστήματος LT [5], κατά το οποίο δεν προβλέπεται καμιά συντήρηση ή επισκευή. Συγκεκριμένα, η πιθανότητα μη διαθεσιμότητας της μονάδος i για το χρονικό διάστημα LT δίδεται από την εξίσωση:

$$U_i(LT) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \left( 1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)LT} \right)$$
(2.15)

Θεωρώντας ότι το διάστημα LT είναι πολύ μικρότερο από το χρόνο επισκευής της μονάδας, η διαδικασία επισκευής μπορεί να παραληφθεί με αποτέλεσμα η εξίσωση (2.15) να λαμβάνει τη μορφή:

$$U_i(LT) = 1 - e^{-\lambda_i \cdot LT}$$
 (2.16)

Η οποία είναι εκθετική συνάρτηση και εκφράζει την πιθανότητα βλάβης μια μονάδος δύο καταστάσεων. Τελικά, αν ( $\lambda \cdot LT \ll 1$ ) όπου ισχύει γενικά για μικρές τιμές του LT [1], η εξίσωση για την πιθανότητα βλάβης λαμβάνει τη μορφή:

$$U_i(LT) = \lambda_i \cdot LT \tag{2.17}$$

Η τελευταία πιθανότητα βλάβης δίδεται στη βιβλιογραφία, για την εκτίμηση αξιοπιστίας σε βραχυπρόθεσμο σχεδιασμό, ως ORR (Outage Replacement Rate)[1].

#### 2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

#### 2.4.1 Περιγραφή πίνακα πιθανότητας απώλειας φορτίου

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των δεικτών αξιοπιστίας βασίζει τη θεωρία της στο βιβλίο [1]. Ειδικότερα, έχοντας εισάγει την έννοια διαθεσιμότητας και μη των μονάδων, η διαδικασία υπολογισμού των δεικτών αξιοπιστίας είναι η εξής:

Για κάθε ώρα δημιουργείται ένας πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος (Capacity Outage Probability Table – COPT) ο οποίος συνοψίζει κατά φθίνουσα σειρά τα επίπεδα απώλειας ισχύος και τις αντίστοιχες πιθανότητες, με τη μορφή:

$$COPT = \begin{bmatrix} X_1 & CR_1 & p(X_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & CR_n & p(X_n) \end{bmatrix}$$
(2.18)

Συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη του COPT ευρίσκονται τα πιθανά επίπεδα απώλειας ισχύος. Στην δεύτερη υπολογίζεται η συνολική εναπομένουσα ισχύς που βρίσκεται εν ενεργεία ως:

$$CR_j = \sum_{i=1}^{NT} Pmax_i - X_j, \quad j = 1, ..., n$$
 (2.19)

Τέλος, στην τελευταία στήλη υπολογίζονται οι πιθανότητες για κάθε ένα από τα πιθανά επίπεδα απώλειας ισχύος. Σε περίπτωση που είχαμε μία μονάδα στο σύστημά μας, η τρίτη στήλη του COPT θα προέκυπτε ως εξής:

$$p(X) = \begin{cases} 1 - U, & \text{if } X = 0\\ U, & \text{if } X = Pmax \end{cases}$$
(2.20)

Εφόσον έχουμε ανεξάρτητες πιθανότητες, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τις ατομικές πιθανότητες αστοχίας ή διαθεσιμότητας της κάθε μονάδος για να εξάγουμε την τελική τιμή του κάθε επιπέδου αξιοπιστίας. Στον πίνακα COPT μπορούμε να συμπεριλάβουμε και μία τέταρτη στήλη η οποία περιλαμβάνει την αθροιστική πιθανότητα και πρακτικά αποτελεί την πιθανότητα να έχουμε απώλεια δυναμικότητας ίση ή μεγαλύτερη του αντίστοιχου επιπέδου.

#### 2.4.2 LOLP & EUE

Διαισθητικά, για την πληρότητα του ορισμού της πιθανότητας απώλειας φορτίου, η αθροιστική πιθανότητα που προκύπτει για κάθε ένα από τα πιθανά επίπεδα διακοπής λειτουργίας, συμβάλλει στον υπολογισμό του δείκτη LOLP.

Δοθείσας λοιπόν μιας χρονοσειράς του φορτίου της ζήτησης  $P_D^t, T = 24hr$ , στο επίπεδο κάθε φορά (j = 1, ..., n) που η τιμή της (ζήτησης) θα είναι μεγαλύτερη από  $CR_j$  όπου με NT οι εν ενεργεία εκείνη την ώρα μονάδες, εκεί ορίζεται και η αθροιστική πιθανότητα ως τιμή του δείκτη LOLP, για κείνη την ώρα.

Η πιθανότητα απώλειας φορτίου  $LOLP_t$ , για την ώρα tυπολογίζεται μέσω της σχέσεως:

$$LOLP_t = \sum_{j=1}^{n} (p(X_j) \cdot LOSS_{j,t}), \ t = 1,..,T$$
 (2.21)

όπου:

$$LOSS_{j,t} = \begin{cases} 1, if \ CR_j < P_D^t \\ 0, otherwise \end{cases}$$
(2.22)

Αντίστοιχα, η τιμή της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας  $EUE_t,$ για την ώρα t,υπολογίζεται ως εξής:

$$EUE_t = \sum_{j=1}^n \left( p(X_j) \cdot LOSS_{j,t} \cdot (P_D^t - CR_j) \right) \forall t = 1, ..., T$$

$$(2.23)$$

Η ολική αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργειας στο τέλος του συνολικού διαστήματος που μελετάται από κάθε υποψήφια λύση, θα δίδεται από τη σχέση:

$$EUE_{tot} = \sum_{t=1}^{T} EUE_t$$
(2.24)

## 3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΌ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων, προκειμένου στη λήψη μιας απόφασης, για τις διάφορες περιπτώσεις που εξετάζονται, γίνεται πάντα μέσω της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Για να φθάσουμε όμως εκεί, απαιτείται αυστηρή μοντελοποίηση, όπως επιχειρήσαμε στο 2° κεφάλαιο, για σταθερή και γρήγορη παραγωγή εφικτών λύσεων μέσω του υπολογιστικού εργαλείου που χρησιμοποιείται. Ο προγραμματισμός του προβλήματος υλοποιήθηκε σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab, το οποίο καθιστά εύκολη την άμεση και ταχεία ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Όπως προκύπτει από τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, ο προγραμματισμός των περιορισμών, η εισαγωγή των διαδικασιών του FROFI, καθώς και η ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας απαιτούν στην δημιουργία υπορουτίνων – υποπρογραμμάτων για την υλοποίηση των. Στον κεφάλαιο λοιπόν αυτό, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας προγραμματισμού του προβλήματος, καθώς και ανάλυση του ευρετικού μηχανισμού που αναπτύχθηκε για την αναζήτηση των υποψήφιων λύσεων σε εφικτές περιοχές του πεδίου τιμών.

Σημειώνουμε εδώ ότι οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται στις παραγράφους στις οποίες και χρησιμοποιούνται.


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής υπολογιστικής συλλογιστικής πορείας

### 3.1 Εισαγωγή δεδομένων συστήματος

Αρχικά, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής, δίδεται από το χρήστη το πλήθος των μονάδων του συστήματος που θα εξεταστεί αυτόματα εισάγεται από το αρχείο εισόδου ο πίνακας με τα απαραίτητα μεγέθη. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων ενός συστήματος που αποτελείται από 10 συμβατικές (θερμικές) μονάδες. Το σύστημα αυτό είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα στη σχετική βιβλιογραφία και για αυτό επιλέχθηκε να μελετηθεί στην παρούσα εργασία.

a/a	Pmax (MW)	Pmin (MW)	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MWh^2)	Tup(h)	Tdn (h)	SCH (\$)	SCC (\$)	Tcold (h)	In.st. (h)
1	455	150	1000	16,19	0,00048	8	8	4500	9000	5	8
2	455	150	970	17,26	0,00031	8	8	5000	10000	5	8
3	130	20	700	16,6	0,002	5	5	550	1100	4	-5
4	130	20	680	16,5	0,00211	5	5	560	1120	4	-5
5	162	25	450	19,7	0,00398	6	6	900	1800	4	-6
6	80	20	370	22,26	0,00712	3	3	170	340	2	-3
7	85	25	480	27,74	0,00079	3	3	260	520	2	-3
8	55	10	660	25,92	0,00413	1	1	30	60	0	-1
9	55	10	665	27,27	0,00222	1	1	30	60	0	-1
10	55	10	670	27,79	0,00173	1	1	30	60	0	-1

Πίνακας 3.1: Πίνακας αριθμητικών τιμών παραμέτρων συστήματος

Για την ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας, τα δεδομένα για τον αναμενόμενο ρυθμό βλάβης  $\lambda_i \left(\frac{f}{h}\right)$  κάθε μονάδος, λήφθηκαν από την εργασία [38]. Η αντιστοίχιση των τιμών  $\lambda_i$  από την ανωτέρω εργασία στην παρούσα έγινε βάση της ονομαστικής ισχύος των εξεταζόμενων μονάδων. Προκύπτει λοιπόν:

Μονάδα	$\lambda$ (f/h)
1	0,00091
2	0,00091
3	0,00084
4	0,00084
5	0,00105
6	0,00084
7	0,00084
8	0,00051
9	0,00051
10	0,00051

Πίνακας 3.2: Αναμενόμενος ρυθμός βλάβης μονάδων

# 3.2 Μοντέλα ζήτησης

Το μοντέλο που επιλέχθηκε για την αναπαράσταση του απαιτούμενου φορτίου της ζήτησης αφορά σε μία χρονοσειρά σταθερών ποσών ισχύος που πρέπει να καλυφθούν κάθε ώρα. Η τιμή της ζήτησης αποτελεί προϊόν πρόβλεψης με αποτέλεσμα να εισάγει στοχαστικότητα στο σύστημα. Συνήθως, στις εργασίες εκτίμησης αξιοπιστίας συστήματος, όπως, η πιθανότητα απώλειας φορτίου προκύπτει από τη συνέλιξη (από συνδυασμό) των πιθανοτήτων:

- Απώλειας φορτίου λόγω διακοπής λειτουργίας (Outage) μιας ή περισσότερων μονάδων
- Απώλειας φορτίου λόγω λανθασμένης πρόβλεψης της τιμής της ζήτησης (Load Forecast Uncertainty)

# 3.2.1 Υπόβαθρο για αβεβαιότητα πρόβλεψης φορτίου

Η αβεβαιότητα πρόβλεψης φορτίου περιγράφεται κάλλιστα από την κανονική κατανομή [1]. Η κατανομή χωρίζεται σε ένα πλήθος διακριτών διαστημάτων – κλάσεων, όπου ως μέσο έχει την τιμή της ζήτησης που έχει προβλεφθεί. Το κεντρικό σημείο κάθε κλάσης, αντιπροσωπεύει την θετική ή αρνητική απόκλιση (τιμή φορτίου)

της ζήτησης, και η πιθανότητα αυτού (άξονας – x) καθορίζει την πιθανότητα όλης της κλάσεως. Το μοντέλο επτά βημάτων (seven- step model)  $(0, \pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma)$  θεωρείται επαρκές βάσει της βιβλιογραφίας [1] για την περιγραφή της αβεβαιότητας στην πρόβλεψη φορτίου. Το σφάλμα στις εκτιμήσεις τις πιθανότητας έγκειται στα επίπεδα ισχύος που βρίσκεται το σύστημα παραγωγής. Η απόκλιση σ λαμβάνεται ως ένα ποσοστό της μέσης τιμής (ακριβής προβλεπόμενη ζήτηση), συνήθως 2 – 5%. Θεωρώντας λοιπόν κανονική κατανομή για την αβεβαιότητα πρόβλεψης φορτίου, μέσω του μοντέλου 7- βημάτων προκύπτει ο υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος  $LOLP_t$ ,  $EUE_t$  για την ώρα t ως:

$$LOLP_t = \sum_{m=1}^{7} (LOLP_t(m) PL(m)), \quad t \in [1, T]$$
 (3.1)

$$EUE_t = \sum_{m=1}^{7} (EUE_t(m) PL(m)), \quad t \in [1, T]$$
(3.2)

όπου, PL(m) η πιθανότητα του κέντρου της κάθε κλάσεως m = 1, ..., 7.

Το εδάφιο αυτό που αναφέρεται στην αβεβαιότητα της ζήτησης παρουσιάσθηκε για λόγους πληρότητας. Στην παρούσα εργασία δεν λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα της ζήτησης, με αποτέλεσμα ο δείκτης LOLP να υπολογίζεται μόνο βάσει της αβεβαιότητας στην λειτουργία των συμβατικών μονάδων.

### 3.2.2 Σταθερή ζήτηση προβλήματος

Η βραχυπρόσθεσμη πρόβλεψη τιμή της ζήτησης στα πλαίσια του προβλήματος που θα αναλύσουμε, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.2: Χρονοσειρά ζήτησης απαιτούμενου φορτίου

Ως εκ του σχήματος φαίνεται, ότι η μορφή της παραπάνω καμπύλης θα μπορούσε υπό συνθήκες να παρουσιάζει το φορτίο ζήτησης μιας τυπικής μέρας. Θεωρώντας ως 12<sup>η</sup> ώρα το μεσημέρι παρουσιάζεται η πρώτη αιχμή καθώς οι καταναλωτές βρίσκονται εν ώρα εργασίας και απαιτείται κάλυψη υψηλού φορτίου. Επίσης τις βραδινές ώρες η 2<sup>η</sup> αιχμή της ζήτησης αιτιολογείται από τα νοικοκυριά.

### 3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΌΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Όπως έχει αναφερθεί, το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται για την επίλυση του ΠΕΜ ολικά είναι ο IRC – FROFI. Πρακτικά η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει ως μέθοδο βελτιστοποίησης τον εξελικτικό αλγόριθμο FROFI, όπως αυτός αναλύθηκε στην υποενότητα (1.8). Παράλληλα στη μέθοδο έχουν ενσωματωθεί κάποιες ευρετικές μέθοδοι επιδιόρθωσης, όπως παρουσιάζονται συνοπτικά στο σχήμα 3.3, οι οποίες μεταβάλλουν τα διανύσματα των υποψήφιων λύσεων έτσι ώστε αυτά να παρουσιάζουν ελάχιστη ή καθόλου παραβίαση των περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς ο πληθυσμός των λύσεων κινείται ταχύτερα προς περιοχές του πεδίου λύσεων με καλύτερες τιμές αντικειμενικής (χαμηλότερο κόστος). Για όλα τα σενάρια που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική, ο πληθυσμός αποτελείται από 40 άτομα. Μελετάται σύστημα 10 μονάδων για το χρονικό διάστημα εικοσιτεσσέρων ωρών (T=24h) με αποτέλεσμα οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος να συνιστούν ένα διάνυσμα διαστάσεων:

- $D = N \cdot T = 10 \cdot 24 = 240$  και συμβολίζουμε
- NP = 40 το μέγεθος που πληθυσμού

Το διάνυσμα μιας υποψήφιας λύσης, αρχικοποιείται από κατάλληλο σχήμα και περιέχει τα ποσά καθαρής ισχύος που αποδίδει η μονάδα *i* την ώρα *t* στο σύστημα :  $P_i^t \in [0, Pmax_i], i = 1, ..., N \& t = 1, ..., T$ . Η συνάρτηση μετασχηματισμού που καθορίζει την κατάσταση μιας μονάδος είναι η εξής:

$$ST_i^t = \begin{cases} 0, & \text{if } 0 \le P_i^t \le Pmin_i \\ 1, & \text{if } Pmin_i \le P_i^t \le Pmax_i \end{cases}$$
(3.3)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, μία μονάδα που αποδίδει καθαρή ισχύ μεγαλύτερη του ελάχιστου επιτρεπόμενου ορίου της, θεωρείται ανοιχτή. Με τον τρόπο αυτό διαχειριζόμαστε ταυτόχρονα την κατανομή φορτίου και τον προγραμματισμό ένταξης μονάδων.

Έχοντας όλο το θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του υποπρογράμματος στο οποίο εξετάζεται η ικανοποίηση όλων των περιορισμών, μέσω ενός ευρετικού μηχανισμού, ο οποίος κινεί τις υποψήφιες λύσεις προς εφικτά πεδία αναζήτησης λύσεων.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα ροής ευρετικού μηχανισμού

# 3.4 Προσεγγίσεις για εκτίμηση ποσού στρεφόμενης εφεδρείας

Πρώτο μέλημα της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η εξέταση δύο περιπτώσεων για την αξιολόγηση της στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος, όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 2.2.2. Για κάθε μία από αυτές τις προσεγγίσεις εφαρμόζεται διαφορετικό τμήμα στον ευρετικό μηχανισμό, όπως αναλύεται και στη συνέχεια.

### 3.4.1 Ντετερμινιστική μέθοδος ορισμού ποσού στρεφόμενης εφεδρείας

Ως έχει αναφερθεί επανειλημμένα, η αναλυτική προσέγγιση προϋποθέτει εξ αρχής τον ορισμό του απαιτούμενου ποσοστού πλεονάζουσας ισχύος που απαιτείται κάθε ώρα να είναι διαθέσιμο. Στην περίπτωση των 10 μονάδων, το ποσοστό αυτό λαμβάνεται ίσο με το 10% της συνολικής ζήτησης ισχύος για κάθε ώρα, δηλαδή:

$$P_R^t = 10\% P_D^t$$

Κάθε υποψήφια λύση υπόκειται σε επιδιόρθωση βάσει της διαδικασίας που παρουσιάσθηκε στο σχήμα 3.3. Αρχικά ελέγχετε η ταυτόχρονη ικανοποίηση του περιορισμού επαρκούς ισχύος. Στην περίπτωση όπου ο περιορισμός (2.6) δεν ικανοποιείται, εντάσσονται διαδοχικά μονάδες στο σύστημα βάσει μιας λίστας προτεραιότητας, η οποία κατατάσσει τις μονάδες κατά αύξουσα σειρά βάσει μέσου κόστους στο μέσο φορτίο:

$$PL1_{i} = \frac{a_{i} + b_{i} \cdot Pavg_{i} + c_{i} \cdot (Pavg_{i})^{2}}{Pavg_{i}}$$
(3.4)

όπου:

$$Pavg_i = \frac{Pmin_i + Pmax_i}{2} \tag{3.5}$$

Η παραβίαση λοιπόν του περιορισμού 2.6, οδηγεί στην ένταξη της φθηνότερης κλειστής μονάδας, βάσει της PL1. Σε περίπτωση που η μονάδα *i* τεθεί σε λειτουργία την ώρα *t* βάσει του μηχανισμού επιδιόρθωσης, η ενέργεια αυτής θα τεθεί ίση το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο παραγωγής της:

$$P_i^t = Pmin_i \tag{3.6}$$

#### 3.4.2 Πιθανοτική μέθοδος στην εκτίμηση στρεφόμενης εφεδρείας

Σημαντική διαφοροποίηση της παρούσας με την προαναφερθείσα τεχνική είναι η εισαγωγή του δείκτη αξιοπιστίας του συστήματος για την εκτίμηση του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας.

Όπως είδαμε σε προηγούμενο εδάφιο, ο υπολογισμός του LOLP για κάθε ώρα υπολογίζεται μέσω του πίνακα πιθανοτικής διακοπής λειτουργίας COPT. Πρόκειται για μία σημαντικά χρονοβόρα διαδικασία, η οποία αποφασίστηκε να υπολογισθεί άπαξ για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των 10 μονάδων, με αποτέλεσμα την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια.

Η υλοποίηση αυτού έγινε μέσω της εντολής Matlab, ff2n(N) η οποία παράγει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς μεταξύ 0 και 1 για 10 μονάδες, συνολικά  $2^N$ . (1<sup>η</sup> γραμμή όλοι άσσοι –  $2^N$  γραμμή όλα μηδενικά) Έτσι, για κάθε πιθανό συνδυασμό των μονάδων παραγωγής, ανάλογα με τη ζήτηση φορτίου κάθε ώρας δημιουργείται πίνακας διαστάσεων  $2^N x T$  με τις τιμές των  $LOLP_t$ .

Εστιάζοντας στον περιορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα ροής για εκτίμηση στρεφόμενης εφεδρείας πιθανοτικής μεθόδου

Συνοψίζουμε λέγοντας ότι στην προσέγγιση αυτή η αποδοχή μιας υποψήφιας λύσης έγκειται στην ικανοποίηση του βασικού περιορισμού της ζήτησης αρχικά, για λόγους ταχύτητας, καθώς και του επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος. Από τη δομή του προγράμματός μας, ο μόνος τρόπος να μειώσουμε την πιθανότητα αδυναμίας του συστήματος να καλύψει τη ζήτηση, είναι η ένταξη επιπλέον μονάδων βάσει της *PL*1. Η τιμή του δείκτη *Lmax* καθορίζει το ωριαίο επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος.

### 3.5 Διόρθωση περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης μονάδων

Η ικανοποίηση του προηγούμενου περιορισμού οδηγεί ασφαλώς σε προγράμματα παραγωγής τα οποία δεν ικανοποιούν τον περιορισμό ελαχίστου χρόνου κράτησης μονάδων. Συνήθως, τις ώρες αιχμής φορτίου, ο περιορισμός *MUT<sub>i</sub>* παραβιάζεται, καθώς μία μονάδα δεσμεύεται για χρόνο μικρότερο από αυτόν που ορίζουν οι τεχνικοί περιορισμοί. Αντίστοιχα, παραβίαση έχουμε στον *MDT<sub>i</sub>* όταν συμβαίνουν πτώσης στη χρονοσειρά της ζήτησης. Η λογική που ακολουθήθηκε είναι η εξής:

Bήµα 1: t = 1

Bήμα 2: i = 1

Βήμα 3: Αν  $ST_i^t = 0 \& ST_i^{t-1} = 1 \& Ton_i^{t-1} < MUT_i$ , κάνε ένταξη της μονάδας i την ώρα t (εξ.(3.6)).

Βήμα 4: Αν  $ST_i^t = 0 \& ST_i^{t-1} = 1 \& t + MDT_i - 1 < T \& Toff_i^{t+MDT_i-1} < MDT_i$ , κάνε ένταξη της μονάδας iτην ώρα t (εξ.( 3.6)).

Bήμα 5: Av  $ST_i^t = 0 \& ST_i^{t-1} = 1 \& t + MDT_i - 1 > T \& \sum_{j=t}^T ST_i^j > 0$ , κάνε ένταξη της μονάδας *i* την ώρα *t* (εξ.(3.6)).

Βήμα 6: Ανανέωση τιμών Toff, Ton μέσω των σχέσεων (2.11), (2.12) αντίστοιχα.

Βήμα 7: Αν i < N τότε i = i + 1 και πήγαινε στο βήμα 3.

Βήμα 8: Αν t < T τότε t = t + 1 και πήγαινε στο βήμα 2, αλλιώς τέλος.

Η βασική εργασία για την ικανοποίηση τον περιορισμού ελαχίστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης, είναι η ένταξη μονάδων προκειμένου στην τήρηση των τεχνικών – χρονικών περιορισμών. Η ένταξη μιας μονάδας σε μία ώρα του συστήματος προκαλεί αύξηση του ήδη ικανοποιημένου δείκτη LOLP με αποτέλεσμα τη βεβαιότητα ικανοποίησης αυτού και μετά τη διαδικασία αυτή.

### 3.6 Διόρθωση της πλεονάζουσα ισχύος – Repair excess capacity

### 3.6.1 Σταθερό ποσό στρεφομένης εφεδρείας

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας στόχο έχει την αποκοπή της περίσσειας ισχύος για την αύξηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος. Κάθε φορά που μία μονάδα τίθεται εκτός θα πρέπει να εξετάζεται η ικανοποίηση των περιορισμών ελάχιστου/ μέγιστου χρόνου κράτησης και στρεφόμενης εφεδρείας. Για την περιγραφή της μεθόδου ορίζουμε το μέγεθος:

$$R^{t} = \sum_{i=1}^{N} ST_{i}^{t} \cdot Pmax_{i} - (P_{D}^{t} + P_{R}^{t})$$
(3.7)

το οποίο περιέχει τη διαφορά μεταξύ διαθέσιμης και απαιτούμενης ζήτησης ισχύος για κάθε ώρα του διαστήματος. Αναλυτικότερα έχουμε:

### Bήµα 1: t = 1

Βήμα 2:Δημιουργία λίστας CL, στην οποία περιέχονται όλες οι εν ενεργεία μονάδες. Συμβολίζουμε την πρώτη της λίστας αυτής ως CL1.

Βήμα 3: Αν  $Pmax(CL1) < R^t$ , έλεγξε αν το κλείσιμο της μονάδος προκαλεί παραβίαση στους προαναφερθέντες περιορισμούς. Αν όχι, σβήσε τη μονάδα αυτή από τη CL και αποσύνδεση την μέσω του σχήματος:

$$P_i^t = \left(k \cdot U(0,1)\right) \cdot Pmin_i \tag{3.8}$$

Η επόμενη μονάδα στη CL επιλέγεται ως CL1. Ανανεώνονται οι χρονικές διάρκειες Toff, Ton και τα παραγόμενα ποσά ενέργειας. Το βήμα αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου  $Pmax(CL1) > R^t$ .

Βήμα 4: Αν t < T, t = t + 1 και πήγαινε στο βήμα 2, αλλιώς τέλος.

Σημειώνουμε ότι η εξίσωση (3.8) θέτει εκτός λειτουργίας μια μονάδα επιλέγοντας τυχαία ένα επίπεδο πρόσδοσης ισχύος μικρότερο του ελαχίστου ορίου παραγωγής της. (k < 1)

### 3.6.2 Αποδέσμευση μονάδων με έλεγχο αξιοπιστίας

Όπως είδαμε, στην πρώτη διαδικασία του ευρετικού μηχανισμού, εδάφιο (3.4.3) (Πιθανοτική μέθοδος στην εκτίμηση στρεφόμενης εφεδρείας) για την εύρεση του

απαιτούμενου ποσού στρεφόμενης εφεδρείας, από άποψη αξιοπιστίας, υλοποιείται μόνον εκείνος της πιθανότητας απώλειας φορτίου LOLP. Προφανώς, η ικανοποίηση του ανωτέρω περιορισμού ελέγχεται και εδώ, κατά την αποδέσμευση των μονάδων, εισάγεται όμως και ο δείκτης αξιοπιστίας που αναφέρεται στην αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια. Ενώ ο LOLP υπολογίζεται ωριαία, ο δείκτης EUE ευρίσκεται σε εικοσιτετράωρη βάση. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται μέσω της δημιουργίας δύο (2) σταδίων όπως θα εξηγήσουμε.

# 3.6.2.1 Στάδιο 1° - Ικανοποίηση πιθανότητας απώλειας φορτίου

Η μετάβαση μια μονάδος από λειτουργία σε αποδέσμευση προκαλεί τη συγκεκριμένη ώρα αύξηση του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου. Στην πιθανοτική προσέγγιση λοιπόν και βάσει της (2.2.2.1) ενότητας θα πρέπει αφενός, η διαφορά διαθέσιμης και ζητούμενης ισχύος να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ισχύ της μονάδας που θα αποδεσμευτεί, αφετέρου δε η αποδέσμευση να μην προκαλεί παραβίαση του περιορισμού αξιοπιστίας (2.13). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση αυτού, για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος, φαίνεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.

Ο συμβολισμός MOU αναφέρεται στην μικρότερη εν ενεργεία μονάδα βάσει ονομαστικής ισχύος για κάθε ώρα. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής, ελέγχεται αν αποδέσμευση μιας μονάδας επιφέρει παραβίαση του ισοζυγίου ισχύος. Στη συνέχεια, εξετάζεται η ικανοποίηση του δείκτη αξιοπιστίας LOLP, για την τήρηση του απαιτούμενου επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος.



Σχήμα 3.5: Διάγραμμα ροής για αποδέσμευση μονάδων με ικανοποίηση LOLP

# 3.6.2.2 Στάδιο 2° – Ικανοποίηση περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας

Στην πιθανοτική προσέγγιση, η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια υπολογίζεται σε εικοσιτετράωρη βάση, μέσω των σχέσεων (2.23), (2.24). Περνώντας το 1° στάδιο ο αλγόριθμος, καλείται τώρα να ικανοποιήσει τον δεύτερο δείκτη αξιοπιστίας κατά την διαδικασία απένταξης των μονάδων. Το επίπεδο πιθανότητας απώλειας ισχύος Lmax ορίζεται ως ποσοστό, ενώ ο δείκτης EUEmax, ορίζεται ως ένα ποσοστό της προβλεπόμενης ενέργειας που ζητείται να καλυφθεί 27100 MWh.

Ειδικότερα, εφόσον ικανοποιείται ο περιορισμός πιθανότητας απώλειας φορτίου και η ζήτηση, υπολογίζεται η ημερήσια αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια. Σε περίπτωση που η τελευταία είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμής της, ευρίσκεται η ώρα με την μεγαλύτερη τιμή αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας και γίνεται ένταξη της φθηνότερης, βάσει της PL1, μονάδος. Η ανωτέρω διαδικασία γίνεται επαναληπτικά έως ότου ικανοποιηθεί ο περιορισμός αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας (2.14). Η υπόψη μέθοδος παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί.



Σχήμα 3.6: : Διάγραμμα ροής για αποδέσμευση μονάδων με ικανονποίηση EUE

### 3.7 Διόρθωση ανάληψης/απόρριψης φορτίου μονάδων (ramp rates)

Η ικανότητα κάθε θερμικής μονάδας να αυξήσει ή να ελαττώσει την ισχύ που αποδίδει εξαρτάται από τους ρυθμούς ανάληψης και απόρριψης φορτίου που δύναται να υποστηρίξει. Συγκεκριμένα, το ποσοστό αυτό σε κάθε περίπτωση ορίζεται ίσο με 20% της ονομαστικής ισχύος κάθε μονάδας, μια προσέγγιση που είναι συνήθης στη σχετική βιβλιογραφία. Μέσω του ευρετικού μηχανισμού που παρουσιάζεται στο παρών εδάφιο, για την διεκπεραίωση του συγκεκριμένου περιορισμού, υλοποιείται η εξής διαδικασία διόρθωσης:

Bήμα 1: t = 1

Bήμα 2: i = 1

Βήμα 3: Αν  $ST_i^t = 0 \& ST_i^{t-1} = 0$ , πήγαινε στο 6° βήμα αλλιώς:

$$DP_i = P_i^t - P_i^{t-1} (3.9)$$

Βήμα 4: Αν  $DP_i > RU_i$  τότε:

$$P_i^t = P_i^{t-1} + RU_i (3.10)$$

Bήμα 5: Av  $DP_i < -RD_i$  τότε:

$$P_i^t = P_i^{t-1} - RD_i \tag{3.11}$$

Βήμα 6: Αν i < N, τότε i = i + 1 και πήγαινε στο βήμα 3.

Βήμα 7: Αν t < T, τότε t = t + 1 και πήγαινε στο βήμα 2, αλλιώς τέλος.

#### 3.8 Διόρθωση ισοζυγίου ισχύος

Περαιτέρω αλλαγές στο πρόγραμμα των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής δημιουργούν αλλοιώσεις στον θεμελιώδη στόχο του προγραμματισμού της παραγωγής για κάλυψη του ζητούμενου φορτίου. Είναι επιθυμητό οι εν ενεργεία μονάδες κάθε ώρας να λειτουργούν κοντά στο ονομαστικό τους φορτίο, καθώς το μέσο κόστος παραγωγής μειώνεται σε υψηλά επίπεδα παραγωγής[41]. Επιπλέον, όσο πιο κοντά στην ονομαστική τους ισχύ λειτουργούν οι μονάδες, τόσο λιγότερες απαιτούνται να είναι συνδεδεμένες κάθε ώρα. Εισάγουμε λοιπόν μία δεύτερη λίστα προτεραιότητας η οποία κατατάσσει τις μονάδες βάσει του μέσου κόστους στην ονομαστική τους ισχύ:

$$PL2_{i} = \frac{a_{i} + b_{i} \cdot Pmax_{i} + c_{i} \cdot (Pmax_{i})^{2}}{Pmax_{i}}$$
(3.12)

Υπολογίζεται για κάθε ώρα η απόκλιση μεταξύ παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος  $DV^t$ . Σε περίπτωση που η παραγωγή είναι μεγαλύτερη της ζήτησης, η πρόσδοση ισχύος της πιο ακριβής μονάδας μειώνεται ώστε η πλεονάζουσα ισχύς να μηδενιστή. Στην αντίθετη περίπτωση όπου  $DV^t < 0$  προστίθεται ενέργεια στο σύστημα από τις μονάδες που βρίσκονται χαμηλά στη λίστα *PL2*.

Bήµα 1: t = 1

Βήμα 2: Κατάταξη των εν ενεργεία μονάδων κατά φθίνουσα σειρά μέσω της PL2

Βήμα 3: Υπολογισμός απόκλισης:

$$DV^{t} = \sum_{i=1}^{N} ST_{i}^{t} \cdot P_{i}^{t} - P_{D}^{t}$$
(3.13)

Βήμα 4: Αν  $DV^t > 0$ , μείωση της καθαρής ισχύος από τις πιο ακριβές μονάδες βάσει της *PL2*, μέχρι και την ελάχιστη τιμή τους *Pmin<sub>i</sub>*, έως ότου  $DV^t = 0$ .

Βήμα 5; Αν  $DV^t < 0$ , αύξηση της καθαρής ισχύος από τις πιο οικονομικές μονάδες βάσει της *PL*2, μέχρι και την μέγιστη τιμή τους *Pmax<sub>i</sub>*, έως ότου  $DV^t = 0$ .

Βήμα 6: Αν t < T, t = t + 1 και πήγαινε στο βήμα 2, διαφορετικά τέλος.

### 3.9 Αντικειμενική συνάρτηση και διαδικασίες IRC – FROFI

Οι ανωτέρω διαδικασίες – διορθώσεις ολικά συνιστούν των ευρετικό μηχανισμό στον οποίο εισάγεται αρχικά ο κάθε πληθυσμός καθώς και οι απόγονοι αυτού σε κάθε γενεά, προκειμένου στην μεθόδευση του αλγορίθμου για αναζήτηση εφικτών λύσεων. Ο υπολογισμός της αντικειμενικής είναι το τελευταίο κομμάτι του υποπρογράμματος που περιέχει τον ευρετικό μηχανισμό. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί το μέτρο σύγκρισης μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού. Υπενθυμίζουμε η αντικειμενική περιέχει κόστος καυσίμου και κόστος εκκίνησης των μονάδων.

Οι τιμές που επιστρέφει το υποπρόγραμμα είναι:

- Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης
- Η συνολική παραβίαση περιορισμών
- Το τελικό διάνυσμα υποψήφιων λύσεων Κατανομή Φορτίου

### 3.10 Κριτήριο τερματισμού – Λοιπές διαδικασίες αλγορίθμου

Το κριτήριο τερματισμού καθορίζεται από τον αριθμό των αξιολογήσεων της αντικειμενικής που ορίζεται αρχικά από το χρήστη. Ειδικά για ένα δείγμα πληθυσμού 40 ατόμων, ορίζοντας συνολικό αριθμό αξιολογήσεων της αντικειμενικής 100.000, η ολοκλήρωση του κώδικα πραγματοποιείται μετά την παραγωγή της γενεάς με αύξοντα αριθμό  $\frac{100000}{40} = 2500$ . Επιπλέον, εκτελέσθηκαν 20 ανεξάρτητα «τρεξίματα» του κώδικα προκειμένου στην ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων.

Η επιστροφή στο βασικό πρόγραμμα συνοδεύεται από την εισαγωγή του πληθυσμού στη διαδικασία μετάλλαξης και διασταύρωσης. Παράγοντας λοιπόν ο αλγόριθμος το διάνυσμα του απογόνου, ο αλγόριθμος νεοεισέρχεται στον ευρετικό μηχανισμό για την ικανοποίηση των περιορισμών του προβλήματος. Στη συνέχεια, επιστρέφοντας ο απόγονος στο κύριο πρόγραμμα, εισέρχεται στην διαδικασία επιλογής, όπου συγκρίνεται με το προαναφερθέν διάνυσμα του γονέα, η επιβίωση των οποίων καθορίζεται από την τιμή της αντικειμενικής που επιφέρουν. Οι δύο τελευταίες διαδικασίες είναι αυτές της αντικατάστασης και της στρατηγικής μετάλλαξης του FROFI, όπως ακριβώς αυτές παρουσιάσθηκαν στα εδάφια 1.8.3 και 1.8.4.

Τέλος αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από τον προγραμματισμό του ανωτέρω θέματος σε Laptop Dell Windows 7 με επεξεργαστή Intel® Core<sup>TM</sup> i5-2410M CPU @ 2.3 GHz.

# 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 10 μονάδων αποτελεί ένα πειραματικό σύστημα. Η θεώρηση αυτή μας επιτρέπει να εξετάσουμε διάφορες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος, που χρησιμοποιούνται στην σχετική βιβλιογραφία [38], [42], για μικρές τιμές του διαστήματος LT. Όπως θα δούμε και στην συνέχεια, η αύξηση της τιμής του LT, δεν επιτρέπει την εξέταση του συγκεκριμένου συστήματος για χαμηλές τιμές των δεικτών αξιοπιστίας. Το γεγονός όμως αυτό μας επιτρέπει την ανάλυση ευαισθησίας σε τιμές των ανωτέρω δεικτών οι οποίες δεν έχουν εξετασθεί σε αντίστοιχες εργασίες.

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την υλοποίηση μιας εναλλακτικής πιθανοτικής προσέγγισης στη διαδικασία εκτίμησης του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος. Τα αποτελέσματα αυτής αντιπαραβάλλονται με εκείνα που προκύπτουν από σταθερή θεώρηση του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας. Η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων γίνεται, όπως και στην περίπτωση του αλγορίθμου, μέσω της τιμής του συνολικού κόστους.

Κύριο ζητούμενο λοιπόν αποτελεί η αποσαφήνιση του αν και υπό ποιες προϋποθέσεις οφείλει να γίνεται ο σχεδιασμός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας κάνοντας χρήση των δεικτών αξιοπιστίας. Η ανάλυση που ακολουθεί γίνεται για τις διάφορες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος καθώς και την τιμή του χρονικού διαστήματος LT.

# 4.1 Αποτίμηση δύο προσεγγίσεων

Ο βασικός παράγων στην εξαγωγή της τελικής απόφασης είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που φέρουν οι υποψήφιες λύσεις του προβλήματος. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων ορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας από οικονομικής απόψεως. Επίσης, παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων τα ενεργειακά μεγέθη, τα οποία προκύπτουν από τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος.

# 4.1.1 Τεχνικοοικονομική σύγκριση αποθεμάτων των 2 προσεγγίσεων

Ο βασικός λόγος που αποτυπώνονται οι διαφοροποιήσεις στο κόστος των δύο προσεγγίσεων (ντετερμινιστική – πιθανοτική), είναι τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος που οφείλει το σύστημα να καλύψει κάθε φορά. Στο σχήμα 4.1 περιλαμβάνεται η χρονοσειρά της ζήτησης με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος.



Σχήμα 4.1: Ζήτηση και εγκατεστημένη ισχύς εξεταζόμενου συστήματος

Ο λειτουργός συνεπώς του συστήματος καλείται να προγραμματίσει κατά βέλτιστο τρόπο τις διαθέσιμες μονάδες για την κάλυψη της ζήτησης με το ελάχιστο εφικτό κόστος. Παρουσιάζουμε αρχικά την περίπτωση της αναλυτικής μεθόδου που λαμβάνει ντετερμινιστικά ένα ωριαίο αποθεματικό ισχύος ίσο με το 10% της ζήτησης την ώρα εκείνη. Στη συνέχεια εξετάζεται για τις μικρότερες δυνατές τιμές των

δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος, η μέθοδος που εισάγει πιθανοτική τεχνική στην εκτίμηση της στρεφόμενης εφεδρείας.

# 4.1.2 Τεχνική ανάλυση των μεθόδων

# 4.1.2.1 Ντετερμινιστική μέθοδος



Σχήμα 4.2: Ζήτηση φορτίου, απαιτούμενη εφεδρεία και ισχύς σε λειτουργία για την περίπτωση προκαθορισμένου σταθερού ποσού στρεφόμενης εφεδρείας( Pr=10% )

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2, εφόσον καθορίζουμε ντετερμινιστικά στο σύστημά μας το απαιτούμενο απόθεμα ισχύος 10%, η καμπύλη που καλούμαστε τελικά να καλύψουμε είναι εκείνη που βρίσκεται ανάμεσα στην ζήτηση και την εγκατεστημένη ισχύ. Όπως είναι φυσικό, όσο κοντά και αν είμεθα στον βέλτιστο προγραμματισμό, σε ορισμένες ώρες, η καμπύλη της εν ενεργεία ισχύος δεν μπορεί να εφάπτεται της απαιτούμενης λόγω τεχνικών περιορισμών. Το σύστημα λοιπόν παράγει επιπλέον ισχύ η οποία εμφανίζει τις επιπτώσεις της στο συνολικό κόστος και δημιουργεί την ανάγκη της παρούσας ανάλυσης.

# 4.1.2.2 Πιθανοτική μέθοδος

Στην πιθανοτική μέθοδο, για τις ανάγκες του συγκεκριμένου εδαφίου, οι δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος έλαβαν τις μικρότερες δυνατές τιμές. Ειδικά,  $L_{max} = 0,5\%$  και  $EUE_{max} = 0,05\%$ . Αναφέρουμε ότι οι συγκεκριμένες τιμές εκλέχθηκαν καθώς αποτελούν τις συνηθέστερες τιμές που εξετάζονται στην βιβλιογραφία, όταν λαμβάνονται υπόψη οι δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος. Το μέγεθος LT λήφθηκε ίσο με τη μονάδα, καθώς για μεγαλύτερη τιμή, η μη διαθεσιμότητα των μονάδων αυξάνει εκθετικά, με αποτέλεσμα, λόγω των μικρών διαστάσεων του προβλήματος (10 μονάδες) να μην μπορούν να τηρηθούν οι συγκεκριμένες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας.



Σχήμα 4.3: Παρουσίαση παραγόμενης ισχύος με πιθανοτική μέθοδο



Σχήμα 4.4: Δείκτης πιθανότητας απώλειας φορτίου (Lmax=0,5%, EUEmax=0,05%)

Ως εκ του σχήματος 4.4 φαίνεται η ικανοποίηση του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου για κάθε ώρα, αφού οι τιμές του δείκτη LOLP είναι χαμηλότερες του 0.5% για κάθε μία από τις ώρες της περιόδου προγραμματισμού. Όπως είναι φανερό, οι τιμές της πιθανότητας απώλειας φορτίου είναι ανάλογες της τιμής ζήτησης. Αύξηση της τελευταίας συνεπάγεται αύξηση της πιθανότητας απώλειας φορτίου σε χαμηλότερα επίπεδα διακοπής λειτουργίας. Οι δείκτες αξιοπιστίας επηρεάζουν την καμπύλη των εν ενεργεία μονάδων, όπως και οι υπόλοιποι τεχνικοί περιορισμοί του προβλήματος, καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3, υπάρχουν σημεία στα οποία η τελευταία αδυνατεί να ακολουθήσει την πτώση της ζήτησης.

# 4.1.2.3 Σύγκριση

Τα δύο μεγέθη που παρουσιάζουμε εδώ είναι το τελικό απόθεμα που παράγεται στις δύο περιπτώσεις καθώς και τα συνολικά κόστη που διαμορφώνονται. Στην περίπτωση της αναλυτικής μεθόδου παρουσιάζεται η συνολική πλεονάζουσα ισχύς που παράγεται, είτε λόγω περιορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας, είτε λόγω των άλλων τεχνικών περιορισμών. Η στρεφόμενη εφεδρεία στην περίπτωση πιθανοτικής προσέγγισης καθορίζεται από το ζητούμενο επίπεδο αξιοπιστίας. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:



Σχήμα 4.5: Ποσό ισχύος στρεφόμενης εφεδρείας των 2 προσεγγίσεων

EUE %	Lmax %	Best Cost (\$)	Mean Cost (\$)	Worst Cost (\$)	STD	time (sec)
-	-	565352	565519	565651	97	39,24
0,05	0,5	562775	563171	563847	249	277,74

Πίνακας 4.1: Οικονομική σύγκριση των 2 προσεγγίσεων

Στον ανωτέρω πίνακα συνοψίζονται τα ολικά κόστη που επιφέρουν οι δύο προσεγγίσεις. Συγκεκριμένα, κάνοντας χρήση της πιθανοτικής μεθόδου στην εκτίμηση στρεφόμενης εφεδρείας, έχουμε μία μείωση της τάξεως των 2577 \$. Η σημαντική αυτή διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι, το ολικό ημερήσιο αποθεματικό ισχύος στην περίπτωση της αναλύτικής μεθόδου είναι 4275 MW, ενώ στην περίπτωση πιθανοτικής, 4070 MW. Το διάγραμμα που αιτιολογεί τις διαφοροποιήσεις στο συνολικό κόστος παραγωγής παρατίθεται ακολούθως.



Σχήμα 4.6: Συνολικός αριθμός εν ενεργεία μονάδων για κάθε ώρα

Η ανάγκη για ικανοποίηση του επιπλέον ποσοστού 10% επί της ζήτησης, υποχρεώνει την ένταξη περισσότερων μονάδων στο σύστημα με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του κόστους. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια που η ζήτηση παρουσιάζει αιχμή (ώρες 9 έως 14) για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας ίσης με 10% της ζήτησης, ο αλγόριθμος «αναγκάζεται» να δεσμεύσει μία μονάδα περισσότερη σε κάθε ώρα, σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιούνται οι πιθανοτικοί δείκτες. Επίσης, από τον πίνακα προκύπτει ότι το υπολογιστικό εργαλείο και στις δύο μεθόδους έχει ίδια τάξη στιβαρότητας (robustness) όπως προκύπτει από τις τιμές τις τυπικής απόκλισης των λύσεων. Φυσικά, η διαδικασία υπολογισμού των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος για κάθε υποψήφια λύση, είναι απαιτητική χρονικά, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου ολοκλήρωσης του αλγορίθμου. Ο υπολογιστικός χρόνος βρίσκεται σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα και κρίνεται σκόπιμο να παρουσιάζεται σε κάθε περίπτωση, για την αξιολόγηση μελλοντικών προσπαθειών πάνω στο θέμα.

# 4.2 Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής ως προς τις τιμές των δεικτών αξιοπιστίας

Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε ένα πλήθος πειραμάτων με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης που έχουν οι διάφορες τιμές των δεικτών αξιοπιστίας στο σύστημα. Οι ενδεικτικές τιμές % των ανωτέρω δεικτών που έχουν μελετηθεί [38], [42] για την αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια, βρίσκονται στο διάστημα [0.01 – 0.10], ενώ για τη πιθανότητα απώλειας φορτίου [0.5 – 1.5].

Η μέγιστη τιμή των δεικτών αξιοπιστίας που ορίζουμε κάθε φορά στον αλγόριθμο, αποτελεί και το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος. Ως είναι φανερό, αύξηση κάποιου δείκτη, σημαίνει μεγαλύτερα όρια εφικτών λύσεων από άποψη αξιοπιστίας, με αποτέλεσμα όπως θα δούμε σημαντικές αλλαγές στα ολικά κόστη. Τέλος, αναφέρουμε ότι τα μεγέθη που παρουσιάζονται, αποτελούν τις βέλτιστες λύσεις έπειτα από 20 ανεξάρτητα τρεξίματα του αλγορίθμου, για κάθε περίπτωση.

# 4.2.1 Μεταβολή επιπέδων αξιοπιστίας για LT=1

# 4.2.1.1 Σταθερό όριο πιθανότητας απώλειας φορτίου

Αρχικά, εξετάζονται οι μικρότερες δυνατές τιμές για το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος ( $L_{max} = 0.5\%$ ) και μεταβάλλουμε το επιτρεπόμενο όριο του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας κρατώντας όλους του άλλους παράγοντες σταθερούς. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται ως εξής:

case	EUE %	Lmax %	Best Cost (\$)	Mean Cost (\$)	Worst Cost (\$)	STD	time (sec)
1	0,05	0,5	562775	563171	563847	249	277,74
2	0,1	0,5	556883	557237	558031	476	207

Πίνακας 4.2: Οικονομικά αποτελέσματα για Lmax=0.5%

Υπενθυμίζουμε ότι το ποσοστό EUE παριστάνει ποσό ενέργειας και υπολογίζεται επί της συνολικής ημερήσιας ζήτησης. Προκύπτει λοιπόν το εξής:

$$EUE_{max} = a \cdot \sum_{t=1}^{T} P_D^t$$

Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του πίνακα στη στήλη EUE % αναφέρεται στην τιμή του μεγέθους a. Για πληρέστερη εποπτεία των μεγεθών a = 0.05% σημαίνει ότι για κάθε πρόγραμμα που παράγει ο αλγόριθμος, η μέγιστη τιμή της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη, για όλο το εικοσιτετράωρο από 13.55 MWh. Αντίστοιχα, για επίπεδο 0.1 % προκύπτει μέγιστο επιτρεπόμενο όριο 27.1 MWh. Στη συνέχεια, όπου χρησιμοποιείται το μέγεθος EUE και εκφράζει ποσοστό επί τοις εκατό, αναφερόμαστε στο μέγεθος a.

Από τον πίνακα 4.2 συνάγουμε το συμπέρασμα ότι αύξηση του επιπέδου αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας προκαλεί σημαντική μείωση στο συνολικό κόστος του συστήματος 5892 \$. Επίσης, η αύξηση του EUE<sub>max</sub> διευρύνει τον χώρο αναζήτησης εφικτών λύσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση της τυπικής απόκλισης των αποτελεσμάτων. Οι τιμές που λαμβάνουν σε ωριαία βάση οι δείκτες αξιοπιστίας παρουσιάζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.7: Ωριαίο ρίσκο συστήματος για Lmax=0.5%



Σχήμα 4.8: Αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια για Lmax=0.5%

Στο τελευταίο σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το ποσό της ενέργειας που βάσει της πιθανότητας απώλειας φορτίου αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί σε κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος που μελετάται. Συνολικά η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια για EUE = 0.05% είναι ίση με 13.362 MWh, ενώ για την περίπτωση 2 όπου EUE = 0.1% είναι 17 MWh. Η αύξηση του επιπέδου αξιοπιστίας από πλευράς αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, οδηγεί στη αποδοχή λύσεων λιγότερο αξιόπιστων αλλά με χαμηλότερο κόστος παραγωγής.



Σχήμα 4.9: Εν ενεργεία μονάδες συναρτήσει της ώρας (Lmax=0.5%)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9, η αύξηση του δείκτη αξιοπιστίας  $EUE_{max}$  δίνει τη δυνατότητα στην παραγωγή εφικτών λύσεων με λιγότερες εν ενεργεία μονάδες κάθε ώρα, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού κόστους. Απόρροια επίσης αυτού αποτελεί το γεγονός ότι αυξάνεται η ωριαία αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8.

### 4.2.1.2 Σταθερό επίπεδο αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας

Εν συνεχεία, για σταθερή τιμή της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας του συστήματος  $EUE_{max}$ , εξετάζουμε διάφορα επίπεδα για την πιθανότητα απώλειας φορτίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

case	EUE %	Lmax %	Best Cost (\$)	Mean Cost (\$)	Worst Cost (\$)	STD	time (s)
3	0,1	0,5	556883	557237	558031	476	207
4	0,1	1,0	553489	555191	556573	951	193
5	0,1	1,5	553465	555225	556604	1035	194

Πίνακας 4.3: Οικονομικά αποτελέσματα για ΕUE=0.1%

Όπως είδαμε και στις περιπτώσεις 1,2 (πίνακας 4.2), έχουμε μείωση του ολικού κόστους με αύξηση του μεγίστου ορίου πιθανότητας απώλειας φορτίου. Η μετάβαση από την περίπτωση 3 στην 4 οδηγεί σε μείωση 3394\$, ενώ περαιτέρω μεταβολή 4 – 5 επιφέρει μείωση 23 \$. Μέσω της τελευταίας (μεταβολή 4 – 5) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το επιτρεπόμενο όριο αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενεργείας, δεν επιτρέπει περαιτέρω αλλαγές στον βέλτιστο προγραμματισμό των μονάδων με αύξηση του  $L_{max}$ . Οι περιπτώσεις λοιπόν 4, 5 παρουσιάζονται ως μία. Έχουμε ίδια συμπεριφορά στις τυπικές αποκλίσεις, μιας και αύξηση των μεγίστων επιτρεπόμενων ορίων αξιοπιστίας διευρύνει των χώρο εφικτών λύσεων. Οι υπολογιστικοί χρόνοι βρίσκονται σε ανταγωνιστικά επίπεδα για τη φύση και πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης μεθόδου.

Παρατηρούμε επίσης ότι με διπλασιασμό του L<sub>max</sub> η επίδραση στο ολικό κόστος είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη που είχαμε στις περιπτώσεις 1,2. Τα διαγράμματα αποτελεσμάτων των περιπτώσεων 3 και 4,5 παρουσιάζονται ακολούθως:



Σχήμα 4.10: Ωριαίο ρίσκο συστήματος για ΕUE=0.1%



Σχήμα 4.11: Πλήθος εν ενεργεία μονάδων για ΕUE=0.1%

Στο ανωτέρω σχήμα είναι εμφανείς οι διαφοροποιήσεις που επιφέρει ο περιορισμός απώλειας φορτίου. Η ανάγκη για ικανοποίηση χαμηλότερων δεικτών αξιοπιστίας στο σύστημα, απαιτεί την ένταξη περισσότερων μονάδων με αποτέλεσμα την αύξηση του ολικού κόστους. Αναφορικά με την αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια των ανωτέρω προγραμμάτων, για  $L_{max} = 0.5\%$  προκύπτουν 17 MWh, ενώ για  $L_{max} = 1.0\%$  θα είναι 19 MWh.



Σχήμα 4.12: Ωριαία στρεφόμενη εφεδρεία συστήματος EUE=0.1%

Οι διαφορές στο ωριαίο αποθεματικό ισχύος για τα επίπεδα αξιοπιστίας που εξετάζονται στην παρούσα φάση δημιουργούνται σε ώρες αιχμής. Όπως προκύπτει από τα σχήματα, η αύξηση της μέγιστης τιμής πιθανότητας απώλειας φορτίου επιτρέπει στο σύστημα να διατηρεί μικρότερο αποθεματικό ισχύος, γεγονός που επιδρά σημαντικά όπως είδαμε στην αντικειμενική. Συνοψίζοντας, η απαίτηση υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας, που περιγράφεται από χαμηλές τιμές του  $L_{max}$ , έχει σημαντικά αρνητική επίδραση στα συνολικά κόστη.

# 4.3 Επίδραση του χρονικού διαστήματος LT στην αντικειμενική

Όπως έχουμε αναφέρει, το διάστημα LT είναι το μέγεθος που επηρεάζει τη διαθεσιμότητα των μονάδων, καθώς θεωρείται ότι σε αυτό το χρονικό διάστημα δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί οιαδήποτε αντικατάσταση ή συντήρηση του στοιχείου με έπαθε βλάβη. Αύξηση του LT προκαλεί εκθετική αύξηση στη μη διαθεσιμότητα των μονάδων, με αποτέλεσμα όπως θα δούμε σημαντικές αλλαγές στα οικονομικά αποτελέσματα.

Η ανάγκη για ανάλυση ευαισθησίας στις διάφορες τιμές του LT, προϋποθέτει την αύξηση των επιτρεπόμενων ορίων αξιοπιστίας, καθώς το πλήθος των 10 μονάδων δεν αρκεί για την εξέταση υψηλών τιμών του LT, στις τιμές των επιπέδων αξιοπιστίας του μελετήθηκαν στις περιπτώσεις 1 – 5. Εφόσον η τιμή της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας λαμβάνεται ως ποσοστό της ζήτησης, η ανάλυση για υψηλότερες τιμές αυτού στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται χωρίς βλάβη της γενικότητας. Αυτό αιτιολογείται, καθώς στις εργασίες 26 μονάδων [38], [42] οι τιμές της ζήτησης είναι πολύ υψηλότερες.

# 4.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας κόστους παραγωγής στις τιμές του LT

Ξεκινώντας, παρουσιάζονται τα οικονομικά αποτελέσματα για τις διάφορες τιμές του LT που εξετάσθηκαν, με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες.

case	EUE %	Lmax %	Best Cost (\$)	Mean Cost (\$)	Worst Cost (\$)	STD	time (sec)	LT
6	0,35	2,5	553476	555112	555724	915	192	2
7	0,35	2,5	554215	555954	557310	883	227	4
8	0,35	2,5	567272	567428	567572	71,31	311	8

Για την ποσοτικοποίηση των δεικτών αξιοπιστίας των εν λόγω περιπτώσεων, με ποσοστό *EUE* = 0.35% αναφερόμαστε σε αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια 94.85 *MWh*. Βλέπουμε συνεπώς πόσο σημαντική επίδραση έχει η διαθεσιμότητα των μονάδων, η οποία καθορίζεται από τις τιμές του χρονικού διαστήματος LT, στο συνολικό κόστος. Ο πίνακας 6 περιέχει ρεαλιστικές τιμές του LT με αποτέλεσμα να μας παρέχει χρήσιμη πληροφορία για την επίδραση της συντήρησης των μονάδων κατά τον σχεδιασμό του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής.

Η μεταβολή 6 – 7 συνοδεύεται από αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας 739 \$, ενώ περεταίρω διπλασιασμός του LT οδηγεί στην σημαντική αύξηση της τάξεως των 13057 \$. Φαίνεται λοιπόν πόσο καθοριστικό είναι το μέγεθος LT κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος. Η αύξηση του LT μειώνει σημαντικά των χώρο αναζήτησης εφικτών λύσεων καθώς οι τιμές της πιθανότητας απώλειας φορτίου LOLP πλησιάζουν το μέγιστο επιτρεπόμενο όριό τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τυπικής απόκλισης των αποτελεσμάτων και συνεπώς την στιβαρότητα του κώδικα Ακολούθως παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μεγεθών που αιτιολογούν τις ανωτέρω αποδόσεις και καθορίζουν τις διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων 6 – 8. Σε κάθε περίπτωση, τα όρια αξιοπιστίας του συστήματος είναι  $L_{max} = 2.5\%$ , EUE = 0.35%.



Σχήμα 4.13: Πιθανότητα απώλειας φορτίου συναρτήσει του LT

Από το σχήμα 4.13 είναι εμφανής η ικανοποίηση του περιορισμού απώλειας φορτίου. Βλέπουμε ότι για LT=8h ο δείκτης LOLP λαμβάνει τιμές σε ένα περιορισμένο εύρος γεγονός που φανερώνει την ακριβή ανάλυση του συστήματος από πλευράς αξιοπιστίας. Λόγω του ότι η πιθανότητα απώλειας φορτίου αναφέρεται σε ποσοστό (αθροιστική συχνότητα), είναι απαραίτητη η συνοδεία της από τον δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ισχύος. Η τεχνική αυτή είναι αναγκαία για την ποσοτικοποίηση του ποσού ενέργειας που αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί από το σύστημα για κάθε ώρα, βάσει της πιθανοτικής μεθόδου στην εκλογή του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας. Το διάγραμμα του εν λόγω δείκτη παρουσιάζεται ακολούθως..



Σχήμα 4.14: Οπτικοποίηση ωριαίας αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας συναρτήσει LT



Σχήμα 4.15: Πλήθος εν ενεργεία μονάδων συναρτήσει του LT

Όπως προκύπτει λοιπόν, αύξηση του χρονικού διαστήματος LT αυξάνει εκθετικά την μη διαθεσιμότητα των μονάδων με αποτέλεσμα την ανάγκη για ένταξη περισσότερων μονάδων για την κάλυψη της ζήτησης. Χαρακτηριστικά, την ώρα αιχμής 12 για τις διάφορες τιμές που λαμβάνει το LT υποχρεώνει σταδιακά την ένταξη μιας επιπλέον μονάδας τη φορά. Όπως είναι φυσικό, η πιθανότητα απώλειας φορτίου (δείκτης LOLP) είναι ανάλογη της τιμής του LT και υποχρεούται το σύστημα στην ένταξη μονάδων που αυξάνουν την συνολική παραγόμενη ισχύ και τελικά το κόστος.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα ενεργειακά μεγέθη που προκύπτουν απευθείας από τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Η αύξηση του LT οδηγεί το σύστημα στην παραγωγή πολύ μεγαλύτερων ποσών ισχύος με στόχο την κάλυψη των περιορισμών αξιοπιστίας. Οι διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων 7, 8 δηλαδή LT=2h, LT=4h αντίστοιχα είναι εμφανείς εκεί που ο δείκτης LOLP λαμβάνει την μέγιστη τιμή λόγω αύξηση της ζήτησης, δηλαδή σε ώρες αιχμής. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η τιμή του LT, για τα ίδια επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος επιδρά καθοριστικά στην εκλογή της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας. Τέλος αναφέρουμε ότι για τις περιπτώσεις 6, 7 και 8 το σύστημα διαθέτει σε στρεφόμενη εφεδρεία 2346, 2401 και 4617 MW αντίστοιχα. Οι διαφορές στα κόστη των περιπτώσεων 6 – 8 αιτιολογούνται από τα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.16: Ζήτηση και ωριαία συνολική ισχύς συναρτήσει LT



Σχήμα 4.17: Οπτικοποίηση ποσού στρεφόμενης εφεδρείας συναρτήσει LT

# 5 Συμπεράσματα – Επίλογος

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την υλοποίηση πιθανοτικής μεθόδου στην εκτίμηση της στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής. Η ενσωμάτωση αυτής πραγματοποιείται μέσω των περιορισμών αξιοπιστίας του συστήματος. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί αναλυτικά κριτήρια για την εκλογή του ωριαίου αποθέματος ισχύος, γεγονός που όπως δείξαμε έχει αρνητική επίδραση στα λειτουργικά κόστη του συστήματος.

Η ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας του συστήματος γίνεται με τρόπο ώστε να ευρίσκεται ο βέλτιστος προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το επίπεδο αξιοπιστίας που ορίζεται κάθε φορά. Ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων και της κατανομής φορτίου είναι IRC – FROFI. Τελικό ζητούμενο αποτελεί ο καθορισμός του ποσού στρεφόμενης εφεδρείας με βασική προϋπόθεση την ικανοποίηση του επιπέδου αξιοπιστίας που εκλέγεται.

# 5.1 Ντετερμινιστική – Πιθανοτική Μέθοδος

Αρχικά, η πιθανοτική μέθοδος στην απόφαση της στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος είναι οικονομικά συμφέρουσα έναντι της αναλυτικής. Η ανάγκη για επιπλέον κάλυψη ενός ποσοστού της ζήτησης επιφέρει μεγαλύτερες τιμές της αντικειμενικής. Αντί αυτού, οι περιορισμοί αξιοπιστίας δίνουν την δυνατότητα στον λειτουργό του συστήματος να μειώνει σημαντικά το λειτουργικό κόστος, γνωρίζοντας σε ωριαία βάση το ρίσκο – πιθανότητα απώλειας φορτίου. Επίσης, το ποσό της ενέργειας που αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί κάθε ώρα, δίνει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να «οπλίσει» το σύστημα με μονάδες οι οποίες θα είναι ικανές να καλύψουν οιαδήποτε διαφοροποίηση στην προβλεπόμενη ζήτηση.

# 5.2 Επίδραση του επιπέδου αξιοπιστίας

Όσο χαμηλότερα είναι τα όρια των δεικτών αξιοπιστίας τόσο πιο αξιόπιστο είναι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση αξιοπιστίας έγινε με γνώμονα τον δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου και τον δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Ως προέκυψε η αύξηση του επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση του λειτουργικού κόστους. Η επιβολή χαμηλών τιμών των δεικτών αξιοπιστίας οδηγεί στην απαίτηση για ένταξη περισσότερων μονάδων για την ικανοποίηση όλων των περιορισμών του προβλήματος, που το καθιστούν ρεαλιστικό. Σημειώνεται λοιπόν αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά μεταξύ του επιπέδου αξιοπιστίας και του συνολικού κόστους του συστήματος.

Βάσει της ανάλυσης που προηγήθηκε θα λέγαμε ότι το σύστημα είναι πιο ευαίσθητο σε μεταβολές του ορίου της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας συγκριτικά με την πιθανότητα απώλειας φορτίου. Αυτό συνοψίζεται στα αποτελέσματα, καθώς με διπλασιασμό του επιπέδου EUE επιφέρεται κοντά διπλάσια μείωση στο κόστος από ότι με διπλασιασμό στην τιμή του Lmax.

Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές που λαμβάνει η τυπική απόκλιση αποδεικνύουν τη στιβαρότητα του κώδικα. Αύξηση των δεικτών αξιοπιστίας επιτρέπουν την αποδοχή περισσότερων λύσεων από πλευράς αξιοπιστίας με αποτέλεσμα την αύξηση των τυπικών αποκλίσεων. Ο υπολογισμός των δεικτών αξιοπιστίας συνιστά μία χρονοβόρα διαδικασία, η οποία μέσω της τεχνολογίας του Η/Υ και της πολυπλοκότητας του προβλήματος κρίνεται ανταγωνιστική.

# 5.3 Επίδραση του διαστήματος LT

Το μέγεθος του χρονικού διαστήματος «συντήρησης» LT καθορίζει τη διαθεσιμότητα των μονάδων. Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν περιπτώσεις για τις διάφορες διακριτές τιμές 1h – 8h που λαμβάνει στα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής η μεταβλητή αυτή, χωρίς την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη φορτίου.

Είναι εμφανές ότι η παράμετρος LT έχει σημαντικότατη επίδραση στο ολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος. Ως προκύπτει από τα αποτελέσματα, η τιμή του LT είναι ανάλογη του βαθμού αντικατάστασης των μονάδων για διακοπή λειτουργίας (ORR). Έτσι, αυξάνοντας το LT απαιτείται ένταξη περισσότερων μονάδων για την ικανοποίηση των περιορισμών του προβλήματος με αποτέλεσμα την παραγωγή ακριβότερων λύσεων στο πρόβλημα ένταξης μονάδων. Συνεπάγεται λοιπόν ανάλογη συμπεριφορά μεταξύ της τιμής LT και του συνολικού κόστους του συστήματος.

Ο καθορισμός του διαστήματος «συντήρησης» LT σε μεγάλες τιμές τείνει σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες παραγωγής, μιας και απαιτείται ένα ικανό χρονικό διάστημα προκειμένου στην επανένταξη μιας μονάδας ή ενός στοιχείου του συστήματος που έχει υποστεί βλάβη. Η παρούσα λοιπόν διπλωματική, αποτελεί μία ικανή αρχή για συστηματική καταγραφή των απαραίτητων μεγεθών προκειμένου στην εκτίμηση της αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Συμπερασματικά, από πλευράς σχεδιασμού, η υιοθέτηση μιας πιθανοτικής μεθόδου για την εκτίμηση του αποθέματος, κρίνεται σκόπιμη, για την πληρέστερη ποσοτικοποίηση των μεγεθών αξιοπιστίας του συστήματος, που δίνει τη δυνατότητα στο λειτουργό να διατηρεί ένα χαμηλότερο ποσό εφεδρείας. Πιθανά να υπάρξει ένα επιπρόσθετο κόστος κατά το σχεδιασμό του συστήματος για την περίπτωση όπου το LT λαμβάνει υψηλές τιμές, το οποίο όμως, δυνητικά μπορεί να μειωθεί μέσω της βελτίωσης της τεχνολογίας του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση λοιπόν, η πιθανοτική προσέγγιση στην εκλογή της στρεφόμενης εφεδρείας αποτελεί συμφέρουσα απόφαση.
## 6 Βιβλιογραφία

- [1] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York: Plenum Press, 1984.
- [2] S. M. S. and C. S. R.N. Allan, R. Billinton, "Bibliography on the Application of Probability Methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PWRS-3, pp. 1555– 1564.
- [3] R. B. and S. H. L. R.N. Allan, "Bibliography on the Application of Probability Metbods in Power System Reliability Evaluatio," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, pp. 275–282, 1984.
- [4] IEEE Committee Report, "Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation," 1978.
- [5] R. Billinton, "Operating Reserve Risk Assessment in Composite Power Systems," vol. 9, no. 3, pp. 1270–1276, 1993.
- [6] J. Maturana, "Solving the short-term electrical generation scheduling problem by an adaptive evolutionary approach," vol. 179, pp. 677–691, 2007.
- [7] A. G. B. Saramourtsis, Damousis, "Genetic Algorithm Solution to the Economic Dispatch Problem." pp. 377–382, 1996.
- [8] W. B. Wood AJ, *Power generation operation and control*. New York, 1984.
- [9] T. Senjyu, T. Miyagi, A. Yousuf, N. Urasaki, and T. Funabashi, "Emerging solution of large-scale unit commitment problem by Stochastic Priority List," vol. 76, pp. 283–292, 2006.
- [10] Y. M. Cohen AI, "A branch-and-bound algorithm for unit commitment," *IEEE Trans Pow Ap Syst PAS-102*, pp. 444–51, 1983.
- [11] H. Y.-Y. Su C-C, "Fuzzy dynamic programming: an application to unit commitment," *IEEE Trans Pow Syst*, pp. 1231–7, 1991.
- [12] B. Takriti S, "Using integer programming to refine Lagrangian-based unit commitment solutions," *IEEE Trans Pow Syst 2000;15(1)*, pp. 151–6.
- [13] P. Ongsakul W, "Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation," *IEEE Trans Pow Syst 2004;19(1)*, pp. 620–8.
- [14] L. F. Frangioni A, Gentile C, "Sequential Lagrangian-MILP approaches for unit commitment problems," *Electr Pow Energy Syst 2011;33*, pp. 585–93.
- [15] C. D. V. D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, "Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.* 21, pp. 68–76.
- [16] M. Y. H. K. Abookazemi, H. Ahmad, A. Tavakolpour, "Unit commitment solution using an optimized genetic system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 33, pp. 969–975, 2011.
- [17] T. F. T. Senjyu, H. Yamashiro, K. Uezato, "A unit commitment problem by

using genetic algorithm based on unit characteristic classification," *Power Eng. Soc. Winter Meet. 2002. IEEE, Vol. 1, IEEE*, pp. 58–63, 2002.

- [18] G. Dudek, "Genetic algorithm with integer representation of unit start-up and shut-down times for the unit commitment problem," *Int. Trans. Electr. Energy Syst. 17.*
- [19] P.-H. Chen, "Two-level hierarchical approach to unit commitment using expert system and elite pso," *IEEE Trans. Power Syst.* 27 2012, pp. 780–789.
- [20] Y. Y. X. Yuan, H. Nie, A. Su, L. Wang, "An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem," *Expert Syst. with Appl. 36 2009*, pp. 8049–8055.
- [21] J. H. K. Juste, H. Kita, E. Tanaka, "An evolutionary programming solution to the unit commitment problem," *IEEE Trans. Power Syst.* 14 1999, pp. 1452– 1459.
- [22] A. M. A. A. Y. Saber, "Scalable unit commitment by memory-bounded ant colony optimization with a local search," *Int. J. Electr. Power Energy Syst. 30* 2008, pp. 403–414.
- [23] X. Yuan, A. Su, H. Nie, Y. Yuan, and L. Wang, "Application of enhanced discrete differential evolution approach to unit commitment problem," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2449–2456, 2009.
- [24] A. K. A. S. Uyar, B. T<sup>•</sup>urkay, "Electrical Power and Energy Systems A novel differential evolution application to short-term electrical power generation scheduling," vol. 33, pp. 1236–1242, 2011.
- [25] K. Y. L. Y.-W. Jeong, J.-B. Park, J.-R. Shin, "A thermal unit commitment approach using an improved quantum evolutionary algorithm," *Electr. Power Components Syst.* 37 7 2009, pp. 770–786.
- [26] Y. H. X. Yuan, B. Ji, S. Zhang, H. Tian, "A new approach for unit commitment problem via binary gravitational search algorithm," *Appl. Soft Comput. 22* 2014, pp. 249–260.
- [27] L. C.-C. Cheng C-P, Liu C-W, "Unit commitment by Lagrangian relaxation and genetic algorithms," *IEEE Trans Pow Syst 2000;15(2)*, pp. 707–14.
- [28] V. J. Balci HH, "Scheduling electric power generations using particle swarm optimization combined with the Lagrangian relaxation method," *Int J Appl Math Comput Sci 2004;14(3)*, pp. 411–21.
- [29] Rajan CCA, "Genetic algorithm based simulated annealing method for solving unit commitment problem in utility system," *IEEE Transm. Distrib. Conf. Expo. New Orleans (LA, USA)*, pp. 1–6, 2010.
- [30] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution : A Survey of the State-of-the-Art," vol. 15, no. 1, pp. 4–31, 2011.
- [31] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," *Tech. Rep. TR-95-*

012, 1995.

- [32] L. J. Price KV, Storn RM, Differential Evolution A Practical Approach to Global Optimization. Springer, 2005.
- [33] S. B. Hamida and M. Schoenauer, "ASCHEA: New results using adaptive segregational constraint handling," *Proc. CEC, Honolulu, HI, USA*, vol. 1, pp. 884–889, 2002.
- [34] K. Deb, "An efficient constraint handling method for genetic algorithms," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng*, vol. 186, , pp. 311–338, 2000.
- [35] C. A. C. Coello, "Treating constraints as objectives for single-objective evolutionary optimization," *Eng. Optim*, vol. 32, no. 3, pp. 275–308, 2000.
- [36] Y. Wang, B. Wang, H. Li, and G. G. Yen, "Incorporating Objective Function Information Into the Feasibility Rule for Constrained Evolutionary Optimization," pp. 1–15, 2015.
- [37] K. V. Price and R. Storn, "Differential evolution: A simple evolution strategy for fast optimization," *Dr. Dobb's J*, vol. 22, no. 4, pp. 18–24, 1997.
- [38] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, and C. D. Vournas, "Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing," *IEEE Trans Pow Syst*, vol. 21, no. 4, pp. 1699–1706, 2006.
- [39] Ε. Ν. Διαλυνάς, "Ανάλυση Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων." Αθήνα, 1991.
- [40] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems -Concepts and Techniques*, 2nd ed. New York: Plenum Press, 1992.
- [41] D. Datta and S. Dutta, "A binary-real-coded differential evolution for unit commitment problem," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 517–524, 2012.
- [42] A. Trivedi, S. Member, D. Srinivasan, S. Member, and D. Sharma, "Evolutionary Multi-Objective Day-Ahead Thermal Generation Scheduling in Uncertain Environment," vol. 28, no. 2, pp. 1345–1354, 2013.