



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Ν. Σιμόπουλος

Αθήνα, Νοέμβριος 2006



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

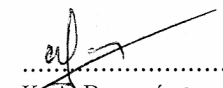
Δημήτριος Ν. Σιμόπουλος

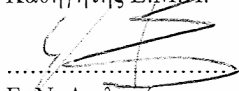
Συμβουλευτική Επιτροπή : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

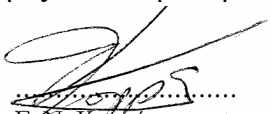
Γεώργιος Ν. Κορρές

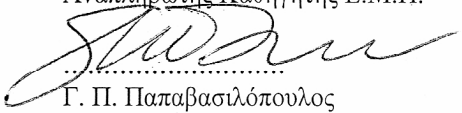
Σταυρούλα Δ. Καβατζά

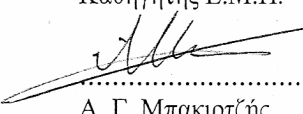
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Νοεμβρίου 2006.

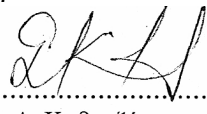

.....
Κ. Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

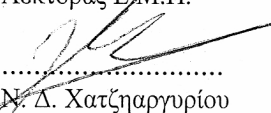

.....
Ε. Ν. Διαλυνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

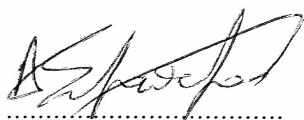

.....
Γ. Ν. Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Γ. Π. Παπαβασιλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Α. Γ. Μπακιρτζής
Καθηγητής Α.Π.Θ.


.....
Σ. Δ. Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.


.....
Ν. Δ. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Δημήτριος Ν. Σιμόπουλος

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

Copyright © Δημήτριος Ν. Σιμόπουλος, 2006.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*αφιερώνεται στη μνήμη του
Καθηγητή Γεώργιου Κονταζή*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται το πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής, στόχος του οποίου είναι ο καθορισμός του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της ενεργού παραγωγής κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος. Η αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος βασίζεται στη διάσπασή του σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα, ένα υδροηλεκτρικό και ένα θερμικό, τα οποία επιλύονται διαδοχικά.

Η επίλυση του θερμικού προβλήματος (προγραμματισμός ένταξης των θερμικών μονάδων και οικονομική κατανομή φορτίου) στηρίζεται στη χρήση μιας νέας μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση όλων των περιορισμών του θερμικού συστήματος παραγωγής. Η μέθοδος περιλαμβάνει τρεις πρωτότυπους μηχανισμούς για την παραγωγή εφικτών υποψήφιων λύσεων, καθώς και συστηματικές διαδικασίες για τη ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου. Η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης επιταχύνεται από τη χρήση μιας μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης, η οποία εφαρμόζεται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας. Παράλληλα, γίνεται χρήση μιας δυναμικής μεθόδου οικονομικής κατανομής φορτίου για την αντιμετώπιση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Η μέθοδος συνίσταται στη διαδοχική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, τροποποιώντας κατάλληλα τα όρια παραγωγής των μονάδων.

Επίσης, παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος για την ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στους δείκτες πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας και παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον καθορισμό της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας σε κάθε ώρα της περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων.

Επιπρόσθετα, μελετάται η επίδραση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στην επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, κάνοντας χρήση δύο πρωτότυπων μεθόδων. Η πρώτη μέθοδος αφορά στους περιορισμούς εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση των περιορισμών που αναφέρονται στους λοιπούς αέριους ρύπους, οι οποίοι δεν εντάσσονται στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων, και συνίσταται στην προσθήκη ενός όρου ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Η επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος (προγραμματισμός λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών) στηρίζεται στη χρήση μιας βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών, η οποία καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση όλων των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Η προτεινόμενη μέθοδος συμβάλλει στην ορθολογική χρήση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό τις συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις.

Η συνδυαστική χρήση των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης, μέσω ενός ενιαίου λογισμικού πακέτου, συντελεί στην επίλυση του συνολικού προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Η αποτελεσματικότητα του προγράμματος αποδεικνύεται από την εξέταση διαφόρων εφαρμογών σε ρεαλιστικά συστήματα παραγωγής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Βέλτιστος Προγραμματισμός Παραγωγής, Υδροθερμική Συνεργασία, Προσομοιωμένη Ανόπτηση, Αποκοπή Αιχμών, Οικονομική Κατανομή Φορτίου, Αξιοπιστία, Εκπομπές Ρύπων

ABSTRACT

This thesis deals with the optimal short-term generation scheduling problem, which aims at determining the on/off state, as well as the real power output, of each hydro and thermal generating unit for every hour of the dispatch period, in order to minimize the total operating cost of the system. The overall problem is decomposed into independent hydro and thermal problems, which are successively solved.

The thermal problem (thermal unit commitment and economic load dispatch) is solved using a new simulated annealing method, which allows the incorporation of all the constraints of the thermal system. This method includes three novel mechanisms for generating feasible trial solutions, as well as systematic procedures for tuning the various control parameters. The convergence of the simulated annealing method is accelerated using a local optimization method, which is implemented at each temperature. Moreover, a dynamic economic dispatch method is used to incorporate the ramp rate constraints of the thermal generating units. For the purposes of this method, a conventional economic load dispatch is independently performed for each considered hour by modifying the generating limits of the units.

A new method for the incorporation of reliability constraints in the formulation of the optimal generation scheduling problem is also presented. The proposed method is based on the loss of load probability and expected unserved energy indices and provides a more realistic evaluation of the hourly spinning reserve requirements, taking into consideration the unavailability of the thermal generating units and the uncertainty of the load forecast.

In addition, the effect of emission constraints on the solution of the optimal generation scheduling problem is examined, using two novel methods. The first one deals with the carbon dioxide constraints, based on the rationale of the European Emissions Trading Scheme. The second method is used to incorporate the constraints referring to other emission types, which are not included in the European Emissions Trading Scheme. This is achieved by adding a penalty term in the objective function of the examined problem.

The hydro problem (hydro plants generation scheduling) is solved using an enhanced peak shaving method, which allows the incorporation of the coupling constraints of the hydroelectric system. The proposed method contributes to a rational allocation of the available hydroelectric energy, resulting in a significant reduction of the required CPU time.

The enhanced peak shaving and simulated annealing methods are integrated in a software package, in order to solve the short-term hydrothermal scheduling problem. Numerical simulations on several realistic test systems have proven the effectiveness of the proposed model.

KEY WORDS

Optimal Generation Scheduling, Hydrothermal Coordination, Simulated Annealing, Peak Shaving, Economic Load Dispatch, Reliability, Emissions

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή ανατέθηκε και επιβλέφθηκε από τον Καθηγητή Γεώργιο Κονταξή στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μετά τον αιφνίδιο θάνατο του Καθηγητή Γεώργιου Κονταξή, την επίβλεψη της διατριβής ανέλαβε ο Καθηγητής Κωνσταντίνος Βουρνάς.

Πριν την παρουσίαση του επιστημονικού μέρους της διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ κατ' αρχάς τον Καθηγητή Κωνσταντίνο Βουρνά για την επίβλεψη και την επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διατριβής. Η εμπιστοσύνη και το ενδιαφέρον που επέδειξε για την εξέλιξη του έργου μου συνέβαλαν σημαντικά στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ τη Λέκτορα Σταυρούλα Καβατζά για την επιστημονική της καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την υπομονή που επέδειξε κατά την εκπόνηση της διατριβής. Την ευχαριστώ ακόμη για την υλική βοήθεια που μου προσέφερε κατά τη συμμετοχή μου σε διάφορες ακαδημαϊκές και ερευνητικές δραστηριότητες.

Ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή Γεώργιο Κορρέ και τον Επιστημονικό Συνεργάτη Κωνσταντίνο Ντελκή για τις πολύτιμες συμβουλές τους. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή Γεώργιο Παπαβασιλόπουλο για τη δυνατότητα που μου παρείχε, μέσω του μεταπτυχιακού μαθήματος “Στοχαστική Βελτιστοποίηση”, να εντοπίσω και να προσεγγίσω το αντικείμενο μελέτης της διατριβής μου.

Ευχαριστώ όλα τα μέλη της ερευνητικής ομάδας, αξιότιμους καθηγητές και συναδέλφους υποψήφιους διδάκτορες, για την άψογη συνεργασία τους και πάντα θα αναπολώ την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφερε ο Καθηγητής Γεώργιος Κονταξής, ο θάνατος του οποίου άφησε ένα δυσαναπλήρωτο κενό.

Τους επιστήθιους φίλους μου Κονταξή Ελευθερία και Γιαννακόπουλο Γιάννη ευχαριστώ θερμά για τη συμπαράσταση και την ειλικρινή φιλία τους, η βοήθεια των οποίων δεν μπορεί να αποτιμηθεί. Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στη Λιάσκα Ειρήνη για την αμέριστη κατανόηση, την υποστήριξη και κυρίως την αγάπη της, η οποία αποτέλεσε κινητήρια δύναμη για να φέρω εις πέρας το δύσκολο έργο μου.

Πάνω από όλα ευχαριστώ τους γονείς μου Νίκο και Μαρία για την πολύπλευρη υποστήριξη, την αγάπη και την ψυχολογική και υλική βοήθεια που μου παρέχουν αφειδώς εδώ και 27 χρόνια. Η παρούσα διατριβή αποτελεί ένα μικρό μόνο βήμα στην προσπάθειά μου να τους ανταποδώσω τους κόπους και τις θυσίες τους. Τέλος ευχαριστώ τον αδερφό μου Κώστα για τη συμπαράσταση και την υποστήριξή του στις δύσκολες στιγμές που αντιμετώπισα κατά την εκπόνηση της διατριβής.

Ευχαριστώ όλους τους ανθρώπους που χάρηκαν ειλικρινά με την προσωπική μου επιτυχία.

Αθήνα, Νοέμβριος 2006

Δημήτριος Ν. Σιμόπουλος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1. Ο Βέλτιστος Προγραμματισμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	23
1.2. Αντικείμενο και Δομή της Διατριβής	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	31
2.1. Γενικά	31
2.2. Τεχνικές και Μέθοδοι Βελτιστοποίησης	31
2.3. Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός Θερμικών Μονάδων Παραγωγής.....	35
2.3.1. Μέθοδος Lagrangian Relaxation.....	35
2.3.2. Μέθοδος διάσπασης Benders	36
2.3.3. Λίστα προτεραιότητας και μέθοδος αποδέσμευσης των μονάδων	36
2.3.4. Δυναμικός προγραμματισμός.....	37
2.3.5. Μικτός ακέραιος προγραμματισμός και μέθοδος εσωτερικού σημείου	38
2.3.6. Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης.....	39
2.3.7. Γενετικοί αλγόριθμοι και εξελικτικός προγραμματισμός	40
2.3.8. Έμπειρα συστήματα και νευρωνικά δίκτυα	41
2.3.9. Στοχαστικές μέθοδοι	42
2.3.10. Λοιπές μέθοδοι.....	43
2.3.11. Υβριδικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος	44
2.4. Βραχυπρόθεσμη Υδροθερμική Συνεργασία	46
2.4.1. Μέθοδος Lagrangian Relaxation.....	46
2.4.2. Προγραμματισμός ροής δικτύου	48
2.4.3. Μέθοδος αποκοπής αιχμών	49
2.4.4. Δυναμικός προγραμματισμός.....	50
2.4.5. Γενετικοί αλγόριθμοι.....	50
2.4.6. Εξελικτικός προγραμματισμός.....	52
2.4.7. Λοιπές μέθοδοι.....	52
2.4.8. Υβριδικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος	54
2.5. Ενσωμάτωση Περιορισμών Αξιοπιστίας του Συστήματος.....	55
2.6. Ενσωμάτωση Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων του Συστήματος	58
2.7. Συμπεράσματα	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΥ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	61
3.1. Γενικά	61
3.2. Μοντέλο Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας	62
3.2.1. Θερμικοί σταθμοί παραγωγής	63
3.2.2. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής.....	63
3.3. Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος	65

3.3.1.	Μαθηματική διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης	65
3.3.1.1.	Κόστος καυσίμου θερμικών μονάδων.....	65
3.3.1.2.	Κόστος εκκίνησης και κράτησης θερμικών μονάδων.....	66
3.3.1.3.	Συνολικό λειτουργικό κόστος θερμικών μονάδων	67
3.3.2.	Περιορισμοί συστήματος	67
3.3.2.1.	Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος	67
3.3.2.2.	Περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας συστήματος	68
3.3.2.3.	Περιορισμοί αξιοπιστίας συστήματος	68
3.3.2.4.	Περιορισμός ελάχιστης παραγωγής.....	69
3.3.2.5.	Περιορισμός εκπομπών ρύπων συστήματος.....	69
3.3.3.	Περιορισμοί θερμικών μονάδων παραγωγής	70
3.3.3.1.	Περιορισμός ορίων ενεργού παραγωγής θερμικών μονάδων.....	70
3.3.3.2.	Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης θερμικών μονάδων	70
3.3.3.3.	Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου θερμικών μονάδων	70
3.3.4.	Περιορισμοί υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής.....	71
3.3.4.1.	Περιορισμός ορίων ενεργού παραγωγής υδροηλεκτρικών σταθμών.....	71
3.3.4.2.	Περιορισμός ρυθμού εκροής ύδατος υδροηλεκτρικών σταθμών ...	71
3.3.4.3.	Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου υδροηλεκτρικών σταθμών.....	71
3.3.4.4.	Περιορισμός ορίων αποθήκευσης ύδατος ταμιευτήρων	71
3.3.4.5.	Περιορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης ταμιευτήρων.....	72
3.3.4.6.	Περιορισμός διαθέσιμης ενέργειας υδροηλεκτρικών σταθμών.....	72
3.3.4.7.	Περιορισμός συνέχειας ροής υδροηλεκτρικών σταθμών.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ		75
4.1.	Φυσικό Ανάλογο.....	75
4.2.	Μοντέλο Διαδικασίας Ανόπτησης.....	75
4.3.	Χρήση της Μεθόδου σε Προβλήματα Βελτιστοποίησης	76
4.4.	Μαθηματική Απόδειξη Σύγκλισης της Μεθόδου	78
4.5.	Παράμετροι Ελέγχου της Μεθόδου	81
4.5.1.	Αρχική θερμοκρασία	81
4.5.2.	Ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας.....	82
4.5.3.	Μήκος Μαρκοβιανής αλυσίδας.....	83
4.5.4.	Κριτήρια τερματισμού.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ		85
5.1.	Γενικά	85
5.2.	Περιγραφή της Μεθόδου Επίλυσης του Προβλήματος.....	86
5.3.	Μέθοδοι Παραγωγής Υπονήφγιων Λύσεων.....	89

5.3.1.	Μεταβολή της κατάστασης μιας τυχαίας θερμικής μονάδας για ένα τυχαίο αριθμό διαδοχικών ωρών	90
5.3.2.	Μεταβολή της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία ώρα	91
5.3.3.	Ενσωμάτωση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων στη διαδικασία παραγωγής λύσεων	92
5.3.4.	Συνδυαστική χρήση των τριών μεθόδων	95
5.4.	Εντοπισμός Αρχικής Λύσης	96
5.5.	Οικονομική Κατανομή Φορτίου	96
5.6.	Ενσωμάτωση Περιορισμών Ανάληψης/Απόρριψης Φορτίου Θερμικών Μονάδων	98
5.6.1.	Γενική περιγραφή της μεθόδου	98
5.6.2.	Πρόσω δυναμική κατανομή (Forward Dynamic Dispatch)	99
5.6.3.	Ανάδρομη δυναμική κατανομή (Backward Dynamic Dispatch)	100
5.6.4.	Επιλογή δυναμικής διαδικασίας	101
5.6.5.	Εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων	101
5.6.6.	Αξιολόγηση της μεθόδου	102
5.7.	Ρύθμιση Παραμέτρων Ελέγχου της Μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης	103
5.7.1.	Καθορισμός αρχικής θερμοκρασίας	103
5.7.2.	Διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας	104
5.7.3.	Καθορισμός του μήκους της Μαρκοβιανής αλυσίδας	104
5.8.	Τοπική Βελτιστοποίηση	104
5.9.	Έλεγχος Σύγκλισης της Μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ..... 107

6.1.	Γενικά	107
6.2.	Υπολογισμός Δεικτών Αξιοπιστίας Συστήματος Παραγωγής	108
6.3.	Μοντέλο Αβεβαιότητας Πρόβλεψης Φορτίου	111
6.4.	Μέθοδος Ενσωμάτωσης Περιορισμών Αξιοπιστίας	112
6.4.1.	Ενσωμάτωση περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου	113
6.4.2.	Ενσωμάτωση περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	115
6.4.3.	Προσδιορισμός (a posteriori) περιθωρίου στρεφόμενης εφεδρείας	118
6.5.	Αξιολόγηση της Μεθόδου	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ..... 121

7.1.	Γενικά	121
7.2.	Το Πρωτόκολλο του Κιότο	122
7.2.1.	Ευέλικτοι μηχανισμοί μείωσης εκπομπών αέριων ρύπων	123
7.2.1.1.	Κοινή Εφαρμογή	123
7.2.1.2.	Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης	124
7.2.1.3.	Διεθνές Εμπόριο Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων	125

7.3.	Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων	126
7.4.	Μέθοδος Ενσωμάτωσης Περιορισμού Εκπομπών CO ₂	127
7.4.1.	Υπολογισμός των εκπομπών CO ₂	128
7.4.2.	Ανάλυση της μεθόδου	129
7.5.	Μέθοδος Ενσωμάτωσης Λοιπών Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων.....	131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ....133

8.1.	Γενικά	133
8.2.	Επίλυση Υδροηλεκτρικού Προβλήματος.....	134
8.2.1.	Υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό	135
8.2.2.	Εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών ανεξάρτητα για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό.....	136
8.2.3.	Εφαρμογή μεθόδου διορθωτικού ελέγχου για την ενσωμάτωση των υδραυλικών περιορισμών	140
8.2.4.	Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου.....	141
8.2.5.	Υπολογισμός του ισοδύναμου θερμικού φορτίου.....	142
8.2.6.	Ανακεφαλαίωση της μεθόδου	142
8.3.	Επίλυση Θερμικού Προβλήματος	144
8.4.	Σύνθεση Επιμέρους Προβλημάτων Υδροθερμικής Συνεργασίας	144
8.5.	Αξιολόγηση της Μεθόδου Βραχυπρόθεσμης Υδροθερμικής Συνεργασίας.....	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ.....147

9.1.	Γενικά	147
9.2.	Δομή του Προγράμματος.....	147
9.3.	Εξωτερικός Προγραμματισμός.....	151
9.3.1.	Κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης.....	151
9.3.2.	Διατύπωση των περιορισμών	152
9.3.3.	Επιλογή κριτηρίου υδροπρογραμματισμού.....	152
9.4.	Προγραμματιστικές Τεχνικές	153
9.4.1.	Αποθήκευση των παραμέτρων	153
9.4.2.	Έλεγχος σφαλμάτων.....	154
9.5.	Δεδομένα Εισόδου	155
9.6.	Αποτελέσματα Εξόδου	157

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ159

10.1.	Γενικά	159
10.2.	Περιγραφή Εξεταζόμενων Συστημάτων.....	159
10.2.1.	Σύστημα 1.....	159
10.2.2.	Σύστημα 2.....	161
10.2.3.	Σύστημα 3.....	164

10.3.	Βασική Εφαρμογή Μεθόδου Βέλτιστου Προγραμματισμού Θερμικών Μονάδων Παραγωγής.....	167
10.3.1.	Σενάριο χωρίς περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου.....	167
10.3.2.	Σενάριο με περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου.....	170
10.3.3.	Συμπεράσματα.....	172
10.4.	Εφαρμογή Μεθόδου Ενσωμάτωσης Περιορισμών Αξιοπιστίας	172
10.4.1.	Επίδραση του απαιτούμενου επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος.....	172
10.4.2.	Επίδραση της διακύμανσης του χρονικού διαστήματος υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των θερμικών μονάδων	175
10.4.3.	Επίδραση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων ...	177
10.4.4.	Συμπεράσματα.....	179
10.5.	Εφαρμογή Μεθόδου Ενσωμάτωσης Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων.....	179
10.5.1.	Χρήση των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων.....	180
10.5.2.	Χρήση της συνάρτησης ποινής	184
10.5.3.	Συμπεράσματα.....	185
10.6.	Εφαρμογή Μεθόδου Υδροθερμικής Συνεργασίας.....	186
10.6.1.	Εξεταζόμενα σενάρια	186
10.6.2.	Συμπεράσματα.....	192

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	193
11.1. Σύνοψη της Διατριβής και Συμπεράσματα.....	193
11.2. Συμβολή της Διατριβής	195
11.3. Τομείς για Μελλοντική Έρευνα	197

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	199
--------------------	-----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3.1: Μοντέλο συστήματος παραγωγής	63
Σχήμα 3.2: Τυπικές καμπύλες κόστους καυσίμου θερμικών μονάδων	66
Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση αλυσσωτών φραγμάτων	73
Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση συνάρτησης με τοπικά ελάχιστα	78
Σχήμα 5.1: Γενικό διάγραμμα μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης	87
Σχήμα 5.2: Γενικό διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της κατάστασης μιας τυχαίας θερμικής μονάδας για ένα τυχαίο αριθμό διαδοχικών ωρών.....	90
Σχήμα 5.3: Γενικό διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία ώρα.....	91
Σχήμα 5.4: Κωδικοποίηση λύσεων στον πίνακα κατάστασης.....	93
Σχήμα 6.1: Μοντέλο δύο καταστάσεων για τις θερμικές μονάδες παραγωγής	109
Σχήμα 6.2: Γενικό διάγραμμα μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας	117
Σχήμα 8.1: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας αποκοπής αιχμών	139
Σχήμα 8.2: Γενικό διάγραμμα βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών.....	143
Σχήμα 8.3: Συνολική μέθοδος επίλυσης βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας.....	144
Σχήμα 9.1: Βασική δομή προγράμματος	148
Σχήμα 9.2: Γενική παράσταση διαδικασιών επίλυσης υδροηλεκτρικού προβλήματος.....	149
Σχήμα 9.3: Γενική παράσταση διαδικασιών επίλυσης θερμικού προβλήματος.....	150
Σχήμα 10.1: Υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για διάφορα συστήματα θερμικών μονάδων.....	169
Σχήμα 10.2: Κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του συστήματος 10 μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου.....	169
Σχήμα 10.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων της βασικής εφαρμογής	171
Σχήμα 10.4: Κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του συστήματος 10 μονάδων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου.....	171
Σχήμα 10.5: Πιθανότητα απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου για διάφορες τιμές του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου EUE_{max}	173
Σχήμα 10.6: Πιθανότητα απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος	174
Σχήμα 10.7: Στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος.....	175

Σχήμα 10.8: Πλήθος εντασσόμενων μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο τιμές του χρονικού διαστήματος LT.....	176
Σχήμα 10.9: Αναμενόμενη ζήτηση ισχύος και συνολική διαθέσιμη ισχύς σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο τιμές του χρονικού διαστήματος LT	177
Σχήμα 10.10: Στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε ώρα της περιόδου για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων.....	178
Σχήμα 10.11: Συνολικές εκπομπές CO ₂ για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 22.644,542 \text{ tCO}_2$	182
Σχήμα 10.12: Συνολικές εκπομπές CO ₂ για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 21.452,724 \text{ tCO}_2$	183
Σχήμα 10.13: Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 22.644,542 \text{ tCO}_2$	183
Σχήμα 10.14: Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 21.452,724 \text{ tCO}_2$	184
Σχήμα 10.15: Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορα ποσοστά μείωσης των εκπομπών CO ₂	185
Σχήμα 10.16: Αποκοπή αιχμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)	190
Σχήμα 10.17: Αποκοπή αιχμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού (Σενάριο 2)	191
Σχήμα 10.18: Κατανομή φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)	191
Σχήμα 10.19: Κατανομή φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού (Σενάριο 2).....	192

Πίνακας 10.19: Αποτελέσματα για 10% μείωση των εκπομπών CO ₂	181
Πίνακας 10.20: Αποτελέσματα για διάφορα ποσοστά μείωσης των εκπομπών CO ₂	185
Πίνακας 10.21: Σύγκριση αποτελεσμάτων υδροηλεκτρικού προβλήματος	187
Πίνακας 10.22: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)	188
Πίνακας 10.23: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας (Σενάριο 2)	188
Πίνακας 10.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμικού προβλήματος.....	189
Πίνακας 10.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων υδροθερμικής συνεργασίας	189

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ο Βέλτιστος Προγραμματισμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, αποτέλεσμα της οικονομικής ανάπτυξης και της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου, έχει οδηγήσει σε μια αντίστοιχη ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή και χρήση σύγχρονων μονάδων παραγωγής έχει συντελέσει στη βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων, καθώς και της αξιοπιστίας τους. Παράλληλα, η αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η τάση αντικατάστασης των παλιών ρυπογόνων τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από νέες, περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον, αποτελεί μια ζωντανή πραγματικότητα. Άλλωστε, η συνεχής αύξηση των τιμών των συμβατικών καυσίμων οδήγησε σε μια αντίστοιχη αύξηση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας αδήρητη την ανάγκη για αξιοποίηση φθηνότερων πηγών ενέργειας. Μια επίσης σημαντική εξέλιξη για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αύξηση των διασυνδέσεων μεταξύ γειτονικών ηλεκτρικών συστημάτων, με στόχο τις συνεχείς ανταλλαγές ενέργειας, ώστε να διευκολύνεται η αξιόπιστη, αλλά και οικονομική, λειτουργία των επιμέρους συστημάτων.

Επιπλέον, η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας δημιούργησε νέες προκλήσεις και οδήγησε στην αύξηση του προβληματισμού των διαχειριστών των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας τους. Η ανάγκη για ρύθμιση όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με τη διαμόρφωση των οικονομικών σχέσεων μεταξύ των παραγόντων που δραστηριοποιούνται στα πλαίσια των απελευθερωμένων αγορών είναι πλέον επιτακτική. Οι υπάρχουσες μονοπωλιακές καθετοποιημένες εταιρίες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν εισέλθει σε ένα στάδιο αναδιοργάνωσης και διάσπασης της συνολικής τους λειτουργίας σε επιμέρους ανεξάρτητες επιχειρήσεις. Η νέα διαμορφωμένη κατάσταση αλλάζει ριζικά τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και δημιουργεί νέες απαιτήσεις αναφορικά με την οικονομική διαχείρισή τους.

Με βάση τις νέες αυτές συνθήκες, ο βέλτιστος προγραμματισμός της λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί να διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Άλλωστε, στα πλαίσια του ανταγωνισμού μεταξύ των παραγόντων της αγοράς, ο προγραμματισμός της λειτουργίας των συστημάτων θα πρέπει να γίνεται με τρόπο διαφανή και αυστηρά καθορισμένο, ώστε να ευνοηθεί ο υγιής ανταγωνισμός και να αποφευχθούν οι στρεβλώσεις της αγοράς. Επιπλέον, η οικονομική λειτουργία των συστημάτων συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση πόρων για την ενεργειακή βιομηχανία, οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν για τον εκσυγχρονισμό των υπαρχουσών εγκαταστάσεων, αλλά και για την επένδυση σε νέες τεχνολογίες.

Ο βέλτιστος προγραμματισμός παραγωγής αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με την οικονομική λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνει την ταυτόχρονη επίλυση δύο επιμέρους

υποπροβλημάτων: του προγραμματισμού ένταξης των μονάδων (θερμικών και υδροηλεκτρικών) και της οικονομικής κατανομής φορτίου. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης, στόχος του οποίου είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μια δεδομένη περίοδο προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης του συγκεκριμένου προβλήματος παίζει βασικό ρόλο στη μείωση του κόστους λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής μπορεί να επιλυθεί για διάφορες χρονικές περιόδους προγραμματισμού, μεταβάλλοντας κάθε φορά το μοντέλο του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται οι περιπτώσεις του βραχυπρόθεσμου, μεσοπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου προγραμματισμού. Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται σε περιόδους μελέτης που δεν υπερβαίνουν τη μία εβδομάδα και απαιτεί ένα ιδιαίτερα αναλυτικό μοντέλο του συστήματος παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο αριθμό περιορισμών. Η δεύτερη περίπτωση αναφέρεται σε χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από ένα μήνα έως και ένα έτος, καθιστώντας δυνατή την απλούστευση του προβλήματος. Στην περίπτωση του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού, η περίοδος μελέτης υπερβαίνει το ένα έτος, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη στοχαστικότητα των διαφόρων μεταβλητών, καθώς και στην αξιοπιστία του συστήματος παραγωγής.

Η επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, οι οποίες πηγάζουν από:

- την ταυτόχρονη θεώρηση των υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων παραγωγής,
- τη μη γραμμική φύση της αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και ορισμένων περιορισμών του προβλήματος, και
- τη συνύπαρξη διακριτών και συνεχών μεταβλητών.

Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί ένας έντονος προβληματισμός αναφορικά με την ενσωμάτωση ορισμένων ειδικών περιορισμών στο κλασικό μοντέλο του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι περιορισμοί αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων του συστήματος. Η χρήση των περιορισμών αξιοπιστίας συμβαδίζει με την απαίτηση για ελαχιστοποίηση του κινδύνου εμφάνισης σοβαρών προβλημάτων στην τροφοδότηση του φορτίου, λαμβάνοντας υπόψη τη στοχαστική φύση των βασικών στοιχείων του συστήματος παραγωγής. Παράλληλα, ο έλεγχος των εκπομπών αέριων ρύπων αποτελεί αντικείμενο έρευνας σε παγκόσμια κλίμακα, λόγω της ολοένα αυξανόμενης ρύπανσης του περιβάλλοντος. Προφανώς, η ενσωμάτωση των εν λόγω περιορισμών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τον προγραμματισμό λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι παραπάνω παράγοντες έχουν συντελέσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Το κοινό χαρακτηριστικό των περισσότερων εξ αυτών είναι η υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών, προκειμένου να καταστεί δυνατή η επίλυση του προβλήματος σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο. Οι παραδοχές αυτές αναφέρονται, ως επί το πλείστον, στο μοντέλο του υδροηλεκτρικού και θερμικού συστήματος παραγωγής, καθώς και στη διατύπωση των περιορισμών του προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, το ζητούμενο είναι η επίλυση

ρεαλιστικών προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, χωρίς να θυσιάζεται η ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει νέες απαιτήσεις και προοπτικές αναφορικά με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η βασική διαφορά ως προς την κλασική διατύπωση του προβλήματος έγκειται στην κατάστροψη της αντικειμενικής συνάρτησης. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της απελευθερωμένης αγοράς, η αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνει τις τιμές προσφοράς των ανεξάρτητων παραγωγών για διάφορα επίπεδα ισχύος και όχι το λειτουργικό κόστος των μονάδων. Στο πλαίσιο αυτό, ο βέλτιστος προγραμματισμός παραγωγής μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που απαιτείται η εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής υποβολής προσφορών από ανεξάρτητους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να διασφαλίσουν την ένταξη των ιδιόκτητων μονάδων τους (υδροηλεκτρικών και θερμικών) στο σύστημα. Παράλληλα, η υποχρέωση των διαχειριστών των συστημάτων να διεκπεραιώνουν τον προγραμματισμό λειτουργίας των επιμέρους μονάδων με διαφανή και αντικειμενικά κριτήρια προϋποθέτει την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής σε ημερήσια βάση. Οι παραπάνω ενδεικτικές εφαρμογές υποδεικνύουν τη χρησιμότητα του εξεταζόμενου προβλήματος και σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς.

1.2. Αντικείμενο και Δομή της Διατριβής

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η εξέταση του προβλήματος του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η επίλυσή του με τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης. Ο ορίζοντας προγραμματισμού μπορεί να κυμαίνεται από μία ημέρα έως μία εβδομάδα με ωριαίο χρονικό βήμα.

Εν συντομία, η διατριβή περιστρέφεται γύρω από τους ακόλουθους βασικούς άξονες:

1. Το συνολικό πρόβλημα βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής διασπάται σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα, ένα υδροηλεκτρικό και ένα θερμικό, τα οποία επιλύονται διαδοχικά.
2. Η επίλυση του θερμικού προβλήματος στηρίζεται στη χρήση μιας νέας μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Το βασικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι η δυνατότητα που παρέχει για ενσωμάτωση πολύπλοκων, μη γραμμικών περιορισμών. Ειδικότερα, ενσωματώνονται οι ακόλουθοι περιορισμοί:
 - i. Περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων.
 - ii. Περιορισμοί αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής.
 - iii. Περιορισμοί εκπομπών ρύπων του συστήματος παραγωγής.
3. Η επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος στηρίζεται στη χρήση μιας βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών. Η προτεινόμενη μέθοδος συντελεί σε ορθολογική χρήση των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τους πολύπλοκους υδραυλικούς περιορισμούς.

4. Οι μέθοδοι προσομοιωμένης ανόπτησης και αποκοπής αιχμών συνδυάζονται μέσω ενός ενιαίου λογισμικού πακέτου για την επίλυση του συνολικού προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Το πρόγραμμα είναι ιδιαίτερα ευέλικτο και επιτρέπει την επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων σε σύντομο υπολογιστικό χρόνο, όπως φαίνεται στις διάφορες εφαρμογές που παρατίθενται.

Η διατριβή διαρθρώνεται σε 11 κεφάλαια.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τα θέματα που πραγματεύεται η διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται μια εκτενής ανασκόπηση των κυριότερων εργασιών που εξετάζουν το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, κάνοντας σαφή διάκριση ανάμεσα στις εργασίες που επικεντρώνονται στον προγραμματισμό των θερμικών μονάδων παραγωγής και σε αυτές που εξετάζουν το πρόβλημα της υδροθερμικής συνεργασίας. Σε κάθε περίπτωση, γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους βελτιστοποίησης που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση των εξεταζόμενων προβλημάτων, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις αναλυτικές και τις ευρετικές μεθόδους. Επίσης, παρουσιάζεται και ένα πλήθος υβριδικών μεθόδων που χαρακτηρίζονται από την υψηλή ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων. Παράλληλα, γίνεται ειδική μνεία στις αναφορές που πραγματεύονται τα θέματα της ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων του συστήματος. Η επισκόπηση της βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στην επισήμανση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των διαφόρων μεθόδων επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στις εργασίες που αναφέρονται στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης. Η ανάλυση αυτή συνεισφέρει στην παρουσίαση της συμβολής της παρούσας διατριβής στο εξεταζόμενο πρόβλημα.

Στο τρίτο κεφάλαιο ορίζεται αναλυτικά το πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής. Το μοντέλο του συστήματος επικεντρώνεται στις θερμικές και υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το δίκτυο μεταφοράς. Ακόμη, δίνεται η αναλυτική μαθηματική διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης και των θεωρούμενων περιορισμών. Η αντικειμενική συνάρτηση συμπεριλαμβάνει το κόστος καυσίμου, το κόστος εκκίνησης και το κόστος κράτησης των θερμικών μονάδων. Η κατάστρωση των περιορισμών έχει ως κύριο άξονα την όσο το δυνατό ακριβέστερη απεικόνιση των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, διατυπώνονται οι περιορισμοί ισοζυγίου ισχύος, απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας, αξιοπιστίας, ελάχιστης παραγωγής και εκπομπών ρύπων. Οι περιορισμοί αυτοί αναφέρονται στο συνολικό σύστημα παραγωγής. Ειδικά για τις θερμικές μονάδες, διατυπώνονται οι περιορισμοί ορίων ενεργού παραγωγής, ανάληψης και απόρριψης φορτίου και ελάχιστου χρόνου λειτουργίας και κράτησης. Επιπρόσθετα, διατυπώνονται οι περιορισμοί ορίων ενεργού παραγωγής, ρυθμού εκροής ύδατος, ανάληψης και απόρριψης φορτίου, ορίων αποθήκευσης ύδατος, αρχικής και τελικής κατάστασης, διαθέσιμης ενέργειας και συνέχειας ροής, οι οποίοι αναφέρονται στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης (Simulated Annealing), η οποία είναι μια στοχαστική μέθοδος βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια και έχει ευρεία εφαρμογή σε ένα μεγάλο πλήθος προβλημάτων από διάφορα ερευνητικά πεδία. Η συγκεκριμένη

μέθοδος αποτελεί τον πυρήνα του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, αναλύεται η φυσική διαδικασία στην οποία στηρίζεται η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης και γίνεται σύντομη αναφορά στο γενικό μοντέλο της μεθόδου. Στη συνέχεια, εξετάζεται ο τρόπος εφαρμογής της προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και αναλύονται οι διαδικασίες ρύθμισης των παραμέτρων ελέγχου της μεθόδου. Παράλληλα, αναλύεται εν συντομία η μαθηματική απόδειξη της ασυμπτωτικής σύγκλισης της μεθόδου στη βέλτιστη λύση κάθε προβλήματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Δεδομένου ότι το συνολικό πρόβλημα μπορεί να αποσυμπλεχθεί σε δύο βασικά υποπροβλήματα (προγραμματισμός ένταξης των θερμικών μονάδων και οικονομική κατανομή φορτίου), περιγράφεται μια πρωτότυπη μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του πρώτου υποπροβλήματος, ενώ το δεύτερο λύνεται με χρήση τετραγωνικού ή γραμμικού προγραμματισμού, ανάλογα με τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης επιταχύνεται από τη χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης, η οποία εφαρμόζεται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας για τον εντοπισμό της καλύτερης λύσης στη γειτονιά της τελευταίας αποδεκτής λύσης.

Ο πυρήνας της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης είναι η διαδικασία παραγωγής εφικτών υποψήφιων λύσεων (προγράμματα ένταξης των θερμικών μονάδων). Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται αναλυτική περιγραφή τριών διαφορετικών πρωτότυπων μεθόδων, η συνδυαστική χρήση των οποίων παρέχει μια δισδιάστατη διερεύνηση του χώρου των εφικτών λύσεων, επιταχύνοντας τη σύγκλιση της μεθόδου. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούνται και για τον εντοπισμό της αρχικής εφικτής λύσης του προβλήματος. Επίσης, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Οι εν λόγω παράμετροι περιλαμβάνουν την αρχική τιμή και το ρυθμό μείωσης της θερμοκρασίας, το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας, δηλαδή τον αριθμό των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας, και τα κριτήρια τερματισμού της μεθόδου. Οι προτεινόμενες διαδικασίες επιταχύνουν τη σύγκλιση της μεθόδου και παρέχουν τη δυνατότητα επίλυσης ρεαλιστικών προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται η δυναμική μέθοδος που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Όπως είναι γνωστό, οι περιορισμοί αυτοί δεσμεύουν τις διαδοχικές ώρες κατανομής, με αποτέλεσμα να απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής για όλες τις ώρες της εξεταζόμενης περιόδου. Ωστόσο, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση του χρόνου εκτέλεσης της οικονομικής κατανομής φορτίου, γεγονός που επιβαρύνει ακόμα περισσότερο τις δεδομένες μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίζεται από την προτεινόμενη δυναμική μέθοδο οικονομικής κατανομής, η οποία στηρίζεται στη διαδοχική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, τροποποιώντας κατάλληλα τα όρια παραγωγής των θερμικών μονάδων. Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στην ενσωμάτωση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού

παραγωγής και, παράλληλα, συντελεί στην επιτάχυνση της επίλυσης του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας του συστήματος στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Οι περισσότερες μέθοδοι επίλυσης του εξεταζόμενου προβλήματος κάνουν χρήση εμπειρικών κανόνων για τον καθορισμό της εφεδρείας που απαιτείται σε κάθε ώρα της περιόδου κατανομής. Συνεπώς, δεν λαμβάνεται υπόψη η στοχαστική φύση των στοιχείων του συστήματος. Σε αντίθεση, λοιπόν, με τη συνήθη πρακτική, η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στη χρήση των δεικτών αξιοπιστίας της πιθανότητας απώλειας φορτίου και της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Η ενσωμάτωση των συγκεκριμένων δεικτών στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης επιτυγχάνεται με τη διατύπωση των αντίστοιχων περιορισμών αξιοπιστίας.

Ο υπολογισμός των προαναφερόμενων δεικτών αξιοπιστίας στηρίζεται στη χρήση του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτή η παράσταση όλων των δυνατών λειτουργικών καταστάσεων που προκύπτουν από το συνδυασμό των επιμέρους θερμικών μονάδων παραγωγής. Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη η αβεβαιότητα που παρουσιάζει η πρόβλεψη των ωριαίων φορτίων του συστήματος, συντελώντας στην αύξηση της ακρίβειας των τελικών αποτελεσμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος αναφέρεται αποκλειστικά στις θερμικές μονάδες παραγωγής, θεωρώντας ότι οι υδροηλεκτρικές μονάδες εμφανίζουν αμελητέα πιθανότητα βλάβης.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο πρωτότυπες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης. Σε κάθε περίπτωση, οι συγκεκριμένοι περιορισμοί δεσμεύουν μόνο το θερμικό σύστημα παραγωγής, δεδομένου ότι η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας δεν προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση.

Η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων και επικεντρώνεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή, λαμβάνεται υπόψη η διαδικασία αγοράς και πώλησης δικαιωμάτων εκπομπών, συνυπολογίζοντας την επάκολουθη αύξηση ή μείωση, αντίστοιχα, του συνολικού κόστους του συστήματος. Για την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης διαδικασίας, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του βασικού θεσμικού πλαισίου που έχει υιοθετηθεί, σε παγκόσμια και ευρωπαϊκή κλίμακα, για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων. Η ανάλυση επικεντρώνεται στους τρεις ευέλικτους μηχανισμούς που προβλέπει το πρωτόκολλο του Κιότο για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων.

Η δεύτερη μέθοδος ενσωμάτωσης των περιορισμών εκπομπών αναφέρεται στους υπόλοιπους αέριους ρύπους, οι οποίοι δεν λαμβάνονται υπόψη στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Εν προκειμένω, γίνεται χρήση μιας συνάρτησης ποινής, η οποία προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται ότι η τελική λύση του προβλήματος ικανοποιεί όλους τους θεωρούμενους περιορισμούς.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Το εν λόγω κεφάλαιο επικεντρώνεται στην επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος, δεδομένου ότι ο

προγραμματισμός των θερμικών μονάδων παραγωγής στηρίζεται στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης, σύμφωνα με την ανάλυση του πέμπτου κεφαλαίου.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής στηρίζεται στη μέθοδο αποκοπής αιχμών, ο στόχος της οποίας είναι η κατανομή της συνολικής διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας στις υψηλότερες περιοχές της χρονολογικής καμπύλης φορτίου, ώστε να επιτευχθεί επιπεδοποίηση των αιχμών φορτίου. Σε αντίθεση, όμως, με την κλασική μέθοδο, η προτεινόμενη βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση όλων των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τη μέθοδο αποκοπής αιχμών με μια μέθοδο διορθωτικού ελέγχου, η οποία αποσκοπεί στην εύρεση μιας νέας, γειτονικής λύσης του υδροηλεκτρικού προβλήματος, η οποία ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς των υδροηλεκτρικών σταθμών.

Στα πλαίσια της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών, ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών στηρίζεται στη χρήση είτε του περιορισμού αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων, είτε του περιορισμού συνολικής διαθέσιμης ενέργειας κάθε σταθμού, οδηγώντας στον υπολογισμό ενός ισοδύναμου θερμικού φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου. Η τροποποιημένη χρονολογική καμπύλη φορτίου του συστήματος αποτελεί δεδομένο εισόδου της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία χρησιμοποιείται για το βέλτιστο προγραμματισμό των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η βασική δομή του προγράμματος περιλαμβάνει τον πυρήνα, ο οποίος διαχειρίζεται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου και συντονίζει την εκτέλεση των επιμέρους διαδικασιών, και δύο κύριες υπολογιστικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία αναφέρεται στην επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος μέσω της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών και η δεύτερη στην επίλυση του θερμικού προβλήματος μέσω της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.

Το υπολογιστικό περιβάλλον παρέχει τη δυνατότητα εξωτερικού προγραμματισμού, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει εξωτερικά στην κατάστροψη της αντικειμενικής συνάρτησης, να ενεργοποιήσει συγκεκριμένους περιορισμούς και να επιλέξει το επιθυμητό κριτήριο υδροπρογραμματισμού. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η επίλυση ποικίλων προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εφαρμογή του λογισμικού πακέτου σε διάφορα συστήματα παραγωγής. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των επιμέρους μεθόδων που αναπτύχθηκαν, εξετάζονται διάφορες εφαρμογές, κάνοντας χρήση τριών συστημάτων παραγωγής. Τα στοιχεία των δύο εξ αυτών προέρχονται από τη σχετική βιβλιογραφία, ενώ το τρίτο αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη των θεμάτων που πραγματεύεται η διατριβή. Επίσης, διατυπώνονται τα βασικότερα συμπεράσματα και οι προοπτικές για περαιτέρω ανάπτυξη και αξιοποίηση του λογισμικού πακέτου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1. Γενικά

Ο βέλτιστος προγραμματισμός των συστημάτων παραγωγής έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για αρκετές δεκαετίες. Η σημασία της οικονομικής λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής, αλλά και οι δυσκολίες που εμφανίζει η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, είναι παράγοντες που έχουν συντελέσει στην ανάπτυξη και εφαρμογή διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίες σταδιακά εξελίσσονται και βελτιώνονται. Βέβαια, ο εντοπισμός όλων των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος είναι πρακτικά ανέφικτος.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σημαντικότερες βιβλιογραφικές αναφορές σχετικά με τα θέματα που πραγματεύεται η διατριβή. Η κατηγοριοποίηση των αναφορών έχει γίνει με βάση το μοντέλο του συστήματος που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται χωριστά οι εργασίες που ασχολούνται αποκλειστικά με τον προγραμματισμό των θερμικών μονάδων παραγωγής και οι εργασίες που επιλύουν το πρόβλημα της υδροθερμικής συνεργασίας. Παράλληλα, γίνεται ειδική μνεία στις αναφορές που πραγματεύονται το θέμα της ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων του συστήματος.

2.2. Τεχνικές και Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής των συστημάτων που αποτελούνται είτε αποκλειστικά από θερμικές μονάδες, είτε από συνδυασμό θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων, έχει αντιμετωπιστεί από ένα πλήθος μεθόδων βελτιστοποίησης, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τις αναλυτικές και τις ευρετικές μεθόδους. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν κυρίως κατά τις πρώτες περιόδους μελέτης του εξεταζόμενου προβλήματος και στηρίζονται στη χρήση τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού. Αντίθετα, οι μέθοδοι της δεύτερης κατηγορίας παρουσιάστηκαν τα τελευταία χρόνια, με τη βοήθεια και της ραγδαίας ανάπτυξης των υπολογιστικών συστημάτων, και στηρίζονται στην εφαρμογή ειδικών ευρετικών αλγορίθμων που αποσκοπούν στη διαδοχική βελτίωση μιας αρχικής εφικτής λύσης, πραγματοποιώντας ενδελεχή έρευνα του πεδίου των λύσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ευρετικές μέθοδοι στηρίζονται στην προσομοίωση διαδικασιών που παρατηρούνται στη φύση.

Τα τελευταία χρόνια, είναι πολύ συνηθισμένη και η ανάπτυξη υβριδικών μεθόδων για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Οι υβριδικοί αλγόριθμοι συνδυάζουν τα θετικά χαρακτηριστικά διαφόρων επιμέρους μεθόδων (αναλυτικών ή ευρετικών) και, συνήθως, οδηγούν σε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος:

- **Μέθοδος Lagrangian Relaxation:** Η Lagrangian Relaxation αποτελεί μια από τις πλέον κλασικές και πολυχρησιμοποιημένες μεθόδους επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η μέθοδος στηρίζεται στη διάσπαση του αρχικού σύνθετου προβλήματος σε πολλά, ανεξάρτητα μεταξύ τους, υποπροβλήματα, τα οποία συνδέονται με το αρχικό πρόβλημα μέσω των πολλαπλασιαστών Lagrange. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου Lagrangian Relaxation είναι η δυσκολία εύρεσης εφικτών λύσεων, πρόβλημα που σχετίζεται με τη δυαδική φύση της μεθόδου.
- **Μέθοδος διάσπασης Benders (Benders Decomposition):** Η συγκεκριμένη αναλυτική μέθοδος στηρίζεται στη διάσπαση του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης σε ένα κύριο πρόβλημα, το οποίο αντιμετωπίζει τις διακριτές μεταβλητές, και ένα δευτερεύον υποπρόβλημα, το οποίο επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση των συνεχών μεταβλητών του αρχικού προβλήματος. Η συνεργασία των δύο υποπροβλημάτων επιτυγχάνεται με μια ομάδα δυαδικών τιμών, η οποία επιστρέφει στο κύριο πρόβλημα μετά από κάθε επίλυση του δεύτερου υποπροβλήματος. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητά της να επιλύει προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού.
- **Λίστα προτεραιότητας και μέθοδος αποδέσμευσης (decommitment) των μονάδων:** Η δημιουργία και αξιοποίηση της λίστας προτεραιότητας των μονάδων αποτελεί μια από τις πρώτες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν και χαρακτηρίζεται από την ευκολία εφαρμογής της. Η λίστα καθορίζει τη σειρά ένταξης των μονάδων στο σύστημα, κατατάσσοντάς τις σε αύξουσα σειρά ανάλογα με το λειτουργικό τους κόστος. Με τον τρόπο αυτό, οι περισσότεροι οικονομικές θερμικές μονάδες εντάσσονται πρώτες στο σύστημα, ενώ οι πιο ακριβές τελευταίες. Παρόμοια λογική παρουσιάζει και η μέθοδος αποδέσμευσης των θερμικών μονάδων, η οποία όμως στηρίζεται στην αντιστροφή της διαδικασίας που ακολουθείται κατά τη χρήση της λίστας προτεραιότητας. Θεωρώντας, δηλαδή, ένα αρχικό πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων, εφαρμόζεται μια διαδικασία διαδοχικής αποδέσμευσής τους. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι παρέχουν γρήγορα αποτελέσματα, όμως η ποιότητα των λύσεων είναι, συνήθως, χαμηλή.
- **Δυναμικός προγραμματισμός:** Η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού στηρίζεται στη δημιουργία και αξιολόγηση του πλήρους δέντρου αποφάσεων του συνδυαστικού προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιείται μια ενδελεχής εξέταση του πεδίου λύσεων για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Μεγάλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης αναλυτικής μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι καλύπτει, σε μεγάλο βαθμό, την περιοχή των εφικτών λύσεων του προβλήματος. Ωστόσο, ο δυναμικός προγραμματισμός πάσχει από την “κατάρα της διαστατικότητας” (το μέγεθος του προβλήματος αυξάνεται ραγδαία αν ο αριθμός των εξεταζόμενων μονάδων είναι μεγάλος), με συνέπεια ο χρόνος υπολογισμού να αυξάνεται υπερβολικά για μεγάλα συστήματα.
- **Μικτός ακέραιος προγραμματισμός:** Η συγκεκριμένη αναλυτική μέθοδος εφαρμόζεται ευρέως σε συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης (γραμμικά και μη-γραμμικά), τα οποία συμπεριλαμβάνουν διακριτές και συνεχείς μεταβλητές. Συνήθως, γίνεται χρήση εμπορικών πακέτων βελτιστοποίησης (π.χ. GAMS).

- **Μέθοδος εσωτερικού σημείου (Interior Point):** Πρόκειται για μια ειδική μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού. Το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η εύρεση της βέλτιστης λύσης στηρίζεται στη διερεύνηση των εσωτερικών σημείων της εφικτής περιοχής λύσεων του προβλήματος, σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού (όπως είναι η Simplex) που κινούνται στις κορυφές της περιοχής αυτής.
- **Προγραμματισμός ροής δικτύου (Network Flow Programming):** Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση υδροηλεκτρικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη δυνατότητά της να αντιμετωπίζει δύσκολους υδροηλεκτρικούς περιορισμούς, όπως ο χρόνος καθυστέρησης μεταφοράς των υδάτων και οι διακλαδώσεις των ποταμών. Οι αλγόριθμοι ροής δικτύου επιτυγχάνουν την εύρεση του πιο σύντομου μονοπατιού επιλύοντας το γενικό πρόβλημα με χρήση μιας υπάρχουσας τεχνικής βελτιστοποίησης δικτύου. Το αρνητικό στοιχείο της μεθόδου είναι η σημαντική αύξηση των υπολογισμών σε περίπτωση που η μορφή του δικτύου γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκη.
- **Μέθοδος αποκοπής αιχμών (Peak Shaving):** Η μέθοδος αποκοπής αιχμών βασίζεται στην ιδέα ότι, κατά την επίλυση του προβλήματος της υδροθερμικής συνεργασίας, η χρήση των υδροηλεκτρικών μονάδων για την κάλυψη των υψηλότερων τμημάτων της καμπύλης φορτίου του συστήματος συντελεί στην καλύτερη διαχείριση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, θεωρείται ότι οι υδροηλεκτρικές μονάδες καλύπτουν τις ώρες αιχμής φορτίου, οδηγώντας σε μια επιπεδοποιημένη καμπύλη φορτίου, η οποία πρέπει να εξυπηρετηθεί από το θερμικό σύστημα παραγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει πολύ μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις, αλλά αδυνατεί να αντιμετωπίσει τους σύνθετους περιορισμούς του υδροηλεκτρικού συστήματος.
- **Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης (Simulated Annealing):** Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1983 από τους Kirkpatrick, Gelatt Jr. και Vecchi [1], οι οποίοι έκαναν χρήση της επαναληπτικής διαδικασίας που πρότειναν οι Metropolis, Rosenbluth και Teller [2] για την προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της εξέλιξης της κρυσταλλικής δομής ενός μετάλλου σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, για μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας. Η μέθοδος στηρίζεται στη προσομοίωση του φυσικού φαινομένου της αργής ψύξης του μετάλλου, κατά τη διάρκεια της οποίας η ενέργεια του συστήματος τείνει να αποκτήσει μια ελάχιστη τιμή. Εξομοιώνοντας τη διαδικασία αυτή με το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης συναρτήσεων, είναι δυνατό να επιλυθεί ένας μεγάλος αριθμός συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, αφού αποδεικνύεται ότι η συγκεκριμένη ευρετική μέθοδος τείνει ασυμπτωτικά στο ολικό ελάχιστο. Γενικά, η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης εμφανίζει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορεί να αντιμετωπίσει με ευχέρεια δύσκολους μη γραμμικούς περιορισμούς, ωστόσο οι μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου αποτελούν σημαντικό εμπόδιο για τη χρήση της σε μεγάλα συστήματα.
- **Γενετικοί αλγόριθμοι και εξελικτικός προγραμματισμός (Evolutionary Programming):** Οι γενετικοί αλγόριθμοι αντιπροσωπεύουν μια στοχαστική μέθοδο αναζήτησης βασισμένη σε αρχές εμπνευσμένες από την εξελικτική θεωρία του Δαρβίνου. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι η αποτελεσματικότητα που παρουσιάζουν στην αντιμετώπιση μη γραμμικών προβλημάτων και η ικανότητα ενσωμάτωσης διακριτών μεταβλητών στη διαδικασία της επίλυσης.

Βασικό μειονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί η αργή σύγκλιση που παρουσιάζουν, καθώς και το γεγονός ότι η χρήση τους δεν εγγυάται την εύρεση βέλτιστων λύσεων. Επιπλέον, η μέθοδος του εξελικτικού προγραμματισμού αποτελεί επέκταση των κλασικών γενετικών αλγορίθμων, προσομοιώνοντας την εξέλιξη συνεργαζόμενων ειδών.

- **Έμπειρα συστήματα (Expert Systems) και νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks):** Τα έμπειρα συστήματα ενσωματώνουν στη διαδικασία της επίλυσης διάφορους κανόνες, οι οποίοι προκύπτουν από την εμπειρία του χειριστή του συστήματος στην αντιμετώπιση παρόμοιων προβλημάτων. Η αξιολόγηση και αξιοποίηση της υπάρχουσας εμπειρίας αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου, καθώς παρέχει μια αξιόπιστη λογική εξήγηση για τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Αντίστοιχα, τα νευρωνικά δίκτυα στηρίζονται στην κατασκευή αντιπροσωπευτικών καμπυλών φορτίου και αντίστοιχων προγραμμάτων ένταξης των μονάδων στο σύστημα, τα οποία ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες καμπύλες. Η διαδικασία βασίζεται στην “εκπαίδευση” των νευρωνικών δικτύων πάνω στις συγκεκριμένες συνθήκες του προβλήματος, το οποίο εξετάζεται σε κάθε περίπτωση. Οι δύο αυτές μέθοδοι εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματα που παρέχει η γνώση της λειτουργίας των εξεταζόμενων συστημάτων, με αποτέλεσμα την εύρεση πολύ ικανοποιητικών λύσεων του προβλήματος σε σύντομο υπολογιστικό χρόνο.
- **Μέθοδος απαγορευμένης αναζήτησης (Tabu Search):** Πρόκειται για μια ευρετική τεχνική βελτιστοποίησης, η οποία αξιοποιεί τη διαδικασία της τοπικής έρευνας και ένα ελαστικό βραχυχρόνιο σύστημα μνήμης. Η μέθοδος εμφανίζει εξαιρετική ικανότητα διαφυγής από σημεία τοπικών ελαχίστων, χρησιμοποιώντας τη λογική των “απαγορευμένων” κινήσεων. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τις πιο πρόσφατες κινήσεις τοπικής έρευνας που έχουν πραγματοποιηθεί σε μία λίστα (Tabu List), η οποία χρησιμοποιείται για να εμποδίσει την πραγματοποίηση κινήσεων που οδηγούν στην εξερεύνηση πρόσφατα αξιολογημένων λύσεων. Με τον τρόπο αυτό εμποδίζεται ο εγκλωβισμός της διαδικασίας σε σημεία τοπικών ελαχίστων και γίνεται εφικτή η εξερεύνηση μεγαλύτερου τμήματος του πεδίου λύσεων. Το βασικό πρόβλημα της μεθόδου είναι ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για τη σύγκλιση της στη βέλτιστη λύση.
- **Στοχαστικές μέθοδοι και ασαφή συστήματα (Fuzzy Systems):** Οι περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους δεν λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα που παρουσιάζει η λειτουργία των συστημάτων παραγωγής (π.χ. αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου). Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, όπως είναι η χρήση των ασαφών συστημάτων. Η ιδέα των ασαφών ομάδων αποτελεί ένα μαθηματικό μέσο περιγραφής της ασάφειας στη γλωσσολογία. Το κυριότερο στοιχείο της εν λόγω μεθόδου είναι η δυνατότητα διαχείρισης καταστάσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ένα βαθμό από ασάφεια. Από διάφορες μελέτες έχει αποδειχθεί ότι τα στοχαστικά μοντέλα παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά από τα αντίστοιχα ντετερμινιστικά, εμφανίζοντας, ωστόσο, ορισμένους περιορισμούς και αδυναμίες κατά την εφαρμογή τους.

2.3. Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός Θερμικών Μονάδων Παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής των συστημάτων που αποτελούνται αποκλειστικά από θερμικές μονάδες έχει αντιμετωπιστεί από ένα πλήθος αναλυτικών, ευρετικών και υβριδικών μεθόδων. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανάλυση των κυριότερων εργασιών που αναφέρονται στο συγκεκριμένο θέμα, οι οποίες είναι ομαδοποιημένες με βάση την προτεινόμενη μέθοδο βελτιστοποίησης.

2.3.1. Μέθοδος Lagrangian Relaxation

Μια ιδιαίτερα αναλυτική προσέγγιση στο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου Lagrangian Relaxation, καθώς και στον τρόπο εφαρμογής της στο εξεταζόμενο πρόβλημα, δίνεται στην εργασία [3], όπου αναδεικνύεται η σημασία της βέλτιστης επιλογής των πολλαπλασιαστών Lagrange. Η δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς εξετάζεται στην αναφορά [4]. Στη συγκεκριμένη εργασία συνυπολογίζεται η επίδραση των μονάδων παραγωγής που υποβάλλουν προσφορές ισχύος στην αγορά με τιμή που εξαρτάται από τη διαμόρφωση της οριακής τιμής του συστήματος. Η θεώρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με το κλασικό μοντέλο του προβλήματος που προϋποθέτει ότι όλες οι μονάδες έχουν προκαθορισμένο λειτουργικό κόστος. Επίσης, το 1995 ο Baldick [5] ανέπτυξε μια Lagrangian Relaxation μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών. Η μέθοδος αντιμετωπίζει, εκτός των άλλων, τους ειδικούς περιορισμούς που εμφανίζουν ορισμένες θερμικές μονάδες σχετικά με τα όρια παραγωγής ενέργειας και κατανάλωσης καυσίμου.

Το ίδιο έτος, οι Peterson και Brammer [6] παρουσίασαν μια νέα τεχνική, βασισμένη στη Lagrangian Relaxation, για την εισαγωγή των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Η τεχνική επικεντρώνεται στην εύρεση μιας αρχικής εφικτής λύσης, η οποία διαδοχικά βελτιώνεται, οδηγώντας τελικά στη βέλτιστη λύση. Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε και από τους Lai και Baldick [7], οι οποίοι πρότειναν τη χρήση ενός επιπρόσθετου διανύσματος πολλαπλασιαστών που αντιπροσωπεύει τη συνολική απαίτηση του συστήματος για μεταβολή του φορτίου. Το πρόβλημα της ενσωμάτωσης των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων στη μέθοδο Lagrangian Relaxation εξετάστηκε και από τους Ongsakul και Petcharak [8,9]. Η προσέγγισή τους στηρίζεται στην κατάλληλη τροποποίηση των ορίων παραγωγής των θερμικών μονάδων, ώστε να συνυπολογιστούν οι χρονικά εξαρτώμενοι περιορισμοί του προβλήματος, χωρίς να απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυσή του για όλη την περίοδο προγραμματισμού. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιείται και για την αντιμετώπιση των περιορισμών του συστήματος μεταφοράς [9].

Η αντιμετώπιση των περιορισμών του συστήματος μεταφοράς εξετάζεται και σε άλλα άρθρα της βιβλιογραφίας. Στην εργασία [10], οι συγκεκριμένοι περιορισμοί λαμβάνονται υπόψη στο στάδιο της οικονομικής κατανομής φορτίου, μέσω της επίλυσης μιας DC ροής φορτίου για κάθε ώρα της χρονικής περιόδου. Μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος είναι ο συνυπολογισμός των περιορισμών του συστήματος μεταφοράς στο αρχικό στάδιο της μεθόδου Lagrangian Relaxation, το οποίο αφορά την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων [11]. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών ευαισθησίας, οι οποίοι

εφαρμόζονται απευθείας στα όρια παραγωγής των μονάδων και υπολογίζονται μέσω της επίλυσης της DC ροής φορτίου.

Τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος Lagrangian Relaxation έχει χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση προβλημάτων που περιλαμβάνουν θερμικές μονάδες με πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, όπως για παράδειγμα οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Στην εργασία [12], ο βέλτιστος προγραμματισμός των διαφόρων λειτουργικών καταστάσεων των θερμικών μονάδων πραγματοποιείται κατά την επίλυση του προβλήματος του δυναμικού προγραμματισμού, ο οποίος εφαρμόζεται χωριστά για κάθε μονάδα του συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε υποπροβλήματα (ένα για κάθε μονάδα) μέσω της χρήσης της μεθόδου Lagrangian Relaxation. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην εργασία [13], η οποία επικεντρώνεται στην περίπτωση των μονάδων συνδυασμένου κύκλου, ενώ η αναφορά [14] επεκτείνει την υφιστάμενη μεθοδολογία, ώστε να συμπεριλάβει και άλλους τύπους μονάδων με πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, όπως είναι οι μονάδες που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν μείγματα καυσίμων, ανάλογα με το επίπεδο λειτουργίας τους.

2.3.2. Μέθοδος διάσπασης Benders

Το 1978 ο Turgeon [15] έκανε χρήση της μεθόδου Benders Decomposition, προκειμένου να αντιμετωπίσει το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων. Η συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνει μια ιδιαίτερα αναλυτική μοντελοποίηση του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη αρκετούς πολύπλοκους περιορισμούς. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης των μονάδων, το οποίο εξαρτάται από τη διάρκεια παραμονής κάθε μονάδας εκτός λειτουργίας. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη και η ειδική περίπτωση λειτουργίας των θερμικών μονάδων εν κενώ φορτίο. Η συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση συνεπάγεται ότι η μονάδα δεν παράγει ενεργό ισχύ, αλλά είναι συγχρονισμένη στο σύστημα και για το λόγο αυτό παρουσιάζει ένα επιπρόσθετο κόστος. Ο συνυπολογισμός αυτού του κόστους στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελεί μια ακόμη πρωτοτυπία της προαναφερόμενης εργασίας.

Το 1999 οι Ma και Shahidehpour [16] παρουσίασαν μια νέα εφαρμογή της μεθόδου Benders Decomposition για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής των θερμικών μονάδων. Η μεθοδός τους επιτρέπει το συνυπολογισμό των περιορισμών του δικτύου μεταφοράς, αφού προηγηθεί η γραμμικοποίησή τους. Αντίστοιχη γραμμικοποίηση εφαρμόζεται και στη συνάρτηση του κόστους καυσίμου των μονάδων. Το ίδιο πρόβλημα εξετάζεται και στην εργασία [17], η οποία αντιμετωπίζει ενιαία τη διαδικασία της ημερήσιας αγοράς και των τεχνικών περιορισμών. Η λύση καθορίζει τις μονάδες που είναι σε λειτουργία σε κάθε ώρα κατανομής, καθώς και την ωριαία ενεργό και άεργο ισχύ που παράγεται από κάθε μονάδα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος παραγωγής, υπό ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών. Στους περιορισμούς λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις για εφεδρεία, οι ρυθμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων, καθώς και οι περιορισμοί ασφάλειας δικτύου (τόσο στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, όσο και κατά τη διάρκεια διαταραχών).

2.3.3. Λίστα προτεραιότητας και μέθοδος αποδέσμευσης των μονάδων

Το 1988 ο Lee [18] παρουσίασε μια δυναμική λίστα προτεραιότητας, η οποία λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια της περιόδου

κατανομής. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχείς αυξομειώσεις του ωριαίου φορτίου, οι οποίες συντελούν σε αντίστοιχες μεταβολές της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας, η συγκεκριμένη εργασία εφαρμόζει ένα τροποποιημένο κανόνα για τον καθορισμό της σειράς ένταξης των μονάδων. Ο κανόνας αυτός συσχετίζει το λειτουργικό κόστος κάθε μονάδας με την πραγματική ικανότητα παραγωγής της. Ο ίδιος συγγραφέας παρουσίασε, λίγα χρόνια αργότερα, μια βελτιωμένη εκδοχή της παραπάνω μεθοδολογίας [19].

Η μέθοδος της λίστας προτεραιότητας μπορεί να εφαρμοστεί και σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς, οδηγώντας σε γρήγορο υπολογισμό της οριακής τιμής του συστήματος [20]. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται σε θέματα που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη δομή των απελευθερωμένων αγορών ενέργειας, όπως η αξιολόγηση των προσφορών, η ανάκτηση του κόστους εκκίνησης των μονάδων, οι περιορισμοί λειτουργίας των μονάδων και ο καθορισμός της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς. Επίσης, οι Senju, Shimabukuro και Uezato [21] παρουσίασαν μια ενισχυμένη λίστα προτεραιότητας με πολύ καλά αποτελέσματα ως προς την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η εύρεση πολύ καλών λύσεων σε εξαιρετικά μικρό χρονικό διάστημα. Τα κριτήρια που εφαρμόζονται στη λίστα προτεραιότητας είναι αρχικά το μέγεθος της μονάδας και στη συνέχεια το κόστος ανά MW κάθε μονάδας, όταν αυτή λειτουργεί σε συνθήκες πλήρους φόρτισης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ενσωματωμένες διαδικασίες για την τροποποίηση των παραγόμενων λύσεων, ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος αποδέσμευσης των μονάδων στηρίζεται στην αντιστροφή της διαδικασίας που ακολουθείται κατά τη χρήση της λίστας προτεραιότητας. Η εργασία [22] παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή της μεθόδου αποδέσμευσης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου μεταφοράς, μέσω της επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Η ανεξάρτητη επίλυση του προβλήματος για κάθε ώρα της περιόδου συντελεί, όπως είναι φυσικό, σε σημαντική μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι εμπειρική και οδηγεί σε ασταθή αποτελέσματα.

2.3.4. Δυναμικός προγραμματισμός

Το 1988 οι Hobbs, Hermon, Warner και Sheble [23] παρουσίασαν μια αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου του δυναμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στην παράλληλη χρήση της τεχνικής της λίστας προτεραιότητας, ώστε να καταστεί δυνατή η αντιμετώπιση ρεαλιστικών προβλημάτων σε σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος αποθηκεύει ορισμένες δευτερεύουσες μη-οικονομικές διαδρομές, τις οποίες χρησιμοποιεί σε περίπτωση που παρατηρηθεί παραβίαση των χρονικά εξαρτώμενων περιορισμών.

Οι Li, Johnson και Svoboda [24] παρουσίασαν μια παρόμοια μεθοδολογία, βασισμένη στο δυναμικό προγραμματισμό, για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Ο αλγόριθμός τους ξεκινάει από ένα αρχικό πρόγραμμα ένταξης, κατά το οποίο εντάσσονται όλες οι μονάδες που είναι διαθέσιμες κατά την περίοδο της μελέτης. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση δυναμικού

προγραμματισμού ώστε να πραγματοποιηθεί η αποδέσμευση ορισμένων μονάδων, σύμφωνα με προκαθορισμένα οικονομικά κριτήρια. Το βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι επιτυγχάνεται μονοτονική μείωση του συνολικού κόστους με τις επαναλήψεις, ενώ η λύση είναι πάντοτε εφικτή όσον αφορά τη στρεφόμενη εφεδρεία.

Μια εναλλακτική μέθοδος δυναμικού προγραμματισμού παρουσιάζεται στην εργασία [25], όπου λαμβάνεται υπόψη και η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί στοιχεία από το πλαίσιο της ασαφούς λογικής, ώστε να συνυπολογιστούν τα σφάλματα της πρόβλεψης του φορτίου. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή οδηγεί σε σημαντική αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Επιπλέον, οι Huse, Wangenstein και Faanes [26] παρουσίασαν μια νέα μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί το δυναμικό προγραμματισμό για να προσομοιώσει τη λειτουργία της ανταγωνιστικής αγοράς. Στη μέθοδο λαμβάνεται υπόψη το κόστος εκκίνησης των μονάδων και οι απαιτήσεις για στρεφόμενη εφεδρεία, ενώ η διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς αντιμετωπίζει ταυτόχρονα τις απαιτήσεις για εφεδρεία και το ισοζύγιο ισχύος. Επιπλέον, η εργασία περιγράφει τις διαδικασίες για την υποβολή των προσφορών και την εκκαθάριση της αγοράς, σύμφωνα με τις οποίες οι παραγωγοί πληρώνονται τόσο για την ενέργεια που παράγουν όσο και για την εφεδρεία.

2.3.5. Μικτός ακέραιος προγραμματισμός και μέθοδος εσωτερικού σημείου

Η εργασία [27] παρουσιάζει μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της μεθόδου μικτού ακέραιου προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής στα πλαίσια της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, στόχος του προβλήματος δεν είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των θερμικών μονάδων, αλλά η μεγιστοποίηση του κοινωνικού ωφέλους. Δεδομένου, βέβαια, ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα λύνεται μέσω της χρήσης της εμπορικής μεθόδου βελτιστοποίησης CPLEX της GAMS, η εργασία επικεντρώνεται κυρίως στη γραμμικοποίηση των περιορισμών του δικτύου μεταφοράς. Επιπλέον, το 2003 οι Guan, Zhai και Papalexopoulos [28] πραγματοποίησαν μια πολύ αναλυτική σύγκριση μεταξύ των μεθόδων μικτού ακέραιου προγραμματισμού και Lagrangian Relaxation, αναφορικά με την αποτελεσματικότητά τους στην επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι οι συνηθισμένες μέθοδοι μικτού ακέραιου προγραμματισμού έχουν πολύ μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις, αφού ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος αυξάνει εκθετικά με το μέγεθος του προβλήματος.

Αναφορικά με τη μέθοδο εσωτερικού σημείου, η εργασία [29] παρουσιάζει μια γενική μεθοδολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων μικτού ακέραιου προγραμματισμού που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η αντιμετώπιση του κυριότερου προβλήματος που εμφανίζουν οι περισσότερες μέθοδοι εσωτερικού σημείου, το οποίο σχετίζεται με τον εγκλωβισμό τους σε περιοχές τοπικών ελαχίστων. Για το λόγο αυτό, προτείνεται μια επαναληπτική μέθοδος, η οποία στηρίζεται στην προσθήκη ενός νέου περιορισμού κάθε φορά που εντοπίζεται ένα τοπικό ελάχιστο του εξεταζόμενου προβλήματος. Ο περιορισμός αυτός δεν επιτρέπει τη σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης στα τοπικά ελάχιστα που έχουν ήδη εντοπιστεί στις προηγούμενες επαναλήψεις της μεθόδου.

2.3.6. Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης

Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης έχει εφαρμοστεί σε μεγάλο πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία προέρχονται από διάφορα ερευνητικά πεδία [30-33]. Επίσης, έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο προγραμματισμός συντήρησης των θερμικών μονάδων παραγωγής [34], η οικονομική κατανομή φορτίου συνυπολογίζοντας και το κόστος εκπομπών ρύπων [35] και ο σχεδιασμός επέκτασης των δικτύων μεταφοράς [36]. Ωστόσο, η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής άρχισε τα τελευταία έτη, με αποτέλεσμα την ύπαρξη περιορισμένων, σε αριθμό, δημοσιεύσεων αναφορικά με το συγκεκριμένο θέμα.

Το 1990 οι Zhuang και Galiana [37] πρότειναν για πρώτη φορά τη χρήση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η μέθοδος στηρίζεται στο διαχωρισμό των περιορισμών του προβλήματος σε δύο κατηγορίες: τους “εύκολους” και τους “δύσκολους”. Όλες οι δοκιμαστικές λύσεις που εξετάζονται ικανοποιούν την πρώτη κατηγορία περιορισμών, ενώ η δεύτερη αντιμετωπίζεται με την εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τυχαίων γειτονικών λύσεων στηρίζεται στην πρόκληση πολύ μικρών διαταραχών στις υπάρχουσες λύσεις, ενώ η θερμοκρασία ελαττώνεται με σχετικά αργό ρυθμό, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή σύγκλιση. Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η έλλειψη αναλυτικών διαδικασιών για τον καθορισμό των διαφόρων παραμέτρων της προσομοιωμένης ανόπτησης, η ρύθμιση των οποίων γίνεται με δοκιμαστικές εκτελέσεις του προγράμματος. Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθόδου σε διάφορα συστήματα φάνερωσε τις μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις της. Πάντως, η εργασία αυτή αποτέλεσε βάση για όλες τις επόμενες που ασχολήθηκαν με το θέμα αυτό.

Μια βελτιωμένη έκδοση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης παρουσιάστηκε το 1998 από τους Mantawy, Abdel-Magid και Selim [38]. Η βασική συμβολή της είναι οι αναλυτικές μεθοδολογίες που προτείνονται για τον καθορισμό της αρχικής τιμής της θερμοκρασίας, για τη διαδικασία μείωσης της συγκεκριμένης παραμέτρου, καθώς και για τον καθορισμό του κριτηρίου τερματισμού. Είναι ενδιαφέρον ότι ο πολυωνυμικός τύπος που χρησιμοποιείται για τη μείωση της θερμοκρασίας στηρίζεται στη χρήση στατιστικών στοιχείων που παράγονται κατά τη διάρκεια της έρευνας για τη βέλτιστη λύση, συμβάλλοντας στην ταχύτερη σύγκλιση της μεθόδου. Επιπλέον, οι νέοι κανόνες που εισάγονται για την παραγωγή εφικτών λύσεων οδηγούν σε μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου, αν και τελικά ο χρόνος εκτέλεσης εξακολουθεί να αποτελεί βασικό εμπόδιο για την εφαρμογή της μεθόδου σε μεγάλα συστήματα.

Το ίδιο έτος, ο Wong [39] πρότεινε μια εναλλακτική μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, υιοθετώντας μηχανισμούς που εξασφαλίζουν ότι οι υποψήφιες λύσεις ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς του προβλήματος. Η δημιουργία αναλυτικών διαδικασιών ελέγχου και επαναφοράς των υποψήφιων λύσεων, ανάλογα με τον περιορισμό που παραβιάζεται σε κάθε περίπτωση, αποτελεί τη σημαντικότερη συνεισφορά της μεθόδου, αφού οδηγεί στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου της διαδικασίας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι και το υποπρόβλημα της οικονομικής κατανομής του φορτίου επιλύεται κάνοντας χρήση της μεθόδου

προσομοιωμένης ανόπτησης. Οι εφαρμογές της μεθόδου σε διάφορα συστήματα απέδειξαν την αξιοπιστία της, αλλά το πρόβλημα του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου δεν ξεπεράστηκε.

Μια ακόμη μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρουσιάστηκε από τους Viana, Sousa και Matos [40]. Το άρθρο προτείνει μια τροποποιημένη μορφή κωδικοποίησης των εξεταζόμενων λύσεων, μέσω της οποίας γίνεται παράλληλος έλεγχος για την ικανοποίηση των περιορισμών που αναφέρονται στον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας και κράτησης κάθε θερμικής μονάδας. Όσον αφορά τη διαδικασία εύρεσης γειτονικών λύσεων, εξετάζονται δύο διαφορετικές δομές. Η πρώτη στηρίζεται στην τυχαία επιλογή μιας μονάδας και μιας χρονικής στιγμής και στην αλλαγή της κατάστασης της μονάδας αυτής, είτε μόνο για την επιλεγμένη χρονική στιγμή, είτε για μια περίοδο γύρω από αυτή. Η δεύτερη δομή αποσκοπεί στην εξάλειψη των περιπτώσεων, κατά τις οποίες παρατηρείται η διατήρηση μιας ορισμένης κατάστασης μερικών μονάδων για πολύ μικρή χρονική διάρκεια. Επιπλέον, γίνεται αναφορά και σε διάφορες στρατηγικές αναζήτησης, οι οποίες στοχεύουν στη μείωση του κόστους που οφείλεται στην αλλαγή της κατάστασης των μονάδων.

2.3.7. Γενετικοί αλγόριθμοι και εξελικτικός προγραμματισμός

Τα τελευταία χρόνια, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μία από τις πλέον εφαρμοσμένες ευρετικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Το 1996 οι Kazarlis, Bakirtzis και Petridis [41] παρουσίασαν έναν πολύ σταθερό γενετικό αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος. Η τεχνική τους υιοθετεί ειδικούς τελεστές (operators) που σχετίζονται με το εκάστοτε πρόβλημα, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται πολύ ικανοποιητικές λύσεις. Επίσης, οι Yang και Huang [42] πρότειναν ένα γενετικό αλγόριθμο σε συνδυασμό με μια τεχνική αντιμετώπισης των περιορισμών. Οι δύσκολοι περιορισμοί είναι ενσωματωμένοι μέσα στον τρόπο κωδικοποίησης των λύσεων, με αποτέλεσμα τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Οι υπόλοιποι περιορισμοί αντιμετωπίζονται κάνοντας χρήση συντελεστών ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση.

Το 2002 οι Swarup και Yamashiro [43] πρότειναν ένα γενετικό αλγόριθμο με αρκετές καινοτομίες, όπως ο τρόπος με τον οποίο κωδικοποιούνται οι διάφορες λύσεις, η αξιολόγηση μόνο εφικτών λύσεων ως προς τον περιορισμό εφεδρείας και η χρήση ειδικών τελεστών για την ικανοποίηση των χρονικά εξαρτώμενων περιορισμών στα αρχικά στάδια του αλγορίθμου. Επίσης, ο περιορισμός εφεδρείας είναι ενσωματωμένος στην αντικειμενική συνάρτηση, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να αντιμετωπίζει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Το ίδιο έτος, οι Xing και Wu [44] πρότειναν τη χρήση των γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετοχή προκαθορισμένων συμβολαίων ενέργειας. Τα συμβόλαια αυτά παριστάνονται ως περιορισμοί που θέτουν συγκεκριμένα όρια στην ενέργεια που μπορεί να παράγει κάθε θερμική μονάδα στη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού.

Μια διαφορετική προσέγγιση στον τρόπο εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζεται στην εργασία [45]. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφοροποιείται από τους κλασικούς γενετικούς αλγορίθμους ως προς τον τρόπο κωδικοποίησης των υποψηφίων λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση ακέραιων αριθμών για

το σχηματισμό των χρωμοσωμάτων που απεικονίζουν τις διάφορες λύσεις, σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική που στηρίζεται στη χρήση δυαδικών αριθμών (0/1 αν η μονάδα είναι εντός/εκτός). Οι ακέραιοι αριθμοί (με θετικό ή αρνητικό πρόσημο) αντιπροσωπεύουν τις ώρες παραμονής κάθε μονάδας σε μια κατάσταση λειτουργίας και συντελούν σε σημαντική μείωση του μεγέθους των χρωμοσωμάτων. Επίσης, το συγκεκριμένο μοντέλο επιτρέπει τον άμεσο συνυπολογισμό των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας και κράτησης των θερμικών μονάδων.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι και η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε από τους Juste, Kita, Tanaka και Hasegawa [46], όπου γίνεται χρήση ενός εξελικτικού αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, πληθυσμοί υφιστάμενων λύσεων εξελίσσονται μέσω τυχαίων αλλαγών, ακολουθώντας τις διαδικασίες του ανταγωνισμού και της επιλογής. Ο τρόπος με τον οποίο κωδικοποιούνται οι διάφορες λύσεις είναι ιδιαίτερα αποδοτικός και οδηγεί σε εφικτές λύσεις αναφορικά με τους δύσκολους περιορισμούς του προβλήματος. Ο αλγόριθμος είναι αρκετά γρήγορος, αφού αξιολογούνται κάθε φορά μόνο οι εφικτές λύσεις, και παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

2.3.8. Έμπειρα συστήματα και νευρωνικά δίκτυα

Μια πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής των θερμικών μονάδων αποτελεί η χρήση των έμπειρων συστημάτων. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση λογικών κανόνων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω επεξεργασία και βελτίωση των λύσεων που παρέχονται από συμβατικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής [47]. Οι κανόνες αυτοί προέρχονται από τη συσσωρευμένη εμπειρία των χειριστών του συστήματος. Η ίδια λογική εφαρμόζεται και στην εργασία [48], όπου παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιεί συγκεκριμένους κανόνες, βασισμένους στη λίστα προτεραιότητας, ώστε να εντοπίσει μια υποβέλτιστη λύση του προβλήματος για ένα συγκεκριμένο μοντέλο φορτίου. Η νέα λύση αποτελεί μια τροποποιημένη και τοπικά βελτιστοποιημένη έκδοση μιας υπάρχουσας λύσης, η οποία εξάγεται από μια βάση δεδομένων. Η μέθοδος αυτή παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σύντομο χρόνο εκτέλεσης.

Μια άλλη μέθοδος που στηρίζεται στην εκμετάλλευση της υπάρχουσας γνώσης για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος είναι τα νευρωνικά δίκτυα. Το 1992 οι Ouyang και Shahidehpour [49] πρότειναν τη χρήση μιας πρωτότυπης μεθόδου τεχνητής νοημοσύνης για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η μέθοδός τους αποτελείται από τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα γίνεται χρήση ενός νευρωνικού δικτύου, το οποίο συγκρίνει τη δοσμένη καμπύλη φορτίου με τις υπάρχουσες που είναι αποθηκευμένες σε μια βάση δεδομένων, ώστε να εντοπιστεί ένα υπόδειγμα που προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα την εξεταζόμενη καμπύλη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα έμπειρο σύστημα για τη διόρθωση της αρχικής λύσης, ώστε να εξαλειφθούν τυχόν παραβιάσεις του περιορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας. Το τελευταίο βήμα της μεθόδου συνίσταται στη χρήση ενός νέου νευρωνικού δικτύου για την περαιτέρω βελτίωση της τελικής λύσης του προβλήματος.

Μια ακόμη εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων προτείνεται στην εργασία [50]. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος υιοθετεί σημαντικές παραδοχές, όπως η θεώρηση γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης κόστους και η χρήση μιας απλής λίστας προτεραιότητας για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής

φορτίου. Επιπλέον, το 1993 οι Wang και Shahidehpour [51] παρουσίασαν έναν αλγόριθμο, στηριζόμενο στην τεχνητή νοημοσύνη, για τη θεώρηση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των μονάδων τόσο κατά τη διαδικασία ένταξης των μονάδων, όσο και κατά την οικονομική κατανομή φορτίου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός ως προς την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών, αλλά οδηγεί σε υποβέλτιστες λύσεις.

Μια ειδική κατηγορία νευρωνικών δικτύων είναι τα δίκτυα Hopfield. Η χρήση των συγκεκριμένων νευρωνικών δικτύων για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρουσιάζεται σε δύο εργασίες των Walsh και O'Malley [52,53]. Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι λαμβάνουν ταυτόχρονα υπόψη τις διακριτές και συνεχείς μεταβλητές του προβλήματος. Ωστόσο, η ρύθμιση των απαιτούμενων παραμέτρων των μεθόδων αποτελεί ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία και στηρίζεται στην πραγματοποίηση πολλών πειραματικών δοκιμών.

2.3.9. Στοχαστικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες δεν λαμβάνουν υπόψη τη στοχαστική φύση των διαφόρων στοιχείων του συστήματος, αλλά στηρίζονται στη ντετερμινιστική διατύπωση του προβλήματος. Αντίθετα, η εργασία [54] παρουσιάζει μια εναλλακτική προσέγγιση στο πρόβλημα, η οποία βασίζεται στη λογική της στοχαστικής διάσπασης του προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα. Η επίλυση του προβλήματος στηρίζεται στη μέθοδο Lagrangian Relaxation, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου και τη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων. Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η παράσταση των παραμέτρων που παρουσιάζουν αβεβαιότητα, θεωρώντας διάφορα πιθανά σενάρια που συνδέονται μεταξύ τους με τη μορφή δένδρου (scenario trees). Στη συνέχεια, γίνεται διάσπαση του αρχικού προβλήματος βελτιστοποίησης σε επιμέρους υποπροβλήματα, με τη βοήθεια της μεθόδου Lagrangian Relaxation. Η διαφοροποίηση της μεθόδου έγκειται στο ότι σε κάθε επανάληψή της επιλύεται ένα πρόβλημα στοχαστικού δυναμικού προγραμματισμού για κάθε μονάδα παραγωγής. Το βασικό πρόβλημα που παρουσιάζει η μέθοδος είναι ο μεγάλος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται, ο οποίος είναι ανάλογος με το μέγεθος του δένδρου (αριθμός σεναρίων) που χρησιμοποιείται. Η ίδια περίπου λογική εφαρμόζεται και στην εργασία [55], όπου επίσης γίνεται χρήση διαφόρων σεναρίων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σε μορφή δένδρου, για την αντιμετώπιση του στοχαστικού προβλήματος.

Ο συνυπολογισμός της στοχαστικής φύσης του συστήματος μπορεί να γίνει και με τη βοήθεια της επαναληπτικής μεθόδου Monte Carlo [56]. Η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί στον υπολογισμό ενός πιθανοτικού κόστους παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη συχνότητα, όσο και τη διάρκεια των βλαβών των θερμικών μονάδων παραγωγής. Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου Monte Carlo καθορίζονται, πιθανοτικά, οι θερμικές μονάδες που είναι διαθέσιμες σε κάθε ώρα της περιόδου. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση της μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, θεωρώντας μόνο τις διαθέσιμες θερμικές μονάδες. Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος κάνει χρήση και μιας ειδικής τεχνικής για τη μείωση της διακύμανσης των αποτελεσμάτων που παρέχει η μέθοδος Monte Carlo, ώστε να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις του μοντέλου.

Το 2002 οι Skoulidas, Vournas και Papavasilopoulos [57] παρουσίασαν μια πρωτότυπη εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων για την εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής υποβολής προσφορών από ανεξάρτητους παραγωγούς ηλεκτρικής

ενέργειας σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, οι παραγωγοί δεν γνωρίζουν το λειτουργικό κόστος και τις προσφορές των ανταγωνιστών τους και, συνεπώς, γίνεται χρήση ενός προσαρμοστικού εργαλείου εκμάθησης (adaptive learning tool) προκειμένου να αντισταθμιστεί η έλλειψη πληροφοριών. Η μέθοδος αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών, οι προσφορές των οποίων καθορίζονται στοχαστικά επιλέγοντας τυχαίες τιμές από μια πιθανοτική κατανομή που περιγράφει τη συμπεριφορά των παραγωγών. Η εργασία καταλήγει σε σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση της συμπεριφοράς των παραγωγών στη διακύμανση της οριακής τιμής του συστήματος και στη σταθερότητα της αγοράς.

Μια ακόμη στοχαστική μέθοδος για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος είναι ο προγραμματισμός υπό πιθανοτικούς περιορισμούς (Chance Constrained Programming) [58,59]. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ενσωμάτωση πιθανοτικών περιορισμών στο κλασικό μοντέλο του προβλήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο περιορισμός του ισοζυγίου ισχύος δεν αντιμετωπίζεται ντετερμινιστικά, αλλά θεωρείται ότι το φορτίο του συστήματος σε κάθε ώρα της περιόδου προγραμματισμού πρέπει να καλυφθεί με μια καθορισμένη υψηλή πιθανότητα. Συνεπώς, προστίθεται ένας πιθανοτικός περιορισμός για κάθε ώρα της περιόδου. Η μέθοδος που παρουσιάζεται συνίσταται στη διαδοχική επίλυση μιας σειράς ντετερμινιστικών προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, κάνοντας χρήση της μεθόδου Lagrangian Relaxation, τα οποία τελικά συγκλίνουν στη λύση του πιθανοτικού προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη στοχαστική μέθοδος λαμβάνει υπόψη και το συσχετισμό που υπάρχει μεταξύ του φορτίου διαδοχικών ωρών.

2.3.10. Λοιπές μέθοδοι

Οι Saneifard, Prasad και Smolleck [60] παρουσίασαν μια μέθοδο ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic) για την αντιμετώπιση του εξεταζόμενου προβλήματος. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ποιοτική περιγραφή των χαρακτηριστικών ενός συστήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση λογικών κανόνων, οι οποίοι επιτρέπουν τη γρήγορη λήψη αποφάσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία, η ενεργός ισχύς, το διαφορικό κόστος, το κόστος εκκίνησης και το κόστος παραγωγής των θερμικών μονάδων αντιμετωπίζονται ως ασαφείς μεταβλητές, οι οποίες δεν μπορούν να καθοριστούν με ντετερμινιστικά κριτήρια. Η τελική λύση του προβλήματος αποτελεί προϊόν μιας αλληλουχίας διαδικασιών, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω των λογικών κανόνων που υιοθετούνται σε κάθε περίπτωση. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο μικρός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος, ωστόσο οι παραγόμενες λύσεις είναι υποβέλτιστες.

Μια νέα, αποδοτική μέθοδος για την αντιμετώπιση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρουσιάστηκε το 1998 από τους Huang και Yang [61]. Ο αλγόριθμός τους συνδυάζει τα χαρακτηριστικά του λογικού προγραμματισμού (Logic Programming) με μια μέθοδο ικανοποίησης περιορισμών, ώστε να δώσει μια ευέλικτη προσέγγιση του προβλήματος. Η αντιμετώπιση των περιορισμών γίνεται στην αρχή του αλγορίθμου, ώστε να μειωθεί δραστικά ο χώρος των εφικτών λύσεων. Με τον τρόπο αυτό, η βέλτιστη λύση βρίσκεται στα πρώτα στάδια της αναζήτησης. Η μέθοδος εφαρμόστηκε επιτυχώς σε διάφορα συστήματα, δίνοντας ικανοποιητικές λύσεις σε σύντομο υπολογιστικό χρόνο.

Οι Sisworahardjo και El-Keib [62] παρουσίασαν μια προσέγγιση βασισμένη στον αλγόριθμο αναζήτησης της αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Search Algorithm). Ο

αλγόριθμος είναι εμπνευσμένος από τη φυσική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι αποικίες των μυρμηγκιών για την εύρεση της τροφής τους και τη μεταφορά της πίσω στις φωλιές τους, κατασκευάζοντας μοναδικά μονοπάτια. Πιο συγκεκριμένα, τα μυρμήγκια μπορούν να εντοπίσουν το γρηγορότερο μονοπάτι από τη φωλιά τους προς τις πηγές της τροφής τους, ακολουθώντας τα ίχνη φερομόνης που αφήνουν τα άλλα μυρμήγκια κατά την κίνησή τους. Για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, ο εν λόγω ευρετικός αλγόριθμος καθορίζει το χώρο αναζήτησης λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που σχετίζονται με τη μετάβαση των μονάδων από τη μια κατάσταση στην άλλη. Ο αλγόριθμος βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο έρευνας, αλλά τα πρώτα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά.

Μια ιδιαίτερα πρωτότυπη μέθοδος για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος παρουσιάζεται και στην εργασία [63]. Η μέθοδος λύνει το συνολικό πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής σε δύο βαθμίδες (φίλτρα). Η πρώτη βαθμίδα αντιμετωπίζει αποκλειστικά το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων, ομαδοποιώντας τις θερμικές μονάδες σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το βαθμό βεβαιότητας ότι θα είναι εντός ή εκτός λειτουργίας σε κάθε ώρα της περιόδου. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται, μέσω ειδικών ευρετικών τεχνικών, κάποιοι πιθανοί συνδυασμοί λειτουργίας των μονάδων που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Η δεύτερη βαθμίδα επικεντρώνεται στην επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου, ώστε να εντοπιστεί η καλύτερη δυνατή λύση του προβλήματος. Η μέθοδος οδηγεί σε γρήγορη επίλυση του προβλήματος, αλλά είναι σε μεγάλο βαθμό εμπειρική.

2.3.11. Υβριδικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται μερικές ενδεικτικές υβριδικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι αρκετές από τις μεθόδους αυτές στηρίζονται στη χρήση της προσομοιωμένης ανόπτησης.

Το 1999 οι Mantawy, Abdel-Magid και Selim [64] παρουσίασαν έναν αλγόριθμο βασισμένο στην παράλληλη χρήση των γενετικών αλγορίθμων, της μεθόδου Tabu Search και της προσομοιωμένης ανόπτησης. Ο πυρήνας του αλγορίθμου βασίζεται στους γενετικούς αλγορίθμους. Η μέθοδος Tabu Search χρησιμοποιείται για την παραγωγή νέων πληθυσμών στη φάση αναπαραγωγής του γενετικού αλγορίθμου και η προσομοιωμένη ανόπτηση χρησιμοποιείται για την επιτάχυνση της σύγκλισης του αλγορίθμου. Ο συγκεκριμένος υβριδικός αλγόριθμος χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη ταχύτητα σύγκλισης και την υψηλή ποιότητα των τελικών λύσεων. Στην εργασία [65] παρουσιάζεται μια ακόμη υβριδική μέθοδος που στηρίζεται στο συνδυασμό της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και των γενετικών αλγορίθμων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την εύρεση της αρχικής θερμοκρασίας της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, καθώς και ο τρόπος ενσωμάτωσης των δύσκολων περιορισμών του προβλήματος στην κωδικοποίηση των υποψήφιων λύσεων. Γενικά, τα βασικά χαρακτηριστικά της προτεινόμενης υβριδικής μεθόδου είναι η εύκολη εφαρμογή της, η γρήγορη σύγκλιση και οι σχεδόν βέλτιστες λύσεις που επιτυγχάνονται.

Το 2003 οι Purushothama, Narendranath και Jenkins [66] παρουσίασαν έναν υβριδικό αλγόριθμο που συνδυάζει την προσομοιωμένη ανόπτηση με τη μέθοδο Tabu Search για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος. Η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης αποτελεί τον πυρήνα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, ενώ η Tabu Search

χρησιμοποιείται τοπικά για τη βελτίωση των υφιστάμενων λύσεων. Το προτεινόμενο μοντέλο κάνει χρήση ενός γεωμετρικού τύπου για τη μείωση της θερμοκρασίας. Πάντως, το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενσωματωμένη διαδικασία της εκτεταμένης τοπικής αναζήτησης. Στην αρχή της διαδικασίας αυτής εντοπίζεται μια λύση και υπολογίζεται το αντίστοιχο κόστος. Στη συνέχεια δημιουργείται μια λίστα από λύσεις που ανήκουν στη γειτονιά της τρέχουσας και εξετάζεται κάθε μία χωριστά, ώστε να βρεθεί η λύση που θα αντικαταστήσει την τρέχουσα. Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους διαπιστώθηκε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι λιγότερο ευαίσθητος ως προς την επιλογή των παραμέτρων ελέγχου του προβλήματος.

Το ίδιο έτος, οι Purushothama και Jenkins [67] πρότειναν το συνδυασμό της προσομοιωμένης απόκτησης με μια μέθοδο τοπικής αναζήτησης για την καλύτερη αντιμετώπιση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Ο κορμός του αλγορίθμου βασίζεται στη μέθοδο προσομοιωμένης απόκτησης, κατά την εκτέλεση της οποίας παράγονται τυχαία νέες δοκιμαστικές λύσεις, οι οποίες στην πλειονηφία τους είναι εφικτές. Παράλληλα, σε κάθε θερμοκρασία πραγματοποιείται τοπική αναζήτηση στη γειτονιά της καλύτερης λύσης, κάνοντας χρήση μιας τεχνικής αποδέσμευσης των μονάδων. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των διαφόρων λύσεων επικεντρώνεται στην απόφαση εκκίνησης ή κράτησης μιας τυχαία επιλεγμένης μονάδας σε μια τυχαία χρονική στιγμή, ανάλογα με την υπάρχουσα κατάσταση της μονάδας τη στιγμή εκείνη. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει την παραγωγή λύσεων που ικανοποιούν τους βασικούς περιορισμούς του προβλήματος, ενώ συνεισφέρει στην εξέταση ενός πολύ μεγαλύτερου τμήματος της γειτονιάς της τρέχουσας λύσης, συγκριτικά με παλαιότερες αντίστοιχες μεθόδους. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η εύρεση καλύτερων λύσεων, σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο.

Ιδιαίτερα διαδεδομένη είναι και η συνδυαστική χρήση της μεθόδου Lagrangian Relaxation και των γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος. Στις περιπτώσεις αυτές, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται, συνήθως, για τη σταδιακή ανανέωση της τιμής των πολλαπλασιαστών Lagrange [68,69]. Η χρήση των γενετικών αλγορίθμων για την ανανέωση των συγκεκριμένων πολλαπλασιαστών οδηγεί, συχνά, σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από ότι η χρήση συμβατικών μεθόδων. Εκτός των άλλων, η εργασία [69] εξετάζει και τον τρόπο επίλυσης του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς. Στην περίπτωση αυτή, στόχος του προβλήματος είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους των ανεξάρτητων παραγωγών και όχι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και στην εργασία [70]. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη υβριδική μέθοδο, η ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange γίνεται μέσω της χρήσης εξελικτικού προγραμματισμού και όχι γενετικών αλγορίθμων.

Το 2002 οι Valenzuela και Smith [71] απέδειξαν ότι η χρήση ενός μιμητικού αλγορίθμου (Memetic Algorithm) σε συνδυασμό με τη μέθοδο Lagrangian Relaxation συμβάλλει στην επίλυση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων. Ο μιμητικός αλγόριθμος είναι, ουσιαστικά, ένας γενετικός αλγόριθμος συνδυασμένος με μια τεχνική τοπικής αναζήτησης. Βασικό σημείο του αλγορίθμου αποτελεί η χρήση μιας δυναμικής συνάρτησης ποινής για την αντιμετώπιση των περιορισμών, καθώς και η χρήση ειδικών τελεστών για τη διόρθωση των μη-εφικτών λύσεων. Επίσης, οι Rajan και Mohan [72] παρουσίασαν μια υβριδική μέθοδο που συνδυάζει χαρακτηριστικά από τους εξελικτικούς αλγόριθμους και τη μέθοδο Tabu Search για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Το πιο ενδιαφέρον σημείο του άρθρου είναι ο διορθωτικός μηχανισμός για τις μη-εφικτές λύσεις.

Η εργασία [73] παρουσιάζει τη συνδυασμένη χρήση των νευρωνικών δικτύων, των γενετικών αλγορίθμων και του δυναμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση των νευρωνικών δικτύων, ενώ ο δυναμικός προγραμματισμός εφαρμόζεται στο τελευταίο στάδιο της μεθόδου προκειμένου να μειωθούν οι καταστάσεις των μονάδων που παρουσιάζουν αβεβαιότητα ως προς τη βέλτιστη τιμή τους (σύνηθες αποτέλεσμα των νευρωνικών δικτύων). Επίσης, ο Padhy [74] έκανε παράλληλη χρήση ενός έμπειρου συστήματος και ενός ασαφούς νευρωνικού δικτύου (Fuzzy Neural Network) για την επίλυση του θεωρούμενου προβλήματος. Τα πιο ενδιαφέροντα σημεία της μεθόδου είναι ότι τα φορτία αντιμετωπίζονται ως ασαφείς μεταβλητές και η εφεδρεία δεν είναι δεδομένη για κάθε ώρα, αλλά το περιθώριο εφεδρείας στηρίζεται στη διακύμανση του φορτίου.

2.4. Βραχυπρόθεσμη Υδροθερμική Συνεργασία

Οι εργασίες που παρουσιάστηκαν προηγουμένως αντιμετωπίζουν το θέμα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη τυχόν υδροηλεκτρικών μονάδων. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύντομη ανάλυση των κυριότερων εργασιών που αναφέρονται στο θέμα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, η ομαδοποίηση των οποίων βασίζεται στη μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση.

2.4.1. Μέθοδος Lagrangian Relaxation

Η χρήση της μεθόδου Lagrangian Relaxation είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Η εφαρμογή της στηρίζεται, συνήθως, στη διάσπαση του συνολικού προβλήματος σε δύο υποπροβλήματα: ένα θερμικό και ένα υδροηλεκτρικό. Η επίλυση των επιμέρους προβλημάτων γίνεται με τη βοήθεια άλλων αναλυτικών μεθόδων βελτιστοποίησης, ενώ η σύνδεσή τους επιτυγχάνεται με τη χρήση των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Το 1988 οι Zaghlool και Trutt [75] παρουσίασαν μια ιδιαίτερα απλουστευμένη εφαρμογή της μεθόδου αυτής για την επίλυση του προβλήματος. Η συγκεκριμένη εργασία θεωρεί υδροηλεκτρικούς σταθμούς με σταθερή στάθμη ταμιευτήρων, ενώ η καμπύλη κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων αποτελεί τετραγωνική συνάρτηση της παραγωγής ενεργού ισχύος. Το μοντέλο των υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνει υπόψη δύο διαφορετικές συναρτήσεις της υδροηλεκτρικής παραγωγής ως προς το ρυθμό εκροής ύδατος: μια τετραγωνική και μια γραμμική. Ωστόσο, οι θεωρούμενοι περιορισμοί είναι πολύ απλοί, ενώ δεν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων. Η εργασία [76] εφαρμόζει τη μέθοδο Lagrangian Relaxation για την επίλυση μιας ειδικής μορφής του προβλήματος, όπου θεωρείται ότι οι υδροηλεκτρικές μονάδες αποτελούν το κυρίαρχο συστατικό του συστήματος. Παράλληλα, το σύστημα μεταφοράς αναπαριστάται με ένα μοντέλο DC ροής φορτίου.

Αντίθετα, η εργασία [77] παρουσιάζει ένα πολύ αναλυτικό μοντέλο του θερμικού συστήματος, ενώ το υδραυλικό μοντελοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο έναν περιορισμό συνολικής ενέργειας για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό. Το θερμικό υποπρόβλημα αντιμετωπίζεται με την τεχνική του δυναμικού προγραμματισμού, ενώ η επίλυση του υδροηλεκτρικού υποπροβλήματος στηρίζεται στη χρήση μίας μεθόδου κατανομής αξιών (merit order allocation). Επίσης, γίνεται χρήση της μεθόδου των κλίσεων (subgradient) για την ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος παρουσιάζεται στην εργασία [78], η οποία λαμβάνει υπόψη τα συμβόλαια αγοραπωλησίας ενέργειας. Η συγκεκριμένη μέθοδος αντιμετωπίζει ταυτόχρονα το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων, τον προγραμματισμό λειτουργίας τόσο των υδροηλεκτρικών, όσο και των αντλητικών σταθμών και, τέλος, τον προγραμματισμό των ανταλλαγών ισχύος. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αναφέρεται στη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους του συστήματος, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται και τα καθαρά έσοδα από τις εξαγωγές ισχύος. Η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού χρησιμοποιείται για την επίλυση του θερμικού και αντλητικού υποπροβλήματος, ενώ ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών στηρίζεται στη μέθοδο της εφικτής κατεύθυνσης (feasible direction method).

Η ενσωμάτωση των προγραμματισμένων συμβολαίων ενέργειας στη μέθοδο Lagrangian Relaxation για την επίλυση του προβλήματος της υδροθερμικής συνεργασίας αντιμετωπίζεται και στις εργασίες [79,80]. Στην πρώτη περίπτωση παρουσιάζεται μια προσεγγιστική μέθοδος, η οποία χρησιμοποιεί μη γραμμικές, τετραγωνικές συναρτήσεις για τη μοντελοποίηση τόσο του κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων, όσο και των συμβολαίων ενέργειας [79]. Με τον τρόπο αυτό, αντιμετωπίζεται το φαινόμενο ταλάντωσης των λύσεων που προκαλείται από τη χρήση γραμμικών συναρτήσεων κόστους στα υποπροβλήματα που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της μεθόδου Lagrangian Relaxation. Επίσης, η εργασία [80] επικεντρώνεται σε ένα διευρυμένο μοντέλο του συστήματος παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη πυρηνικές μονάδες, η ενέργεια των οποίων χρησιμοποιείται για την κάλυψη των φορτίων βάσης, υδροηλεκτρικούς σταθμούς, οι οποίοι καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό του ζητούμενου φορτίου, συμβατικούς θερμικούς σταθμούς, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τα φορτία αιχμής, και συμβόλαια αγοράς και πώλησης ενέργειας σε προκαθορισμένες τιμές.

Το 1996 οι Ruzic, Rajakovic και Vuckovic [81] παρουσίασαν μια πρωτότυπη μεθοδολογία, βασισμένη στη Lagrangian Relaxation, για την επίλυση του θεωρούμενου προβλήματος. Η επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος στηρίζεται στον υπολογισμό του κόστους που έχει η υπερβολική χρήση των υδάτων σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, εξαιτίας της μη διαθεσιμότητάς τους στο άμεσο μέλλον. Με τον τρόπο αυτό γίνεται μια προσπάθεια ποσοτικού προσδιορισμού της αξίας χρήσης του νερού. Το θερμικό υποπρόβλημα λύνεται με τη μέθοδο του δυναμικού προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη τους βασικούς περιορισμούς των θερμικών μονάδων παραγωγής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μέθοδος που περιγράφεται στην εργασία [82]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται το πρόβλημα της ένταξης των υδροηλεκτρικών μονάδων. Μέσω της μεθόδου Lagrangian Relaxation, το υδραυλικό πρόβλημα διασπάται τόσο σε επίπεδο μονάδων, όσο και σε επίπεδο χρονικών διαστημάτων. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση της μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού ώστε να εντοπιστεί το βέλτιστο πρόγραμμα λειτουργίας των επιμέρους μονάδων κατά τη διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού.

Η εργασία [83] παρουσιάζει μια ακόμη εφαρμογή της μεθόδου Lagrangian Relaxation για την επίλυση του προβλήματος υδροθερμικής συνεργασίας. Το κόστος καυσίμου των θερμικών μονάδων και η υδροηλεκτρική παραγωγή παριστάνονται μέσω μη-γραμμικών συναρτήσεων. Το θερμικό υποπρόβλημα λύνεται με χρήση δυναμικού προγραμματισμού, ενώ το υδροηλεκτρικό υποπρόβλημα λύνεται μέσω μιας αναλυτικής μεθόδου υδροθερμικού προγραμματισμού, θεωρώντας δεδομένο το πρόγραμμα λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε ένα πολύ απλουστευμένο μοντέλο του υδραυλικού συστήματος. Το ίδιο

μειονέκτημα εμφανίζει και η εργασία των Luh, Zhang και Tomastik [84], η οποία επικεντρώνεται στην παρουσίαση μιας νέας μεθόδου δέσμης (bundle method) μειωμένης πολυπλοκότητας για την ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange. Το ίδιο θέμα εξετάζεται και στην εργασία [85].

Το 1998 οι Al-Agtash και Su [86] παρουσίασαν μια ενισχυμένη μέθοδο Lagrangian Relaxation για την επίλυση του προβλήματος της υδροθερμικής συνεργασίας. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην ενσωμάτωση μιας τετραγωνικής συνάρτησης ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Η συνάρτηση ποινής αναφέρεται στην ενδεχόμενη παραβίαση των ανισοτικών περιορισμών στρεφόμενης εφεδρείας. Η ίδια τεχνική ακολουθείται για το συνυπολογισμό των περιορισμών εκπομπών ρύπων του συστήματος. Αναφορικά με τη διαδικασία επίλυσης, το θερμικό υποπρόβλημα λύνεται μέσω της μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού, ενώ ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών μονάδων στηρίζεται στη λογική της μεθόδου αποκοπής αιχμών. Η εργασία [87] αποτελεί, ουσιαστικά, επέκταση της προηγούμενης μεθόδου και εστιάζεται στην τεχνική ενσωμάτωσης των αντλητικών μονάδων και των περιορισμών του δικτύου μεταφοράς.

Μια ιδιαίτερα πρωτότυπη εφαρμογή της μεθόδου Lagrangian Relaxation παρουσιάζεται και στην εργασία [88]. Η προτεινόμενη μαθηματική διατύπωση λαμβάνει υπόψη τους βασικότερους περιορισμούς ενός υδροθερμικού συστήματος παραγωγής και οδηγεί στην επίλυση ενός σύνθετου προβλήματος βελτιστοποίησης. Η βασική συνεισφορά της μεθόδου εντοπίζεται στη χρήση ειδικών ευρετικών διαδικασιών για τον εντοπισμό μιας εφικτής λύσης του προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίλυση του υδραυλικού υποπροβλήματος στηρίζεται στη θεώρηση γραμμικής μεταβολής της υδροηλεκτρικής παραγωγής με το ρυθμό εκροής ύδατος, καθιστώντας δυνατή τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών. Επίσης, η επίλυση του θερμικού υποπροβλήματος γίνεται μέσω της μεθόδου του δυναμικού προγραμματισμού.

2.4.2. Προγραμματισμός ροής δικτύου

Το 1990 οι Habibollahzadeh, Frances και Sui [89] παρουσίασαν μια νέα μέθοδο ροής δικτύου για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υδροθερμικής συνεργασίας. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση όλων των υδραυλικών περιορισμών, ωστόσο το μοντέλο του θερμικού προβλήματος είναι ιδιαίτερα απλουστευμένο. Πιο συγκεκριμένα, δεν λαμβάνονται υπόψη οι διακριτές μεταβλητές που εκφράζουν την κατάσταση λειτουργίας των θερμικών μονάδων, καθώς το πρόγραμμα ένταξης των μονάδων θεωρείται δεδομένο. Ενδιαφέρον, πάντως, παρουσιάζει η χρήση συντελεστών ποινής για το συνυπολογισμό των απωλειών του δικτύου μεταφοράς.

Μια ακόμη εφαρμογή της μεθόδου ροής δικτύου παρουσιάζεται στην εργασία [90]. Στο πρώτο στάδιο της μεθόδου γίνεται χρήση μιας τεχνικής γραμμικοποίησης για την αντιμετώπιση της μη-γραμμικής φύσης του υδροηλεκτρικού συστήματος και τη δημιουργία ενός ικανού μοντέλου ροής δικτύου. Στη συνέχεια, εντοπίζεται μια αρχική εφικτή λύση του προβλήματος μέσω της μεθόδου αποκοπής αιχμών. Η χρήση της μεθόδου αποκοπής αιχμών συντελεί στην εύρεση μιας πολύ καλής αρχικής λύσης και, συνεπώς, στη μείωση του χρόνου επίλυσης του προβλήματος. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας επίλυσης, εφαρμόζονται οι συνθήκες βελτιστοποίησης της μεθόδου ροής δικτύου για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η προσέγγιση των Franco, Carvalho και Soares [91]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής παραγωγής του συστήματος προέρχεται από υδροηλεκτρικές μονάδες. Η βασική συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην παράλληλη χρήση του μοντέλου ροής δικτύου τόσο για τον προγραμματισμό λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων, όσο και για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής φορτίου (χρήση DC μοντέλου ροής φορτίου). Ένα ακόμη καινοτόμο στοιχείο της μεθόδου είναι η ενσωμάτωση όλων των περιορισμών του προβλήματος στην κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης, κάνοντας χρήση κατάλληλων συντελεστών ποινής.

Το 1995 οι Heredia και Nabona [92] παρουσίασαν ένα μη-γραμμικό μοντέλο ροής δικτύου, το οποίο στηρίζεται στην ενιαία αντιμετώπιση του συνολικού υδροθερμικού προβλήματος. Η εργασία προτείνει τη γραμμικοποίηση της συνάρτησης που ορίζει την παραγωγή κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού, λαμβάνοντας υπόψη τις εκροές του και τον όγκο ύδατος που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα του στην αρχή και στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου μεταφοράς μέσω ενός DC μοντέλου ροής φορτίου. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν εξετάζει καθόλου το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων.

2.4.3. Μέθοδος αποκοπής αιχμών

Η μέθοδος αποκοπής αιχμών χρησιμοποιείται, συνήθως, για την επίλυση προβλημάτων μακροπρόθεσμου προγραμματισμού. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις έχει παρατηρηθεί η χρήση της και σε προβλήματα βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, είτε ως βασική μέθοδος επίλυσης [93,94], είτε ως βοηθητική τεχνική για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων [87,90].

Το 1989 οι Wu, Lee και Hill [93] επιχείρησαν να συγκρίνουν τη μέθοδο αποκοπής αιχμών με την αναλυτική μέθοδο των εξισώσεων συνεργασίας (coordination equations). Για πρακτικούς λόγους, η εργασία επικεντρώνεται σε ένα ιδιαίτερα απλουστευμένο μοντέλο του υδροθερμικού συστήματος παραγωγής. Η σύγκριση των δύο μεθόδων οδήγησε στα ακόλουθα, πολύ σημαντικά αποτελέσματα:

- Οι διαφορές των δύο μεθόδων αναφορικά με το κόστος της θερμικής παραγωγής είναι πρακτικά αμελητέες.
- Η μέθοδος αποκοπής αιχμών τείνει να επιπεδοποιεί το ισοδύναμο θερμικό φορτίο πιο αποτελεσματικά από τη μέθοδο των εξισώσεων συνεργασίας, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η άσκοπη έναρξη και παύση της λειτουργίας των θερμικών μονάδων.
- Η μέθοδος αποκοπής αιχμών έχει πολύ μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις.

Μια ακόμη εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών παρουσιάζεται στην εργασία [94]. Στην περίπτωση αυτή προτείνεται η επαναληπτική χρήση της μεθόδου, ώστε να ληφθούν υπόψη οι δεσμευτικοί περιορισμοί των υδροηλεκτρικών σταθμών και τα συμβόλαια αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εργασία, το μοντέλο του υδροθερμικού συστήματος παραγωγής είναι πολύ αναλυτικό. Η εργασία καταλήγει στο βασικό συμπέρασμα ότι ο συνυπολογισμός των δεσμευτικών υδραυλικών περιορισμών απαιτεί την επαναληπτική εκτέλεση της μεθόδου αποκοπής αιχμών και συντελεί σε λιγότερο επίπεδες ισοδύναμες καμπύλες φορτίου.

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος αποκοπής αιχμών έχει χρησιμοποιηθεί και ως βοηθητική τεχνική, σε συνδυασμό με άλλες αναλυτικές μεθόδους, για την επίλυση

του προβλήματος της υδροθερμικής συνεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία [87] γίνεται χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για την επίλυση του υδροηλεκτρικού υποπροβλήματος, στα πλαίσια της μεθόδου Lagrangian Relaxation. Επίσης, στην εργασία [90] η μέθοδος αποκοπής αιχμών χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας πολύ καλής αρχικής λύσης του προβλήματος, το οποίο λύνεται με τη μέθοδο ροής δικτύου.

2.4.4. Δυναμικός προγραμματισμός

Το 1989 οι Yang και Chen [95] παρουσίασαν μια μέθοδο δυναμικού προγραμματισμού, η οποία συμβάλλει στη μείωση τόσο της μνήμης αποθήκευσης, όσο και του υπολογιστικού χρόνου επίλυσης του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος στηρίζεται σε μια επαναληπτική εφαρμογή του δυναμικού προγραμματισμού, η οποία ξεκινάει κάνοντας χρήση ενός μεγάλου χρονικού βήματος που μειώνεται σταδιακά σε κάθε επανάληψη. Στις τελευταίες επαναλήψεις του αλγορίθμου γίνεται χρήση ωριαίου χρονικού βήματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σταδιακή βελτίωση της λύσης του προβλήματος, μέχρι το σημείο που δύο διαδοχικές επαναλήψεις οδηγούν στην ίδια λύση. Ωστόσο, λόγω της επαναληπτικής φύσης της μεθόδου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εγκλωβισμού της σε σημεία τοπικών ελαχίστων. Η ίδια μέθοδος εφαρμόζεται και στην εργασία [96], όπου λαμβάνονται υπόψη και οι αντλητικές μονάδες, καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες. Η επίλυση του προβλήματος στηρίζεται στη θεώρηση ότι οι υδροηλεκτρικές και αποθηκευτικές μονάδες χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τα φορτία αιχμής, ενώ οι αντλητικές αναλαμβάνουν την κάλυψη των χαμηλότερων φορτίων του συστήματος.

Μια διαφορετική εφαρμογή της μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού παρουσιάζεται στην εργασία [97]. Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη την επίπτωση που μπορεί να έχει στη λύση του προβλήματος μια απρόβλεπτη αλλαγή στις φυσικές εισροές ύδατος. Παρά το γεγονός ότι γίνεται χρήση της μεθόδου Lagrangian Relaxation για τη διάσπαση του συνολικού προβλήματος, η εργασία επικεντρώνεται στη χρήση μιας μεθόδου διαφορικού δυναμικού προγραμματισμού για την επίλυση του υδροηλεκτρικού υποπροβλήματος. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην επιτάχυνση της διαδικασίας επίλυσης, λόγω της χρήσης μιας τεχνολογίας παράλληλης επεξεργασίας για την ταυτόχρονη επίλυση των επιμέρους υδροηλεκτρικών υποπροβλημάτων. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε ένα ιδιαίτερα απλουστευμένο μοντέλο του θερμικού συστήματος, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τους δεσμευτικούς περιορισμούς των θερμικών μονάδων.

2.4.5. Γενετικοί αλγόριθμοι

Τα τελευταία χρόνια, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετές εργασίες που πραγματεύονται το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Το 1996 οι Chen και Chang [98] εφάρμοσαν τη συγκεκριμένη μέθοδο για τον προγραμματισμό ενός υδροθερμικού συστήματος που περιλαμβάνει και αλυσσωτά φράγματα. Κατά την επίλυση του προβλήματος, οι περιορισμοί συνέχειας της ροής λαμβάνονται υπόψη στην κωδικοποίηση των τεχνητών χρωμοσωμάτων και η ικανοποίησή τους ελέγχεται άμεσα κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε χρωμόσωμα αναπαριστά ένα πρόγραμμα λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, οδηγώντας σε μια ισοδύναμη καμπύλη φορτίου που καλύπτεται από το θερμικό υποσύστημα. Το θερμικό πρόβλημα που προκύπτει επιλύεται μέσω μιας μεθόδου δυναμικού προγραμματισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της στάθμης των ταμιευτήρων στην

υδροηλεκτρική παραγωγή (χρήση μη-γραμμικής συνάρτησης), αυξάνοντας την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Μια ιδιαίτερα αναλυτική περιγραφή της λογικής των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζεται στην εργασία [99]. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην ενσωμάτωση όλων των βασικών περιορισμών του υδροθερμικού συστήματος στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, με χρήση συντελεστών ποινής. Ωστόσο, το μοντέλο του θερμικού συστήματος είναι πολύ απλουστευμένο, δεδομένου ότι δεν εξετάζεται το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων, ενώ γίνεται χρήση μιας ισοδύναμης θερμικής μονάδας για τον υπολογισμό της συνολικής θερμικής παραγωγής. Αντίθετα, ο γενετικός αλγόριθμος των Rudolf και Bayrleithner [100] λαμβάνει υπόψη τον προγραμματισμό λειτουργίας των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων, κάνοντας χρήση μιας προσέγγισης δύο επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο γίνεται χρήση του γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, ενώ το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου λύνεται στο δεύτερο επίπεδο μέσω της χρήσης της μεθόδου Lagrangian Relaxation. Για την επίλυση του προβλήματος, οι περιορισμοί που αναφέρονται στον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων και στη λειτουργία των αντλητικών σταθμών λαμβάνονται υπόψη στην κωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων, ενώ οι υπόλοιποι περιορισμοί ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση.

Μια διαφορετική εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος παρουσιάζεται στην εργασία [101]. Σε αντίθεση με τους κλασικούς γενετικούς αλγόριθμους, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί δύο χρωμοσώματα για την αναπαράσταση κάθε υποψήφιας λύσης του προβλήματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια ευρύτερη διερεύνηση του πεδίου των εφικτών λύσεων, χωρίς να απαιτείται η αύξηση του μεγέθους του πληθυσμού των χρωμοσωμάτων που εξετάζονται σε κάθε επανάληψη του γενετικού αλγορίθμου. Αναφορικά με τον τρόπο αντιμετώπισης των περιορισμών του προβλήματος, ακολουθείται η συνήθης πρακτική της ενσωμάτωσής τους στην αντικειμενική συνάρτηση μέσω συντελεστών ποινής.

Το 2003 οι Gil, Bustos και Rudnick [102] παρουσίασαν ένα γενετικό αλγόριθμο που έχει τη δυνατότητα να επιλύει ταυτόχρονα τα προβλήματα της υδροθερμικής συνεργασίας, της ένταξης των μονάδων και της οικονομικής κατανομής φορτίου. Η μέθοδος στηρίζεται στη χρήση μιας συνάρτησης κόστους για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό, η οποία αντιπροσωπεύει το μελλοντικό κόστος από τη χρήση συγκεκριμένης ποσότητας ύδατος σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Η συνολική αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από το λειτουργικό κόστος των θερμικών μονάδων, το μελλοντικό κόστος χρήσης του ύδατος και μια συνάρτηση ποινής, η οποία είναι ανάλογη του επιπέδου παραβίασης των περιορισμών του προβλήματος. Ωστόσο, η παραγωγή του κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού παριστάνεται μέσω οκτώ διακριτών επιπέδων, τα οποία ορίζονται αυθαίρετα.

Τέλος, η εργασία [103] παρουσιάζει έναν ιδιαίτερα αποτελεσματικό γενετικό αλγόριθμο για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτή λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων. Σε κάθε χρωμόσωμα γίνεται κωδικοποίηση τόσο των εκροών ύδατος κάθε υδροηλεκτρικής μονάδας, όσο και της λειτουργικής της κατάστασης (εντός ή εκτός λειτουργίας). Με τον τρόπο αυτό παράγονται διάφορες υποψήφιες λύσεις του υδροηλεκτρικού υποπροβλήματος, ενώ ο προγραμματισμός των θερμικών μονάδων στηρίζεται στη μέθοδο της λίστας προτεραιότητας. Η συμβολή της συγκεκριμένης εργασίας, η οποία περιλαμβάνει και

μια εφαρμογή στο ελληνικό σύστημα παραγωγής, έγκειται στην αναλυτική διατύπωση των περιορισμών των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων.

2.4.6. Εξελικτικός προγραμματισμός

Το 1999 οι Werner και Verstege [104] παρουσίασαν μια νέα μέθοδο επίλυσης του προβλήματος βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, η οποία βασίζεται στον εξελικτικό προγραμματισμό. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν απαιτεί τη διάσπαση του συνολικού υδροθερμικού προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα, αυξάνοντας την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθείται επιτρέπει τη μελέτη αντλητικών σταθμών, καθώς και αλυσσωτών φραγμάτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η αναλυτική παράσταση του υδραυλικού συστήματος, κάνοντας χρήση μη-γραμμικών συναρτήσεων για τον υπολογισμό της παραγωγής ενεργού ισχύος από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Στην εργασία [105] ακολουθείται μια πιο απλή αντιμετώπιση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται χρήση ενός ισοδύναμου θερμικού σταθμού και θεωρείται ότι η στάθμη των ταμιευτήρων δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου. Η συγκεκριμένη μέθοδος εξελικτικού προγραμματισμού δίνει καλά αποτελέσματα, ωστόσο οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με μια βελτιωμένη έκδοση της προηγούμενης μεθόδου [106], η βασική συμβολή της οποίας έγκειται στο συνυπολογισμό των περιορισμών που σχετίζονται με τις απαγορευμένες ζώνες λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι περιορισμοί του υδροθερμικού συστήματος λαμβάνονται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος κάνοντας χρήση συντελεστών ποινής, ενώ το μοντέλο του θερμικού συστήματος στηρίζεται στη χρήση μιας ισοδύναμης θερμικής μονάδας.

2.4.7. Λοιπές μέθοδοι

Το 1992 οι El-Hawary και Ravindranath [107] παρουσίασαν μια εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου Newton–Raphson για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Στην εργασία αυτή λαμβάνεται υπόψη και το δίκτυο μεταφοράς, το οποίο αναπαρίσταται μέσω εξισώσεων ροής φορτίου που δίνονται τόσο σε πολική (polar), όσο και σε ορθογώνια (rectangular) μορφή. Στο πρώτο στάδιο της μεθόδου εντοπίζεται η βέλτιστη λύση, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι ανισοτικοί περιορισμοί. Στη συνέχεια, οι ανισοτικοί περιορισμοί του προβλήματος ενσωματώνονται στην αντικειμενική συνάρτηση μέσω της χρήσης συντελεστών ποινής. Η τελική λύση του προβλήματος εντοπίζεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τις παραβιασμένες μεταβλητές, ενώ γίνεται χρήση και αραιών πινάκων ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία της σύγκλισης.

Η εργασία [108] περιγράφει μια εφαρμογή της μεθόδου μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος. Η μέθοδος στηρίζεται στη θεώρηση ότι το σύστημα παραγωγής αποτελείται κυρίως από υδροηλεκτρικές μονάδες, ενώ το μαθηματικό μοντέλο της εργασίας επιτρέπει τον υδροηλεκτρικό προγραμματισμό τόσο σε επίπεδο μονάδων, όσο και σε επίπεδο σταθμών. Επίσης, όλοι οι περιορισμοί του συστήματος, καθώς και η αντικειμενική συνάρτηση, διατυπώνονται σε γραμμική μορφή. Συνεπώς, προκύπτει ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο λύνεται μέσω του εμπορικού προγράμματος CPLEX. Αντίθετα, η εργασία [109] στηρίζεται σε ένα μη-γραμμικό μοντέλο, όπου η παραγωγή των υδροηλεκτρικών μονάδων αποτελεί συνάρτηση των

εκροών ύδατος και της στάθμης των ταμιευτήρων. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αναφέρεται στη μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι σημαντικότεροι περιορισμοί του υδροηλεκτρικού συστήματος. Το μη-γραμμικό πρόβλημα που προκύπτει λύνεται μέσω του εμπορικού προγράμματος MINOS της MATLAB.

Το 2003 ο Basu [110] παρουσίασε μια εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων Hopfield για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε ένα πολύ απλό μοντέλο του υδροηλεκτρικού συστήματος, ενώ δεν λαμβάνεται υπόψη το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων παραγωγής. Επίσης, θεωρείται ότι η στάθμη των ταμιευτήρων δεν μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου, καθιστώντας δυνατή τη χρήση μιας τμηματικής γραμμικής συνάρτησης για τον προσδιορισμό της παραγωγής των υδροηλεκτρικών σταθμών. Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς, ενώ αμελείται ο περιορισμός στρεφόμενης εφεδρείας.

Το 2005 ο ίδιος συγγραφέας [111] παρουσίασε μια νέα μέθοδο, η οποία στηρίζεται στον αλγόριθμο προσομοιωμένης απόπτωσης, για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Το μοντέλο του υδροθερμικού συστήματος είναι όμοιο με προηγούμενως. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη και τις εκπομπές ρύπων του συστήματος, μέσω της επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με δύο αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η μία συνάρτηση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος και η δεύτερη στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων. Η διαδικασία επίλυσης στηρίζεται στην ενοποίηση των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία, μέσω της χρήσης ειδικών συντελεστών βαρύτητας, αναζητώντας το βέλτιστο δυνατό συμβιβασμό ανάμεσα στους δύο αντικρουόμενους στόχους. Η ελαχιστοποίηση της ενιαίας αντικειμενικής συνάρτησης γίνεται μέσω της μεθόδου προσομοιωμένης απόπτωσης. Το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου έγκειται στις μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις.

Το 2005 οι Uturbey και Costa [112] παρουσίασαν μια εφαρμογή της μεθόδου εσωτερικού σημείου για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας σε συνθήκες απελευθερωμένης αγοράς. Η συμβολή της μεθόδου έγκειται στην ενιαία αντιμετώπιση του υδροθερμικού προβλήματος, σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική που στηρίζεται στη διάσπασή του σε επιμέρους υποπροβλήματα. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη το συσχετισμό ανάμεσα στο φορτίο του συστήματος και την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς. Ωστόσο, η διαδικασία επίλυσης δεν εξετάζει το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων. Η ενιαία αντιμετώπιση του υδροθερμικού προβλήματος εξετάζεται και στην εργασία [113]. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στον ημικαθορισμένο προγραμματισμό (Semidefinite Programming), ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με τη μέθοδο εσωτερικού σημείου. Η ιδιαιτερότητα της μεθόδου έγκειται στο ότι η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται στον κώνο που ορίζεται από την ομάδα των θετικά ορισμένων μητρών, στις οποίες ταξινομούνται οι μεταβλητές του προβλήματος. Η διαδικασία επίλυσης στηρίζεται στη μετατροπή των διακριτών μεταβλητών σε συνεχείς, μέσω της χρήσης κυρτών τετραγωνικών περιορισμών, καθώς και στη μετατροπή των ανισοτικών περιορισμών σε ισοτικούς, μέσω της χρήσης βοηθητικών μεταβλητών.

Τέλος, ο Huang [114] παρουσίασε μια ιδιαίτερα πρωτότυπη προσέγγιση στο πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, κάνοντας χρήση ενός συστήματος αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony System). Στη συγκεκριμένη εργασία,

το πρόβλημα του υδροηλεκτρικού προγραμματισμού αντιμετωπίζεται ανεξάρτητα από το θερμικό υποπρόβλημα, στο οποίο γίνεται χρήση μιας ισοδύναμης θερμικής μονάδας. Σε αυτό το πλαίσιο, ο στόχος του υδροπρογραμματισμού είναι η αναζήτηση μιας βέλτιστης στρατηγικής αντικατάστασης της θερμικής ισχύος με υδροηλεκτρική, προκειμένου να μειωθεί το συνολικό κόστος παραγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκεται ακόμη σε εμπειρικό στάδιο.

2.4.8. Υβριδικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος

Το 1989 οι Luo, Habibollahzadeh και Semlyen [115] παρουσίασαν μια υβριδική μέθοδο για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη και το δίκτυο μεταφοράς. Η μέθοδος στηρίζεται στη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε ένα υδροηλεκτρικό και ένα θερμικό υποπρόβλημα, κάνοντας χρήση των συνθηκών Kuhn-Tucker. Το υδροηλεκτρικό υποπρόβλημα επιλύεται με τη μέθοδο του προγραμματισμού ροής δικτύου, ενώ ο προγραμματισμός παραγωγής των θερμικών μονάδων στηρίζεται στην επίλυση μιας βέλτιστης ροής φορτίου, χωρίς όμως να συνυπολογίζεται το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων. Ο συνδυασμός των δύο προβλημάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση των εξισώσεων συνεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος λαμβάνει υπόψη ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών, όπως η αλληλεπίδραση των αλυσσωτών φραγμάτων, η καθυστέρηση στη μεταφορά του ύδατος, οι μεταβολές στη στάθμη των ταμιευτήρων, καθώς και οι περιορισμοί ασφάλειας του δικτύου μεταφοράς.

Η εργασία [116] παρουσιάζει τη συνδυαστική χρήση των μεθόδων αναζήτησης Tabu και διάσπασης Benders για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Η μέθοδος αναζήτησης Tabu χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η χρήση της μεθόδου Benders αποσκοπεί στη μείωση των υποψήφιων λύσεων του προβλήματος, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία σύγκλισης. Κάθε υποψήφια λύση που εξετάζει η μέθοδος Tabu προκύπτει από το συνδυασμό των μεθόδων δυναμικού προγραμματισμού, ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση του θερμικού υποπροβλήματος, και προγραμματισμού ροής δικτύου, για το υδροηλεκτρικό υποπρόβλημα. Οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούνται και για την εύρεση της αρχικής εφικτής λύσης που απαιτείται από τη μέθοδο Tabu.

Οι υβριδικές μέθοδοι που περιγράφονται στις εργασίες [117,118] επικεντρώνονται στον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, στα πλαίσια της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία [117] προτείνει τη διάσπαση του αρχικού προβλήματος σε επιμέρους υποπροβλήματα. Το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων αντιμετωπίζεται με χρήση δυναμικού προγραμματισμού και των υδροηλεκτρικών με τη βοήθεια των μεθόδων ροής δικτύου και δυναμικού προγραμματισμού. Στο πρώτο στάδιο της μεθόδου πραγματοποιείται ο προγραμματισμός των ισοδύναμων υδροηλεκτρικών σταθμών, μέσω της μεθόδου ροής δικτύου, και στη συνέχεια καθορίζεται το πρόγραμμα ένταξης των επιμέρους υδροηλεκτρικών μονάδων κάνοντας χρήση δυναμικού προγραμματισμού. Η ένωση όλων των επιμέρους προβλημάτων στηρίζεται στη μέθοδο Lagrangian Relaxation. Η τελευταία αποτελεί τον πυρήνα και της υβριδικής μεθόδου που παρουσιάζεται στην εργασία [118]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μέθοδος Lagrangian Relaxation χρησιμοποιείται για την εύρεση μιας σχεδόν βέλτιστης δυαδικής λύσης. Στη συνέχεια, γίνεται χρήση της μεθόδου διαδοχικής ένταξης των μονάδων (Sequential Unit Commitment) για τη διόρθωση της δυαδικής λύσης και την εξασφάλιση ενός εφικτού προγράμματος ένταξης των μονάδων. Τέλος, εφαρμόζεται η μέθοδος αποδέσμευσης των μονάδων ώστε να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο η τελική λύση του προβλήματος.

Το 2001 ο Wong [119] παρουσίασε μια νέα υβριδική μέθοδο που συνδυάζει τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και των γενετικών αλγορίθμων. Ουσιαστικά, το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται μέσω ενός γενετικού αλγορίθμου, ενώ η απόφαση για την αντικατάσταση των μελών του εκάστοτε πληθυσμού χρωμοσωμάτων λαμβάνεται με βάση το κριτήριο αποδοχής υποψήφιων λύσεων, το οποίο αποτελεί τον πυρήνα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί ευρετικές τεχνικές, οι οποίες στηρίζονται στη λογική της μεθόδου αποκοπής αιχμών, για την επιπεδοποίηση των αιχμών φορτίου, ώστε να αποτραπούν οι μεγάλες διακυμάνσεις του φορτίου που πρέπει να καλύψει το θερμικό σύστημα παραγωγής.

Τέλος, η υβριδική μέθοδος του Basu [120] στηρίζεται στη συνδυαστική χρήση του εξελικτικού προγραμματισμού και της ασαφούς λογικής για την επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη και τις εκπομπές ρύπων του συστήματος. Η μέθοδος επιτρέπει την παράλληλη θεώρηση δύο αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων, οι οποίες αναφέρονται στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και των εκπομπών ρύπων του συστήματος, αντίστοιχα. Η διαδικασία επίλυσης στηρίζεται στη μέθοδο της εργασίας [111]. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη περίπτωση η βελτιστοποίηση της συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης βασίζεται στη μέθοδο εξελικτικού προγραμματισμού, ενώ η βαρύτητα των επιμέρους στόχων ρυθμίζεται μέσω της χρήσης ασαφούς λογικής. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην αδυναμία αντιμετώπισης του προβλήματος της ένταξης των μονάδων.

2.5. Ενσωμάτωση Περιορισμών Αξιοπιστίας του Συστήματος

Στα περισσότερα άρθρα της βιβλιογραφίας, ο καθορισμός του περιθωρίου της στρεφόμενης εφεδρείας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη χρήση εμπειρικών μεθόδων και κανόνων. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις ο καθορισμός της απαιτούμενης εφεδρείας γίνεται με τη βοήθεια πιθανοτικών τεχνικών, οι οποίες στηρίζονται στην ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας στο κλασικό μοντέλο του προβλήματος. Βέβαια, η ανάλυση αξιοπιστίας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται, συνήθως, στην ειδική περίπτωση του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού [121]. Επειδή, όμως, η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στο θέμα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού, η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στη συγκεκριμένη χρονική κλίμακα.

Η εργασία [122] ασχολείται με το θέμα της ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας. Η μέθοδος στηρίζεται στη χρήση ενός πιθανοτικού δείκτη που είναι γνωστός ως ρίσκο ένταξης των μονάδων. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την πιθανότητα αποτυχίας του συστήματος να ικανοποιήσει το φορτίο και υπολογίζεται από τη διαδοχική συνέλιξη της πιθανότητας βλάβης των μονάδων με τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του φορτίου του συστήματος. Το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο γίνεται ο προγραμματισμός των θερμικών μονάδων, μέσω της μεθόδου του δυναμικού προγραμματισμού, θεωρώντας δεδομένη την παραγωγή κάθε υδροηλεκτρικής μονάδας για κάθε ώρα της περιόδου. Στο στάδιο αυτό λαμβάνεται υπόψη και ο δείκτης ρίσκου, ο οποίος καθορίζει αν ένας δεδομένος συνδυασμός θερμικών μονάδων σε λειτουργία παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας. Το δεύτερο στάδιο της μεθόδου αποσκοπεί στον προγραμματισμό των υδροηλεκτρικών μονάδων, κάνοντας χρήση της μεθόδου των κλίσεων. Τα δύο στάδια

εκτελούνται επαναληπτικά, οδηγώντας στον υπολογισμό ενός πιθανοτικού κόστους παραγωγής, απόρροια της ενσωμάτωσης των περιορισμών αξιοπιστίας.

Η επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας με ενσωμάτωση πιθανοτικών περιορισμών αξιοπιστίας εξετάζεται και στην εργασία [123]. Όπως και προηγουμένως, γίνεται χρήση ενός δείκτη ρίσκου ώστε να εκτιμηθεί η αξιοπιστία του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα βλάβης των θερμικών μονάδων και την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου. Ωστόσο, η εργασία αυτή λαμβάνει υπόψη και την ύπαρξη διασυνδεδεμένων συστημάτων παραγωγής, υπολογίζοντας ένα χωριστό δείκτη ρίσκου για κάθε διασυνδεδεμένη περιοχή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το πρόβλημα της υδροθερμικής συνεργασίας λύνεται με τη βοήθεια της μεθόδου Lagrangian Relaxation.

Η εργασία [124] παρουσιάζει μια εκτενή ανάλυση της επίδρασης που έχει η αβεβαιότητα της πρόβλεψης του φορτίου στον υπολογισμό του δείκτη ρίσκου ενός συστήματος θερμικών μονάδων παραγωγής. Η αβεβαιότητα του φορτίου λαμβάνεται υπόψη μέσω του μοντέλου Gauss-Markov, το οποίο επιτρέπει το συνυπολογισμό του συσχετισμού που υπάρχει μεταξύ του φορτίου διαδοχικών ωρών. Επίσης, η εκτίμηση της διαθεσιμότητας των θερμικών μονάδων στηρίζεται στη χρήση του κλασικού μοντέλου Markov. Πρέπει, πάντως, να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εργασία δεν λαμβάνει υπόψη οικονομικά κριτήρια για την επίλυση του προβλήματος. Αντίθετα, ο προγραμματισμός λειτουργίας των θερμικών μονάδων βασίζεται σε μια ιδιόμορφη λίστα προτεραιότητας, η οποία χρησιμοποιεί, ως κριτήριο ένταξης των μονάδων, το χρόνο εκκίνησής τους. Συνεπώς, η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται αποκλειστικά στην ανάλυση αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής, οδηγώντας, όπως είναι φυσικό, σε λύσεις που αυξάνουν το κόστος του συστήματος.

Οι Gooi, Mendes, Bell και Kirschen [125] παρουσίασαν μια διαφορετική προσέγγιση για την ενσωμάτωση του πιθανοτικού καθορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας στο πρόβλημα της ένταξης των μονάδων. Ο προγραμματισμός του συστήματος παραγωγής γίνεται με βάση ένα προκαθορισμένο δείκτη ρίσκου. Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται κάνοντας σύγκριση του συνολικού κόστους του συστήματος με το κόστος της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Η ανάλυση γίνεται σε δύο στάδια και πραγματοποιείται ανάμεσα στις διαδικασίες ελαχιστοποίησης και μεγιστοποίησης του δυαδικού προβλήματος της μεθόδου Lagrangian Relaxation, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων. Τα δύο στάδια αφορούν την αξιολόγηση του ρίσκου της ένταξης των μονάδων και τον καθορισμό της εφεδρείας για κάθε χρονικό διάστημα. Αφού επιτευχθεί σύγκλιση του αλγορίθμου σε μια λύση του προβλήματος, ακολουθεί η περαιτέρω επεξεργασία της για την εξάλειψη του φαινομένου της υπερεκτίμησης της εφεδρείας, όπου αυτό είναι δυνατό. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη εργασία λαμβάνει υπόψη και την αβεβαιότητα που εμφανίζει η πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος.

Το 1994 οι Billinton και Lian [126] παρουσίασαν μια νέα μεθοδολογία για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέθοδος προτείνει την κατάταξη του συστήματος σε τρεις λειτουργικές καταστάσεις: υγιής (healthy), οριακή (marginal) και επικίνδυνη (at risk). Η παραπάνω κατάταξη στηρίζεται στο βαθμό ικανοποίησης συγκεκριμένων κριτηρίων επάρκειας και ασφάλειας. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι οι περιορισμοί ασφάλειας είναι εντός ορίων στην υγιή και οριακή κατάσταση, ενώ παραβιάζονται στην επικίνδυνη. Συνεπώς, ο υπολογισμός των ορίων λειτουργίας του συστήματος μπορεί να γίνει με βάση τις πιθανότητες εμφάνισης των διαταραχών που οδηγούν στις

παραπάνω λειτουργικές καταστάσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιολόγηση της επάρκειας των ολοκληρωμένων συστημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί κάνοντας χρήση ενός δείκτη ρίσκου. Ο δείκτης αυτός εκφράζει την πιθανότητα μετάβασης του συστήματος σε μια μη αποδεκτή κατάσταση λειτουργίας. Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ένα σύστημα θεωρείται αξιόπιστο όταν ο δείκτης αυτός είναι μικρότερος ή ίσος με ένα επιθυμητό επίπεδο ρίσκου.

Το ίδιο έτος, οι Billinton και Fotuhi-Firuzabad [127] εφάρμοσαν την παραπάνω μεθοδολογία για τον πιθανοτικό καθορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο συγκεκριμένο άρθρο εξετάζεται η επίδραση στο πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγόντων όπως το φορτίο αιχμής, η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου και η μερική βλάβη των μονάδων παραγωγής. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε σε δύο ακόμη εργασίες [128,129], στις οποίες αναλύεται η επίδραση μερικών επιπλέον παραγόντων στο εξεταζόμενο πρόβλημα. Έτσι, στην εργασία [128] συνυπολογίζονται οι εξαρτημένες από το χρόνο πιθανότητες εμφάνισης όλων των δυνατών καταστάσεων λειτουργίας, στις οποίες μπορεί να περιέλθει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, στην εργασία [129] εξετάζεται η επίδραση των μονάδων άμεσης εκκίνησης και θερμής εφεδρείας, του διακοπτόμενου φορτίου και των περιπτώσεων κατά τις οποίες η απόσυρση μιας μονάδας παραγωγής από τη λειτουργία εξαιτίας κάποιας βλάβης μπορεί να καθυστερήσει για ένα μικρό χρονικό διάστημα.

Η συγκεκριμένη μέθοδος πιθανοτικού καθορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας έχει εφαρμοστεί τόσο σε απομονωμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς [130-132]. Στην πρώτη περίπτωση αμελείται το σύστημα μεταφοράς και συνεπώς οι περιορισμοί ασφάλειας αναφέρονται μόνο στη συνολική παραγόμενη ενέργεια και ζήτηση του συστήματος. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση εξετάζονται και οι περιορισμοί που αναφέρονται στη μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς. Βέβαια, η ενσωμάτωση των περιορισμών της μεταβατικής κατάστασης λειτουργίας συντελεί σε μια πιο ρεαλιστική αξιολόγηση της ασφάλειας του συστήματος [130]. Σε κάθε περίπτωση, η λύση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων εξαρτάται άμεσα από τους θεωρούμενους περιορισμούς ασφάλειας του συστήματος [131]. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση διασυνδεδεμένων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [132].

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στις εργασίες [126-132] για τον πιθανοτικό καθορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας στηρίζεται στη χρήση διαφόρων πιθανοτικών κριτηρίων, με βάση τα οποία γίνεται η κατηγοριοποίηση των πιθανών καταστάσεων λειτουργίας ενός συστήματος. Ο υπολογισμός των κριτηρίων αυτών μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των τεχνικών που αναλύονται στην εργασία [133]. Η πρώτη τεχνική στηρίζεται στην απαρίθμηση όλων των δυνατών διαταραχών που μπορούν να παρουσιαστούν στα διάφορα στοιχεία του συστήματος και η δεύτερη στην κατασκευή του συμβατικού πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος. Το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται από το συγκεκριμένο άρθρο είναι ότι η τεχνική του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος είναι πολύ πιο εύχρηστη για συστήματα μεγάλων διαστάσεων.

2.6. Ενσωμάτωση Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων του Συστήματος

Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί ένας έντονος προβληματισμός αναφορικά με τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλωστε, η αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχει προσεγγιστεί μέσω ειδικών νομοθετικών ρυθμίσεων, τόσο σε διεθνές [134], όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο [135,136]. Στο πλαίσιο αυτό, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στις διάφορες διαδικασίες που σχετίζονται με τον προγραμματισμό λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής.

Η πιο συνηθισμένη τεχνική για την ενσωμάτωση των παραπάνω περιορισμών στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής είναι ο συνυπολογισμός τους στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, κάνοντας χρήση της αναλυτικής μεθόδου Lagrangian Relaxation. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη επιπλέον πολλαπλασιαστών Lagrange, οι οποίοι αναφέρονται στην πιθανή παραβίαση των συγκεκριμένων περιορισμών [13,14,69]. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης έγκειται στη δυσκολία εύρεσης μιας εφικτής λύσης του προβλήματος, λόγω της δυαδικής φύσης της μεθόδου Lagrangian Relaxation (δυαδικό κενό). Επίσης, η ποιότητα της τελικής λύσης εξαρτάται άμεσα από την τεχνική που υιοθετείται σε κάθε περίπτωση για την ανανέωση των πολλαπλασιαστών Lagrange.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος είναι η χρήση της μεθόδου Augmented Lagrangian Relaxation. Το χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι η προσθήκη μιας μη-γραμμικής συνάρτησης ποινής στην κλασική συνάρτηση Lagrange. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η πιθανότητα εντοπισμού της βέλτιστης λύσης του αρχικού προβλήματος, ακόμα και στις περιπτώσεις που αυτή βρίσκεται μέσα στην περιοχή του δυαδικού κενού. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική για την ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στην επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής [10,11,16,86]. Ωστόσο, η διαδικασία ανανέωσης των πολλαπλασιαστών Lagrange εξακολουθεί να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση της μεθόδου.

Μια εναλλακτική προσέγγιση του προβλήματος είναι η παράλληλη θεώρηση δύο αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων. Η μία συνάρτηση αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος και η δεύτερη στην ελαχιστοποίηση των συνολικών εκπομπών ρύπων. Οι δύο αυτές συναρτήσεις ενώνονται σε μια ενιαία αντικειμενική συνάρτηση, κάνοντας χρήση κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας. Η προσέγγιση αυτή εμφανίζεται στις εργασίες [35,111], στις οποίες γίνεται χρήση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για τη βελτιστοποίηση της συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης, καθώς και στην εργασία [120] που στηρίζεται στη μέθοδο του εξελικτικού προγραμματισμού. Στη δεύτερη περίπτωση, ο καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας γίνεται με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής. Παρόλα αυτά, η εύρεση των κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, η οποία συνήθως στηρίζεται στη χρήση εμπειρικών μεθόδων. Το γεγονός αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα την εύρεση λύσεων που οδηγούν σε αύξηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

2.7. Συμπεράσματα

Από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι οι αναλυτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στα αρχικά στάδια μελέτης του

προβλήματος βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι:

- η δυσκολία εύρεσης εφικτών λύσεων,
- η μειωμένη δυνατότητα ενσωμάτωσης όλων των δεσμευτικών περιορισμών των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων και
- η ανάγκη για υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών, αναφορικά με το μοντέλο του συστήματος παραγωγής, ώστε να καταστεί δυνατή η επίλυση του προβλήματος.

Τα παραπάνω προβλήματα αντιμετωπίστηκαν σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση ευρετικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Στη συγκεκριμένη κατηγορία εντάσσεται και η μέθοδος προσομοιωμένης απόκτησης, η οποία έχει εφαρμοστεί κυρίως για την επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Τα βασικά σημεία που διαφοροποιούν τις υφιστάμενες μεθόδους προσομοιωμένης απόκτησης είναι ο τρόπος καθορισμού των παραμέτρων ελέγχου της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι μηχανισμοί παραγωγής τυχαίων εφικτών λύσεων και η ταχύτητα σύγκλισης στη βέλτιστη λύση. Οι περισσότερες μέθοδοι προσομοιωμένης απόκτησης εμφανίζουν τρία βασικά προβλήματα:

- την ανάγκη δοκιμαστικών εκτελέσεων για τη ρύθμιση των παραμέτρων ελέγχου,
- τη μεγάλη διακύμανση των τελικών αποτελεσμάτων και
- τις μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο.

Αναφορικά με το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, η συνήθης πρακτική επιβάλλει τη διάσπασή του σε δύο υποπροβλήματα: ένα θερμικό και ένα υδροηλεκτρικό. Σε αντίθετη περίπτωση, απαιτείται η υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών όπως η θεώρηση ενός ισοδύναμου θερμικού σταθμού και η παράλειψη των δεσμευτικών περιορισμών των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων. Η μέθοδος αποκοπής αιχμών ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων που στηρίζονται στη διάσπαση του συνολικού προβλήματος υδροθερμικής συνεργασίας σε ανεξάρτητα υποπροβλήματα. Η εν λόγω μέθοδος έχει μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις, ωστόσο δεν επιτρέπει την άμεση ενσωμάτωση των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος.

Επίσης, η επισκόπηση των μεθόδων ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής φανέρωσε τη δυσκολία που αντιμετωπίζουν αναφορικά με την παράσταση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας συνεπάγεται, συνήθως, την υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών, ώστε να καταστεί δυνατή η επίλυση του προβλήματος σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο.

Ένα ακόμη θέμα που εξετάζεται σε αρκετές εργασίες της βιβλιογραφίας είναι η ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων του συστήματος παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση της μεθόδου Lagrangian Relaxation, είτε με τη θεώρηση πολλαπλών (αντικρουόμενων) αντικειμενικών συναρτήσεων. Στην πρώτη περίπτωση ανακύπτει το πρόβλημα της ανανέωσης των πολλαπλασιαστών Lagrange, ενώ το μειονέκτημα της δεύτερης έγκειται στη δυσκολία εύρεσης των κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

3.1. Γενικά

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξυπηρετηθεί από ένα σύστημα παραγωγής με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ο καθορισμός του βέλτιστου τρόπου τροφοδότησης είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, άμεσα συνδεδεμένη με τα επιθυμητά κριτήρια, ως προς τα οποία πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση. Αν το βασικό κριτήριο είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους του συστήματος, τότε η εύρεση του βέλτιστου τρόπου τροφοδότησης του φορτίου του συστήματος για μια δεδομένη περίοδο προγραμματισμού βασίζεται στις εξής διαδικασίες [137]:

- Ακριβή πρόβλεψη φορτίων για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου
- Οικονομικό προγραμματισμό εντάξεως των μονάδων παραγωγής στο σύστημα
- Οικονομική φόρτιση μονάδων σε λειτουργία

Έχοντας δεδομένη την πρόβλεψη των ωριαίων φορτίων της υπό εξέταση περιόδου, οι δύο τελευταίες διαδικασίες συνιστούν το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, στο οποίο συμμετέχουν τόσο οι θερμικές όσο και οι υδροηλεκτρικές μονάδες παραγωγής. Ο στόχος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους ενός υδροθερμικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μια δεδομένη περίοδο προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που αναφέρονται στις απαιτήσεις του συστήματος και στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής.

Η ικανότητα παραγωγής των θερμικών μονάδων εξαρτάται άμεσα από την εγκατεστημένη ισχύ τους και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού τους. Αντίθετα, η υδροηλεκτρική παραγωγή δεν μπορεί να καθοριστεί τόσο άμεσα, διότι εξαρτάται από τις υδρολογικές συνθήκες κάθε περιοχής, καθώς και από τα προγράμματα λειτουργίας των ταμιευτήρων. Συνεπώς, η οικονομική λειτουργία ενός υδροθερμικού συστήματος παραγωγής παρουσιάζει, τις περισσότερες φορές, πολλαπλές λύσεις.

Το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής μπορεί να επιλυθεί για διάφορες χρονικές περιόδους προγραμματισμού, μεταβάλλοντας κάθε φορά το μοντέλο του προβλήματος. Η συγκεκριμένη διατριβή επικεντρώνεται στην περίπτωση του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού. Συνεπώς, η θεωρούμενη χρονική περίοδος κυμαίνεται από μία ημέρα ως μία εβδομάδα με ωριαίο χρονικό βήμα.

Το συνολικό πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διασπαστεί σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα που επιλύονται διαδοχικά. Το πρώτο πρόβλημα αναφέρεται στον προγραμματισμό του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής και το δεύτερο στον προγραμματισμό του θερμικού. Η διάσπαση αυτή επιτρέπει τη λεπτομερή

μοντελοποίηση των επιμέρους προβλημάτων, χωρίς να απαιτείται η υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών που αλλοιώνουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της τελικής λύσης. Βέβαια, η διάσπαση του αρχικού προβλήματος δεν μπορεί να οδηγήσει στην εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ωστόσο, η μεγάλη πολυπλοκότητα του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την ταυτόχρονη επίλυση των δύο υποπροβλημάτων, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς των θερμικών και υδροηλεκτρικών συστημάτων παραγωγής.

Ο στόχος του υδροηλεκτρικού προβλήματος είναι η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη την προκαθορισμένη ποσότητα ύδατος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάθε σταθμό κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Η επίλυση του εν λόγω προβλήματος οδηγεί στη δημιουργία μιας τροποποιημένης χρονολογικής καμπύλης φορτίου, η οποία αποτελεί δεδομένο εισόδου του θερμικού προβλήματος.

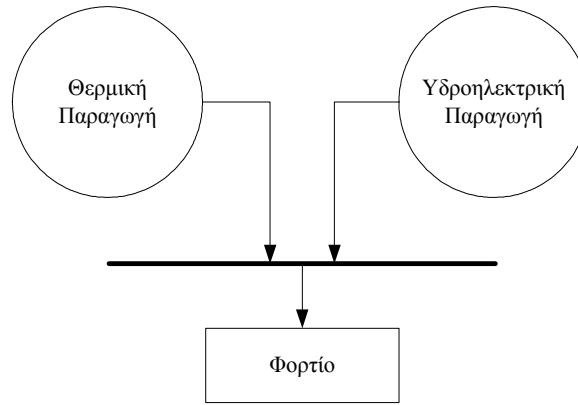
Το θερμικό πρόβλημα συνίσταται στην ταυτόχρονη επίλυση δύο επιμέρους υποπροβλημάτων: του βέλτιστου προγραμματισμού ένταξης των θερμικών μονάδων και της οικονομικής κατανομής φορτίου. Το πρώτο υποπρόβλημα ανήκει στην κατηγορία του μη-γραμμικού, μικτού ακέραιου προγραμματισμού, ενώ το δεύτερο είναι ένα πρόβλημα τετραγωνικού ή γραμμικού προγραμματισμού, ανάλογα με τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η επίλυση του συνολικού προβλήματος αποτελεί μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία, η δυσκολία της οποίας αυξάνει αναλογικά με το πλήθος των θερμικών μονάδων παραγωγής και των περιορισμών που λαμβάνονται υπόψη.

Στις επόμενες ενότητες αναλύονται οι βασικές παραδοχές που έχουν υιοθετηθεί στο μοντέλο του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του συνολικού προβλήματος του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού ενός υδροθερμικού συστήματος παραγωγής.

3.2. Μοντέλο Συστήματος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τη μετατροπή μιας πρωτογενούς μορφής ενέργειας αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Το σύνολο της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από την καύση ορυκτών καυσίμων, από τη ροή ή την πτώση των υδάτων, από την πυρηνική σχάση και από εναλλακτικές (ανανεώσιμες) πηγές ενέργειας, όπως είναι ο ήλιος (ηλιακή ενέργεια), ο άνεμος (αιολική ενέργεια), η βιομάζα, τα θαλάσσια κύματα, η γεωθερμική ενέργεια κ.λ.π. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα: είναι ανεξάντλητες και ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον. Ωστόσο, η μικρή ηλεκτρική απόδοση και, σε πολλές περιπτώσεις, το μεγάλο κόστος κατασκευής των σταθμών ανανεώσιμων μορφών ενέργειας έχουν σαν αποτέλεσμα τη μικρή συμμετοχή των σταθμών αυτών στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή, το μοντέλο του συστήματος παραγωγής επικεντρώνεται αποκλειστικά στις θερμικές και υδροηλεκτρικές μονάδες, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, θεωρείται ότι όλες οι μονάδες παραγωγής είναι συνδεδεμένες σε ένα μοναδικό ζυγό και εξυπηρετούν τη συνολική ζήτηση στον ίδιο ζυγό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Οι περιορισμοί μεταφοράς και η φυσική τοποθεσία των μονάδων παραγωγής δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση.



Σχήμα 3.1: Μοντέλο συστήματος παραγωγής

3.2.1. Θερμικοί σταθμοί παραγωγής

Οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν ως πρωτογενή μορφή ενέργειας τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, δηλαδή τον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Βασικό χαρακτηριστικό των καυσίμων αυτών είναι ότι περιέχουν χημική ενέργεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμικοί σταθμοί καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα.

Οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: ατμοηλεκτρικούς, νηζελοηλεκτρικούς (εμβολοφόρες νηζελογεννήτριες και αεριοστρόβιλοι) και πυρηνικούς. Οι ατμοηλεκτρικοί και πυρηνικοί σταθμοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσον (εξωτερική καύση) για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας, μέσω των ατμοστροβίλων. Αντίθετα, οι νηζελοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Στη συνέχεια, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι πυρηνικοί σταθμοί είναι μια ειδική κατηγορία ατμοηλεκτρικών σταθμών, όπου ο λέβητας έχει αντικατασταθεί από τον πυρηνικό αντιδραστήρα. Επιπλέον, θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται και με τους σύγχρονους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, οι οποίοι στηρίζονται στο συνδυασμό λειτουργίας ατμοστροβίλου και αεριοστροβίλου. Οι σταθμοί αυτοί χρησιμοποιούν, συνήθως, το φυσικό αέριο ως πρωτογενή πηγή ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η μοντελοποίηση του θερμικού συστήματος γίνεται σε επίπεδο θερμικών μονάδων παραγωγής (και όχι θερμικών σταθμών). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πληρέστερη απεικόνιση των τεχνικών χαρακτηριστικών των επιμέρους μονάδων, οδηγώντας σε πιο ρεαλιστικές τελικές λύσεις. Με βάση το πλαίσιο αυτό, όλοι οι τύποι των θερμικών μονάδων συμμετέχουν στη διαδικασία του προγραμματισμού παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργό παραγωγή $P_{i,t}$ κάθε θερμικής μονάδας i σε κάθε ώρα t της εξεταζόμενης περιόδου και ένα μεγάλο αριθμό τεχνικών περιορισμών που εξασφαλίζουν την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία τους.

3.2.2. Υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί στηρίζονται στη μετατροπή αρχικά της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική, μέσω υδροστροβίλων διαφόρων τύπων, και στη συνέχεια της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια των γεννητριών. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται σε σταθμούς συνεχούς ροής, η λειτουργία των

οποίων στηρίζεται στη φυσική ροή των υδάτων των ποταμών, και σταθμούς ρυθμιζόμενης ροής, όπου είναι απαραίτητη η δημιουργία τεχνητών λιμνών (ταμιευτήρες νερού). Υπάρχει και η ειδική κατηγορία των αντλητικών σταθμών, όπου οι υδροστρόβιλοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν ως αντλίες και οι γεννήτριες ως κινητήρες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού κόστους παραγωγής, κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου, για την παραγωγή ενέργειας στις ώρες αιχμής, αντικαθιστώντας μονάδες με υψηλότερο κόστος παραγωγής. Στην παρούσα διατριβή, πάντως, εξετάζονται αποκλειστικά οι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί με ταμιευτήρα.

Το βασικό πλεονέκτημα των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι το μηδενικό κόστος καυσίμου και η έλλειψη κάθε είδους ρύπανσης και μόλυνσης του περιβάλλοντος, καθώς στηρίζονται στη χρήση των υδάτινων πόρων. Ωστόσο, το πρόβλημα έγκειται στην ανεπάρκεια των υδάτων, γεγονός που οδηγεί στη χρήση της υδροηλεκτρικής παραγωγής για την κάλυψη κυρίως των φορτίων αιχμής, ενώ κατά τις περιόδους χαμηλού φορτίου πραγματοποιείται, συνήθως, αποταμίευση ύδατος.

Σε αντίθεση με τις θερμικές μονάδες, το μοντέλο του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής βασίζεται, συνήθως, στην ενοποίηση των υδροηλεκτρικών μονάδων σε ισοδύναμους υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Το μοντέλο αυτό, το οποίο ακολουθείται και στη συγκεκριμένη διατριβή, στηρίζεται στη θεώρηση ότι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί του συστήματος αποτελούνται από n όμοιες μονάδες που παρουσιάζουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των μεταβλητών και, συνεπώς, της πολυπλοκότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Μια άλλη παραδοχή που υιοθετείται στο μοντέλο του υδροηλεκτρικού συστήματος αναφέρεται στη συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος των υδροηλεκτρικών σταθμών ως προς το ρυθμό εκροής ύδατος. Λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές απώλειες, η ενεργός ισχύς $P_{j,t}$ που παράγεται από τον υδροηλεκτρικό σταθμό j την ώρα t δίνεται από την ακόλουθη, μη γραμμική σχέση [138]:

$$P_{j,t} = 8,7 \cdot Q_{j,t} \cdot (h_{j,t} - h_{f,j,t}), \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.1)$$

όπου $Q_{j,t}$ είναι ο ρυθμός εκροής ύδατος του υδροηλεκτρικού σταθμού j κατά τη διάρκεια της ώρας t , $h_{j,t}$ είναι η εκμεταλλεύσιμη υψομετρική διαφορά του ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού σταθμού j την ώρα t , $h_{f,j,t}$ είναι οι υδραυλικές απώλειες στον αγωγό της υδατοπτώσεως του υδροηλεκτρικού σταθμού j κατά τη διάρκεια της ώρας t , NH είναι το πλήθος των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής και T είναι η θεωρούμενη περίοδος κατανομής.

Για τους σκοπούς του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού, μπορεί να γίνει η θεώρηση ότι η υψομετρική διαφορά $h_{j,t}$ είναι ανεξάρτητη του χρόνου, καθώς η στάθμη των ταμιευτήρων διατηρείται, συνήθως, σε πολύ στενά όρια. Αν, επιπλέον, αγνοήσουμε τις υδραυλικές απώλειες ($h_{f,j,t} = 0$), η εξίσωση (3.1) μπορεί να μετατραπεί στην ακόλουθη απλή γραμμική σχέση:

$$P_{j,t} = a_j \cdot Q_{j,t}, \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.2)$$

όπου η σταθερά a_j σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού σταθμού j . Η χρήση της γραμμικής σχέσης (3.2) διευκολύνει σημαντικά την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, χωρίς να συντελεί σε σημαντική αλλοίωση της ακρίβειας των τελικών αποτελεσμάτων.

3.3. Μαθηματική Διατύπωση του Προβλήματος

Από μαθηματικής άποψης, ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής ενός υδροθερμικού συστήματος αποτελεί ένα μη γραμμικό πρόβλημα μεγάλης κλίμακας, το οποίο περιλαμβάνει συνεχείς και διακριτές μεταβλητές και ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών, ανισοτικών και ισοτικών, γραμμικών και μη γραμμικών, εξαρτώμενων και μη από το χρόνο. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων και, παράλληλα, ο καθορισμός της ενεργού παραγωγής κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης κόστους ικανοποιώντας ένα πλήθος περιορισμών.

Όπως προαναφέρθηκε, η υδροηλεκτρική παραγωγή στηρίζεται στη χρήση της διαθέσιμης ποσότητας ύδατος, το οποίο αποτελεί φυσική πηγή ενέργειας. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι το λειτουργικό κόστος των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής είναι μηδενικό. Συνεπώς, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αναφέρεται στο λειτουργικό κόστος των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Το πλήθος των μεταβλητών και των περιορισμών που λαμβάνονται υπόψη στην κατάσταση του προβλήματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο δυσκολίας που παρουσιάζει η επίλυσή του. Πιο συγκεκριμένα, ο μεγάλος αριθμός θερμικών μονάδων και υδροηλεκτρικών σταθμών που απαρτίζουν τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα παραγωγής, καθώς και ο συνυπολογισμός χρονικά εξαρτώμενων και μη γραμμικών περιορισμών, αποτελούν παράγοντες που ανάγουν το βέλτιστο προγραμματισμό παραγωγής σε ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην ανάλυση που ακολουθεί περιγράφονται αναλυτικά η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης και οι περιορισμοί που αναφέρονται στη λειτουργία του θερμικού και υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής.

3.3.1. Μαθηματική διαμόρφωση της αντικειμενικής συνάρτησης

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους των θερμικών μονάδων παραγωγής κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού. Η μαθηματική διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης συνίσταται στο συνυπολογισμό του κόστους καυσίμου, του κόστους εκκίνησης και του κόστους κράτησης των θερμικών μονάδων.

3.3.1.1. Κόστος καυσίμου θερμικών μονάδων

Η κατανάλωση καυσίμου στις θερμικές μονάδες είναι, συνήθως, τετραγωνική συνάρτηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Κατά την εκκίνηση και σβέση, η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για κάθε θερμική μονάδα, ανάλογα με τον τύπο της. Με βάση τα παραπάνω, το κόστος καυσίμου $FC_{i,t}$ της θερμικής μονάδας i για την ώρα t δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$FC_{i,t}(P_{i,t}) = A_i \cdot P_{i,t}^2 + B_i \cdot P_{i,t} + C_i \quad (3.3)$$

όπου A_i , B_i , C_i είναι οι συντελεστές της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους της μονάδας i . Πρέπει να σημειωθεί ότι στον υπολογισμό των συντελεστών της συνάρτησης (3.3) έχει συμπεριληφθεί και η τιμή αγοράς του καυσίμου κάθε μονάδας.

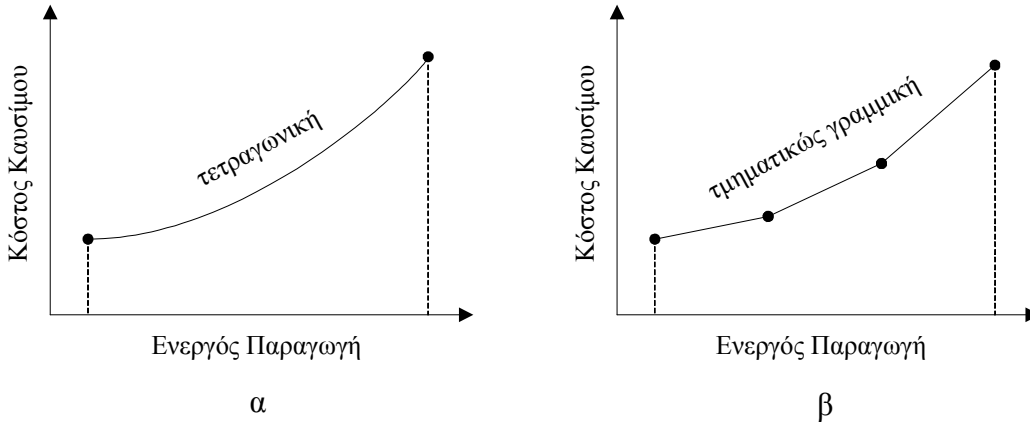
Εναλλακτικά, το κόστος καυσίμου των θερμικών μονάδων μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης:

$$FC_{i,t}(P_{i,t}) = a_{1,i} \cdot P_{1,i,t} + a_{2,i} \cdot P_{2,i,t} + \dots + a_{n,i} \cdot P_{n,i,t} + c_i \quad (3.4)$$

Η συνάρτηση αυτή αποτελείται από n ευθύγραμμα τμήματα με διαφορετικές κλίσεις το καθένα, όπου $a_{k,i}$ ($k = 1 \dots n$) είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος k της συνάρτησης κόστους της θερμικής μονάδας i , ενώ c_i είναι ο σταθερός όρος της συνάρτησης. Σύμφωνα με τη σχέση (3.4), η συνολική ενεργός παραγωγή της μονάδας i την ώρα t δίνεται από το άθροισμα των επιμέρους τιμών ισχύος $P_{k,i,t}$:

$$P_{i,t} = \sum_{k=1}^n P_{k,i,t} \quad (3.5)$$

Ανεξάρτητα, πάντως, από τον τύπο της συνάρτησης του κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων, η μορφή της καμπύλης πρέπει να είναι γνησίως αύξουσα. Η τυπική μορφή των προαναφερόμενων τετραγωνικών και τμηματικώς γραμμικών συναρτήσεων κόστους καυσίμου δίνεται στα Σχήματα 3.2α και 3.2β, αντίστοιχα.



Σχήμα 3.2: Τυπικές καμπύλες κόστους καυσίμου θερμικών μονάδων

3.3.1.2. Κόστος εκκίνησης και κράτησης θερμικών μονάδων

Το κόστος εκκίνησης μιας θερμικής μονάδας παραγωγής εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια παραμονής της εκτός λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, η πολύωρη παραμονή μιας μονάδας εκτός λειτουργίας συντελεί, συνήθως, σε σημαντική αύξηση του κόστους εκκίνησης. Η εξάρτηση αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω δύο βασικών συναρτήσεων: μιας εκθετικής και μιας βηματικής.

Σύμφωνα με την εκθετική συνάρτηση, το κόστος εκκίνησης $SUP_{i,t}$ της μονάδας i για την ώρα t δίνεται από τη σχέση:

$$SUP_{i,t} = b_{0,i} \cdot (1 - e^{-Toff_{i,t-1}/k_i}) + b_{1,i} \quad (3.6)$$

όπου $b_{0,i}$, $b_{1,i}$, k_i είναι οι συντελεστές της εκθετικής συνάρτησης κόστους εκκίνησης της μονάδας i και $Toff_{i,t}$ είναι ένας θετικός ακέραιος που υποδηλώνει τις συνεχόμενες ώρες κατά τις οποίες η μονάδα i βρίσκεται εκτός λειτουργίας πριν την ώρα t .

Αντίστοιχα, η βηματική συνάρτηση μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$SUP_{i,t} = \begin{cases} S_{h,i}, & \text{αν } Toff_{i,t-1} \leq t_{cold,i} \\ S_{c,i}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.7)$$

όπου $S_{h,i}$, $S_{c,i}$ είναι το κόστος της θερμικής μονάδας i για θερμή και ψυχρή εκκίνηση, αντίστοιχα, ενώ $t_{cold,i}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται για να κρυώσει ο λέβητας της μονάδας. Το κόστος ψυχρής εκκίνησης αναφέρεται στην περίπτωση που μια μονάδα έχει παραμείνει για αρκετές ώρες εκτός λειτουργίας. Αντίθετα, το κόστος θερμής εκκίνησης επιβάλλεται αν η μονάδα έχει τεθεί πρόσφατα εκτός λειτουργίας (η θερμοκρασία του λέβητα είναι ακόμη υψηλή).

Σε αντίθεση με το κόστος εκκίνησης, το κόστος κράτησης SDN_i κάθε θερμικής μονάδας i θεωρείται, συνήθως, σταθερό.

3.3.1.3. Συνολικό λειτουργικό κόστος θερμικών μονάδων

Με βάση τα παραπάνω, η συνολική αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από την ελαχιστοποίηση της ακόλουθης συνάρτησης κόστους:

$$TC = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NT} [ST_{i,t} \cdot FC_{i,t}(P_{i,t}) + ST_{i,t} \cdot (1 - ST_{i,t-1}) \cdot SUP_{i,t} + ST_{i,t-1} \cdot (1 - ST_{i,t}) \cdot SDN_i] \quad (3.8)$$

όπου TC είναι το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος, NT είναι το πλήθος των θερμικών μονάδων παραγωγής και $ST_{i,t}$ είναι η μεταβλητή που απεικονίζει την κατάσταση λειτουργίας της θερμικής μονάδας i την ώρα t (1 εαν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός).

Γίνεται φανερό, ότι η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι μη γραμμική ως προς τις μεταβλητές ελέγχου $ST_{i,t}$ (διακριτές) και $P_{i,t}$ (συνεχείς). Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (3.8) υπόκειται σε ένα πλήθος περιορισμών, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια.

3.3.2. Περιορισμοί συστήματος

Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης κατηγορίας αναφέρονται στο συνολικό σύστημα παραγωγής και συμπεριλαμβάνουν τους περιορισμούς ισοζυγίου ισχύος, απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας, αξιοπιστίας, ελάχιστης παραγωγής και εκπομπών ρύπων του συστήματος.

3.3.2.1. Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος

Ο περιορισμός ισοζυγίου ισχύος αναφέρεται στην ωριαία ζήτηση ισχύος του συστήματος. Με βάση τον περιορισμό αυτό, η συνολική παραγόμενη θερμική και υδροηλεκτρική ισχύς σε κάθε ώρα κατανομής πρέπει να ισούται με το φορτίο της συγκεκριμένης ώρας συν τις απώλειες του συστήματος:

$$\sum_{i=1}^{NT} P_{i,t} + \sum_{j=1}^{NH} P_{j,t} = LOAD_t + LOSS_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.9)$$

όπου $LOAD_t$ και $LOSS_t$ είναι το φορτίο και οι απώλειες του συστήματος για την ώρα t , αντίστοιχα.

Οι απώλειες του συστήματος μπορούν να εκφραστούν ως ένα συγκεκριμένο ποσοστό του ωριαίου φορτίου, δεδομένου ότι στην κατάστρωση του προβλήματος δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του δικτύου μεταφοράς. Στη βιβλιογραφία, οι απώλειες συνήθως αμελούνται ή συνυπολογίζονται στο φορτίο, κάνοντας χρήση ενός προκαθορισμένου συντελεστή απωλειών, ο οποίος μπορεί να εξαχθεί από τα ιστορικά δεδομένα του εξεταζόμενου συστήματος. Ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών απαιτεί την επίλυση ενός προβλήματος βέλτιστης ροής φορτίου, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων.

3.3.2.2. Περιορισμός απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας συστήματος

Η εξασφάλιση επαρκούς στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα κατανομής είναι απαραίτητη για την ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να επιτευχθεί η αδιάλειπτη τροφοδότηση του φορτίου.

Όπως είναι γνωστό, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί έχουν τη δυνατότητα άμεσου συγχρονισμού στο σύστημα, αποτελώντας μια ιδιαίτερα αποτελεσματική και άμεση λύση για την εξασφάλιση επαρκούς στρεφόμενης εφεδρείας, ανεξάρτητα από την κατάσταση λειτουργίας τους. Αντίθετα, θεωρείται ότι μόνο οι εν λειτουργία θερμικές μονάδες έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία (χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι θερμικές μονάδες άμεσης εκκίνησης). Με βάση τα παραπάνω, η απαίτηση για στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\sum_{i=1}^{NT} (ST_{i,t} \cdot P_{\max,i}) + \sum_{j=1}^{NH} P_{\max,j} \geq LOAD_t + RSRV_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.10)$$

όπου οι όροι $P_{\max,i}$ και $P_{\max,j}$ εκφράζουν το τεχνικό μέγιστο της θερμικής μονάδας i και του υδροηλεκτρικού σταθμού j , αντίστοιχα, ενώ ο όρος $RSRV_t$ αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία για την ώρα κατανομής t .

3.3.2.3. Περιορισμοί αξιοπιστίας συστήματος

Σε πολλές περιπτώσεις, ο καθορισμός της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας γίνεται με τη βοήθεια πιθανοτικών τεχνικών, οι οποίες επιτρέπουν το συνυπολογισμό των διαφόρων αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τη λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής (πιθανότητα βλάβης των μονάδων, αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου, κ.λ.π.). Οι εν λόγω τεχνικές στηρίζονται, συνήθως, στη χρήση δύο δεικτών αξιοπιστίας: του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου, ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα το σύστημα παραγωγής να μην μπορέσει να εξυπηρετήσει το ζητούμενο φορτίο, και του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας που εκφράζει την ενέργεια που αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί το σύστημα παραγωγής για τη θεωρούμενη περίοδο ανάλυσης.

Η ενσωμάτωση των παραπάνω δεικτών συνίσταται στη διατύπωση των ακόλουθων περιορισμών αξιοπιστίας:

$$LOLP_t \leq LOLP_{\max}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.11)$$

$$\sum_{t=1}^T EUE_t \leq EUE_{\max} \quad (3.12)$$

όπου $LOLP_t$ και EUE_t είναι η πιθανότητα απώλειας φορτίου και η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια για την ώρα t , αντίστοιχα, ενώ $LOLP_{\max}$ και $EUE_{\max}$ είναι

τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια που θέτονται για τους θεωρούμενους δείκτες αξιοπιστίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης της πιθανότητας απώλειας φορτίου (και το αντίστοιχο μέγιστο όριο) υπολογίζεται, συνήθως, χωριστά για κάθε ώρα της περιόδου προγραμματισμού, ενώ ο περιορισμός της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας αναφέρεται σε ολόκληρη την περίοδο. Ο καθορισμός των ορίων $LOLP_{max}$ και EUE_{max} εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας που πρέπει να παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής.

3.3.2.4. Περιορισμός ελάχιστης παραγωγής

Ο συγκεκριμένος περιορισμός ορίζει ότι το άθροισμα των τεχνικών ελάχιστων των θερμικών μονάδων και των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής που είναι προγραμματισμένοι να λειτουργήσουν σε κάθε ώρα κατανομής δεν πρέπει να υπερβαίνει το φορτίο της αντίστοιχης ώρας. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\sum_{i=1}^{NT} (ST_{i,t} \cdot P_{min,i}) + \sum_{j=1}^{NH} (ST_{j,t} \cdot P_{min,j}) \leq LOAD_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.13)$$

όπου $ST_{j,t}$ είναι η μεταβλητή που απεικονίζει την κατάσταση λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού j την ώρα t (1 εαν ο σταθμός είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός), ενώ οι όροι $P_{min,i}$ και $P_{min,j}$ εκφράζουν το τεχνικό ελάχιστο της θερμικής μονάδας i και του υδροηλεκτρικού σταθμού j , αντίστοιχα.

3.3.2.5. Περιορισμός εκπομπών ρύπων συστήματος

Η λειτουργία των θερμικών μονάδων παραγωγής συνοδεύεται πάντα από την εκπομπή αέριων ρύπων. Το είδος και η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων εξαρτάται, κυρίως, από τον τύπο καυσίμου και την τεχνολογία κάθε θερμικής μονάδας. Πιο συγκεκριμένα, η καύση άνθρακα, πετρελαίου ή αερίου συντελεί στην έκλυση οξειδίων του αζώτου και του άνθρακα. Επιπλέον, ο άνθρακας και το πετρέλαιο είναι υπεύθυνα για την έκλυση οξειδίων του θείου.

Σε κάθε περίπτωση, η θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για το λόγο αυτό, τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα παραγωγής περιορίζονται από ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εκπομπών αέριων ρύπων για κάθε περίοδο προγραμματισμού. Τα όρια αυτά καθορίζονται μέσω είτε διεθνών συμβάσεων [134,135,136], είτε εθνικών νομοθεσιών.

Συνεπώς, ο περιορισμός εκπομπών ρύπων του συστήματος μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NT} [ST_{i,t} \cdot EMS_{k,i,t}(P_{i,t})] \leq EMCAP_k, \quad \forall k \in NE \quad (3.14)$$

όπου NE είναι το πλήθος των ρύπων που εξετάζονται σε κάθε εφαρμογή, $EMS_{k,i,t}$ είναι η ποσότητα του ρύπου k που εκπέμπεται από τη θερμική μονάδα i κατά τη διάρκεια της ώρας t και $EMCAP_k$ είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εκπομπών του ρύπου k , το οποίο αναφέρεται στο συνολικό θερμικό σύστημα παραγωγής. Όπως είναι φυσικό, η ποσότητα των εκπεμπόμενων ρύπων είναι άμεση συνάρτηση της ενεργού παραγωγής κάθε θερμικής μονάδας.

3.3.3. Περιορισμοί θερμικών μονάδων παραγωγής

3.3.3.1. Περιορισμός ορίων ενεργού παραγωγής θερμικών μονάδων

Η ενεργός παραγωγή κάθε θερμικής μονάδας περιορίζεται μεταξύ ενός κάτω ορίου $P_{min,i}$ (τεχνικό ελάχιστο) και ενός άνω ορίου $P_{max,i}$ (τεχνικό μέγιστο), το οποίο συνήθως ισούται με την ονομαστική ισχύ της μονάδας. Ο περιορισμός αυτός διατυπώνεται ως εξής:

$$ST_{i,t} \cdot P_{min,i} \leq P_{i,t} \leq ST_{i,t} \cdot P_{max,i}, \quad \forall i \in NT \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.15)$$

Η ικανοποίηση του συγκεκριμένου περιορισμού είναι απαραίτητη για την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία των θερμικών μονάδων παραγωγής. Η θεώρηση μη μηδενικών τεχνικών ελάχιστων για τις θερμικές μονάδες έχει σαν αποτέλεσμα την ενσωμάτωση των διακριτών μεταβλητών κατάστασης $ST_{i,t}$, οι οποίες συντελούν στη δημιουργία ενός προβλήματος μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

3.3.3.2. Περιορισμός ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης θερμικών μονάδων

Τεχνικοί και οικονομικοί λόγοι επιβάλλουν τη λειτουργία των θερμικών μονάδων για ένα συγκεκριμένο ελάχιστο αριθμό συνεχόμενων ωρών μετά την εκκίνησή τους. Αντίστοιχα, υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός ωρών για τις οποίες πρέπει μια μονάδα να παραμείνει εκτός λειτουργίας, προτού τεθεί ξανά σε λειτουργία.

Οι περιορισμοί ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

$$(Ton_{i,t-1} - Turp_i) \cdot (ST_{i,t-1} - ST_{i,t}) \geq 0, \quad \forall i \in NT \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.16)$$

$$(Toff_{i,t-1} - Tdown_i) \cdot (ST_{i,t} - ST_{i,t-1}) \geq 0, \quad \forall i \in NT \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.17)$$

όπου $Ton_{i,t}$ είναι ένας θετικός ακέραιος που υποδηλώνει τις συνεχόμενες ώρες κατά τις οποίες η μονάδα i βρίσκεται εντός λειτουργίας κατά την ώρα t , ενώ οι όροι $Turp_i$ και $Tdown_i$ εκφράζουν τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας και κράτησης της μονάδας i , αντίστοιχα.

Στη διατύπωση των συγκεκριμένων περιορισμών λαμβάνεται υπόψη και το χρονικό διάστημα παραμονής κάθε θερμικής μονάδας στην αρχική κατάσταση λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η χρονική σύνδεση των διαδοχικών περιόδων κατανομής.

3.3.3.3. Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου θερμικών μονάδων

Η ικανότητα κάθε θερμικής μονάδας να αυξήσει ή να ελαττώσει την παραγωγή της σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα περιορίζεται από τους ρυθμούς ανάληψης και απόρριψης φορτίου που εμφανίζει. Ο περιορισμός αυτός ενεργοποιείται όταν η μονάδα παραμείνει σε λειτουργία για δύο συνεχόμενες ώρες και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$-RATEDN_i \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq RATEUP_i, \quad \forall i \in NT \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.18)$$

όπου οι όροι $RATEDN_i$ και $RATEUP_i$ εκφράζουν, αντίστοιχα, το ρυθμό απόρριψης και ανάληψης φορτίου της θερμικής μονάδας i .

3.3.4. Περιορισμοί υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής

3.3.4.1. Περιορισμός ορίων ενεργού παραγωγής υδροηλεκτρικών σταθμών

Η ενεργός παραγωγή κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού περιορίζεται μεταξύ ενός κάτω ορίου $P_{min,j}$ (τεχνικό ελάχιστο) και ενός άνω ορίου $P_{max,j}$ (τεχνικό μέγιστο), το οποίο ισούται με την ονομαστική ισχύ του σταθμού. Σε πολλές περιπτώσεις, πάντως, το τεχνικό ελάχιστο των υδροηλεκτρικών σταθμών θεωρείται ίσο με 0. Ο περιορισμός αυτός διατυπώνεται ως εξής:

$$ST_{j,t} \cdot P_{min,j} \leq P_{j,t} \leq ST_{j,t} \cdot P_{max,j}, \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.19)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, λόγω της γραμμικής σχέσης (3.2), η τιμή του τεχνικού ελάχιστου και μέγιστου κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού είναι άμεση συνάρτηση του ελάχιστου και μέγιστου ρυθμού εκροής ύδατος του αντίστοιχου ταμιευτήρα.

3.3.4.2. Περιορισμός ρυθμού εκροής ύδατος υδροηλεκτρικών σταθμών

Ο ρυθμός εκροής ύδατος από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό περιορίζεται μεταξύ ενός κάτω ορίου $Q_{min,j}$ και ενός άνω ορίου $Q_{max,j}$. Τα όρια αυτά εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά κάθε σταθμού. Ο περιορισμός του ρυθμού εκροής ύδατος μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$ST_{j,t} \cdot Q_{min,j} \leq Q_{j,t} \leq ST_{j,t} \cdot Q_{max,j}, \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.20)$$

Σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ο ρυθμός εκροής ύδατος ενός υδροηλεκτρικού σταθμού μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια κάθε ώρας. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία τη χρήση ενός μέσου ρυθμού εκροής για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου.

3.3.4.3. Περιορισμός ανάληψης/απόρριψης φορτίου υδροηλεκτρικών σταθμών

Η ικανότητα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού να αυξήσει ή να ελαττώσει την παραγωγή του σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα περιορίζεται από τους ρυθμούς ανάληψης και απόρριψης φορτίου που εμφανίζει. Ο περιορισμός αυτός ενεργοποιείται όταν ο σταθμός παραμένει σε λειτουργία για δύο συνεχόμενες ώρες και μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$-RATEDN_j \leq P_{j,t} - P_{j,t-1} \leq RATEUP_j, \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.21)$$

όπου οι όροι $RATEDN_j$ και $RATEUP_j$ εκφράζουν, αντίστοιχα, το ρυθμό απόρριψης και ανάληψης φορτίου του υδροηλεκτρικού σταθμού j .

3.3.4.4. Περιορισμός ορίων αποθήκευσης ύδατος ταμιευτήρων

Ο υδάτινος όγκος που μπορεί να αποθηκευτεί στον ταμιευτήρα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού περιορίζεται μεταξύ ενός κάτω ορίου $V_{min,j}$ και ενός άνω ορίου $V_{max,j}$. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$V_{min,j} \leq V_{j,t} \leq V_{max,j}, \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.22)$$

όπου $V_{j,t}$ είναι ο όγκος ύδατος που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού σταθμού j στο τέλος της ώρας t .

3.3.4.5. Περιορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης ταμιευτήρων

Η συνολική ποσότητα ύδατος που μπορεί να αξιοποιήσει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου καθορίζεται, συνήθως, από την αρχική και τελική κατάσταση των ταμιευτήρων. Η τελική κατάσταση κάθε ταμιευτήρα αποτελεί το στόχο που πρέπει να επιτευχθεί κατά τον προγραμματισμό των υδροηλεκτρικών σταθμών. Τα στοιχεία αυτά θεωρούνται δεδομένα κατά την επίλυση του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής και εξάγονται από το μεσοπρόθεσμο προγραμματισμό του υδάτινου δυναμικού του συστήματος.

Με βάση τα παραπάνω, ο περιορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων διατυπώνεται ως εξής:

$$V_{j,0} = V_{j,in} \quad \text{και} \quad V_{j,T} = V_{j,fin}, \quad \forall j \in NH \quad (3.23)$$

όπου οι όροι $V_{j,in}$ και $V_{j,fin}$ εκφράζουν τον υδάτινο όγκο που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού σταθμού j στην αρχή και στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού, αντίστοιχα.

3.3.4.6. Περιορισμός διαθέσιμης ενέργειας υδροηλεκτρικών σταθμών

Σε πολλές περιπτώσεις, ο στόχος του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού δεν καθορίζεται από την αρχική και τελική κατάσταση των ταμιευτήρων, αλλά από τη συνολική ενέργεια $E_{tot,j}$ που μπορεί να παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός j κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Η περίπτωση αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\sum_{t=1}^T P_{j,t} = E_{tot,j}, \quad \forall j \in NH \quad (3.24)$$

3.3.4.7. Περιορισμός συνέχειας ροής υδροηλεκτρικών σταθμών

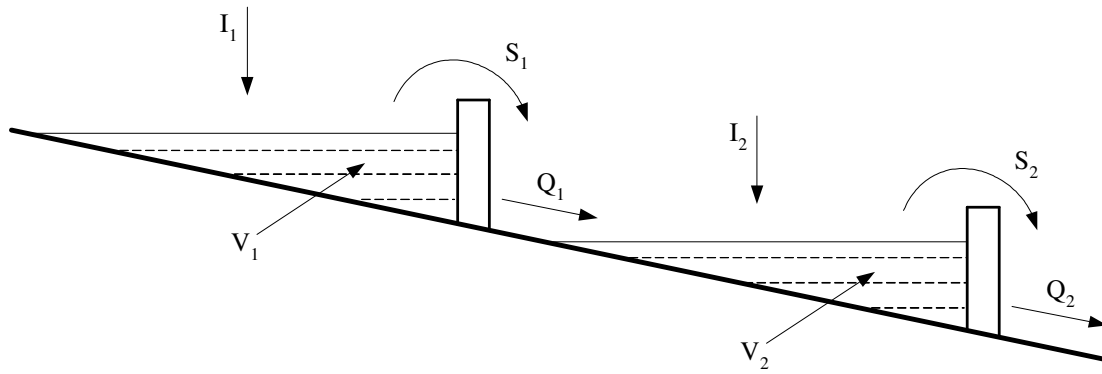
Ο όγκος του ύδατος που είναι αποθηκευμένος στους ταμιευτήρες σε κάθε ώρα της περιόδου προγραμματισμού είναι συνάρτηση των εισροών και εκροών ύδατος των ταμιευτήρων. Αν το υδροηλεκτρικό σύστημα περιλαμβάνει και αλυσσώτα φράγματα, τότε πρέπει να συνυπολογιστούν οι εκροές ύδατος από τους ανάντι υδροηλεκτρικούς σταθμούς που είναι εγκατεστημένοι στη ροή του ίδιου ποταμού, καθώς και η καθυστέρηση της μεταφοράς του ύδατος μεταξύ των σταθμών.

Η περίπτωση των αλυσσωτών φραγμάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3, όπου έχει παραλειφθεί, για λόγους ευκρίνειας, ο δείκτης του χρόνου από όλες τις μεταβλητές.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, ο περιορισμός συνέχειας της ροής μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$V_{j,t} = V_{j,t-1} - Q_{j,t} - S_{j,t} + I_{j,t} + \sum_{k=1}^{UP_j} (Q_{k,t-d_{kj}} + S_{k,t-d_{kj}}), \quad \forall j \in NH \quad \forall t \in [1, T] \quad (3.25)$$

όπου $S_{j,t}$ και $I_{j,t}$ είναι ο ρυθμός υπερχειλίσης και εισροής ύδατος στον ταμιευτήρα του υδροηλεκτρικού σταθμού j κατά τη διάρκεια της ώρας t , αντίστοιχα, UP_j είναι ο αριθμός των ανάντι υδροηλεκτρικών σταθμών του σταθμού j και d_{kj} είναι η καθυστέρηση μεταφοράς ύδατος από τον υδροηλεκτρικό σταθμό k στο σταθμό j .



Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση αλυσσωτών φραγμάτων

Η υπερχειλίση ύδατος πρέπει να αποφεύγεται κατά τον προγραμματισμό λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, καθώς οδηγεί στην απώλεια ύδατος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μαθηματική διατύπωση του ρυθμού υπερχειλίσης ύδατος είναι η ακόλουθη:

$$S_{j,t} = \begin{cases} V_{j,t} - V_{\max,j}, & \text{αν } V_{j,t} > V_{\max,j} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.26)$$

Ο περιορισμός (3.25) παίζει σημαντικό ρόλο στον προγραμματισμό λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, καθώς εξασφαλίζει τη συνέχεια στη ροή του ύδατος για το υδροηλεκτρικό δίκτυο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΗΣ ΑΝΟΠΤΗΣΗΣ

4.1. Φυσικό Ανάλογο

Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης βασίζεται στην αναλογία που υπάρχει ανάμεσα στην προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της ανόπτησης των στερεών σωμάτων και της διαδικασίας επίλυσης δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η φυσική διαδικασία αναφέρεται στη σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου, ξεκινώντας από μια αρχική υψηλή θερμοκρασία, μέχρι το σημείο κατά το οποίο η ενέργεια του συστήματος έχει αποκτήσει την ελάχιστη τιμή της. Η κεντρική ιδέα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης στηρίζεται στον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η κρυσταλλική δομή ενός μετάλλου κατά τη διαδικασία της ανόπτησης. Σε υψηλές θερμοκρασίες το μέταλλο βρίσκεται σε υγρή φάση και συνεπώς τα άτομα του συστήματος είναι ακανόνιστα, ακολουθώντας μια τυχαία διάταξη στο χώρο. Με τη σταδιακή ψύξη του μετάλλου, το σύστημα αποκτά μια πιο κανονικοποιημένη δομή, μέχρι να φθάσει στην τελική στερεά κατάσταση (“frozen” ground state), όπου η ενέργεια του συστήματος έχει ελαχιστοποιηθεί [2]. Το πιο σημαντικό σημείο της μεθόδου εντοπίζεται στην επιλογή ενός αργού ρυθμού ψύξης του μετάλλου, ώστε να επιτυγχάνεται κατάσταση θερμικής ισορροπίας σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας.

Σε πρώτη ανάλυση, δεν γίνεται φανερή η αναλογία που υπάρχει ανάμεσα στη παραπάνω φυσική διαδικασία και στο αντικείμενο της βελτιστοποίησης μαθηματικών προβλημάτων. Ωστόσο, αρχικά οι Metropolis, Rosenbluth και Teller [2] και στη συνέχεια οι Kirkpatrick, Gelatt Jr. και Vecchi [1] πρότειναν έναν πρωτότυπο τρόπο για τη μαθηματική διατύπωση της παραπάνω διαδικασίας και την εφαρμογή της σε δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης. Τα βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης αναλύονται στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου.

4.2. Μοντέλο Διαδικασίας Ανόπτησης

Το 1953 οι Metropolis, Rosenbluth και Teller [2] πρότειναν μια απλή επαναληπτική μέθοδο για την προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της εξέλιξης της κρυσταλλικής δομής ενός μετάλλου σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, για μια συγκεκριμένη τιμή θερμοκρασίας. Σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, ένα τυχαίο άτομο μετατοπίζεται μέσω μιας τυχαίας διαταραχής της υπάρχουσας κατάστασής του και υπολογίζεται η επακόλουθη αλλαγή ΔE στην ενέργεια του συστήματος. Αν $\Delta E \leq 0$, η προτεινόμενη διαταραχή οδηγεί το μέταλλο σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Συνεπώς, η αλλαγή γίνεται αποδεκτή και η νέα διάταξη των ατόμων του συστήματος αποτελεί το σημείο εκκίνησης για το επόμενο βήμα. Στην αντίθετη περίπτωση, η προτεινόμενη αλλαγή δεν απορρίπτεται άμεσα, αλλά μπορεί να γίνει δεκτή με πιθανότητα που δίνεται από την κατανομή του Boltzmann:

$$P(\Delta E) = \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B \cdot Temp}\right) \quad (4.1)$$

όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann και $Temp$ είναι η τρέχουσα τιμή της θερμοκρασίας.

Ένας εύκολος τρόπος για την εφαρμογή του πιθανοτικού αυτού τμήματος του αλγορίθμου είναι η παραγωγή τυχαίων αριθμών ομοιόμορφα κατανομημένων στο διάστημα $(0,1)$. Αφού επιλεγεί ένας τυχαίος αριθμός από αυτή την κατανομή, γίνεται σύγκριση με την πιθανότητα $P(\Delta E)$. Αν ο αριθμός είναι μικρότερος από τη συγκεκριμένη πιθανότητα, η νέα διάταξη των ατόμων αντικαθιστά την υπάρχουσα, διαφορετικά η υπάρχουσα διάταξη χρησιμοποιείται ως σημείο εκκίνησης για το επόμενο στάδιο [2].

Η χρήση του παραπάνω κανόνα για την απόφαση αποδοχής μιας κατάστασης που οδηγεί σε χειρότερο ενεργειακό επίπεδο είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως το κριτήριο του Metropolis. Η υιοθέτηση της πιθανότητας $P(\Delta E)$ αναγκάζει το σύστημα να οδηγηθεί σε μια κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Πιο συγκεκριμένα, μετά από ένα μεγάλο πλήθος διαταραχών η πιθανοτική κατανομή των καταστάσεων (διατάξεων των ατόμων) του συστήματος προσεγγίζει την κατανομή του Boltzmann [2].

Το 1983 οι Kirkpatrick, Gelatt Jr. και Vecchi [1] παρουσίασαν για πρώτη φορά μια επαναληπτική μέθοδο (που ονόμασαν Simulated Annealing), η οποία στηρίζεται στην επαναληπτική χρήση του κριτηρίου του Metropolis για διάφορες θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, η σταδιακή ψύξη ενός μετάλλου ξεκινώντας από μια αρχική υψηλή θερμοκρασία είναι δυνατό να οδηγήσει το σύστημα σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας, το κριτήριο του Metropolis εφαρμόζεται για μια ακολουθία δοκιμών, όπου το αποτέλεσμα της κάθε δοκιμής εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το αποτέλεσμα της αμέσως προηγούμενης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά μέσω μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας, το μήκος της οποίας αντιστοιχεί σε ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η κίνηση των ατόμων του μετάλλου στο στάδιο της θερμικής ισορροπίας. Καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, η κατανομή του Boltzmann οδηγεί σε καταστάσεις με χαμηλότερη ενέργεια. Τελικά, όταν η θερμοκρασία πλησιάσει ασυμπτωτικά το μηδέν, μόνο οι χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις έχουν μη μηδενική πιθανότητα εμφάνισης. Η παραπάνω διαδικασία αναπαρίσταται ιδανικά μέσω της σχέσης (4.1), χάρη στην οποία η πιθανότητα αποδοχής υψηλότερων ενεργειακών διατάξεων είναι μεγάλη στις υψηλές θερμοκρασίες, αλλά μειώνεται παράλληλα με τη θερμοκρασία (σύγκλιση στη βέλτιστη κατάσταση).

Εξομοιώνοντας την παραπάνω διαδικασία με το πρόβλημα ελαχιστοποίησης συναρτήσεων, είναι δυνατό να επιλυθεί ένας μεγάλος αριθμός συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, ακολουθώντας την ίδια διαδικασία μετάβασης από μια κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη και αναζητώντας την ελάχιστη ενεργειακή κατάσταση του συστήματος.

4.3. Χρήση της Μεθόδου σε Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, τα τελευταία κυρίως χρόνια, για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο φάσμα προβλημάτων, ανεξάρτητα από τη δομή της αντικειμενικής συνάρτησης και το είδος των θεωρούμενων περιορισμών. Η εφαρμογή της μεθόδου στηρίζεται κυρίως στην εύρεση μιας αναλογίας μεταξύ των παραμέτρων που

περιγράφουν τη φυσική διαδικασία της ανόπτησης των μετάλλων και της μαθηματικής διατύπωσης του εξεταζόμενου προβλήματος βελτιστοποίησης.

Όπως προαναφέρθηκε, η φυσική διαδικασία της προσομοιωμένης ανόπτησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας του συστήματος. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, η ενέργεια των ατόμων αντιστοιχεί στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της τρέχουσας λύσης. Συνεπώς, η τελική κατάσταση στην οποία οδηγείται το φυσικό σύστημα ισοδυναμεί με την εύρεση της βέλτιστης λύσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Επιπλέον, η θερμοκρασία παίζει το ρόλο της παραμέτρου ελέγχου της συνολικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας σχετίζεται άμεσα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ενώ η σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας ρυθμίζει τη σύγκλιση της μεθόδου.

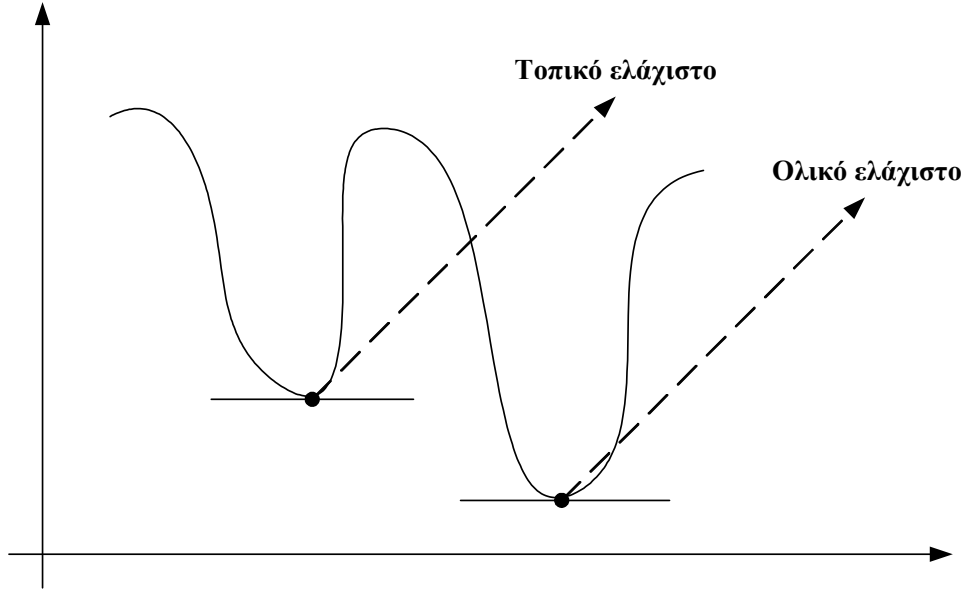
Σύμφωνα, λοιπόν, με τις παραπάνω αναλογίες, η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος βελτιστοποίησης ακολουθώντας τα εξής γενικά βήματα:

- Βήμα 1. Εύρεση μιας τυχαίας αρχικής λύσης και καθορισμός της αρχικής τιμής της παραμέτρου της θερμοκρασίας.
- Βήμα 2. Εύρεση μιας γειτονικής λύσης μέσω μικρής διαταραχής της τρέχουσας λύσης.
- Βήμα 3. Εφαρμογή του κριτηρίου του Metropolis, ώστε να αποφασιστεί αν η τρέχουσα λύση θα γίνει αποδεκτή ή όχι.
- Βήμα 4. Μέχρι να συμπληρωθεί ο απαιτούμενος αριθμός επαναλήψεων (μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας) επαναλαμβάνονται τα Βήματα 2 και 3.
- Βήμα 5. Η τελευταία αποδεκτή λύση για την τρέχουσα θερμοκρασία αποτελεί την αρχική λύση για το επόμενο στάδιο. Η θερμοκρασία μειώνεται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (ξεκινώντας από το Βήμα 2) μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού.

Προκειμένου να εφαρμοστεί το κριτήριο του Metropolis στο τρίτο βήμα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, απαιτείται ο υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης της τρέχουσας λύσης. Η υποψήφια λύση γίνεται αποδεκτή εφόσον οδηγεί σε μείωση της τιμής της συνάρτησης. Σε διαφορετική περίπτωση, υπολογίζεται η διαφορά της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ΔC της υποψήφιας λύσης από την τρέχουσα και παράγεται ένας τυχαίος αριθμός από την ομοιόμορφη κατανομή $U(0,1)$. Αν $\exp(-\Delta C/Temp) \geq U(0,1)$, η υποψήφια λύση γίνεται δεκτή και αντικαθιστά την τρέχουσα, διαφορετικά απορρίπτεται. Ο όρος $Temp$ της παραπάνω σχέσης αντιστοιχεί στην τρέχουσα τιμή της θερμοκρασίας.

Η πιθανοτική αποδοχή λύσεων που οδηγούν σε αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί τον πυρήνα ολόκληρης της μεθόδου. Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι περισσότερες ευρετικές μέθοδοι ελαχιστοποίησης είναι ότι συγκλίνουν σε διάφορα τοπικά ελάχιστα, ιδιαίτερα αν η εξεταζόμενη αντικειμενική συνάρτηση εμφανίζει αρκετά τέτοια σημεία (Σχήμα 4.1). Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμη μεγαλύτερο για τις μεθόδους που στηρίζονται στη παραγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης, αφού η παράγωγος της συνάρτησης στα τοπικά ελάχιστα είναι μηδενική. Αντίθετα, ο τρόπος αναζήτησης που χρησιμοποιεί η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης έχει τη δυνατότητα να ξεφεύγει από τις περιοχές των τοπικών ελαχίστων, αφού επιτρέπει την αποδοχή χειρότερων λύσεων (με ορισμένη

πιθανότητα), με σκοπό να οδηγηθεί τελικά στη βέλτιστη λύση. Άλλωστε, αποδεικνύεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει ασυμπτωτικά (για πολύ μεγάλο αριθμό επαναλήψεων) την ελάχιστη τιμή μιας συνάρτησης με πιθανότητα 1 [30].



Σχήμα 4.1: Σχηματική απεικόνιση συνάρτησης με τοπικά ελάχιστα

4.4. Μαθηματική Απόδειξη Σύγκλισης της Μεθόδου

Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, συγκριτικά με τις άλλες ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης, είναι ότι μπορεί να αποδειχθεί μαθηματικά η ασυμπτωτική σύγκλισή της στη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύντομη ανάλυση της εν λόγω μαθηματικής απόδειξης, η οποία περιγράφεται λεπτομερώς στην αναφορά [30].

Όπως προαναφέρθηκε, η μέθοδος της προσομοιωμένης ανόπτησης συνίσταται σε μια αλληλουχία Μαρκοβιανών αλυσίδων. Κάθε αλυσίδα περιγράφεται από μια ομάδα δεσμευμένων πιθανοτήτων $P_{ij}(k-1, k)$ για κάθε ζεύγος ενδεχομένων (i, j) . Η έκφραση $P_{ij}(k-1, k)$ ορίζει την πιθανότητα μετάβασης από την κατάσταση i στην κατάσταση j κατά το στάδιο k της μεθόδου. Θεωρώντας ότι $a_i(k)$ είναι η πιθανότητα εμφάνισης της κατάστασης i κατά τη δοκιμή k , ισχύει ότι:

$$a_i(k) = \sum_l a_l(k-1) \cdot P_{li}(k-1, k), \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

όπου το άθροισμα λαμβάνει υπόψη όλα τα πιθανά ενδεχόμενα l . Αν, λοιπόν, θεωρήσουμε ότι $X(k)$ είναι η κατάσταση στην οποία καταλήγει η μέθοδος μετά από k διαδοχικές μεταβάσεις, ισχύει ότι:

$$P_{ij}(k-1, k) = \Pr\{X(k) = j \mid X(k-1) = i\} \quad (4.3)$$

$$a_i(k) = \Pr\{X(k) = i\} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση της προσομοιωμένης ανόπτησης, η πιθανότητα μετάβασης εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου της θερμοκρασίας $Temp$. Συνεπώς, αν η θερμοκρασία διατηρηθεί σταθερή, η Μαρκοβιανή αλυσίδα που προκύπτει είναι

ομογενής (homogenous) και ο πίνακας μετάβασης $P(Temp)$ σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας ορίζεται ως εξής:

$$P_{ij}(Temp) = \begin{cases} G_{ij}(Temp) \cdot A_{ij}(Temp), & \forall j \neq i \\ 1 - \sum_{l=1, l \neq i}^{|R|} [G_{il}(Temp) \cdot A_{il}(Temp)], & j = i \end{cases} \quad (4.5)$$

όπου G_{ij} είναι η πιθανότητα παραγωγής της κατάστασης j από την κατάσταση i και A_{ij} είναι η πιθανότητα αποδοχής της κατάστασης j εφόσον έχει παραχθεί από την κατάσταση i . Η πιθανότητα G_{ij} δίνεται από την ομοιόμορφη κατανομή (η παραγωγή της κατάστασης j στηρίζεται στην πρόκληση μιας τυχαίας μικρής διαταραχής στην υπάρχουσα κατάσταση i) και η πιθανότητα A_{ij} δίνεται από το κριτήριο του Metropolis:

$$A_{ij}(Temp) = \min\{1, \exp\left[-\frac{(C(j) - C(i))}{Temp}\right]\} \quad (4.6)$$

όπου $C(x)$ είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για την κατάσταση x .

Με βάση τα παραπάνω, η μαθηματική απόδειξη της ασυμπτωτικής σύγκλισης της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης σε ένα ολικό ελάχιστο στηρίζεται στην ικανοποίηση της ακόλουθης συνθήκης:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{X(k) \in R_{opt}\} = 1 \quad (4.7)$$

όπου R_{opt} είναι το σύνολο των ολικά βέλτιστων καταστάσεων, δεδομένου ότι ένα πρόβλημα μπορεί να έχει πολλαπλές βέλτιστες λύσεις που οδηγούν στην ίδια τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μια τυχαία λύση του συνόλου R_{opt} . Όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, κάθε δυνατή βέλτιστη λύση παρουσιάζει την ίδια πιθανότητα εμφάνισης (ομοιόμορφη κατανομή) στο τελικό στάδιο της μεθόδου.

Η σχέση (4.7) ικανοποιείται εφόσον:

1. κάθε Μαρκοβιανή αλυσίδα έχει άπειρο μήκος,
2. οι πίνακες $A(Temp)$ και $G(Temp)$ ικανοποιούν συγκεκριμένες συνθήκες και
3. η τιμή της θερμοκρασίας τείνει ασυμπτωτικά στο μηδέν.

Σημαντικό ρόλο στην απόδειξη της σύγκλισης της μεθόδου παίζει το γεγονός ότι, υπό συγκεκριμένες συνθήκες, μπορεί να βρεθεί η στάσιμη κατανομή μιας ομογενούς Μαρκοβιανής αλυσίδας, η οποία ορίζεται από έναν πίνακα q που περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_i = \lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{X(k) = i \mid X(0) = j\} = \lim_{k \rightarrow \infty} [a(0)^T \cdot P^k] \quad (4.8)$$

για ένα τυχαίο j , όπου ο όρος $a(0)^T$ εκφράζει την αρχική πιθανοτική κατανομή, δηλαδή $a(0) = (a_i(0))$, $i \in \mathcal{R}$ και:

$$\forall i \in \mathcal{R}: a_i(0) \geq 0, \sum_{i \in \mathcal{R}} a_i(0) = 1 \quad (4.9)$$

Επειδή η πιθανότητα P εξαρτάται από τη θερμοκρασία $Temp$, συνεπάγεται ότι και η στάσιμη κατανομή q εξαρτάται από τη θερμοκρασία, δηλαδή $q = q(Temp)$.

Η στάσιμη κατανομή q μιας πεπερασμένης ομογενούς Μαρκοβιανής αλυσίδας υφίσταται εφόσον η αλυσίδα είναι ανάγωγη (irreducible) και απεριοδική (aperiodic).

Η πρώτη συνθήκη (irreducibility) ορίζει ότι για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς καταστάσεων (i, j) , υπάρχει θετική πιθανότητα ($P_{ij} > 0$) η κατάσταση i να οδηγήσει στην κατάσταση j μετά από ένα πεπερασμένο αριθμό μεταβάσεων. Όμως, η πιθανότητα A_{ij} , η οποία δίνεται από τη σχέση (4.6), είναι μεγαλύτερη του μηδενός για κάθε ζεύγος (i, j) αν $Temp > 0$. Σύμφωνα, λοιπόν, με τη σχέση (4.5), η πρώτη συνθήκη ικανοποιείται εφόσον:

$$\begin{aligned} \forall i, j \in \mathcal{R} \quad \exists p \geq 1 \quad \exists l_0, l_1, \dots, l_p \in \mathcal{R} \quad (l_0 = i \wedge l_p = j) : \\ G_{l_k l_{k+1}}(Temp) > 0, \quad k = 0, 1, \dots, p-1 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Η δεύτερη συνθήκη (aperiodicity) ορίζει ότι:

$$\forall Temp > 0 \quad \exists i \in \mathcal{R} : P_{ii}(Temp) > 0 \quad (4.11)$$

Συνεπώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η δεύτερη συνθήκη ικανοποιείται εφόσον ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\forall Temp > 0 \quad \exists i, j \in \mathcal{R} : A_{ij}(Temp) < 1 \wedge G_{ij}(Temp) > 0 \quad (4.12)$$

Η ικανοποίηση των συνθηκών (4.10) και (4.12) αποδεικνύεται άμεσα από τη μορφή των πιθανοτήτων G_{ij} και A_{ij} . Συνεπώς, η ομογενής Μαρκοβιανή αλυσίδα που ορίζεται από τις δεσμευμένες πιθανότητες (4.5) έχει στάσιμη κατανομή $q(Temp)$, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$q_i(Temp) = \frac{A_{i_0 i}(Temp)}{\sum_{j \in \mathcal{R}} A_{i_0 j}(Temp)} = \frac{\exp[-(C(i) - C_{opt})/Temp]}{\sum_{j \in \mathcal{R}} \exp[-(C(j) - C_{opt})/Temp]} \quad (4.13)$$

για κάθε τυχαίο $i_0 \in R_{opt}$, όπου C_{opt} είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τη βέλτιστη λύση.

Επιπλέον, η χρήση της σχέσης (4.6) για τον ορισμό της πιθανότητας A_{ij} εγγυάται την ικανοποίηση των ακόλουθων συνθηκών:

$$\forall i, j \in \mathcal{R} : C(i) \geq C(j) \Rightarrow A_{ij}(Temp) = 1 \quad (4.14)$$

$$\forall i, j \in \mathcal{R} : C(i) < C(j) \Rightarrow \lim_{Temp \downarrow 0} A_{ij}(Temp) = 0 \quad (4.15)$$

Από το συνδυασμό των σχέσεων (4.13)-(4.15) προκύπτει ότι η στάσιμη κατανομή $q(Temp)$ συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μια ομοιόμορφη κατανομή π του συνόλου των ολικά βέλτιστων καταστάσεων, δηλαδή:

$$\lim_{Temp \downarrow 0} q(Temp) = \pi \quad (4.16)$$

όπου:

$$\pi_i = \begin{cases} |R_{opt}|^{-1} & \text{αν } i \in R_{opt} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (4.17)$$

Ο συνδυασμός των εξισώσεων (4.8) και (4.16) οδηγεί στην ακόλουθη σχέση:

$$\lim_{Temp \downarrow 0} [\lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{X(k) = i\}] = \pi_i \Rightarrow \lim_{Temp \downarrow 0} [\lim_{k \rightarrow \infty} \Pr\{X(k) \in R_{opt}\}] = 1 \quad (4.18)$$

Με τον τρόπο αυτό αποδεικνύεται ότι η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης συγκλίνει ασυμπτωτικά σε μια βέλτιστη λύση.

4.5. Παράμετροι Ελέγχου της Μεθόδου

Από την προηγούμενη ανάλυση γίνεται φανερό ότι η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης εξαρτάται άμεσα από την προσεκτική επιλογή και ρύθμιση των παρακάτω βασικών παραμέτρων ελέγχου:

- Αρχική θερμοκρασία – η επιλογή μιας υψηλής αρχικής τιμής για τη θερμοκρασία επιτρέπει την εκτενή διερεύνηση του χώρου των λύσεων.
- Ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας – η αργή μείωση της θερμοκρασίας αποτρέπει την πρόωμη σύγκλιση σε τοπικά ελάχιστα.
- Μήκος Μαρκοβιανής αλυσίδας – η αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων σε κάθε θερμοκρασία βελτιώνει τη σύγκλιση της μεθόδου, αλλά αυξάνει τις υπολογιστικές απαιτήσεις της.
- Κριτήρια τερματισμού – τα πιο συνηθισμένα κριτήρια είναι η χρήση ενός κατώτατου ορίου για την τελική θερμοκρασία και ο έλεγχος για τον αριθμό των διαδοχικών Μαρκοβιανών αλυσίδων χωρίς αποδοχή οποιασδήποτε υποψήφιας λύσης.

Η ρύθμιση των παραπάνω παραμέτρων είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που έχει στόχο την επίτευξη της σύγκλισης της μεθόδου στη βέλτιστη λύση σε όσο το δυνατό μικρότερο υπολογιστικό χρόνο. Άλλωστε, το βασικό μειονέκτημα των περισσότερων μεθόδων προσομοιωμένης ανόπτησης είναι οι μεγάλες υπολογιστικές απαιτήσεις, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις αυξάνουν εκθετικά με τον αριθμό των μεταβλητών του προβλήματος.

4.5.1. Αρχική θερμοκρασία

Το πιο σημαντικό βήμα για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης είναι η σωστή επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας. Σε θεωρητικό επίπεδο, η αρχική τιμή της θερμοκρασίας πρέπει να καθορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε στο αρχικό στάδιο της μεθόδου να γίνονται αποδεκτές όλες οι υποψήφιες λύσεις. Επειδή, όμως, η επιλογή μιας πολύ υψηλής αρχικής θερμοκρασίας συντελεί σε σημαντική αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου, οι περισσότερες μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τον καθορισμό αυτής της παραμέτρου αποσκοπούν στην εύρεση μιας συμβιβαστικής λύσης.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αρχική θερμοκρασία υπολογίζεται πειραματικά με πολλαπλές εκτελέσεις της μεθόδου, ώστε να εντοπιστεί η τιμή της θερμοκρασίας που

οδηγεί σε κάποιο συγκεκριμένο ποσοστό αποδεκτών λύσεων στο αρχικό στάδιο. Συνήθως, όμως, η επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας γίνεται με εντελώς αυθαίρετο τρόπο [37,39,64,66,67].

Μια εναλλακτική λύση αποτελεί η δοκιμαστική εκτέλεση του πρώτου σταδίου της μεθόδου σε μια τυχαία θερμοκρασία και η χρήση του ακόλουθου τύπου για τον υπολογισμό της αρχικής τιμής της θερμοκρασίας $Temp_0$ [38]:

$$Temp_0 = \frac{\Delta f}{\ln\left(\frac{m_2}{m_2 \cdot X_{in} - m_1 \cdot (1 - X_{in})}\right)} \quad (4.19)$$

όπου X_{in} είναι το επιθυμητό ποσοστό αποδεκτών λύσεων στο αρχικό στάδιο, m_1 είναι το πλήθος των λύσεων του δοκιμαστικού σταδίου που οδήγησαν σε μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης της εκάστοτε τρέχουσας λύσης, m_2 είναι το πλήθος των υπόλοιπων λύσεων και Δf είναι η μέση αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που παρατηρήθηκε κατά την αποδοχή των m_2 λύσεων.

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι η παραγωγή m αρχικών λύσεων και ο καθορισμός της αρχικής θερμοκρασίας μέσω της παρακάτω σχέσης [65]:

$$Temp_0 = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{m/2} \quad (4.20)$$

όπου $C_{\max}$ και $C_{\min}$ είναι η υψηλότερη και η χαμηλότερη, αντίστοιχα, τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ανάμεσα στις m αρχικές λύσεις.

Σύμφωνα με μια άλλη θεώρηση, αν χρησιμοποιηθεί αρχικά μια σχετικά υψηλή θερμοκρασία και υπολογιστεί η μέση αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ΔC_{av} για τις υποψήφιες λύσεις που παράγονται σε μια Μαρκοβιανή αλυσίδα, τότε η αρχική θερμοκρασία μπορεί να καθοριστεί μέσω του τύπου [30]:

$$Temp_0 = \Delta C_{av} / \ln(X_{in}^{-1}) \quad (4.21)$$

Προφανώς, είναι δύσκολο να υποστηριχθεί ότι κάποια από τις παραπάνω διαδικασίες υπερτερεί απέναντι στις υπόλοιπες.

4.5.2. Ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας

Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος βελτιστοποίησης βασίζεται κατά μεγάλο ποσοστό στη χρήση μιας αποτελεσματικής διαδικασίας για τη μείωση της θερμοκρασίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η επιλογή ενός πολύ αργού ρυθμού μείωσης της θερμοκρασίας αποτρέπει την πρόωπη σύγκλιση σε τοπικά ελάχιστα, αλλά οδηγεί στην αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου.

Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι η χρήση της σχέσης [37,39,64-67]:

$$Temp_{k+1} = a \cdot Temp_k \quad (4.22)$$

η οποία μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

$$Temp_k = Temp_0 \cdot a^k \quad (4.23)$$

όπου $Temp_k$ είναι η τιμή της θερμοκρασίας κατά το στάδιο k και a είναι μια σταθερά που παίρνει τιμές λίγο μικρότερες από τη μονάδα.

Εκτός από τη σχέση (4.22), η οποία αποτελεί μια απλή αλλά αξιόπιστη λύση, έχουν εφαρμοστεί πολλοί ακόμη τύποι για τη μείωση της θερμοκρασίας, όπως οι ακόλουθοι [31]:

$$Temp_k = Temp_0 / \ln k \quad (4.24)$$

$$Temp_k = Temp_0 \cdot \exp[(c-1) \cdot k], \quad 0 < c < 1 \quad (4.25)$$

$$Temp_k = Temp_0 / k \quad (4.26)$$

Η σχέση (4.24) διασφαλίζει τη σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, ωστόσο δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα μεγάλων διαστάσεων. Αντίθετα, η σχέση (4.26) οδηγεί σε πολύ απότομη μείωση της θερμοκρασίας, δημιουργώντας τον κίνδυνο πρόωμης σύγκλισης σε τοπικά ελάχιστα.

4.5.3. Μήκος Μαρκοβιανής αλυσίδας

Μια ακόμη βασική παράμετρος ελέγχου της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης είναι το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας. Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική, η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου είναι ανάλογη με τον αριθμό των μεταβλητών του εξεταζόμενου προβλήματος βελτιστοποίησης και παραμένει σταθερή για κάθε τιμή της θερμοκρασίας [30].

Στις περισσότερες περιπτώσεις, το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας καθορίζεται πειραματικά με πολλαπλές εκτελέσεις της μεθόδου. Η πειραματική διαδικασία στοχεύει στον εντοπισμό του αριθμού των επαναλήψεων που παρέχει τη δυνατότητα εκτενούς διερεύνησης της γειτονιάς της εκάστοτε τρέχουσας λύσης. Ωστόσο, η επιλογή μιας πολύ μεγάλης τιμής για το μήκος της αλυσίδας (αναγκαίο σε προβλήματα μεγάλων διαστάσεων) οδηγεί σε σημαντική αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Το ζητούμενο, λοιπόν, είναι να επιτευχθεί σύγκλιση της μεθόδου με όσο το δυνατό μικρότερο αριθμό επαναλήψεων σε κάθε θερμοκρασία.

4.5.4. Κριτήρια τερματισμού

Ανεξάρτητα από το κριτήριο τερματισμού που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η τελική τιμή της θερμοκρασίας πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να επιτευχθεί η σύγκλιση της μεθόδου στη βέλτιστη λύση. Συχνά, όμως, η συνέχιση της μεθόδου μετά από ένα συγκεκριμένο στάδιο οδηγεί σε πολύ μικρή βελτίωση της λύσης, αυξάνοντας δυσανάλογα τον υπολογιστικό χρόνο. Για το λόγο αυτό, έχουν υιοθετηθεί διάφορα κριτήρια τερματισμού, όπως η χρήση ενός ανώτατου ορίου για τον αριθμό των διαδοχικών Μαρκοβιανών αλυσίδων χωρίς αποδοχή οποιασδήποτε υποψήφιας λύσης [37], η υπέρβαση ενός μέγιστου αριθμού επαναλήψεων [39,64] και η χρήση ενός κατώτατου ορίου για τη θερμοκρασία [66,67]. Βέβαια, σε πολλές περιπτώσεις γίνεται συνδυαστική χρήση των παραπάνω κριτηρίων.

Ένα εναλλακτικό κριτήριο τερματισμού στηρίζεται στον έλεγχο ικανοποίησης της παρακάτω σχέσης [38]:

$$\left. \frac{Temp_k}{\langle f \rangle_\infty} \cdot \frac{\partial \langle f \rangle_{Temp}}{\partial Temp} \right|_{Temp_k} < \varepsilon, \quad \langle f \rangle_\infty \approx \langle f \rangle_{Temp_0} \quad (4.27)$$

όπου $\langle f \rangle_{Temp}$ είναι η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αναφορικά με τις λύσεις που παράγονται στη θερμοκρασία $Temp$ και ε είναι μια πολύ μικρή θετική σταθερά. Στη σχέση (4.27) λαμβάνεται υπόψη ο ρυθμός μεταβολής της μέσης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας. Συνεπώς, το συγκεκριμένο κριτήριο τερματισμού στηρίζεται στη θεώρηση ότι στο τελικό στάδιο της μεθόδου (σύγκλιση στη βέλτιστη λύση) δεν υφίσταται σημαντική διακύμανση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

5.1. Γενικά

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Στόχος της μεθόδου είναι ο καθορισμός του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων ενός συστήματος παραγωγής, καθώς και της ενεργού παραγωγής κάθε μονάδας για κάθε ώρα της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος. Η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος υπόκειται στους περιορισμούς του θερμικού συστήματος παραγωγής, οι οποίοι περιγράφηκαν στο τρίτο κεφάλαιο της διατριβής.

Η προτεινόμενη μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο τις θερμικές μονάδες παραγωγής. Συνεπώς, θεωρείται ότι η υδροηλεκτρική παραγωγή σε κάθε ώρα της περιόδου έχει ήδη καθοριστεί και οι θερμικές μονάδες καλούνται να εξυπηρετήσουν ένα ισοδύναμο θερμικό φορτίο. Το πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού λειτουργίας των υδροηλεκτρικών μονάδων αντιμετωπίζεται με τη βελτιωμένη μέθοδο αποκοπής αιχμών, η οποία αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η μη γραμμική φύση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής, καθώς και η συνύπαρξη διακριτών και συνεχών μεταβλητών δυσχεραίνουν ιδιαίτερα την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Ωστόσο, η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης, η γενική μορφή της οποίας περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίζει μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης χωρίς να επηρεάζεται από τη μορφή των θεωρούμενων περιορισμών. Το γεγονός αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη μέθοδο ιδιαίτερα αποτελεσματική για την επίλυση πολύπλοκων, συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Δεδομένου, λοιπόν, ότι το συνολικό πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής συνίσταται στην ταυτόχρονη επίλυση δύο βασικών υποπροβλημάτων, αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης για την εύρεση του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων, ενώ το υποπρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου λύνεται μέσω τετραγωνικού ή γραμμικού προγραμματισμού, ανάλογα με τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά βήματα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και αναλύονται τα θέματα που σχετίζονται με την εφαρμογή της για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

5.2. Περιγραφή της Μεθόδου Επίλυσης του Προβλήματος

Η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, συνδυασμένης με μια τεχνική τοπικής αναζήτησης.

Με βάση την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, η εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης στηρίζεται στην προσομοίωση της φυσικής διαδικασίας της ανόπτησης των μετάλλων, η οποία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας του συστήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ενέργεια των ατόμων του μετάλλου αντιστοιχεί στο συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος.

Επιπλέον, κάθε διάταξη των ατόμων του φυσικού συστήματος αντιστοιχεί στην τρέχουσα λύση του προβλήματος. Ουσιαστικά, κάθε λύση αποτελείται από ένα συγκεκριμένο πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων, το οποίο περιγράφεται από ένα συνδυασμό μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Δεδομένου ότι η κατάσταση λειτουργίας κάθε μονάδας δίνεται από μια δυαδική μεταβλητή που παίρνει τιμές 0 (αν η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας) και 1 (αν η μονάδα είναι εντός), γίνεται σαφές ότι κάθε υποψήφια λύση μπορεί να παρασταθεί από ένα δυαδικό πίνακα. Το πλήθος των στοιχείων (0 ή 1) του πίνακα αυτού ισούται με το γινόμενο του αριθμού των ωρών της περιόδου επί το πλήθος των θερμικών μονάδων του συστήματος.

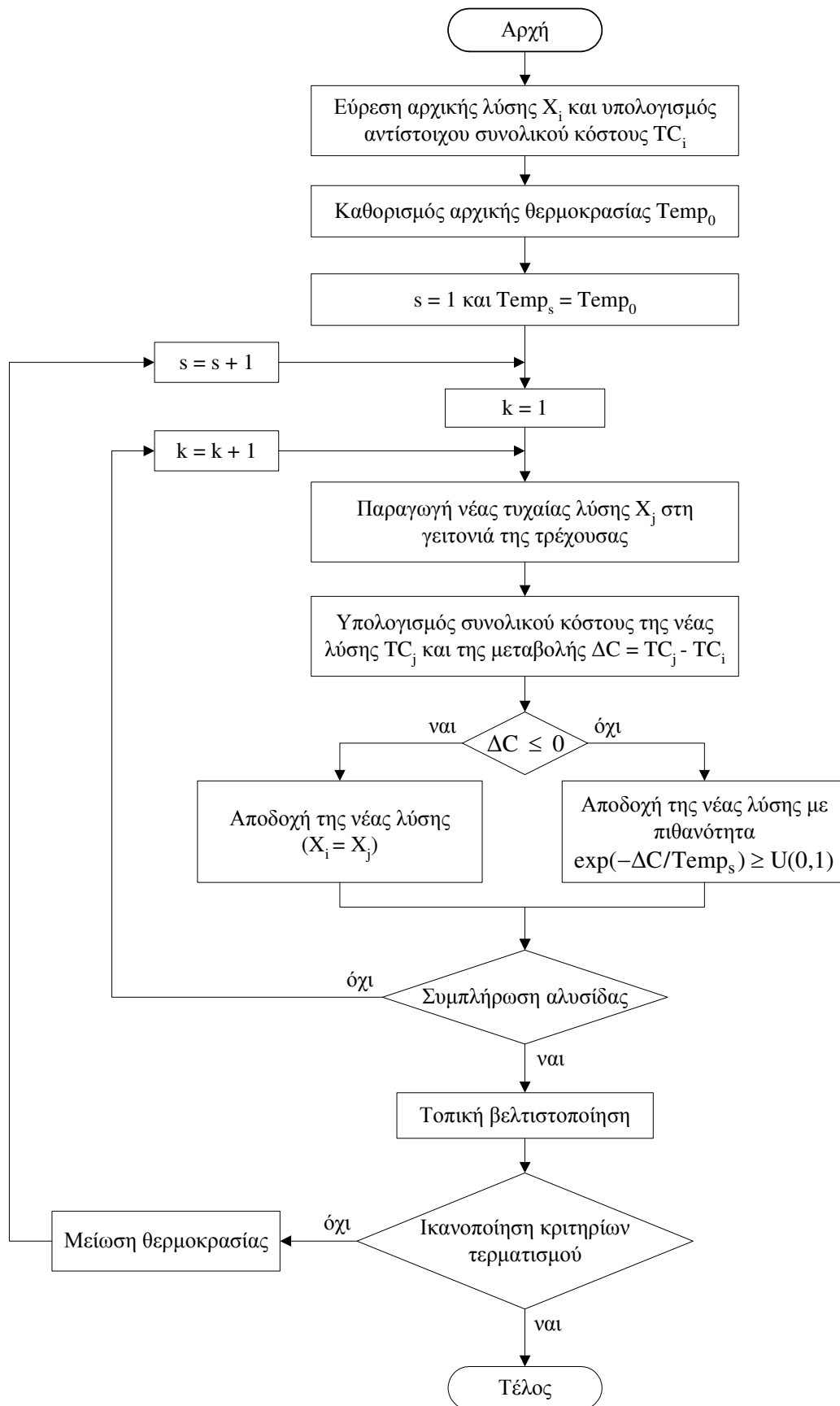
Η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης αποτελείται από δύο επαναληπτικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία (εξωτερική) αναφέρεται στην παραγωγή διαδοχικών Μαρκοβιανών αλυσίδων σταθερού μήκους. Σε κάθε Μαρκοβιανή αλυσίδα εκτελείται μια δεύτερη επαναληπτική διαδικασία (εσωτερική), η οποία σχετίζεται με την παραγωγή διαδοχικών υποψήφιας λύσεων, μέσω της πρόκλησης μιας μικρής διαταραχής στην εκάστοτε τρέχουσα λύση. Η παράμετρος της θερμοκρασίας διατηρείται σταθερή για κάθε αλυσίδα (ομογενής αλγόριθμος), ενώ μειώνεται σταδιακά στο επίπεδο της εξωτερικής επαναληπτικής διαδικασίας.

Σε κάθε βήμα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης παράγονται τυχαία νέες υποψήφιες λύσεις και ελέγχεται η ικανοποίηση των περιορισμών (3.10), (3.13), (3.16) και (3.17). Σε περίπτωση που μια υποψήφια λύση οδηγεί σε παραβίαση οποιουδήποτε από τους παραπάνω περιορισμούς, η λύση απορρίπτεται και ακολουθεί η παραγωγή μιας νέας τυχαίας λύσης. Για κάθε εφικτή υποψήφια λύση, πραγματοποιείται οικονομική κατανομή φορτίου, ανεξάρτητα για κάθε ώρα της περιόδου κατανομής, με τη βοήθεια τετραγωνικού ή γραμμικού προγραμματισμού, ανάλογα με τη μορφή της συνάρτησης κόστους κυσίμου των θερμικών μονάδων. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η ικανοποίηση των περιορισμών (3.9) και (3.15), ενώ παράλληλα υπολογίζεται το συνολικό κόστος TC της εκάστοτε τρέχουσας λύσης μέσω της σχέσης (3.8).

Ο συνυπολογισμός των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας δυναμικής μεθόδου, η οποία επιτρέπει την ανεξάρτητη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου.

Προκειμένου να επιταχυνθεί η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, γίνεται χρήση μιας μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης, η οποία αποσκοπεί στη βελτίωση της τελευταίας λύσης που γίνεται αποδεκτή σε κάθε θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.



Σχήμα 5.1: Γενικό διάγραμμα μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης

Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά βήματα της μεθόδου περιγράφονται ως εξής:

- Βήμα 1. Εύρεση, με τυχαίο τρόπο, μιας εφικτής αρχικής λύσης, η οποία ορίζεται ως η τρέχουσα λύση X_i . Εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου και υπολογισμός του συνολικού κόστους του συστήματος για τη συγκεκριμένη λύση. Υπολογισμός του κόστους εκκίνησης μέσω της σχέσης (3.6) ή (3.7) και του συνολικού κόστους TC_i μέσω της σχέσης (3.8).
- Βήμα 2. Καθορισμός της αρχικής τιμής της θερμοκρασίας $Temp_0$.
- Βήμα 3. Αρχικοποίηση του εξωτερικού δείκτη επαναλήψεων $s = 1$ και ορισμός $Temp_s = Temp_0$.
- Βήμα 4. Αρχικοποίηση του εσωτερικού δείκτη επαναλήψεων $k = 1$.
- Βήμα 5. Εύρεση μιας γειτονικής εφικτής λύσης X_j μέσω μιας τυχαίας διαταραχής της τρέχουσας λύσης.
- Βήμα 6. Εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου και υπολογισμός του νέου συνολικού κόστους TC_j .
- Βήμα 7. Έλεγχος αποδοχής της νέας υποψήφιας λύσης:

- Αν $TC_j \leq TC_i$, η νέα λύση γίνεται αποδεκτή, οπότε τίθεται $X_i = X_j$ και $TC_i = TC_j$ και εκτελείται το επόμενο βήμα.
- Αν $TC_j > TC_i$, εφαρμόζεται το κριτήριο του Metropolis. Υπολογίζεται η μεταβολή του κόστους $\Delta C = TC_j - TC_i$ και παράγεται ένας τυχαίος αριθμός από την ομοιόμορφη κατανομή $U(0,1)$. Αν:

$$\exp(-\Delta C/Temp_s) \geq U(0,1) \quad (5.1)$$

η νέα λύση X_j γίνεται αποδεκτή, διαφορετικά η λύση X_i διατηρείται ως τρέχουσα λύση.

- Βήμα 8. Αν η τιμή του k είναι μικρότερη από το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας, αυξάνεται ο εσωτερικός δείκτης επαναλήψεων $k = k + 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 5, διαφορετικά εκτελείται το Βήμα 9.
- Βήμα 9. Τοπική βελτιστοποίηση στη γειτονιά της τελευταίας αποδεκτής λύσης.
- Βήμα 10. Έλεγχος κριτηρίων τερματισμού:
- Αν δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια τερματισμού, μειώνεται η τρέχουσα τιμή της θερμοκρασίας $Temp_s$ και εκτελείται το επόμενο βήμα.
 - Αν ικανοποιούνται τα κριτήρια τερματισμού, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 12.

- Βήμα 11. Αυξάνεται ο εξωτερικός δείκτης επαναλήψεων $s = s + 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 4.

- Βήμα 12. Τερματισμός της μεθόδου. Η τελική λύση έχει εντοπιστεί.

Η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης εξαρτάται άμεσα από τη διαδικασία παραγωγής τυχαίων υποψήφιων λύσεων. Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η κατάλληλη ρύθμιση των εξής παραμέτρων ελέγχου: αρχική τιμή και ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας και μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας. Τα θέματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με ιδιαίτερη επιτυχία, όπως φαίνεται στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου.

5.3. Μέθοδοι Παραγωγής Υποψήφιων Λύσεων

Σε κάθε στάδιο της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης απαιτείται η παραγωγή τυχαίων λύσεων, οι οποίες γίνονται αποδεκτές ή όχι σύμφωνα με το κριτήριο του Metropolis. Κάθε νέα υποψήφια λύση (πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων) πρέπει να βρίσκεται στη γειτονιά της εκάστοτε τρέχουσας, δηλαδή να προκύπτει από μια μικρή διαταραχή της τρέχουσας λύσης.

Η προτεινόμενη μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης κάνει συνδυαστική χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων για την παραγωγή εφικτών υποψήφιων λύσεων. Η βασική διαφοροποίηση των δύο πρώτων μεθόδων έγκειται στην κατεύθυνση της αναζήτησης που πραγματοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό πεδίο λύσεων του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής μπορεί να απεικονιστεί σε ένα σύστημα δύο αξόνων, όπου ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στις θερμικές μονάδες του συστήματος και ο οριζόντιος στις ώρες της εξεταζόμενης περιόδου. Με βάση το πλαίσιο αυτό, η διαδικασία αναζήτησης της πρώτης μεθόδου πραγματοποιείται πάνω σε μια ευθεία που είναι παράλληλη προς τον οριζόντιο άξονα και της δεύτερης σε μια ευθεία παράλληλη προς τον κατακόρυφο άξονα.

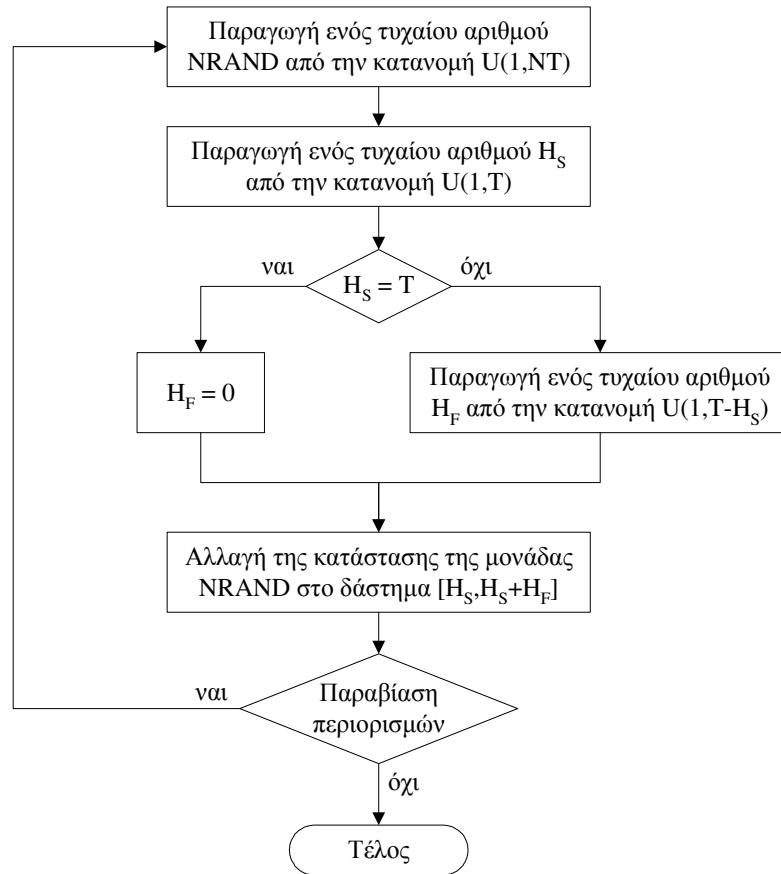
Το μειονέκτημα των δύο προαναφερόμενων μεθόδων είναι η απαίτηση για επαναληπτική εκτέλεση των επιμέρους διαδικασιών προκειμένου να εντοπιστούν οι ζητούμενες εφικτές λύσεις. Αυτό οφείλεται στο ότι οι περιορισμοί ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης κάθε θερμικής μονάδας αντιμετωπίζονται ως εξωτερικοί έλεγχοι, αφού πρώτα έχει παραχθεί μια υποψήφια λύση. Για την ακρίβεια, η ικανοποίηση των εν λόγω περιορισμών για κάθε ώρα της περιόδου κατανομής ελέγχεται μέσω μιας δυναμικής διαδικασίας, η οποία εφαρμόζεται αποκλειστικά και μόνο στις μονάδες των οποίων η κατάσταση μεταβλήθηκε κατά την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται από την τρίτη μέθοδο που αναπτύχθηκε, η οποία επιτρέπει την ενσωμάτωση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων στη διαδικασία παραγωγής λύσεων.

Για την περιγραφή των τριών μεθόδων παραγωγής υποψήφιων λύσεων χρησιμοποιούνται οι εξής συμβολισμοί:

DUR_0	: διάρκεια παραμονής εξεταζόμενης μονάδας στην αρχική κατάσταση (+ αν είναι εντός λειτουργίας και - αν είναι εκτός)
NT	: πλήθος θερμικών μονάδων του συστήματος
ST_0	: αρχική κατάσταση (0 ή 1) εξεταζόμενης μονάδας
ST_t	: κατάσταση (0 ή 1) εξεταζόμενης μονάδας την ώρα κατανομής t
T	: πλήθος ωρών εξεταζόμενης περιόδου
t	: εξεταζόμενη ώρα κατανομής
T_{down}	: ελάχιστος χρόνος κράτησης της εξεταζόμενης μονάδας
T_{up}	: ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της εξεταζόμενης μονάδας

5.3.1. Μεταβολή της κατάστασης μιας τυχαίας θερμικής μονάδας για ένα τυχαίο αριθμό διαδοχικών ωρών

Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής υποψήφιων λύσεων στηρίζεται στη μεταβολή της κατάστασης (0 ή 1) μιας τυχαία επιλεγμένης θερμικής μονάδας παραγωγής για ένα τυχαίο αριθμό διαδοχικών ωρών κατανομής. Το γενικό διάγραμμα της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Γενικό διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της κατάστασης μιας τυχαίας θερμικής μονάδας για ένα τυχαίο αριθμό διαδοχικών ωρών

Η μονάδα που εξετάζεται κάθε φορά από τη μέθοδο επιλέγεται με την παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού $NRAND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,NT)$. Με τυχαία διαδικασία επιλέγεται και το χρονικό διάστημα, για τις ώρες του οποίου θα εξεταστεί η δυνατότητα μεταβολής της κατάστασης της μονάδας $NRAND$. Πιο συγκεκριμένα, η αρχική ώρα του διαστήματος προκύπτει με την παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού H_S από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,T)$. Μετά τον εντοπισμό της ώρας H_S , παράγεται ένας τυχαίος αριθμός H_F που ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,T-H_S)$. Ειδικά για την περίπτωση κατά την οποία η ώρα H_S ισούται με την τελευταία ώρα της περιόδου προγραμματισμού, ο αριθμός H_F ορίζεται ίσος με 0. Με την παραπάνω διαδικασία ορίζεται το εξής διάστημα:

$$H_S \leq t \leq H_S + H_F \quad (5.2)$$

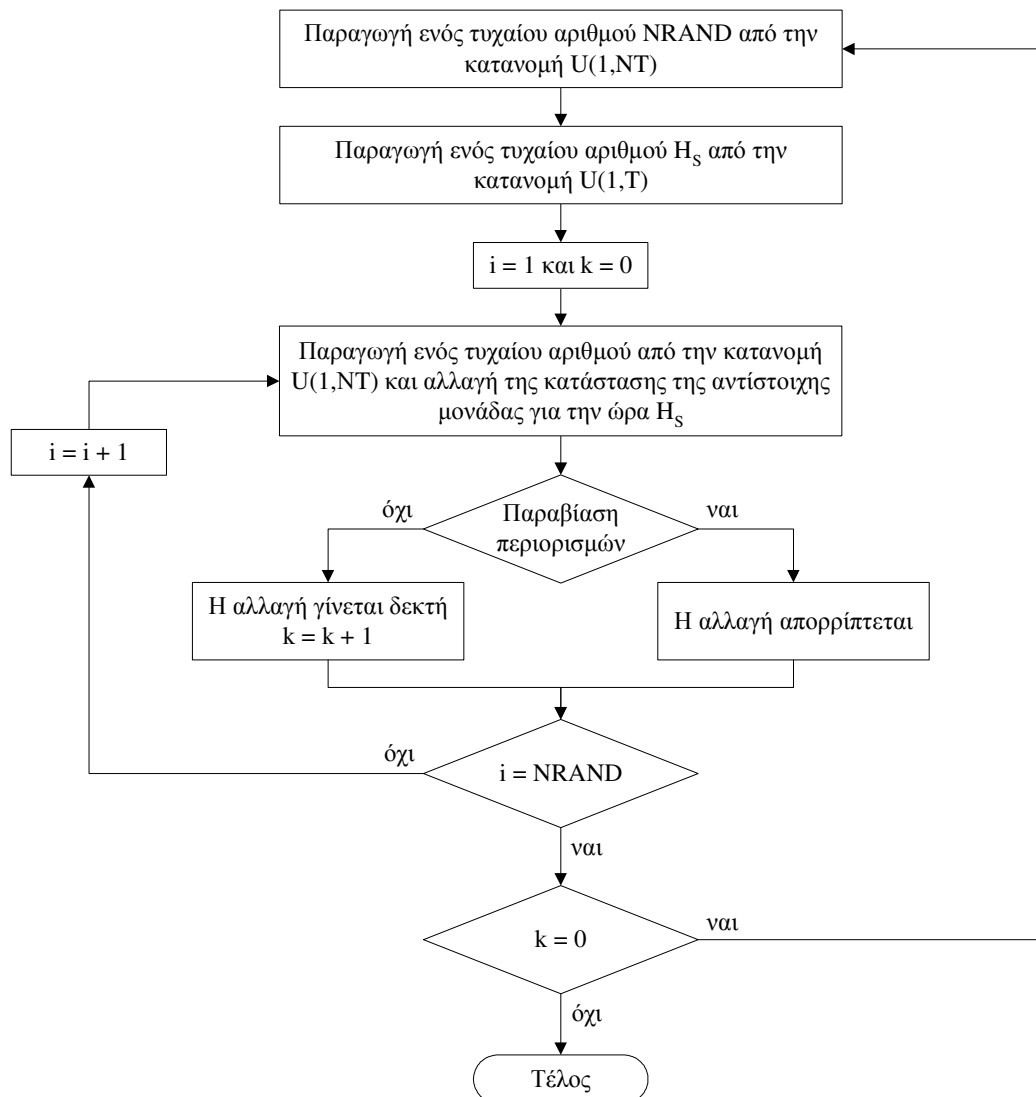
Στο τελευταίο στάδιο της μεθόδου εξετάζεται η δυνατότητα μεταβολής της κατάστασης της μονάδας $NRAND$ για κάθε ώρα της περιόδου που ορίζεται από τη

σχέση (5.2). Σε περίπτωση που η παραπάνω διαδικασία οδηγήσει σε παραβίαση οποιουδήποτε περιορισμού του προβλήματος, οι αλλαγές απορρίπτονται και η μέθοδος επαναλαμβάνεται από την αρχή.

Το βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η ταχύτητα παραγωγής εφικτών λύσεων. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω του ότι οι έλεγχοι για πιθανή παραβίαση περιορισμών εφαρμόζονται μόνο στις ώρες που ανήκουν στο διάστημα της σχέσης (5.2) και όχι σε ολόκληρη την περίοδο κατανομής. Η θεώρηση αυτή είναι σωστή, διότι οι ώρες εκτός του παραπάνω διαστήματος έχουν ήδη ελεγχθεί (ως προς την ικανοποίηση των περιορισμών) κατά την παραγωγή της τρέχουσας λύσης.

5.3.2. Μεταβολή της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία ώρα

Η δεύτερη μέθοδος παραγωγής υποψήφιων λύσεων στηρίζεται στη μεταβολή της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία ώρα κατανομής. Το γενικό διάγραμμα της μεθόδου φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Γενικό διάγραμμα μεθόδου μεταβολής της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία ώρα

Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού $NRAND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,NT)$ και ενός τυχαίου αριθμού H_S από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,T)$. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται το πλήθος των θερμικών μονάδων που πρόκειται να εξεταστούν και εντοπίζεται μια τυχαία ώρα.

Στη συνέχεια γίνεται ο ακριβής καθορισμός των εξεταζόμενων μονάδων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαδοχική παραγωγή $NRAND$ τυχαίων αριθμών από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1,NT)$. Κάθε αριθμός αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θερμική μονάδα του συστήματος και συνεπώς δεν επιτρέπεται η πολλαπλή επιλογή του ίδιου αριθμού.

Τελικά, εξετάζεται η δυνατότητα αλλαγής της κατάστασης κάθε επιλεγμένης μονάδας για την ώρα κατανομής H_S . Κάθε αλλαγή που οδηγεί σε παραβίαση οποιουδήποτε περιορισμού του προβλήματος απορρίπτεται άμεσα. Σε περίπτωση που απορριφθούν όλες οι προτεινόμενες αλλαγές, η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή. Αντίθετα, αν γίνει αποδεκτή έστω και μια αλλαγή, η διαδικασία τερματίζεται.

5.3.3. Ενσωμάτωση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων στη διαδικασία παραγωγής λύσεων

Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην άμεση ενσωμάτωση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων στη διαδικασία παραγωγής λύσεων και εφαρμόζεται σε ήδη εφικτές λύσεις.

Για μια δεδομένη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, το πρόγραμμα ένταξης κάθε θερμικής μονάδας κωδικοποιείται μέσω ενός μονοδιάστατου πίνακα IST . Κάθε στοιχείο του πίνακα δηλώνει τον αριθμό των συνεχόμενων ωρών κατά τις οποίες μια συγκεκριμένη θερμική μονάδα βρίσκεται σε μια κατάσταση λειτουργίας. Θεωρώντας ότι η περίοδος προγραμματισμού αποτελείται από μια ακολουθία T_{max} διαστημάτων, κατά τη διάρκεια των οποίων η εξεταζόμενη μονάδα είναι είτε εντός είτε εκτός λειτουργίας, ο αντίστοιχος πίνακας IST περιέχει T_{max} στοιχεία. Το πρόσημο κάθε στοιχείου είναι θετικό αν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας κατά το αντίστοιχο διάστημα και αρνητικό αν η μονάδα είναι εκτός.

Είναι φανερό ότι το άθροισμα των απολύτων τιμών των στοιχείων του πίνακα IST ισούται με το πλήθος των ωρών της θεωρούμενης περιόδου κατανομής:

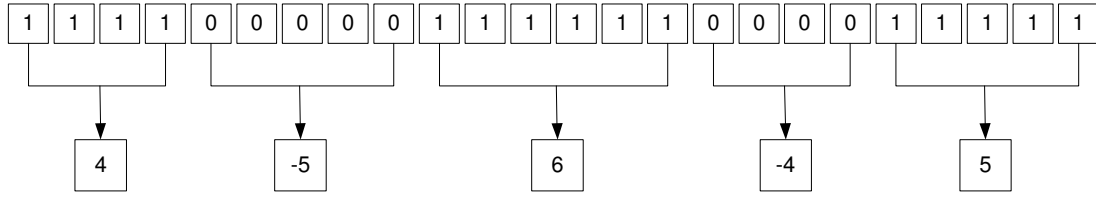
$$\sum_{i=1}^{T_{max}} |IST(i)| = T \quad (5.3)$$

Για κάθε στοιχείο i του πίνακα IST , η αρχική ώρα TS_i και η τελική ώρα TF_i του αντίστοιχου διαστήματος κατανομής δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$TS_i = \begin{cases} 1, & i = 1 \\ 1 + \sum_{k=1}^{i-1} |IST(k)|, & \forall i \in [2, T_{max}] \end{cases} \quad (5.4)$$

$$TF_i = \sum_{k=1}^i |IST(k)|, \quad \forall i \in [1, T_{max}] \quad (5.5)$$

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζεται η διαδικασία κατασκευής του πίνακα IST με βάση ένα δεδομένο πρόγραμμα ένταξης μιας τυχαίας μονάδας για την περίοδο 24 ωρών.



Σχήμα 5.4: Κωδικοποίηση λύσεων στον πίνακα κατάστασης

Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, η περίοδος προγραμματισμού χωρίζεται σε 5 διαδοχικά διαστήματα ($T_{max} = 5$) και το πρόγραμμα ένταξης της εξεταζόμενης μονάδας κωδικοποιείται μέσω του πίνακα $IST = [4, -5, 6, -4, 5]$. Συνεπώς, για το πρώτο διάστημα ισχύει $TS_1 = 1$ και $TF_1 = 4$, για το δεύτερο $TS_2 = 5$ και $TF_2 = 9$ κ.ο.κ.

Με βάση τα παραπάνω, η εξεταζόμενη μέθοδος παραγωγής υποψήφιων λύσεων στηρίζεται στην τυχαία μεταβολή των στοιχείων του πίνακα IST που αντιστοιχεί στο τρέχον πρόγραμμα ένταξης μιας τυχαία επιλεγμένης θερμικής μονάδας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης της μονάδας. Αυτό επιτυγχάνεται με την επαναληπτική εκτέλεση συγκεκριμένων διαδικασιών.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι η επιλογή μιας θερμικής μονάδας του συστήματος μέσω της παραγωγής ενός τυχαίου αριθμού $NRAND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1, NT)$. Από εδώ και στο εξής όλα τα μεγέθη είναι παραμετρικά ως προς τη θερμική μονάδα που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο αριθμό.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο πίνακας κατάστασης $IST(i)$ για την επιλεγμένη μονάδα $NRAND$, όπου $i = 1 \dots T_{max}$. Παράλληλα, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός XR από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1, T_{max})$. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζεται το διάστημα κατά το οποίο θα εξεταστεί η δυνατότητα αλλαγής της κατάστασης της μονάδας $NRAND$.

Μετά την επιλογή του διαστήματος XR εκτελούνται τα εξής βήματα:

Βήμα 1. Έλεγχος των ακόλουθων συνθηκών:

- Αν $XR \neq 1$, τίθεται $ID = TS_{XR} - 1$ και εκτελείται το Βήμα 2.
- Αν $XR = 1$ και $ST_0 \neq ST_1$, τίθεται $ID = 0$ και εκτελείται το Βήμα 2.
- Αν $XR = 1$ και $ST_0 = ST_1$, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 6.

Η μεταβλητή ID είναι βοηθητική και χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των εξεταζόμενων διαστημάτων κατανομής.

Βήμα 2. Έλεγχος του προσήμου του στοιχείου $IST(XR)$. Αν $IST(XR) > 0$ (η μονάδα $NRAND$ είναι εντός λειτουργίας στο διάστημα κατανομής XR), εκτελείται το Βήμα 3, διαφορετικά εκτελείται το Βήμα 4.

Βήμα 3. Υπολογίζεται η παράμετρος IC :

$$IC = IST(XR) - T_{up} \quad (5.6)$$

- Αν $IC > 0$, εκτελείται το Βήμα 5.
- Αν $IC = 0$, η μονάδα $NRAND$ τίθεται εκτός λειτουργίας για όλες τις ώρες του διαστήματος T_1 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_1[ID + 1, ID + T_{up}]: ST_t = 0 \quad (5.7)$$

Βήμα 4. Υπολογίζεται η παράμετρος IC :

$$IC = IST(XR) + Tdown \quad (5.8)$$

- Αν $IC < 0$, εκτελείται το Βήμα 5.
- Αν $IC = 0$, η μονάδα $NRAND$ τίθεται εντός λειτουργίας για όλες τις ώρες του διαστήματος T_2 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_2[ID + 1, ID + Tdown]: ST_t = 1 \quad (5.9)$$

Βήμα 5. Παραγωγή ενός τυχαίου αριθμού $PROB$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(0,1)$ και ενός τυχαίου αριθμού $IEND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1, |IC|)$.

- Αν $PROB \geq 0,5$ και $XR \neq T_{max}$, αλλάζει η κατάσταση της μονάδας $NRAND$ για όλες τις ώρες του διαστήματος T_3 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_3[TF_{XR} - IEND + 1, TF_{XR}]: ST_t = |ST_t - 1| \quad (5.10)$$

- Αν $PROB < 0,5$ ή $XR = T_{max}$, αλλάζει η κατάσταση της μονάδας $NRAND$ για όλες τις ώρες του διαστήματος T_4 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_4[ID + 1, ID + IEND]: ST_t = |ST_t - 1| \quad (5.11)$$

Βήμα 6. Υπολογισμός της παραμέτρου IB :

$$IB = |DUR_0 + IST(1)| \quad (5.12)$$

Η συγκεκριμένη παράμετρος συνυπολογίζει τη διάρκεια παραμονής της εξεταζόμενης μονάδας στην αρχική κατάσταση.

- Αν $ST_1 = 0$ και $IB = Tdown$ ή $ST_1 = 1$ και $IB = Tur$, δεν μπορεί να γίνει αλλαγή της κατάστασης της μονάδας $NRAND$, γιατί θα προκληθεί παραβίαση των περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης της μονάδας. Συνεπώς, η διαδικασία τερματίζεται και η μέθοδος εφαρμόζεται από την αρχή.
- Αν $ST_1 = 0$ και $IB \neq Tdown$, εκτελείται το Βήμα 7.
- Αν $ST_1 = 1$ και $IB \neq Tur$, εκτελείται το Βήμα 8.

Βήμα 7. Υπολογίζεται η παράμετρος IM :

$$IM = \max(0, Tdown + DUR_0) \quad (5.13)$$

και παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $IEND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1, -IST(1) - IM)$. Η μονάδα $NRAND$ τίθεται εντός λειτουργίας για όλες τις ώρες του διαστήματος T_5 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_5[-IST(1) - IEND + 1, -IST(1)]: ST_t = 1 \quad (5.14)$$

Βήμα 8. Υπολογίζεται η παράμετρος IM :

$$IM = \max(0, Tur - DUR_0) \quad (5.15)$$

και παράγεται ένας τυχαίος αριθμός $IEND$ από την ομοιόμορφη κατανομή $U(1, IST(1) - IM)$. Η μονάδα τίθεται εκτός λειτουργίας για όλες τις ώρες του διαστήματος T_6 και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 9:

$$\forall t \in T_6[IST(1) - IEND + 1, IST(1)]: ST_t = 0 \quad (5.16)$$

Βήμα 9. Τερματισμός της διαδικασίας (η νέα εφικτή λύση έχει πλέον εντοπιστεί).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο τρίτο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας δεν πραγματοποιείται έλεγχος για $IC < 0$, επειδή αυτό θα σήμαινε ότι η τρέχουσα λύση οδηγεί σε παραβίαση του περιορισμού ελάχιστου χρόνου λειτουργίας της μονάδας $NRAND$. Η εξεταζόμενη μέθοδος παραγωγής υποψήφιων λύσεων, όμως, εφαρμόζεται μόνο σε ήδη εφικτές λύσεις. Αντίστοιχα, δεν πραγματοποιείται έλεγχος για $IC > 0$ κατά την εκτέλεση του τέταρτου βήματος της διαδικασίας, το οποίο επικεντρώνεται στον περιορισμό ελάχιστου χρόνου κράτησης της μονάδας.

5.3.4. Συνδυαστική χρήση των τριών μεθόδων

Η συνδυαστική χρήση των τριών μεθόδων παραγωγής λύσεων παρέχει μια δισδιάστατη διερεύνηση του χώρου των εφικτών λύσεων, επιταχύνοντας τη σύγκλιση της μεθόδου. Ωστόσο, σε κάθε στάδιο της προσομοιωμένης ανόπτησης πρέπει να αποφασιστεί ποια από τις τρεις μεθόδους θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή της επόμενης υποψήφιας λύσης. Η απόφαση λαμβάνεται μέσω μιας διαδικασίας “επιβραβείωσης”. Πιο συγκεκριμένα, ελέγχεται αν η επιλογή μιας μεθόδου κατά το αμέσως προηγούμενο στάδιο οδήγησε σε μια λύση που έγινε αποδεκτή με βάση το κριτήριο του Metropolis. Στην περίπτωση αυτή, η ίδια μέθοδος επιλέγεται και για το επόμενο στάδιο (“επιβράβευση” της μεθόδου). Σε αντίθετη περίπτωση, η παραπάνω μέθοδος αποκλείεται από τη διαδικασία της επιλογής και γίνεται πιθανοτική επιλογή μιας από τις δύο άλλες μεθόδους.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η πιθανότητα επιλογής της μεθόδου j για την παραγωγή της υποψήφιας λύσης k , δεδομένου ότι η αμέσως προηγούμενη λύση παράχθηκε μέσω της μεθόδου i , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Pr\{D_k = j \mid D_{k-1} = i\} = \begin{cases} 0, & \text{αν } (j = i \wedge A_{k-1,i} = 0) \vee (j \neq i \wedge A_{k-1,i} = 1) \\ 0,5, & \text{αν } (j \neq i \wedge A_{k-1,i} = 0) \\ 1, & \text{αν } (j = i \wedge A_{k-1,i} = 1) \end{cases} \quad (5.17)$$

όπου οι διακριτές μεταβλητές i και j παίρνουν τις τιμές 1, 2 και 3, ανάλογα με τη μέθοδο που εξετάζεται σε κάθε περίπτωση, ο όρος D_k συμβολίζει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή της υποψήφιας λύσης k , ενώ η δυαδική μεταβλητή $A_{k,i}$ προσδιορίζει αν η υποψήφια λύση k που παράχθηκε μέσω της μεθόδου i απορρίφθηκε ($A_{k,i} = 0$) ή έγινε αποδεκτή ($A_{k,i} = 1$) από τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης, με βάση το κριτήριο του Metropolis.

Η συγκεκριμένη διαδικασία συντελεί στην εναλλακτική χρήση των τριών μεθόδων παραγωγής υποψήφιων λύσεων και αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα εύρεσης καλών λύσεων από τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης.

5.4. Εντοπισμός Αρχικής Λύσης

Όπως προαναφέρθηκε, το πρώτο βήμα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης είναι ο εντοπισμός μιας αρχικής λύσης, η οποία πρέπει να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του εξεταζόμενου προβλήματος. Σε αντίστοιχες μεθόδους της βιβλιογραφίας, η συγκεκριμένη απαίτηση δημιουργεί μεγάλα προβλήματα και οδηγεί σε σημαντική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Η μέθοδος που προτείνεται στη συγκεκριμένη διατριβή κάνει χρήση μιας ταχύτατης επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία παρέχει με τυχαίο τρόπο μια αρχική εφικτή λύση.

Η διαδικασία εύρεσης της αρχικής λύσης ξεκινάει με την παραγωγή μιας πρώτης δοκιμαστικής λύσης X_0 , θεωρώντας ότι όλες οι μονάδες του συστήματος είναι εντός λειτουργίας για όλες τις ώρες της περιόδου κατανομής. Αν, όμως, μια μονάδα είναι αρχικά εκτός λειτουργίας και ο χρόνος παραμονής της στην κατάσταση αυτή είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο ελάχιστο χρόνο κράτησης, η συγκεκριμένη μονάδα τίθεται εντός λειτουργίας μόνο για το διάστημα:

$$T_{down} + DUR_0 + 1 \leq t \leq T \quad (5.18)$$

Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η λύση X_0 ικανοποιεί τους περιορισμούς ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης κάθε θερμικής μονάδας.

Στη συνέχεια ελέγχεται αν η λύση X_0 ικανοποιεί και τους υπόλοιπους περιορισμούς του προβλήματος. Σε περίπτωση που δεν διαπιστωθεί παραβίαση κάποιου περιορισμού, η X_0 ορίζεται ως αρχική λύση. Διαφορετικά, γίνεται επαναληπτική χρήση των μεθόδων παραγωγής νέων λύσεων, οι οποίες αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μέχρι να βρεθεί μια τυχαία λύση που να ικανοποιεί όλους τους θεωρούμενους περιορισμούς του προβλήματος.

Γίνεται φανερό, ότι η συγκεκριμένη διαδικασία οδηγεί σε μια αρχική λύση υψηλού κόστους, δεδομένου ότι κατά το αρχικό της στάδιο γίνεται ένταξη όλων των μονάδων του συστήματος για όλες τις ώρες της περιόδου κατανομής. Ωστόσο, η σύγκλιση της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης δεν επηρεάζεται από την επιλογή της αρχικής λύσης. Αυτό οφείλεται στο ότι η συγκεκριμένη μέθοδος έχει τη δυνατότητα να ξεφεύγει από περιοχές τοπικών ελαχίστων, όπως διεξοδικά αποδείχτηκε, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς τον καθορισμό του σημείου εκκίνησης της αναζήτησης.

5.5. Οικονομική Κατανομή Φορτίου

Για κάθε υποψήφια λύση (πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων) της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης απαιτείται η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η εύρεση του βέλτιστου επιπέδου παραγωγής κάθε θερμικής μονάδας για κάθε ώρα της περιόδου, ώστε να εξυπηρετηθεί η ωριαία ζήτηση φορτίου με το ελάχιστο δυνατό κόστος του συστήματος. Δεδομένου ότι οι διακριτές μεταβλητές του προβλήματος $ST_{i,t}$ (κατάσταση λειτουργίας της μονάδας i την ώρα t) έχουν ήδη οριστεί (0 ή 1), η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου εξετάζει μόνο τις συνεχείς μεταβλητές που αναφέρονται στην ωριαία παραγωγή κάθε εν λειτουργία μονάδας.

Συνεπώς, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου συνίσταται στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους που δίνεται από τη σχέση

(3.8), θεωρώντας δεδομένες τις μεταβλητές $ST_{i,t}$, υπό τους περιορισμούς (3.9) και (3.15). Η ικανοποίηση των υπόλοιπων περιορισμών των θερμικών μονάδων έχει ήδη εξασφαλιστεί κατά τη διαδικασία παραγωγής υποψήφιων λύσεων.

Στην περίπτωση που το κόστος καυσίμου των θερμικών μονάδων δίνεται από την τετραγωνική σχέση (3.3), η οικονομική κατανομή φορτίου διατυπώνεται σαν ένα απλό πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού, το οποίο μπορεί εύκολα να επιλυθεί από τις κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Ωστόσο, αν οι μονάδες χαρακτηρίζονται από την τμηματικώς γραμμική συνάρτηση κόστους καυσίμου (3.4), απαιτείται μια μικρή τροποποίηση της διατύπωσης του προβλήματος, ώστε να μπορεί να επιλυθεί από μια μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού.

Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε ότι η τμηματικώς γραμμική συνάρτηση κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων αποτελείται από n ευθύγραμμα τμήματα με διαφορετικές κλίσεις το καθένα, η ενεργός παραγωγή $P_{i,t}$ της μονάδας i για την ώρα t δίνεται από το άθροισμα των επιμέρους τιμών ισχύος $P_{k,i,t}$, όπου $k = 1 \dots n$. Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση κόστους καυσίμου της θερμικής μονάδας i για την ώρα t δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$FC_{i,t}(P_{i,t}) = \sum_{k=1}^n (a_{k,i} \cdot P_{k,i,t}) + c_i \quad (5.19)$$

όπου $a_{k,i}$ είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος k , ενώ c_i είναι ο σταθερός όρος της συνάρτησης.

Κάθε επίπεδο ισχύος $P_{k,i,t}$ μπορεί να πάρει τιμές μεταξύ ενός κάτω ορίου $P_{min,k,i}$ και ενός άνω ορίου $P_{max,k,i}$, τα οποία δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{min,k,i} = \begin{cases} P_{min,i}, & \text{αν } k = 1 \\ 0, & \text{αν } 1 < k \leq n \end{cases} \quad (5.20)$$

$$P_{max,k,i} = \begin{cases} P_{in,k}, & \text{αν } k = 1 \\ P_{in,k} - P_{in,k-1}, & \text{αν } 1 < k < n \\ P_{max,i} - P_{in,k-1}, & \text{αν } k = n \end{cases} \quad (5.21)$$

όπου $P_{min,i}$ και $P_{max,i}$ είναι το τεχνικό ελάχιστο και μέγιστο της θερμικής μονάδας i , αντίστοιχα, ενώ $P_{in,k}$ είναι το ενδιάμεσο σημείο καμπής, στο οποίο αλλάζει η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος k . Προφανώς, η τμηματικώς γραμμική συνάρτηση που ορίζεται από τη σχέση (5.19) παρουσιάζει $n - 1$ ενδιάμεσα σημεία καμπής.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, για κάθε μονάδα χρησιμοποιούνται n βοηθητικές μεταβλητές, οι οποίες εκφράζουν τα αντίστοιχα επίπεδα ισχύος $P_{k,i,t}$. Δεδομένου, όμως, ότι οι μεταβλητές αυτές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$\forall k < n: P_{k,i,t} < P_{max,k,i} \Rightarrow P_{k+1,i,t} = 0 \quad (5.22)$$

Η λογική της μεθόδου γραμμικού προγραμματισμού εξασφαλίζει την αυτόματη ικανοποίηση της συνθήκης (5.22), αν και μόνο αν η τμηματικώς γραμμική συνάρτηση κόστους καυσίμου είναι γνησίως αύξουσα, δηλαδή:

$$a_{1,i} < a_{2,i} < \dots < a_{n,i} \quad (5.23)$$

Το παραπάνω μοντέλο επιτρέπει τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου, θεωρώντας ότι οι θερμικές μονάδες έχουν τμηματικώς γραμμική συνάρτηση κόστους καυσίμου. Παρά το γεγονός ότι απαιτούνται n μεταβλητές για κάθε θερμική μονάδα, ο γραμμικός προγραμματισμός έχει μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις από τον τετραγωνικό. Βέβαια, ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος αυξάνει γραμμικά με τον αριθμό n των ευθυγράμμων τμημάτων της συνάρτησης.

Ανεξάρτητα, πάντως, από τη μορφή της συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου λύνεται χωριστά για κάθε ώρα προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε λύση της μεθόδου προσομοιωμένης απόπτησης, το παραπάνω πρόβλημα λύνεται μόνο για τις ώρες κατά τις οποίες έχει μεταβληθεί η κατάσταση λειτουργίας των μονάδων, συγκριτικά με την αμέσως προηγούμενη λύση. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση ενός βοηθητικού πίνακα που αποθηκεύει την ενεργό παραγωγή κάθε μονάδας για κάθε ώρα της περιόδου, σύμφωνα με την εκάστοτε τρέχουσα λύση. Ο πίνακας αυτός ανανεώνεται κάθε φορά που μια νέα υποψήφια λύση γίνεται δεκτή από τη μέθοδο προσομοιωμένης απόπτησης. Η συγκεκριμένη διαδικασία συντελεί σε σημαντική μείωση των συνολικών υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου.

Η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου οδηγεί, εκτός των άλλων, και στον υπολογισμό της οριακής τιμής του συστήματος για κάθε ώρα της περιόδου, η οποία υποδηλώνει την ευαισθησία της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος ως προς την ικανοποίηση του περιορισμού ισοζυγίου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, η οριακή τιμή εκφράζει τη μεταβολή που θα προκληθεί στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αν μεταβληθεί το φορτίο του συστήματος στη συγκεκριμένη ώρα. Προφανώς, η οριακή τιμή του συστήματος είναι μεγαλύτερη στις ώρες αυξημένου φορτίου.

5.6. Ενσωμάτωση Περιορισμών Ανάλυσης/Απόρριψης Φορτίου Θερμικών Μονάδων

5.6.1. Γενική περιγραφή της μεθόδου

Η ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου προϋποθέτει ότι το πρόβλημα δεν περιλαμβάνει χρονικά εξαρτώμενους περιορισμούς, ώστε να καθίσταται εφικτή η ανεξάρτητη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου. Η αντιμετώπιση των χρονικά εξαρτώμενων περιορισμών ανάλυσης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος για όλες τις ώρες της περιόδου, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση του χρόνου εκτέλεσης της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος, αναπτύχθηκε μια δυναμική μέθοδος οικονομικής κατανομής φορτίου. Ο στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι ο συνυπολογισμός των περιορισμών ανάλυσης/απόρριψης φορτίου στο πρόβλημα βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς να απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για όλη την περίοδο προγραμματισμού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας δυναμικής μεθόδου που στηρίζεται στη διαδοχική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα κατανομής, τροποποιώντας κατάλληλα τα όρια παραγωγής των θερμικών μονάδων.

Για την ανάλυση της προτεινόμενης δυναμικής μεθόδου, θεωρούμε τη γενική περίπτωση κατά την οποία η παραγωγή μιας νέας υποψήφιας λύσης X_{new} στηρίζεται σε μια μικρή διαταραχή της τρέχουσας λύσης X_{curr} . Η διαταραχή αυτή ισοδυναμεί με την αλλαγή της κατάστασης ενός αριθμού θερμικών μονάδων για μια περίοδο διαδοχικών ωρών κατανομής t με $t \in H[H_1, H_2]$. Οι ώρες H_1 και H_2 συμβολίζουν, αντίστοιχα, την αρχική και την τελική ώρα της περιόδου, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε αλλαγή στην κατάσταση κάποιας θερμικής μονάδας. Προφανώς, στην περίπτωση εφαρμογής της δεύτερης μεθόδου παραγωγής λύσεων, η οποία στηρίζεται στη μεταβολή της κατάστασης ενός τυχαίου αριθμού θερμικών μονάδων για μια τυχαία επιλεγμένη ώρα κατανομής, ισχύει ότι $H_1 = H_2$.

Με βάση τα παραπάνω, η μοναδική διαφοροποίηση της λύσης X_{new} ως προς τη X_{curr} έγκειται στην αλλαγή του προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων για τις ώρες του διαστήματος H . Παράλληλα, γίνεται η θεώρηση ότι η κατανομή φορτίου που αντιστοιχεί στο πρόγραμμα ένταξης της λύσης X_{curr} ικανοποιεί τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου των μονάδων. Με βάση αυτή τη θεώρηση, υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικής εφαρμογής δύο δυναμικών διαδικασιών, προκειμένου να συνυπολογιστούν οι παραπάνω περιορισμοί στην επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για τη νέα λύση X_{new} . Οι διαδικασίες αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

5.6.2. Πρόσω δυναμική κατανομή (Forward Dynamic Dispatch)

Η δυναμική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα t του διαστήματος $[H_1, T]$ με κατεύθυνση από την ώρα $t = H_1$ προς την τελευταία ώρα $t = T$ της περιόδου προγραμματισμού ορίζεται ως πρόσω δυναμική κατανομή.

Η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας στηρίζεται στην κατάλληλη τροποποίηση των ορίων παραγωγής των θερμικών μονάδων για κάθε εξεταζόμενη ώρα, ώστε να συνυπολογιστούν οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου των μονάδων. Η κεντρική ιδέα είναι ότι τα νέα όρια παραγωγής κάθε μονάδας για κάθε ώρα κατανομής αποτελούν συνάρτηση της ενεργού παραγωγής της μονάδας στην αμέσως προηγούμενη ώρα και των αντίστοιχων ρυθμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η ανεξάρτητη εκτέλεση της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της θεωρούμενης περιόδου.

Πιο συγκεκριμένα, τα τροποποιημένα όρια παραγωγής των μονάδων για κάθε ώρα του διαστήματος $[H_1, T]$ καθορίζονται ως εξής:

$$P_{\min,i,t} = \max(P_{\min,i}, P_{i,t-1} - \text{RATEDN}_i) \quad (5.24)$$

$$P_{\max,i,t} = \min(P_{\max,i}, P_{i,t-1} + \text{RATEUP}_i) \quad (5.25)$$

όπου οι όροι $P_{\min,i,t}$ και $P_{\max,i,t}$ εκφράζουν το τροποποιημένο ελάχιστο και μέγιστο όριο ενεργού παραγωγής της μονάδας i για την ώρα t , αντίστοιχα, ενώ οι όροι RATEDN_i και RATEUP_i εκφράζουν, αντίστοιχα, το ρυθμό απόρριψης και ανάληψης φορτίου της θερμικής μονάδας i .

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τεχνικά όρια παραγωγής των μονάδων αποτελούν δεδομένα εισόδου του προβλήματος και παραμένουν αμετάβλητα κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Αντίθετα, τα τροποποιημένα όρια παραγωγής υπολογίζονται με βάση τους τύπους (5.24) και (5.25) και, προφανώς, είναι διαφορετικά σε κάθε ώρα κατανομής.

Με βάση τα παραπάνω, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου λύνεται ανεξάρτητα για κάθε ώρα t του διαστήματος $[H_1, T]$, λαμβάνοντας υπόψη τα τροποποιημένα όρια παραγωγής των μονάδων που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη ώρα. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται δυναμικά οι τιμές των $P_{i,t}$. Ειδικά, όμως, για την πρώτη ώρα εφαρμογής της πρόσω δυναμικής κατανομής ($t = H_1$), οι τιμές των μεταβλητών $P_{i,t-1}$ που απαιτούνται για την εφαρμογή των τύπων (5.24) και (5.25) θεωρούνται δεδομένες. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές αυτές έχουν ήδη υπολογιστεί κατά την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για τη λύση X_{curr} , αφού κατά την παραγωγή της νέας λύσης X_{new} δεν αλλάζει το πρόγραμμα ένταξης των μονάδων για την ώρα $t = H_1 - 1$.

Συμπερασματικά, τα βήματα της πρόσω δυναμικής κατανομής περιγράφονται ως εξής:

- Βήμα 1. Αρχικοποίηση του δείκτη χρόνου $t = H_1$.
- Βήμα 2. Τροποποίηση των ορίων παραγωγής των μονάδων του συστήματος για την ώρα t μέσω των σχέσεων (5.24) και (5.25).
- Βήμα 3. Εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου για την ώρα t και υπολογισμός της ενεργού παραγωγής $P_{i,t}$ κάθε θερμικής μονάδας i .
- Βήμα 4. Αν $t \neq T$, αυξάνεται ο δείκτης χρόνου $t = t + 1$ και επαναλαμβάνονται τα Βήματα 2 και 3.

5.6.3. Ανάδρομη δυναμική κατανομή (Backward Dynamic Dispatch)

Η δυναμική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα t του διαστήματος $[1, H_2]$ με κατεύθυνση από την ώρα $t = H_2$ προς την πρώτη ώρα $t = 1$ της περιόδου προγραμματισμού ορίζεται ως ανάδρομη δυναμική κατανομή.

Η εφαρμογή της ανάδρομης δυναμικής κατανομής στηρίζεται στην ίδια λογική με προηγουμένως, με τη βασική διαφορά ότι αλλάζει η κατεύθυνση της δυναμικής κατανομής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα τροποποιημένα όρια παραγωγής των μονάδων για κάθε ώρα του διαστήματος $[1, H_2]$ καθορίζονται ως εξής:

$$P_{\min,i,t} = \max(P_{\min,i}, P_{i,t+1} - RATEUP_i) \quad (5.26)$$

$$P_{\max,i,t} = \min(P_{\max,i}, P_{i,t+1} + RATEDN_i) \quad (5.27)$$

Σε αυτό το πλαίσιο, τα βασικά βήματα της ανάδρομης δυναμικής κατανομής περιγράφονται ως εξής:

- Βήμα 1. Αρχικοποίηση του δείκτη χρόνου $t = H_2$.
- Βήμα 2. Τροποποίηση των ορίων παραγωγής των μονάδων του συστήματος για την ώρα t μέσω των σχέσεων (5.26) και (5.27).
- Βήμα 3. Εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου για την ώρα t και υπολογισμός της ενεργού παραγωγής $P_{i,t}$ κάθε θερμικής μονάδας i .
- Βήμα 4. Αν $t \neq 1$, μειώνεται ο δείκτης χρόνου $t = t - 1$ και επαναλαμβάνονται τα Βήματα 2 και 3.

5.6.4. Επιλογή δυναμικής διαδικασίας

Η δυναμική διαδικασία (πρόσω ή ανάδρομη δυναμική κατανομή) που πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση επιλέγεται κάνοντας χρήση συγκεκριμένων κανόνων. Με βάση τους κανόνες αυτούς, σε κάθε εφαρμογή της μεθόδου επιλέγεται η δυναμική διαδικασία που απαιτεί τις λιγότερες εκτελέσεις του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρόσω δυναμική κατανομή εφαρμόζεται για κάθε ώρα του διαστήματος $[H_1, T]$ και, συνεπώς, απαιτεί N_F εκτελέσεις της οικονομικής κατανομής φορτίου, όπου:

$$N_F = T - H_1 + 1 \quad (5.28)$$

Προφανώς, η παράμετρος N_F ισούται με το πλήθος των ωρών του εξεταζόμενου διαστήματος.

Αντίστοιχα, η ανάδρομη δυναμική κατανομή εφαρμόζεται για κάθε ώρα του διαστήματος $[1, H_2]$ και απαιτεί H_2 εκτελέσεις της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Προκειμένου, λοιπόν, να αποφασιστεί η δυναμική διαδικασία που πρέπει να εφαρμοστεί κάθε φορά, γίνεται σύγκριση των τιμών N_F και H_2 :

- Αν $N_F < H_2$, εφαρμόζεται η πρόσω δυναμική κατανομή.
- Αν $N_F > H_2$, εφαρμόζεται η ανάδρομη δυναμική κατανομή.
- Αν $N_F = H_2$, η διαδικασία που θα εφαρμοστεί επιλέγεται τυχαία.

Ειδικά για την τρίτη περίπτωση, οι δύο δυναμικές διαδικασίες απαιτούν τον ίδιο αριθμό εκτελέσεων της οικονομικής κατανομής φορτίου και, συνεπώς, γίνεται τυχαία επιλογή της εφαρμοζόμενης διαδικασίας, με βάση την τιμή ενός τυχαίου αριθμού $PROB$ που ακολουθεί την ομοιόμορφη κατανομή $U(0,1)$:

- Αν $PROB \geq 0,5$, εφαρμόζεται η πρόσω δυναμική κατανομή.
- Αν $PROB < 0,5$, εφαρμόζεται η ανάδρομη δυναμική κατανομή.

Η εφαρμογή των παραπάνω κανόνων συντελεί στη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου της μεθόδου.

5.6.5. Εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων

Στην περίπτωση της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων, η εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου οικονομικής κατανομής φορτίου προϋποθέτει την κατάλληλη μετατροπή των σχέσεων (5.20) και (5.21), μέσω των οποίων υπολογίζεται το ελάχιστο και μέγιστο όριο των βοηθητικών μεταβλητών $P_{k,i,t}$ που εκφράζουν την παραγωγή κάθε μονάδας, ώστε να καταστεί δυνατή η ενσωμάτωση των τροποποιημένων ορίων παραγωγής των θερμικών μονάδων.

Πιο συγκεκριμένα, οι σχέσεις (5.20) και (5.21) αντικαθίστανται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_{\min,k,i,t} = \begin{cases} \min(P_{\max,k,i,t}, P_{\min,i,t}), & \text{αν } k = 1 \\ \max[0, \min(P_{\max,k,i,t}, P_{\min,i,t} - P_{\min,k-1})], & \text{αν } 1 < k \leq n \end{cases} \quad (5.29)$$

$$P_{\max,k,i,t} = \begin{cases} \min(P_{\max,i,t}, P_{in,k}), & \text{αν } k = 1 \\ \max[0, \min(P_{\max,i,t}, P_{in,k}) - P_{in,k-1}], & \text{αν } 1 < k < n \\ \max(0, P_{\max,i,t} - P_{in,k-1}), & \text{αν } k = n \end{cases} \quad (5.30)$$

όπου οι όροι $P_{\min,k,i,t}$ και $P_{\max,k,i,t}$ εκφράζουν, αντίστοιχα, το τροποποιημένο ελάχιστο και μέγιστο όριο της βοηθητικής μεταβλητής $P_{k,i,t}$, ενώ οι όροι $P_{\min,i,t}$ και $P_{\max,i,t}$ δίνονται από τις σχέσεις (5.24) - (5.27). Γίνεται φανερό ότι οι μεταβλητές $P_{\min,k,i,t}$ και $P_{\max,k,i,t}$ αποτελούν συνάρτηση των τροποποιημένων ορίων παραγωγής των μονάδων, σε αντίθεση με τις μεταβλητές $P_{\min,k,i}$ και $P_{\max,k,i}$, οι οποίες αποτελούν συνάρτηση των τεχνικών ορίων παραγωγής και χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που δεν υφίστανται οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου.

5.6.6. Αξιολόγηση της μεθόδου

Όπως προαναφέρθηκε, η εφαρμογή της προτεινόμενης δυναμικής μεθόδου οικονομικής κατανομής φορτίου στηρίζεται στη βασική θεώρηση ότι η νέα υποψήφια λύση X_{new} παράγεται από τη διαταραχή μιας ήδη εφικτής λύσης X_{curr} , προκειμένου να εξασφαλιστεί η ικανοποίηση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Συνεπώς, αν εντοπιστεί μια λύση που ικανοποιεί τους παραπάνω περιορισμούς, όλες οι επόμενες υποψήφιες λύσεις θα είναι εφικτές. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι η αρχική λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης μπορεί να οδηγήσει σε παραβιάσεις των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται έμμεσα με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου.

Πιο συγκεκριμένα, κατά την εφαρμογή της μεθόδου σε διάφορες υποψήφιες λύσεις εξασφαλίζεται η ικανοποίηση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου για το εκάστοτε διάστημα της δυναμικής κατανομής. Επειδή, όμως, το διάστημα αυτό αλλάζει για κάθε υποψήφια λύση, η διαδοχική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου οδηγεί στη σταδιακή εξάλειψη όλων των παραβιάσεων. Συνεπώς, μετά από την εξέταση ενός μικρού αριθμού υποψήφιων λύσεων, εντοπίζεται μια λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς του προβλήματος.

Το γεγονός ότι στα αρχικά στάδια της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης εξετάζονται λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου των μονάδων οδηγεί σε πιο εκτενή διερεύνηση του χώρου των λύσεων και αυξάνει σημαντικά την ταχύτητα σύγκλισης. Άλλωστε, η περιοχή της βέλτιστης λύσης εντοπίζεται στα τελευταία στάδια της προσομοιωμένης ανόπτησης, όπου έχει ήδη επιτευχθεί η εξάλειψη όλων των παραβιάσεων. Επιπλέον, η απαίτηση για άμεση εύρεση μιας αρχικής λύσης που να λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου θα οδηγούσε σε σημαντική αύξηση του συνολικού υπολογιστικού χρόνου, ιδιαίτερα αν οι ρυθμοί ανάληψης και απόρριψης φορτίου των μονάδων έχουν χαμηλή τιμή (μειώνοντας έτσι σημαντικά τις πιθανές εφικτές λύσεις).

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί σε υποβέλτιστες λύσεις, οι οποίες βέβαια δεν απέχουν σημαντικά από τη βέλτιστη. Είναι, άλλωστε, γεγονός ότι η εύρεση της βέλτιστης λύσης απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για όλες τις ώρες της θεωρούμενης περιόδου. Ωστόσο, αυτό οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου, ο οποίος αυξάνεται σχεδόν εκθετικά με το πλήθος των θεωρούμενων μονάδων παραγωγής. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό θα έπρεπε να μειωθεί

ο αριθμός των επαναλήψεων της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, γεγονός που θα είχε αρνητική επίδραση στη σύγκλιση της μεθόδου. Άλλωστε, η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου αποτελεί το βασικό λόγο, για τον οποίο οι περισσότερες μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής δεν λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος συμβάλλει στην ενσωμάτωση των περιορισμών αυτών και οδηγεί, τελικά, σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

5.7. Ρύθμιση Παραμέτρων Ελέγχου της Μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής εξαρτάται άμεσα από τη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων ελέγχου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα βασικά στοιχεία που πρέπει να καθοριστούν είναι η αρχική τιμή και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας, καθώς και το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας, δηλαδή ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας.

5.7.1. Καθορισμός αρχικής θερμοκρασίας

Σε θεωρητικό επίπεδο, η αποδοτική λειτουργία της προσομοιωμένης ανόπτησης επιβάλλει την αποδοχή όλων των υποψήφιων λύσεων στην αρχική θερμοκρασία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν η αρχική θερμοκρασία $Temp_0$ ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\exp(-\Delta C_{ij} / Temp_0) \cong 1, \quad \forall i, j \quad (5.31)$$

όπου ΔC_{ij} είναι η μεταβολή του κόστους μεταξύ των γειτονικών λύσεων i και j . Ωστόσο, η ικανοποίηση της συνθήκης αυτής απαιτεί τη χρήση μιας πολύ υψηλής αρχικής θερμοκρασίας, οδηγώντας σε πολύ μεγάλη αύξηση του συνολικού υπολογιστικού χρόνου.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση ενός τροποποιημένου κανόνα για τον καθορισμό της αρχικής θερμοκρασίας. Αρχικά, δίνεται μια πολύ υψηλή τιμή στη θερμοκρασία και εκτελείται η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης για μια Μαρκοβιανή αλυσίδα. Πολλές από τις υποψήφιες λύσεις που παράγονται κατά τη διάρκεια της εφαρμογής οδηγούν, όπως είναι αναμενόμενο, σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Επειδή, όμως, η τιμή της θερμοκρασίας είναι πολύ μεγάλη, οι περισσότερες από τις λύσεις αυτές γίνονται αποδεκτές με βάση το κριτήριο του Metropolis. Υπολογίζοντας, λοιπόν, την αύξηση του κόστους που προκαλείται κάθε φορά που γίνεται δεκτή μια ακριβότερη λύση, προκύπτει η μέση αύξηση του κόστους ΔC_{av} .

Τελικά, η αρχική τιμή της θερμοκρασίας καθορίζεται κάνοντας χρήση του τύπου:

$$Temp_0 = \Delta C_{av} / \ln(0,85^{-1}) \quad (5.32)$$

Η σχέση (5.32) εξασφαλίζει ότι ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 85%) των υποψήφιων λύσεων που παράγονται στην αρχική θερμοκρασία γίνεται δεκτό.

5.7.2. Διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας

Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Η βασική αρχή είναι ότι η θερμοκρασία πρέπει να μειώνεται με σχετικά αργό ρυθμό, ώστε να αποφευχθεί η πρόωγη σύγκλιση σε τοπικά ελάχιστα.

Η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση του ακόλουθου απλού κανόνα για τη μείωση της θερμοκρασίας:

$$Temp_{s+1} = a \cdot Temp_s \quad (5.33)$$

όπου $Temp_s$ είναι η τιμή της θερμοκρασίας κατά το στάδιο s της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και a είναι μια σταθερά λίγο μικρότερη από τη μονάδα. Γίνεται φανερό, ότι η ταχύτητα της σύγκλισης μπορεί να ελεγχθεί εύκολα μέσω της κατάλληλης ρύθμισης της παραμέτρου a .

5.7.3. Καθορισμός του μήκους της Μαρκοβιανής αλυσίδας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης εξαρτάται άμεσα από τον καθορισμό του μήκους της Μαρκοβιανής αλυσίδας. Η συγκεκριμένη παράμετρος αντιστοιχεί στον αριθμό των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας και η τιμή της εξαρτάται από το μέγεθος του προβλήματος (αριθμός των μεταβλητών).

Με βάση τα παραπάνω, το μήκος LCh κάθε Μαρκοβιανής αλυσίδας της προτεινόμενης μεθόδου καθορίζεται ως η ελάχιστη τιμή ανάμεσα σε ένα άνω όριο LCh_{max} και στο πλήθος των μεταβλητών (γινόμενο του αριθμού των μονάδων με τον αριθμό των εξεταζόμενων ωρών κατανομής):

$$LCh = \min(LCh_{max}, NT \cdot T) \quad (5.34)$$

Η χρήση μιας μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής για το μήκος κάθε αλυσίδας αποσκοπεί στον περιορισμό των υπολογιστικών απαιτήσεων κατά την επίλυση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων.

5.8. Τοπική Βελτιστοποίηση

Η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης επιταχύνεται κάνοντας χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην επαναληπτική παραγωγή νέων υποψηφίων λύσεων, κάνοντας χρήση των μεθόδων που αναλύθηκαν στην παράγραφο 5.3, σε μια προσπάθεια βελτίωσης της τελευταίας λύσης που γίνεται αποδεκτή σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας.

Σε αντίθεση με τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης, όπου γίνεται εφαρμογή του κριτηρίου Metropolis προκειμένου να αποφασιστεί η αποδοχή λύσεων με μεγαλύτερο κόστος από την εκάστοτε τρέχουσα, στην περίπτωση της τοπικής βελτιστοποίησης γίνονται δεκτές μόνο οι λύσεις που οδηγούν σε μείωση του κόστους του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι X_s είναι η τελευταία αποδεκτή λύση μετά την ολοκλήρωση μιας Μαρκοβιανής αλυσίδας στο επίπεδο θερμοκρασίας $Temp = Temp_s$ και TC_s είναι το κόστος που της αντιστοιχεί, η μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης περιγράφεται από τα εξής βήματα:

- Βήμα 1. Αρχικοποίηση του δείκτη επαναλήψεων $c = 1$.
- Βήμα 2. Εύρεση μιας γειτονικής λύσης X_j μέσω μιας μικρής διαταραχής της τρέχουσας λύσης X_s και εκτέλεση οικονομικής κατανομής φορτίου για τον υπολογισμό του νέου συνολικού κόστους TC_j .
- Βήμα 3. Έλεγχος αποδοχής νέας υποψήφιας λύσης:
- Αν $TC_j < TC_s$, η νέα λύση γίνεται αποδεκτή, οπότε τίθεται $X_s = X_j$ και $TC_s = TC_j$ και εκτελείται το επόμενο βήμα.
 - Αν $TC_j \geq TC_s$, η νέα λύση X_j απορρίπτεται και η λύση X_s διατηρείται ως τρέχουσα λύση.
- Βήμα 4. Αν η τιμή του c είναι μικρότερη από τον προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων, αυξάνεται ο δείκτης $c = c + 1$ και επαναλαμβάνονται τα Βήματα 2 και 3.

Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η έντονη παρέμβαση στη συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης, αφού το ζητούμενο είναι η επιτάχυνση της σύγκλισης χωρίς να αλλοιωθεί σημαντικά η διαδικασία της προσομοιωμένης ανόπτησης. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης εφαρμόζεται για ένα πολύ μικρό αριθμό επαναλήψεων συγκριτικά με το μήκος της Μαρκοβιανής αλυσίδας, δηλαδή:

$$c \ll LCh \quad (5.35)$$

Προκειμένου να μειωθεί ακόμη περισσότερο η επίδραση της τοπικής βελτιστοποίησης, κάθε νέα υποψήφια λύση που εξετάζεται από τη συγκεκριμένη μέθοδο παράγεται μέσω μιας πολύ μικρής διαταραχής της εκάστοτε τρέχουσας λύσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός επιπλέον περιορισμού που επιτρέπει κάθε φορά την αλλαγή ενός μόνο στοιχείου της τρέχουσας λύσης. Ο περιορισμός αυτός ενσωματώνεται και στις τρεις μεθόδους παραγωγής υποψήφιων λύσεων που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3.

5.9. Έλεγχος Σύγκλισης της Μεθόδου Προσομοιωμένης Ανόπτησης

Ο έλεγχος της σύγκλισης της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης στηρίζεται στην εναλλακτική χρήση των ακόλουθων κριτηρίων τερματισμού:

Κριτήριο 1. Υπέρβαση ενός προκαθορισμένου αριθμού διαδοχικών Μαρκοβιανών αλυσίδων χωρίς αποδοχή οποιασδήποτε υποψήφιας λύσης.

Κριτήριο 2. Χρήση ενός κατώτατου ορίου για την τελική τιμή της θερμοκρασίας.

Ανεξάρτητα, πάντως, από το κριτήριο που ικανοποιείται σε κάθε εφαρμογή της μεθόδου, η τελική τιμή της θερμοκρασίας πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να αποφευχθεί η σύγκλιση σε τοπικά ελάχιστα.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν φαινόμενα μη σύγκλισης της προτεινόμενης μεθόδου, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε μικρή απόκλιση της τελικής λύσης από τη βέλτιστη, γίνεται χρήση ενός μηχανισμού αποθήκευσης της καλύτερης λύσης που εντοπίζεται κατά την εκτέλεση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε βήμα της μεθόδου ελέγχεται αν το κόστος της τελευταίας αποδεκτής λύσης είναι χαμηλότερο από όσες λύσεις έχουν εξεταστεί μέχρι εκείνο το σημείο. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται αποθήκευση, σε βοηθητικό πίνακα, τόσο του

κόστους της λύσης, όσο και του αντίστοιχου προγράμματος λειτουργίας των θερμικών μονάδων (κατάσταση λειτουργίας και παραγόμενη ισχύς σε κάθε ώρα της περιόδου). Προφανώς, κάθε φορά που εντοπίζεται μια καλύτερη λύση γίνεται ανανέωση του συγκεκριμένου πίνακα.

Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη εξαιτίας της έντονης στοχαστικής φύσης της μεθόδου προσομοιωμένης απόκτησης. Παρόλα αυτά, η επίλυση διαφόρων προβλημάτων με εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απέδειξε ότι σχεδόν πάντα επιτυγχάνεται σύγκλιση στην καλύτερη λύση που έχει εντοπιστεί κατά τα διάφορα στάδια της μεθόδου προσομοιωμένης απόκτησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ

6.1. Γενικά

Ο θεμελιώδης στόχος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τροφοδότηση των καταναλωτών με όσο το δυνατόν πιο οικονομικό και αξιόπιστο τρόπο. Σύμφωνα με ένα πολύ διαδεδομένο και κοινά αποδεκτό ορισμό, αξιοπιστία είναι η πιθανότητα μιας συσκευής ή ενός συστήματος να εκτελεί την αποστολή του επαρκώς για τη σχεδιαζόμενη χρονική περίοδο και τις επικρατούσες λειτουργικές συνθήκες [139,140]. Ο ορισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου υπάρχει η λογική απαίτηση για εξασφάλιση υψηλού βαθμού αξιοπιστίας.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη μέθοδος για την ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος λαμβάνει υπόψη τη μη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης του φορτίου και στηρίζεται στη χρήση των ακόλουθων δεικτών αξιοπιστίας:

- Πιθανότητα Απώλειας Φορτίου: εκφράζει την πιθανότητα (%) το σύστημα παραγωγής να μην μπορέσει να εξυπηρετήσει το ζητούμενο φορτίο για τη θεωρούμενη περίοδο ανάλυσης.
- Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια: εκφράζει την ενέργεια (MWh) που αναμένεται να μην εξυπηρετηθεί το σύστημα παραγωγής για τη θεωρούμενη περίοδο ανάλυσης.

Ο δείκτης πιθανότητας απώλειας φορτίου υπολογίζεται σε ωριαία βάση, ενώ ο δείκτης αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας αναφέρεται σε ολόκληρη την περίοδο προγραμματισμού. Για κάθε δείκτη τίθεται ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, ανάλογα με το επίπεδο αξιοπιστίας που πρέπει να παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής, συντελώντας στη διατύπωση αντίστοιχων περιορισμών αξιοπιστίας.

Η ενσωμάτωση των παραπάνω περιορισμών στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής, στηρίζεται στη διαδοχική εκτέλεση δύο επιμέρους διαδικασιών. Σε πρώτη φάση, εκτελείται η διαδικασία ενσωμάτωσης του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου για την τρέχουσα λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Αν διαπιστωθεί παραβίαση του συγκεκριμένου περιορισμού για οποιαδήποτε ώρα της θεωρούμενης περιόδου, η τρέχουσα λύση απορρίπτεται και παράγεται μια νέα υποψήφια λύση. Σε αντίθετη περίπτωση, εκτελείται η διαδικασία ενσωμάτωσης του περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας.

Η προτεινόμενη μέθοδος αναφέρεται αποκλειστικά και μόνο στις θερμικές μονάδες παραγωγής. Συνεπώς, θεωρείται ότι οι υδροηλεκτρικές μονάδες εμφανίζουν

αμελητέα πιθανότητα βλάβης, όπως άλλωστε συνηθίζεται στη σχετική βιβλιογραφία [122,123], και οι θερμικές μονάδες καλούνται να εξυπηρετήσουν ένα ισοδύναμο θερμικό φορτίο για κάθε ώρα t της περιόδου, το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$LOAD_{th,t} = LOAD_t - \sum_{j=1}^{NH} P_{j,t}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.1)$$

όπου $LOAD_t$ είναι το συνολικό φορτίο του συστήματος για την ώρα t , το οποίο θεωρείται ότι έχει σταθερή τιμή κατά τη διάρκεια κάθε ώρας της περιόδου T , NH είναι το πλήθος των υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος και $P_{j,t}$ είναι η ενεργός ισχύς που παράγεται από τον υδροηλεκτρικό σταθμό j την ώρα t . Η συνολική υδροηλεκτρική παραγωγή σε κάθε ώρα της περιόδου υπολογίζεται μέσω της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών, η οποία αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τα βασικά βήματα της προτεινόμενης μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας. Επειδή, βέβαια, η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στο θέμα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού, η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στη συγκεκριμένη χρονική κλίμακα.

6.2. Υπολογισμός Δεικτών Αξιοπιστίας Συστήματος Παραγωγής

Όπως προαναφέρθηκε, η προτεινόμενη μέθοδος ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας στηρίζεται στη χρήση των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Οι εν λόγω δείκτες μπορούν να υπολογιστούν μέσω της συνέλιξης του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος με τη χρονολογική καμπύλη φορτίου που αναφέρεται στην εξεταζόμενη περίοδο. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η κατασκευή ενός πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος για κάθε ώρα της περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις θερμικές μονάδες παραγωγής που έχουν προγραμματιστεί να λειτουργήσουν στην αντίστοιχη ώρα. Η κατασκευή του πίνακα αυτού στηρίζεται στον υπολογισμό των πιθανοτήτων απώλειας διαφόρων επιπέδων ισχύος λόγω βλάβης των μονάδων.

Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος ($COPT$) είναι ένα διάνυσμα των διαφόρων επιπέδων απώλειας ισχύος και των αντίστοιχων τιμών πιθανότητας εμφάνισής τους, δηλαδή:

$$COPT = \begin{bmatrix} X_1 & CR_1 & p(X_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_k & CR_k & p(X_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & CR_n & p(X_n) \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

όπου κάθε γραμμή $k = 1 \dots n$ περιλαμβάνει την απώλεια ενός συγκεκριμένου επιπέδου ισχύος X_k , τη συνολική ισχύ CR_k που παραμένει διαθέσιμη και την πιθανότητα $p(X_k)$ εμφάνισης της αντίστοιχης κατάστασης.

Η ισχύς CR_k υπολογίζεται ως εξής:

$$CR_k = \sum_{i=1}^{NT} P_{\max,i} - X_k, \quad \forall k \in [1, n] \quad (6.3)$$

όπου NT είναι το πλήθος των διαθέσιμων θερμικών μονάδων του εξεταζόμενου συστήματος παραγωγής και $P_{max,i}$ είναι το τεχνικό μέγιστο της μονάδας i .

Ο υπολογισμός των πιθανοτήτων $p(X_k)$ στηρίζεται στην επαναληπτική εφαρμογή της ακόλουθης σχέσης για κάθε θερμική μονάδα του συστήματος:

$$p(X) = (1 - U) \cdot p'(X) + U \cdot p'(X - P_{max}) \quad (6.4)$$

όπου $p'(X)$ και $p(X)$ είναι, αντίστοιχα, οι πιθανότητες απώλειας ισχύος X MW πριν και μετά την προσθήκη μιας θερμικής μονάδας με ισχύ P_{max} και πιθανότητα βλάβης U . Για την παραπάνω σχέση ισχύει ότι:

$$p'(X - P_{max}) = 0, \quad \text{αν } X < P_{max} \quad (6.5)$$

Ειδικά για την πρώτη θερμική μονάδα του συστήματος παραγωγής, η σχέση (6.4) διατυπώνεται ως εξής:

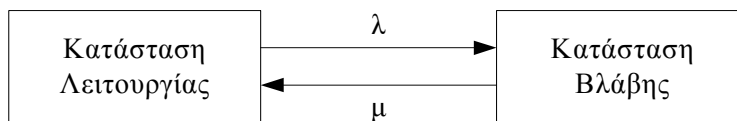
$$p(X) = \begin{cases} 1 - U, & \text{για } X = 0 \\ U, & \text{για } X = P_{max} \end{cases} \quad (6.6)$$

Ο πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος μπορεί, επίσης, να κατασκευαστεί κάνοντας χρήση της αθροιστικής πιθανότητας απώλειας τουλάχιστον X MW, αντί της πιθανότητας απώλειας X MW. Στην περίπτωση αυτή, η πιθανότητα $p(X)$ της σχέσης (6.4) αντικαθίσταται από την αθροιστική πιθανότητα $P(X)$ και ισχύει ότι:

$$P'(X) = 1, \quad \text{αν } X \leq 0 \quad (6.7)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό θερμικών μονάδων παραγωγής και, συνεπώς, ο πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος περιλαμβάνει εκατοντάδες πιθανές διακριτές στάθμες απώλειας ισχύος. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται μια τεχνική στρογγυλοποίησης, η οποία οδηγεί στην κατασκευή ενός πίνακα που περιέχει μόνο στάθμες απώλειας ισχύος ίσες με ένα πολλαπλάσιο του διαστήματος στρογγυλοποίησης. Επίσης, οι υπολογιστικές απαιτήσεις της παραπάνω διαδικασίας μπορούν να περιοριστούν σημαντικά αν παραλειφθούν τα επίπεδα απώλειας ισχύος, για τα οποία οι αθροιστικές πιθανότητες είναι μικρότερες από ένα προκαθορισμένο όριο (π.χ. 10^{-7}).

Η μεταβλητή U που χρησιμοποιείται στις σχέσεις (6.4) και (6.6) εκφράζει την πιθανότητα βλάβης κάθε θερμικής μονάδας σε μια χρονική στιγμή στο μέλλον και ορίζεται ως μη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων παραγωγής. Ο υπολογισμός της συγκεκριμένης πιθανότητας εξαρτάται από το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των πιθανών λειτουργικών καταστάσεων των μονάδων. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, κάθε θερμική μονάδα περιγράφεται από ένα απλό μοντέλο δύο καταστάσεων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Μοντέλο δύο καταστάσεων για τις θερμικές μονάδες παραγωγής

Σύμφωνα με το παραπάνω μοντέλο, ορίζονται οι εξής καταστάσεις:

- Κατάσταση Λειτουργίας: η θερμική μονάδα είναι διαθέσιμη να παράγει την ονομαστική της ισχύ.
- Κατάσταση Βλάβης: η θερμική μονάδα δεν είναι διαθέσιμη λόγω μη προγραμματισμένης διακοπής που οφείλεται σε βλάβη.

Ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση λειτουργίας στην κατάσταση βλάβης ορίζεται ως αναμενόμενος ρυθμός βλάβης (λ) της μονάδας. Αντίστοιχα, ο ρυθμός μετάβασης από την κατάσταση βλάβης στην κατάσταση λειτουργίας ορίζεται ως αναμενόμενος ρυθμός επισκευής (μ) της μονάδας.

Με βάση τα παραπάνω, η πιθανότητα βλάβης (μη διαθεσιμότητα) $U_i(LT)$ της θερμικής μονάδας i κατά τη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος LT στο μέλλον δίνεται από την εξής σχέση [139]:

$$U_i(LT) = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} [1 - e^{-(\lambda_i + \mu_i)LT}] \quad (6.8)$$

Στην περίπτωση του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής, θεωρείται ότι το διάστημα LT είναι πολύ μικρότερο από το χρόνο που απαιτείται για να επισκευαστεί μια μονάδα. Συνεπώς, οι ρυθμοί επισκευής των μονάδων μπορούν να αγνοηθούν ($\mu_i = 0$). Με βάση αυτή τη θεώρηση, η σχέση (6.8) απλοποιείται ως εξής:

$$U_i(LT) = 1 - e^{-\lambda_i LT} \quad (6.9)$$

Η χρήση της παραπάνω εκθετικής κατανομής διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την ανάλυση αξιοπιστίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, διότι η πιθανότητα βλάβης μιας μονάδας σε κάθε χρονικό διάστημα είναι ανεξάρτητη της προηγούμενης λειτουργικής κατάστασης και εξαρτάται μόνο από τη διάρκεια LT της θεωρούμενης περιόδου. Προκειμένου, βέβαια, να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη κατανομή, θεωρείται ότι ο ρυθμός βλάβης λ_i κάθε μονάδας είναι σταθερός.

Αν η τιμή του LT είναι πολύ μικρή ($LT \ll 1$), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παρακάτω προσεγγιστική σχέση:

$$U_i(LT) \cong \lambda_i LT \quad (6.10)$$

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, αν ο πίνακας πιθανότητας απώλειας ισχύος για την ώρα t περιέχει n στάθμες απώλειας ισχύος, οι όροι $p(X_k)$ και CR_k (όπου $k = 1 \dots n$) εκφράζουν, αντίστοιχα, την πιθανότητα απώλειας ισχύος X_k MW και την ισχύ που παραμένει διαθέσιμη μετά την απώλεια του συγκεκριμένου επιπέδου ισχύος. Συνεπώς, η πιθανότητα απώλειας φορτίου $LOLP_t$ για την ώρα t υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$LOLP_t = \sum_{k=1}^n [p(X_k) \cdot LOSS_{k,t}], \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.11)$$

όπου:

$$LOSS_{k,t} = \begin{cases} 1, & \text{αν } CR_k < LOAD_{th,t} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.12)$$

Αντίστοιχα, η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια EUE_t για την ώρα t υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EUE_t = \sum_{k=1}^n [p(X_k) \cdot LOSS_{k,t} \cdot (LOAD_{th,t} - CR_k)], \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.13)$$

Τελικά, η συνολική αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια EUE_{tot} της εξεταζόμενης περιόδου δίνεται από τη σχέση:

$$EUE_{tot} = \sum_{t=1}^T EUE_t \quad (6.14)$$

6.3. Μοντέλο Αβεβαιότητας Πρόβλεψης Φορτίου

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου αποτελεί ένα πρόβλημα που χαρακτηρίζεται από σημαντικό βαθμό αβεβαιότητας. Δεδομένου ότι η τελική λύση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής εξαρτάται από την αναμενόμενη τιμή του φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας που παρουσιάζει η πρόβλεψη του συγκεκριμένου μεγέθους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, όσο και στον καθορισμό των ωριαίων απαιτήσεων του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία.

Πιο συγκεκριμένα, η υποεκτίμηση των ωριαίων φορτίων μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις που δεν παρέχουν επαρκή στρεφόμενη εφεδρεία, αυξάνοντας την πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων στην τροφοδότηση του φορτίου. Αντίθετα, η υπερεκτίμηση των ωριαίων φορτίων έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της κατανεμημένης στρεφόμενης εφεδρείας, συντελώντας σε λύσεις αυξημένου κόστους.

Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική, η αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων μπορεί να περιγραφεί από την κανονική κατανομή $N(\mu_t, \sigma_t)$ [121]. Η μέση τιμή μ_t της κατανομής ισούται με την αναμενόμενη τιμή $LOAD_t$ του συνολικού φορτίου που αντιστοιχεί στην ώρα t , ενώ η τυπική απόκλιση σ_t αποτελεί ένα προκαθορισμένο ποσοστό α (συνήθως 5%) της μέσης τιμής:

$$\mu_t = LOAD_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.15)$$

$$\sigma_t = \alpha \cdot \mu_t = \alpha \cdot LOAD_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.16)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τυπική απόκλιση της κατανομής μπορεί να υπολογιστεί μέσω στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων προγενέστερων προβλέψεων φορτίου.

Για λόγους απλούστευσης των υπολογισμών, η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας της ζήτησης φορτίου μπορεί να περιγραφεί από ένα μοντέλο επτά διακριτών βημάτων ($0, \pm 1\sigma_t, \pm 2\sigma_t, \pm 3\sigma_t$), η υιοθέτηση του οποίου δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Σε κάθε βήμα m του μοντέλου αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο φορτίου $LOAD_t(m)$, όπου:

$$LOAD_t(m) = LOAD_t + (m - 4) \cdot \sigma_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad \forall m \in [1, 7] \quad (6.17)$$

Με βάση τη σχέση (6.1), σε κάθε επίπεδο φορτίου $LOAD_t(m)$ αντιστοιχεί ένα ισοδύναμο θερμικό φορτίο $LOAD_{th,t}(m)$, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$LOAD_{th,t}(m) = LOAD_t(m) - \sum_{j=1}^{NH} P_{j,t}, \quad \forall t \in [1, T] \quad \forall m \in [1, 7] \quad (6.18)$$

Συνεπώς, η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης του φορτίου συνίσταται στον υπολογισμό, για κάθε ώρα t , των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου $LOLP_t(m)$ και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας $EUE_t(m)$, οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε επίπεδο ισοδύναμου θερμικού φορτίου $LOAD_{th,t}(m)$ του παραπάνω διακριτού μοντέλου κατανομής πιθανότητας. Θεωρώντας ότι $PL(m)$ είναι η πιθανότητα μη υπέρβασης του φορτίου που αντιστοιχεί στο βήμα m , οι τελικές τιμές των δεικτών $LOLP_t$ και EUE_t υπολογίζονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$LOLP_t = \sum_{m=1}^7 [LOLP_t(m) \cdot PL(m)], \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.19)$$

$$EUE_t = \sum_{m=1}^7 [EUE_t(m) \cdot PL(m)], \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.20)$$

Οι πιθανότητες $PL(m)$ που αντιστοιχούν σε κάθε διακριτό βήμα m της κανονικής κατανομής μπορούν να εξαχθούν από κατάλληλους πίνακες. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι στην παραπάνω ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών ωριαίων φορτίων.

6.4. Μέθοδος Ενσωμάτωσης Περιορισμών Αξιοπιστίας

Η προτεινόμενη μέθοδος αποσκοπεί στην ενσωμάτωση των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Για κάθε δείκτη τίθεται ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, συντελώντας στη διατύπωση των περιορισμών αξιοπιστίας (3.11) και (3.12), οι οποίοι εφαρμόζονται σε κάθε εφικτή υποψήφια λύση που παράγεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.

Τα βασικά βήματα της μεθόδου περιγράφονται ως εξής:

- Υπολογισμός του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου για κάθε υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και ενσωμάτωση του αντίστοιχου περιορισμού αξιοπιστίας.
- Υπολογισμός του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας για κάθε υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και ενσωμάτωση του αντίστοιχου περιορισμού αξιοπιστίας.
- Προσδιορισμός (a posteriori) του περιθωρίου της στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των παραπάνω βημάτων.

6.4.1. Ενσωμάτωση περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου

Η ενσωμάτωση του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής του περιορισμού (3.11) σε κάθε υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε τη γενική περίπτωση κατά την οποία η παραγωγή μιας νέας υποψήφιας λύσης X_{new} στηρίζεται σε μια μικρή διαταραχή της τρέχουσας λύσης X_{curr} . Η διαταραχή αυτή ισοδυναμεί με την αλλαγή της κατάστασης ενός αριθμού θερμικών μονάδων για μια περίοδο διαδοχικών ωρών κατανομής t με $t \in H[H_1, H_2]$. Οι ώρες H_1 και H_2 συμβολίζουν, αντίστοιχα, την αρχική και την τελική ώρα της περιόδου, κατά την οποία πραγματοποιήθηκε αλλαγή στην κατάσταση κάποιας θερμικής μονάδας.

Για κάθε ώρα t της περιόδου H , υπολογίζεται ο δείκτης πιθανότητας απώλειας φορτίου $LOLP_t$ μέσω των εξισώσεων (6.11) και (6.19), κατασκευάζοντας τον πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη ώρα. Για κάθε πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος λαμβάνονται υπόψη μόνο οι θερμικές μονάδες που έχουν προγραμματιστεί να λειτουργήσουν στην αντίστοιχη ώρα της περιόδου. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την απαίτηση για μετατροπή του πίνακα κάθε φορά που πραγματοποιείται αλλαγή του προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων για οποιαδήποτε ώρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των συνολικών υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό περιορίζεται μέσω της στρογγυλοποίησης του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος σε κατάλληλα βήματα ισχύος, ώστε να αποφεύγεται η αλλοίωση της ακρίβειας των απαιτούμενων υπολογισμών.

Στη συνέχεια, η τιμή του $LOLP_t$ συγκρίνεται με ένα προκαθορισμένο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $LOLP_{max}$, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας που πρέπει να παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η ικανοποίηση του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί παραβίαση του παραπάνω περιορισμού για οποιαδήποτε ώρα της θεωρούμενης περιόδου, η τρέχουσα λύση του προβλήματος απορρίπτεται και παράγεται μια νέα υποψήφια λύση από τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης.

Όπως είναι φυσικό, η παραπάνω διαδικασία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων, λόγω της δυσκολίας εύρεσης υποψήφιας λύσεων που να ικανοποιούν τον περιορισμό πιθανότητας απώλειας φορτίου. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος είναι η “διόρθωση” κάθε υποψήφιας λύσης της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης που οδηγεί σε παραβίαση του συγκεκριμένου περιορισμού. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί, για παράδειγμα, με την ένταξη επιπλέον θερμικών μονάδων σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου $LOLP_{max}$ για κάποια ώρα της περιόδου.

Ωστόσο, η σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης βασίζεται στην πιθανοτική παραγωγή κάθε υποψήφιας λύσης μέσω της πρόκλησης μιας μικρής, τυχαίας διαταραχής στην εκάστοτε τρέχουσα λύση. Συνεπώς, οποιαδήποτε διαδικασία διόρθωσης των υποψήφιας λύσεων, ώστε να ικανοποιηθεί ο παραπάνω περιορισμός αξιοπιστίας, θα αποτελούσε εξωτερική παρέμβαση στην πιθανοτική διαδικασία παραγωγής λύσεων, επιδρώντας αρνητικά στη σύγκλιση της μεθόδου.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα, η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση ενός επιπλέον περιορισμού, ο οποίος εφαρμόζεται πριν τον περιορισμό πιθανότητας απώλειας φορτίου και διατυπώνεται ως εξής:

$$\sum_{i=1}^{NT} (ST_{i,t} \cdot P_{\max,i}) - LOAD_{th,t} \geq RTH_t, \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.21)$$

όπου $ST_{i,t}$ είναι η μεταβλητή που απεικονίζει την κατάσταση λειτουργίας της θερμικής μονάδας i την ώρα t (1 εαν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός), ενώ RTH_t είναι μια βοηθητική μεταβλητή που εκφράζει το ελάχιστο περιθώριο στρεφόμενης εφεδρείας που πρέπει να παρέχουν οι θερμικές μονάδες σε κάθε ώρα t της περιόδου, ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός πιθανότητας απώλειας φορτίου.

Η τιμή της μεταβλητής RTH_t δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, αλλά υπολογίζεται κατά τη διαδοχική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε διάφορες υποψήφιες λύσεις της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Αρχικά, η μεταβλητή RTH_t μηδενίζεται για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Κάθε φορά που μια υποψήφια λύση οδηγεί σε παραβίαση του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου για μια συγκεκριμένη ώρα t , η αντίστοιχη μεταβλητή RTH_t αυξάνεται κατά 1 MW. Με τον τρόπο αυτό, ο περιορισμός (6.21) λειτουργεί ως ένας αρχικός έλεγχος που προηγείται της εφαρμογής του περιορισμού αξιοπιστίας. Συνεπώς, η ανανέωση της τιμής του RTH_t συντελεί στη μείωση των εφικτών υποψήφιων λύσεων για κάθε ώρα t , πριν το χρονοβόρο υπολογισμό του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου, με αποτέλεσμα τη σημαντική επιτάχυνση της συνολικής μεθόδου.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η διαδικασία ενσωμάτωσης του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου περιγράφεται από τα εξής βήματα:

- Βήμα 1. Παραγωγή μιας νέας υποψήφιας λύσης X_{new} από τη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης.
- Βήμα 2. Έλεγχος ικανοποίησης του περιορισμού (6.21) για κάθε ώρα $t \in H[H_1, H_2]$. Αν διαπιστωθεί παραβίαση του περιορισμού, η λύση X_{new} απορρίπτεται και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 6, διαφορετικά εκτελείται το Βήμα 3.
- Βήμα 3. Αρχικοποίηση του δείκτη χρόνου $t = H_1$.
- Βήμα 4. Υπολογισμός του $LOLP_t$:
 - Αν $LOLP_t \leq LOLP_{\max}$, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 7.
 - Αν $LOLP_t > LOLP_{\max}$, η λύση X_{new} απορρίπτεται.
- Βήμα 5. Ανανέωση της τιμής του RTH_t . Επειδή η τρέχουσα τιμή του RTH_t οδηγεί σε παραβίαση του περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου, τίθεται $RTH_t = RTH_t + 1$.
- Βήμα 6. Παραγωγή μιας νέας υποψήφιας λύσης και μετάβαση στο Βήμα 9.
- Βήμα 7. Αν $t < H_2$, αυξάνεται ο δείκτης χρόνου $t = t + 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 4, διαφορετικά εκτελείται το Βήμα 8.
- Βήμα 8. Η υποψήφια λύση X_{new} ικανοποιεί τον περιορισμό πιθανότητας απώλειας φορτίου.
- Βήμα 9. Επιστροφή στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης.

Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στη θεώρηση ότι η τρέχουσα λύση X_{curr} είναι εφικτή ως προς τον περιορισμό πιθανότητας απώλειας φορτίου. Συνεπώς, κατά το στάδιο εύρεσης της αρχικής λύσης της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η προτεινόμενη διαδικασία εφαρμόζεται για ολόκληρη την περίοδο προγραμματισμού, δηλαδή $H_1 = 1$ και $H_2 = T$. Στη συνέχεια, η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται μόνο για τις ώρες κατά τις οποίες πραγματοποιείται αλλαγή στην κατάσταση κάποιας θερμικής μονάδας. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται σημαντική μείωση των συνολικών υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου.

Η προτεινόμενη διαδικασία διασφαλίζει ότι η τελική λύση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας, με βάση το δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου.

6.4.2. Ενσωμάτωση περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας

Η ενσωμάτωση του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής επιτυγχάνεται μέσω μιας δυναμικής συνάρτησης ποινής. Η χρήση της συνάρτησης ποινής αποσκοπεί στην αύξηση του συνολικού κόστους της εκάστοτε τρέχουσας λύσης του προβλήματος, σε περίπτωση που η λύση αυτή δεν παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας.

Το πρώτο βήμα της προτεινόμενης διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας EUE_{tot} για κάθε υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, μέσω των εξισώσεων (6.13), (6.14) και (6.20). Ο συγκεκριμένος δείκτης υπολογίζεται για ολόκληρη την περίοδο προγραμματισμού. Προκειμένου να επιτευχθεί εξοικονόμηση χρόνου, γίνεται χρήση ενός βοηθητικού πίνακα, στον οποίο αποθηκεύονται οι τιμές της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας για κάθε ώρα της περιόδου, σύμφωνα με την εκάστοτε τρέχουσα λύση. Συνεπώς, για κάθε νέα υποψήφια λύση απαιτείται ο υπολογισμός του συγκεκριμένου δείκτη μόνο για τις ώρες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε αλλαγή στο πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων, δεδομένου ότι η κατάσταση των υπολοίπων ωρών της περιόδου έχει μείνει αμετάβλητη.

Μετά τον υπολογισμό της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας για κάθε υποψήφια λύση, γίνεται σύγκριση της τιμής αυτής με ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο EUE_{max} , ο καθορισμός του οποίου εξαρτάται από το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας που πρέπει να παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής. Το όριο αυτό μπορεί να εκφραστεί ως ένα μικρό ποσοστό της συνολικής ενέργειας που πρέπει να καλύψει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου ανάλυσης:

$$EUE_{max} = a_{tot} \cdot \sum_{t=1}^T LOAD_t \quad (6.22)$$

όπου a_{tot} είναι μια πολύ μικρή θετική σταθερά που παίρνει τιμές κοντά στο 0 (συνήθως επιλέγεται $a_{tot} \leq 0,001$). Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η τιμή του EUE_{max} , τόσο μεγαλύτερο είναι το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος.

Με βάση τα παραπάνω, η χρήση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου EUE_{max} συνεπάγεται την ενσωμάτωση του περιορισμού αξιοπιστίας (3.12), ο οποίος αναφέρεται στο δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Σε περίπτωση, λοιπόν, που μια υποψήφια λύση του προβλήματος οδηγεί σε παραβίαση του

συγκεκριμένου περιορισμού, ένας όρος ποινής UVL προστίθεται στο συνολικό λειτουργικό κόστος της λύσης αυτής.

Ο όρος UVL είναι μια τετραγωνική συνάρτηση του μεγέθους της παραβίασης του παραπάνω περιορισμού και υπολογίζεται ως εξής:

$$UVL = \begin{cases} (EUE_{tot} - EUE_{max})^2, & \text{αν } EUE_{tot} > EUE_{max} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (6.23)$$

Η προσθήκη του όρου ποινής UVL οδηγεί σε μια επαυξημένη αντικειμενική συνάρτηση TC_{aug} του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής:

$$TC_{aug} = TC + PM \cdot UVL \quad (6.24)$$

όπου TC είναι το λειτουργικό κόστος της τρέχουσας λύσης, το οποίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.8), και PM είναι ένας δυναμικός συντελεστής, ο οποίος εκφράζει τη βαρύτητα που έχει ο όρος ποινής στη συνολική συνάρτηση του προβλήματος.

Η τιμή του συντελεστή PM αυξάνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει ένα πολύ υψηλό άνω όριο PM_{max} . Πιο συγκεκριμένα, κάθε φορά που μια υποψήφια λύση οδηγεί σε παραβίαση του περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, ο συντελεστής ποινής αυξάνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$PM_k = \min(PM_{max}, inc^k \cdot PM_0) \quad (6.25)$$

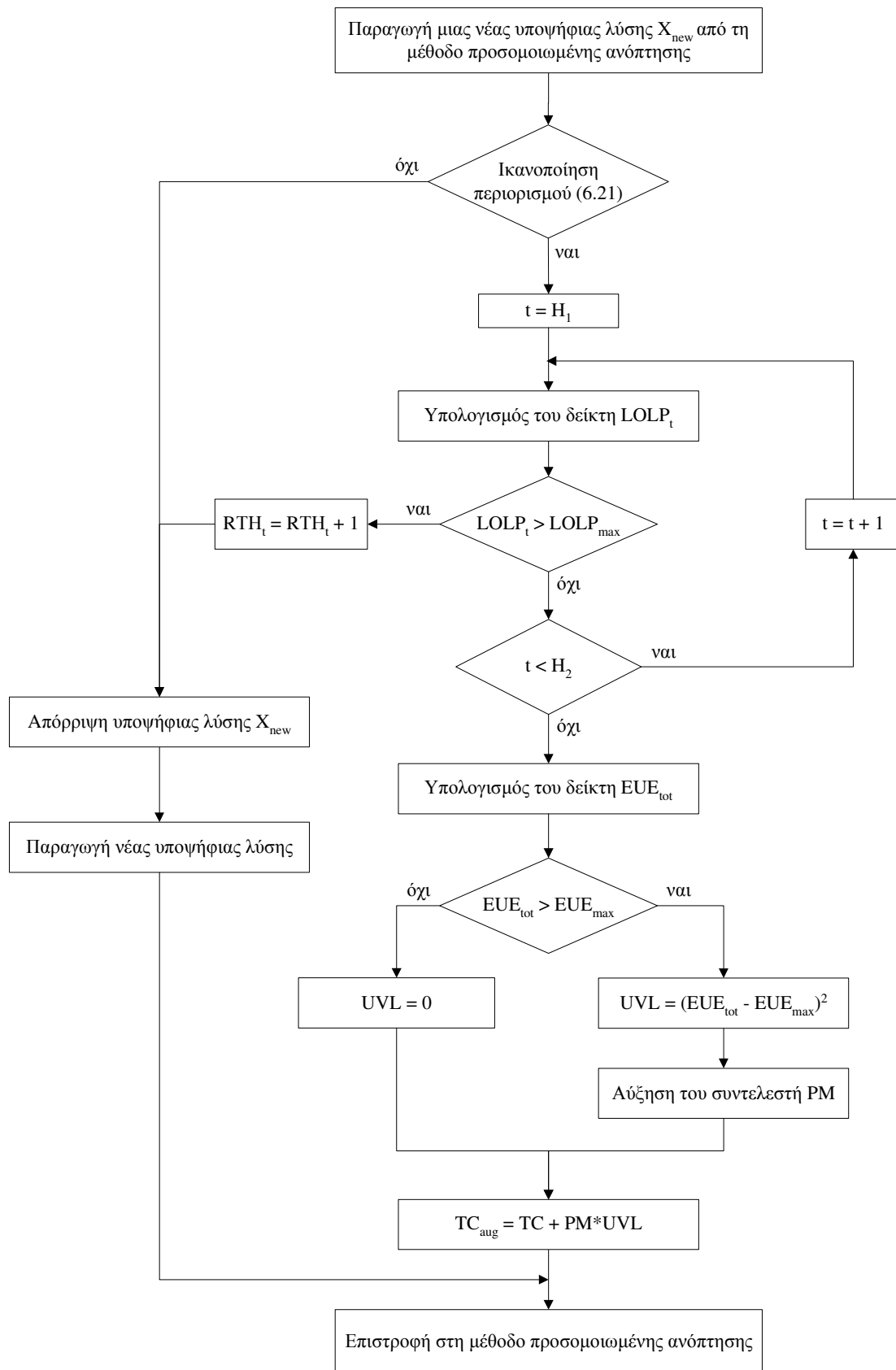
όπου PM_k είναι η τιμή του συντελεστή ποινής μετά από k παραβιάσεις του παραπάνω περιορισμού, PM_0 είναι η αρχική τιμή του συντελεστή και inc είναι μια σταθερά ελάχιστα μεγαλύτερη από 1.

Η αρχική τιμή του συντελεστή ποινής επιλέγεται πολύ κοντά στο 0, ώστε να ενθαρρύνεται στα πρώτα στάδια της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης η αποδοχή υποψήφιων λύσεων που οδηγούν σε παραβίαση του περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Αυτό είναι απαραίτητο για τη μεγαλύτερη διερεύνηση του χώρου λύσεων του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Η σταδιακή αύξηση της τιμής του PM συνεπάγεται τη μείωση της πιθανότητας αποδοχής οποιασδήποτε λύσης οδηγεί σε παραβίαση του παραπάνω περιορισμού, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εξάλειψη όλων των παραβιάσεων. Στα τελευταία στάδια της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η παραπάνω πιθανότητα είναι σχεδόν μηδενική, αφού η τιμή του PM έχει φθάσει σε πολύ υψηλά επίπεδα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το κόστος των μη εφικτών λύσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση του άνω ορίου PM_{max} είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφευχθεί η πολύ μεγάλη αύξηση του συντελεστή PM , γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αριθμητικά προβλήματα.

Η προτεινόμενη διαδικασία διασφαλίζει ότι η τελική λύση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας, με βάση το δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας.

Το γενικό διάγραμμα της συνολικής μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Γενικό διάγραμμα μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας

6.4.3. Προσδιορισμός (a posteriori) περιθωρίου στρεφόμενης εφεδρείας

Η μέθοδος που αναπτύχθηκε οδηγεί στην εύρεση μιας σχεδόν βέλτιστης λύσης του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, η οποία παρέχει το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας, με βάση τους δείκτες πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Η χρήση των συγκεκριμένων δεικτών αξιοπιστίας συμβάλλει στην αντιμετώπιση του προβλήματος της αυθαίρετης επιλογής ενός προκαθορισμένου περιθωρίου στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα της περιόδου.

Σύμφωνα, λοιπόν, με το πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων που αντιστοιχεί στην τελική λύση του προβλήματος, η στρεφόμενη εφεδρεία $RSRV_{th,t}$ που παρέχουν οι θερμικές μονάδες σε κάθε ώρα t της περιόδου προγραμματισμού μπορεί να υπολογιστεί (a posteriori) από την παρακάτω σχέση:

$$RSRV_{th,t} = \sum_{i=1}^{NT} (FST_{i,t} \cdot P_{\max,i}) - LOAD_{th,t}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (6.26)$$

όπου $FST_{i,t}$ είναι η μεταβλητή που απεικονίζει την κατάσταση λειτουργίας της θερμικής μονάδας i την ώρα t (1 αν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός) σύμφωνα με την τελική λύση του προβλήματος.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση (6.26) δεν αποτελεί επιπλέον περιορισμό του προβλήματος, αλλά χρησιμοποιείται μόνο για τον τελικό υπολογισμό της στρεφόμενης εφεδρείας που παρέχουν οι θερμικές μονάδες.

6.5. Αξιολόγηση της Μεθόδου

Η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον καθορισμό της εφεδρείας, σε αντίθεση με τις πιο διαδεδομένες εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται στον αυθαίρετο καθορισμό των απαιτήσεων του συστήματος σε στεφόμενη εφεδρεία. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται, εκτός των άλλων, σημαντική μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Η μείωση αυτή οφείλεται στη διαδικασία που ακολουθείται για την κατανομή της εφεδρείας και, πιο συγκεκριμένα, στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος παραγωγής. Θεωρώντας, δηλαδή, ότι υπάρχουν διάφορες εφικτές λύσεις του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής που παρέχουν το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας (με βάση τους δείκτες πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας), η ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης συντελεί στον εντοπισμό της λύσης με το μικρότερο λειτουργικό κόστος. Βέβαια, η τελική λύση του προβλήματος εξαρτάται άμεσα από το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας.

Η βασική διαφορά της προτεινόμενης μεθόδου από τις αντίστοιχες της βιβλιογραφίας έγκειται στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για το θερμικό σύστημα παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότερες μέθοδοι ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας δεν λαμβάνουν υπόψη τους σύνθετους περιορισμούς των θερμικών μονάδων παραγωγής, αλλά στηρίζονται σε ένα πιο απλουστευμένο μοντέλο του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός των πιθανοτικών κριτηρίων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μέθοδο για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των εξεταζόμενων συστημάτων. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο, συνήθως επιλέγεται η χρήση απλών μεθόδων επίλυσης του προβλήματος της ένταξης των μονάδων (π.χ.

λίστα προτεραιότητας), με αποτέλεσμα την εύρεση υποβέλτιστων λύσεων. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας στη μέθοδο προσομοιωμένης απόκτησης που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής συντελεί στην πληρέστερη απεικόνιση του συστήματος παραγωγής και οδηγεί στην εύρεση σχεδόν βέλτιστων λύσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

7.1. Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, ο έλεγχος των εκπομπών αέριων ρύπων έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας σε παγκόσμια κλίμακα, λόγω της ολοένα αυξανόμενης ρύπανσης του περιβάλλοντος. Το θέμα αυτό έχει προσεγγιστεί μέσω της διεθνούς νομοθεσίας, αναγνωρίζοντας τους μεγάλους κινδύνους που ανακύπτουν από τις συνεπακόλουθες αλλαγές των κλιματολογικών συνθηκών.

Η σύμβαση πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την αλλαγή του κλίματος (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC) και το πρωτόκολλο του Κιότο [134] παρέχουν ένα παγκόσμιο πλαίσιο για την καταπολέμηση των κλιματολογικών αλλαγών. Η UNFCCC επιβάλλει σε όλα τα συμβαλλόμενα μέρη τον καθορισμό εθνικών προγραμμάτων για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Με βάση το πλαίσιο της UNFCCC, το πρωτόκολλο του Κιότο θέτει στις βιομηχανικές χώρες νομικούς περιορισμούς για τις εκπομπές αέριων ρύπων και προβλέπει καινοτόμους μηχανισμούς για την επίτευξη της μείωσης των ρύπων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Οι μηχανισμοί αυτοί διευκολύνουν τις αναπτυγμένες χώρες να εκπληρώσουν τους στόχους που θέτει το πρωτόκολλο του Κιότο και στηρίζονται στη λογική ότι οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου αποτελούν παγκόσμιο πρόβλημα και, συνεπώς, δεν έχει σημασία η γεωγραφική περιοχή στην οποία επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών.

Η παραπάνω ανάλυση υποδεικνύει την ανάγκη για ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στις διαδικασίες που σχετίζονται με τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου, μάλιστα, ότι η θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνη για την εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων αέριων ρύπων, η θεώρηση των εν λόγω περιορισμών παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος. Στα πλαίσια αυτά, αναπτύχθηκαν δύο πρωτότυπες μέθοδοι για την ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Η πρώτη μέθοδος επικεντρώνεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων (European Emissions Trading Scheme – ETS). Σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική της αυστηρής εφαρμογής των περιορισμών εκπομπών ρύπων, ο στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους που συνεπάγεται ο έλεγχος των συνολικών εκπομπών CO₂ του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών.

Η δεύτερη μέθοδος που αναπτύχθηκε αποσκοπεί στην ενσωμάτωση των περιορισμών που αναφέρονται στους υπόλοιπους αέριους ρύπους, οι οποίοι δεν λαμβάνονται υπόψη στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη χρήση μιας συνάρτησης ποινής, η

οποία προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Η υιοθέτηση της συνάρτησης ποινής διασφαλίζει ότι η τελική λύση του προβλήματος ικανοποιεί όλους τους θεωρούμενους περιορισμούς.

Σε κάθε περίπτωση, πάντως, οι περιορισμοί εκπομπών ρύπων δεσμεύουν μόνο το θερμικό σύστημα παραγωγής, δεδομένου ότι η υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας δεν προκαλεί ατμοσφαιρική ρύπανση. Για το λόγο αυτό, οι δύο παραπάνω μέθοδοι αποσκοπούν στην ενσωμάτωση των συγκεκριμένων περιορισμών στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται όλες οι παραπάνω διαδικασίες, αφού προηγηθεί μια σύντομη περιγραφή του βασικού θεσμικού πλαισίου που έχει υιοθετηθεί, σε παγκόσμια και ευρωπαϊκή κλίμακα, για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων.

7.2. Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο εγκρίθηκε στις 10 Δεκεμβρίου 1997, στοχεύει στη μείωση των εκπομπών ρύπων που σχετίζονται με τα αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases – GHG). Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα έξι ακόλουθα αέρια:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)
- Μεθάνιο (CH_4)
- Υποξείδιο του αζώτου (N_2O)
- Υδρογονοφθοράνθρακες (HFCs)
- Υπερφθοράνθρακες (PFCs)
- Εξαφθοριούχο θείο (SF_6)

Με βάση το πρωτόκολλο του Κιότο, οι χώρες που είναι βιομηχανικές ή βρίσκονται σε στάδιο μετάβασης σε καθεστώς οικονομίας ελεύθερης αγοράς (οι επονομαζόμενες “χώρες του Annex I”) υποχρεούνται να μειώσουν τις συνολικές εκπομπές των έξι αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 5%, αναφορικά με τα επίπεδα του 1990 (έτος αναφοράς). Η δέσμευση αυτή ισχύει για την περίοδο 2008 – 2012 (πρώτη περίοδο δέσμευσης).

Το πρωτόκολλο του Κιότο ορίζει συγκεκριμένους στόχους μείωσης των εκπομπών ρύπων για κάθε χώρα του Annex I. Αντίθετα, δεν επιβάλλονται αντίστοιχες δεσμευτικές υποχρεώσεις για τις αναπτυσσόμενες χώρες, προκειμένου να διευκολυνθεί η περαιτέρω βιομηχανική τους ανάπτυξη. Η διάκριση αυτή στηρίζεται, κυρίως, στο γεγονός ότι οι βιομηχανικές χώρες ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό των εκπομπών αέριων ρύπων σε παγκόσμια κλίμακα και, συνεπώς, οφείλουν να αναλάβουν δράση για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Έχοντας ως σημείο αναφοράς το πρωτόκολλο του Κιότο, η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύτηκε στο σύνολό της να μειώσει τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε ποσοστό 5% κατά τη διάρκεια της πρώτης περιόδου δέσμευσης. Ο στόχος αυτός επιμερίζεται μεταξύ των κρατών μελών με μια νομικά δεσμευτική συμφωνία επιμερισμού των βαρών. Η συμφωνία αυτή θέτει συγκεκριμένα όρια εκπομπών ρύπων για κάθε κράτος μέλος. Για παράδειγμα, η Ελλάδα δεσμεύεται για τον περιορισμό της αύξησης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά την περίοδο

2008 – 2012 στο 25% σε σχέση με τις εκπομπές του έτους βάσης. Ως έτος βάσης για τις εκπομπές CO₂, CH₄ και N₂O λαμβάνεται το 1990, ενώ για τις εκπομπές HFCs, PFCs και SF₆ λαμβάνεται το 1995. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης επικύρωσαν το πρωτόκολλο του Κιότο στις 31 Μαΐου 2002.

Όπως είναι φυσικό, η επίτευξη των στόχων που θέτει το πρωτόκολλο του Κιότο συνεπάγεται ένα σημαντικό οικονομικό κόστος για τις υπόχρεες χώρες, το οποίο σχετίζεται άμεσα με τα μέτρα που υιοθετούνται σε κάθε περίπτωση. Για το λόγο αυτό, 10 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μεταξύ αυτών και η Ελλάδα, απέχουν σημαντικά από την εκπλήρωση των υποχρεώσεών τους που ανακύπτουν από τη συμφωνία επιμερισμού των βαρών. Συνεπώς, απαιτείται μεγάλη προσπάθεια ώστε να καταστεί δυνατή η πλήρης συμμόρφωσή τους με τους στόχους του πρωτοκόλλου του Κιότο.

7.2.1. Ευέλικτοι μηχανισμοί μείωσης εκπομπών αέριων ρύπων

Η επίτευξη των στόχων μείωσης εκπομπών ρύπων που θέτει το πρωτόκολλο του Κιότο προϋποθέτει την υιοθέτηση δραστικών μέτρων στο εσωτερικό κάθε υπόχρεας χώρας. Παράλληλα, όμως, με την απαίτηση για εγχώριες δράσεις, το πρωτόκολλο του Κιότο προβλέπει την αξιοποίηση τριών ευέλικτων μηχανισμών, οι οποίοι στηρίζονται στις αρχές της ελεύθερης αγοράς. Ο αντικειμενικός στόχος των μηχανισμών αυτών είναι η μείωση του κόστους των επενδύσεων που απαιτούνται για την επίτευξη των στόχων του Κιότο, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι επιπτώσεις από τη ρύπανση του περιβάλλοντος δεν έχουν σύνορα.

Οι ευέλικτοι μηχανισμοί του Κιότο είναι οι εξής:

- Κοινή Εφαρμογή (Joint Implementation – JI)
- Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης (Clean Development Mechanism – CDM)
- Διεθνές Εμπόριο Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων (International Emissions Trading – IET)

Με τη βοήθεια των παραπάνω μηχανισμών, οποιαδήποτε χώρα του Annex I (ή επιχείρηση που δραστηριοποιείται στο εσωτερικό μιας χώρας του Annex I) έχει τη δυνατότητα να συμμετάσχει σε προγράμματα μείωσης των εκπομπών ρύπων, τα οποία υλοποιούνται σε μια άλλη χώρα. Η λογική και ο τρόπος εφαρμογής των συγκεκριμένων μηχανισμών αναλύονται εν συντομία στις ακόλουθες παραγράφους.

7.2.1.1. Κοινή Εφαρμογή

Ο μηχανισμός της Κοινής Εφαρμογής επιτρέπει σε οποιαδήποτε χώρα του Annex I να εκπληρώσει ένα μέρος των υποχρεώσεών της που απορρέουν από το πρωτόκολλο του Κιότο χρηματοδοτώντας προγράμματα μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε άλλες χώρες του Annex I, δεδομένου ότι με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί το συνολικό κόστος της επένδυσης. Ο συγκεκριμένος διακανονισμός υπόκειται στις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- Όλες οι εμπλεκόμενες χώρες είναι σύμφωνες για την πραγματοποίηση των εν λόγω έργων.
- Η πραγματοποίηση των συγκεκριμένων έργων συντελεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών ρύπων, η οποία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σε διαφορετική περίπτωση.

Η λογική του μηχανισμού στηρίζεται στη δημιουργία ενός σεναρίου αναφοράς, με βάση το οποίο υπολογίζεται η μείωση των εκπομπών ρύπων στην υποθετική περίπτωση μη εφαρμογής του μηχανισμού Κοινής Εφαρμογής. Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται θεωρώντας δεδομένη την υλοποίηση ενός προγράμματος μείωσης εκπομπών ρύπων στα πλαίσια του εν λόγω μηχανισμού. Τα επιπρόσθετα οφέλη αποτελούν μέτρο σύγκρισης για την παροχή επιπλέον Μονάδων Μείωσης Εκπομπών (Emission Reduction Units – ERUs) στη χώρα που χρηματοδότησε το συγκεκριμένο έργο. Οι Μονάδες αυτές μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν από τη χώρα που τις πιστώνεται για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων της αναφορικά με το πρωτόκολλο του Κιότο, είτε να πωληθούν σε άλλη χώρα, προκειμένου να εκπληρώσει τις δικές της υποχρεώσεις. Η διαδικασία αυτή ισχύει για την πρώτη περίοδο δέσμευσης του Κιότο.

Δεδομένου, βέβαια, ότι κάθε ένα από τα έξι αέρια του θερμοκηπίου έχει διαφορετική επίδραση στο φαινόμενο της αλλαγής του κλίματος, μια Μονάδα Μείωσης Εκπομπών αντιστοιχεί στην περίπτωση που επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών οποιουδήποτε αερίου του θερμοκηπίου, η οποία ισοδυναμεί με την επίδραση που έχει η μείωση εκπομπών ενός τόνου CO₂. Συνεπώς, οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου μετριούνται σε ισοδύναμους τόνους CO₂ (tCO₂eq), ώστε να καθιερωθεί μια ενιαία μονάδα μέτρησης των εκπομπών. Για παράδειγμα, 1 τόνος εκπομπών CH₄ έχει την ίδια κλιματολογική επίδραση με 21 τόνους εκπομπών CO₂, δηλαδή 1 tCH₄ = 21 tCO₂eq.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός Κοινής Εφαρμογής μπορεί να αξιοποιηθεί από οποιαδήποτε επιχείρηση δραστηριοποιείται σε μια χώρα του Annex I, υπό την προϋπόθεση ότι η επιχείρηση αυτή δεσμεύεται από την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων μείωσης εκπομπών ρύπων. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, ο συγκεκριμένος μηχανισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο συμπληρωματικά με τις υπόλοιπες δράσεις που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο εσωτερικό κάθε χώρας για τη μείωση των εκπομπών ρύπων.

7.2.1.2. Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης

Ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης ακολουθεί την ίδια λογική με το μηχανισμό Κοινής Εφαρμογής, με τη διαφορά ότι τα προγράμματα μείωσης των εκπομπών ρύπων, τα οποία χρηματοδοτούνται από τις χώρες του Annex I, πρέπει να υλοποιηθούν στο εσωτερικό των αναπτυσσόμενων χωρών (χώρες εκτός Annex I). Η υλοποίηση ενός έργου μέσω του συγκεκριμένου μηχανισμού προϋποθέτει την ικανοποίηση όλων των κριτηρίων που θέτονται από την κυβέρνηση της χώρας που φιλοξενεί το έργο.

Ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης αποβλέπει στα ακόλουθα οφέλη:

- Μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων στις αναπτυσσόμενες χώρες, μέσω της κατασκευής προηγμένων τεχνολογικά και φιλικότερων προς το περιβάλλον εγκαταστάσεων στο εσωτερικό τους.
- Ενίσχυση του ρυθμού ανάπτυξης των αναπτυσσόμενων χωρών, μέσω της υλοποίησης νέων επενδύσεων στο εσωτερικό τους.
- Εκπλήρωση των υποχρεώσεων των αναπτυσσόμενων χωρών αναφορικά με τη μείωση των εκπομπών ρύπων με σημαντικά χαμηλότερο κόστος, συγκριτικά με την περίπτωση υλοποίησης των απαιτούμενων έργων στο εσωτερικό των χωρών αυτών.

Δεδομένου, όμως, ότι οι αναπτυσσόμενες χώρες δεν δεσμεύονται από το πρωτόκολλο του Κιότο, τα έργα που πραγματοποιούνται μέσω του συγκεκριμένου μηχανισμού επιβλέπονται από μια διεθνή αρχή (CDM Executive Board), προκειμένου να επικυρωθεί η μείωση των εκπομπών ρύπων που επιτυγχάνεται. Η αρχή αυτή είναι υπεύθυνη για την έκδοση Πιστοποιημένων Μειώσεων Εκπομπών (Certified Emission Reductions – CERs), τα οποία παρέχονται στις επιχειρήσεις που επιτυγχάνουν τη μείωση των εκπομπών ρύπων μέσω του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης. Ο υπολογισμός των Πιστοποιημένων Μειώσεων Εκπομπών στηρίζεται στην ίδια ακριβώς λογική με τις Μονάδες Μείωσης Εκπομπών, οι οποίες αναφέρονται στο μηχανισμό Κοινής Εφαρμογής.

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης είναι η δυνατότητα που παρέχεται στις επιχειρήσεις να επιτύχουν επιπρόσθετα οφέλη από την πρόωγη δράση τους στα πλαίσια του εν λόγω μηχανισμού. Πιο συγκεκριμένα, μια επιχείρηση μπορεί να ξεκινήσει την υλοποίηση ενός έργου πριν την έναρξη της πρώτης περιόδου δέσμευσης του Κιότο, αρκεί να αποδείξει ότι αποτελεί τμήμα ενός ολοκληρωμένου προγράμματος μείωσης των ρύπων, και να αποταμιεύσει εγκαίρως τις Πιστοποιημένες Μειώσεις Εκπομπών.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα χρηματοδότησης ενός έργου του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης από την ίδια χώρα που φιλοξενεί το έργο. Η διαδικασία αυτή καλείται Μονομερής Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης (Unilateral CDM). Στην περίπτωση αυτή, οι Πιστοποιημένες Μειώσεις Εκπομπών που αποκτά η χώρα μπορούν να πωληθούν μέσω του Διεθνούς Εμπορίου Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων.

7.2.1.3. Διεθνές Εμπόριο Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων

Το Διεθνές Εμπόριο Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων αποτελεί τον τρίτο ευέλικτο μηχανισμό του Κιότο, ο οποίος αποβλέπει στον περιορισμό του συνολικού κόστους των επενδύσεων που απαιτούνται για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μηχανισμό, οι χώρες που ανήκουν στο Annex I έχουν τη δυνατότητα να αγοράζουν ή να πωλούν Εμπορεύσιμες Άδειες Εκπομπών (Tradable Emissions Permits – TEPs), ανάλογα με το έλλειμμα ή το πλεόνασμα, αντίστοιχα, των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων που διαθέτουν.

Η λειτουργία του εν λόγω μηχανισμού στηρίζεται στην προϋπόθεση ότι κάθε συμβαλλόμενη χώρα δεσμεύεται από ένα άνω όριο εκπομπών αέριων ρύπων, το οποίο καθορίζεται σε ετήσια βάση. Το όριο αυτό μεταφράζεται στην παροχή αντίστοιχων δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων. Κάθε δικαίωμα αντιστοιχεί στην εκπομπή ενός ισοδύναμου τόνου CO₂. Σε περίπτωση, λοιπόν, που μια χώρα επιτύχει σημαντική μείωση των εκπομπών της, με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων, τα πλεονάζοντα δικαιώματα μπορούν να πωληθούν μέσω του Διεθνούς Εμπορίου Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων, σε τιμή που ορίζεται από τους κανόνες της αγοράς. Αντίστοιχα, όποια χώρα εξαντλήσει τα δικαιώματα εκπομπών που της αναλογούν έχει τη δυνατότητα να αγοράσει επιπλέον δικαιώματα με την ίδια διαδικασία.

Η διαπραγμάτευση των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων μπορεί να γίνεται είτε σε εθνικό επίπεδο, μεταξύ των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται στο εσωτερικό κάθε χώρας του Annex I και δεσμεύονται από την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων μείωσης εκπομπών ρύπων, είτε σε υπερεθνικό επίπεδο, μεταξύ των κυβερνήσεων (ή και των επιχειρήσεων) των συμβαλλόμενων χωρών. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η

ευθύνη για την επίτευξη των στόχων του Κιότο ανήκει αποκλειστικά στις κυβερνήσεις των υπόχρεων χωρών.

Η υιοθέτηση του συγκεκριμένου μηχανισμού στηρίζεται στη λογική ότι το κόστος των εγχώριων προγραμμάτων μείωσης των εκπομπών μπορεί να διαφέρει από χώρα σε χώρα. Συνεπώς, οι χώρες με αυξημένο κόστος ανάληψης εγχώριων δράσεων έχουν τη δυνατότητα να αποζημιώσουν, κατά κάποιο τρόπο, τις χώρες με χαμηλό κόστος. Βέβαια, το καθαρό κέρδος από τη χρήση του μηχανισμού αποτελεί συνάρτηση της τιμής στην οποία γίνεται η διαπραγμάτευση των δικαιωμάτων εκπομπών. Δεδομένου, όμως, ότι η τιμή αυτή καθορίζεται με βάση τους μηχανισμούς της ελεύθερης αγοράς, ο προτεινόμενος μηχανισμός αναμένεται να συμβάλλει έμμεσα στην εντατικοποίηση των διαδικασιών μείωσης των εκπομπών αέριων ρύπων.

7.3. Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων

Οι τρεις προαναφερόμενοι μηχανισμοί του Κιότο δεν έχουν τεθεί ακόμη σε ισχύ. Παρόλα αυτά, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη προχωρήσει σε ένα εσωτερικό σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, το οποίο θεωρείται πρόδρομος του Διεθνούς Εμπορίου Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Το σύστημα αυτό αναλύεται στην Οδηγία 2003/87/EC [135] της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία τέθηκε σε εφαρμογή μέσω της Απόφασης 2004/156/EC [136] της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.

Το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της αλλαγής του κλίματος. Πρόκειται για το πρώτο πολυεθνικό σύστημα εμπορίας εκπομπών CO₂ παγκοσμίως και καλύπτει περισσότερες από 12.000 εγκαταστάσεις σε 10 πρωτογενείς βιομηχανικούς τομείς (ηλεκτροπαραγωγή και λοιπές εγκαταστάσεις καύσης, διυλιστήρια, σίδηρος και χάλυβας, φρύξη μεταλλευμάτων, τσιμέντο, ασβέστης, γυαλί, κεραμικά και χαρτί) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι επιχειρήσεις αυτές είναι υπεύθυνες σχεδόν για το 50% των συνολικών εκπομπών CO₂ της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στο μέλλον ενδέχεται να ενταχθούν στο σύστημα και άλλοι κλάδοι, όπως για παράδειγμα οι μεταφορές.

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό σύστημα εμπορίας ρύπων, η αρμόδια αρχή κάθε χώρας εκδίδει άδειες εκπομπών για τα αέρια του θερμοκηπίου, οι οποίες παρέχονται στον υπεύθυνο κάθε εγκατάστασης που αναφέρεται στην Οδηγία 2003/87/EC. Ο τρόπος υπολογισμού και διάθεσης των συγκεκριμένων αδειών καθορίζεται από το Εθνικό Σχέδιο Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών που καταρτίζει κάθε χώρα. Κάθε άδεια αντιστοιχεί στο δικαίωμα εκπομπής ενός ισοδύναμου τόνου CO₂ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια προκαθορισμένη εμπορική περίοδο. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την περίοδο 2005 – 2008, τα κράτη μέλη υποχρεούνται να κατανείμουν τουλάχιστον το 95% των δικαιωμάτων δωρεάν, ενώ για την περίοδο 2008 – 2012 το αντίστοιχο ποσοστό ανέρχεται σε 90%.

Τα δικαιώματα εκπομπών αποτελούν εμπορεύσιμο αγαθό. Πιο συγκεκριμένα, οι επιχειρήσεις που κατορθώνουν να διατηρήσουν τις συνολικές εκπομπές τους σε χαμηλότερα επίπεδα από τα δικαιώματα που τους έχουν χορηγηθεί, έχουν τη δυνατότητα να πουλήσουν τα πλεονάζοντα δικαιώματα στις επιχειρήσεις που αντιμετωπίζουν πρόβλημα αναφορικά με την εκπλήρωση των δικών τους υποχρεώσεων. Η τιμή διαπραγμάτευσης των δικαιωμάτων καθορίζεται με βάση τους κανόνες της αγοράς (προσφορά – ζήτηση).

Στο τέλος κάθε ημερολογιακού έτους, ο υπεύθυνος κάθε εγκατάστασης είναι υποχρεωμένος να παραδώσει τον αριθμό των δικαιωμάτων που αντιστοιχούν στη συνολική ποσότητα των εκπομπών της εγκατάστασής του για το προηγούμενο έτος. Σε περίπτωση που δεν καταστεί δυνατή η παράδοση όλων των δικαιωμάτων εκπομπών που αντιστοιχούν σε μια εγκατάσταση, προβλέπεται η επιβολή ενός αυστηρού προστίμου για κάθε επιπλέον τόνο CO₂. Για την περίοδο 2005 – 2008, το πρόστιμο ανέρχεται σε 40 €/tCO₂, ενώ για την πρώτη περίοδο δέσμευσης του Κιότο (2008 – 2012) το πρόστιμο ανέρχεται σε 100 €/tCO₂. Η υιοθέτηση ενός τόσο υψηλού προστίμου αποσκοπεί στη δημιουργία κατάλληλων κινήτρων για τις υπόχρεες εγκαταστάσεις, προκειμένου είτε να μειώσουν τις εκπομπές τους είτε να αγοράσουν τα δικαιώματα εκπομπών που τους λείπουν. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η καταβολή προστίμου δεν απαλλάσσει τον υπεύθυνο της εγκατάστασης από την υποχρέωση να παραδώσει, κατά την επιστροφή των δικαιωμάτων για το επόμενο ημερολογιακό έτος, τα δικαιώματα που αντιστοιχούν στην ποσότητα των καθ' υπέρβαση εκπομπών ρύπων.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, οι εγκαταστάσεις που μπορούν να επιτύχουν μείωση των συνολικών εκπομπών τους με σχετικά χαμηλό κόστος, έχουν τη δυνατότητα να επωφεληθούν πουλώντας τα πλεονάζοντα δικαιώματα εκπομπών στις επιχειρήσεις, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένο οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών. Συνεπώς, το μεγάλο πλεονέκτημα του ευρωπαϊκού συστήματος εμπορίας ρύπων έγκειται στο ότι μπορούν να επιτευχθούν οι συνολικοί στόχοι του πρωτοκόλλου του Κιότο με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Πρέπει να σημειωθεί, πάντως, ότι προς το παρόν το σύστημα αυτό αναφέρεται αποκλειστικά στις εκπομπές CO₂, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου.

7.4. Μέθοδος Ενσωμάτωσης Περιορισμού Εκπομπών CO₂

Ο αντικειμενικός στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι η ενσωμάτωση του περιορισμού εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στο πρόβλημα του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής. Η μέθοδος στηρίζεται στη θεώρηση ότι το θερμικό σύστημα παραγωγής περιορίζεται από ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εκπομπών CO₂ για την εξεταζόμενη περίοδο προγραμματισμού. Το όριο αυτό εξαρτάται από τα δικαιώματα εκπομπών ρύπων που έχει εξασφαλίσει το σύστημα για τη συγκεκριμένη περίοδο. Δεδομένου, λοιπόν, ότι η κατανομή των δικαιωμάτων γίνεται σε ετήσια βάση, η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει την κατάρτιση ενός μακροπρόθεσμου προγράμματος αξιοποίησης των συνολικών ετήσιων δικαιωμάτων, προκειμένου να καταστεί δυνατή η υιοθέτηση ενός συγκεκριμένου στόχου για την εξεταζόμενη περίοδο.

Σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική, η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει την αποδοχή λύσεων που οδηγούν σε παραβίαση του περιορισμού εκπομπών ρύπων. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων, με βάση το οποίο καθίσταται δυνατή η αγορά επιπλέον δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ σε περίπτωση που παρατηρηθεί υπέρβαση των διαθέσιμων δικαιωμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τιμή διαπραγμάτευσης των δικαιωμάτων εκπομπών καθορίζεται με βάση τους κανόνες της ελεύθερης αγοράς.

Η εφαρμογή της μεθόδου συνίσταται στον υπολογισμό των συνολικών εκπομπών CO₂ για κάθε εφικτή υποψήφια λύση που παράγεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Αν οι υπολογιζόμενες εκπομπές υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, το συνολικό κόστος της εκάστοτε τρέχουσας λύσης

προσαναζάνεται με το κόστος αγοράς των επιπλέον δικαιωμάτων εκπομπών που απαιτούνται. Σε αντίθετη περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα πώλησης των πλεοναζόντων δικαιωμάτων εκπομπών, συντελώντας σε ανάλογη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Η αναλυτική περιγραφή της προτεινόμενης μεθόδου παρατίθεται στις επόμενες ενότητες.

7.4.1. Υπολογισμός των εκπομπών CO₂

Η θερμική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνοδεύεται πάντα από την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Με βάση την Απόφαση 2004/156/EC [136] της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα $EMS_{carb,i,t}$ (tCO₂) της θερμικής μονάδας i για την ώρα t αποτελούν συνάρτηση της ενεργού παραγωγής της $P_{i,t}$ και μπορούν να υπολογιστούν μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EMS_{carb,i,t}(P_{i,t}) = FUEL_{i,t}(P_{i,t}) \cdot NCV_i \cdot EF_i \cdot OF_i \quad (7.1)$$

όπου $FUEL_{i,t}$ είναι η κατανάλωση καυσίμου (t ή m³) της μονάδας i για την ώρα t , ενώ οι όροι NCV_i , EF_i και OF_i εκφράζουν, αντίστοιχα, την καθαρή θερμογόνο δύναμη (TJ/t ή TJ/m³), το συντελεστή εκπομπών CO₂ (tCO₂/TJ) και το συντελεστή οξείδωσης (%) του καυσίμου που χρησιμοποιείται στη θερμική μονάδα i .

Η καθαρή θερμογόνος δύναμη και ο συντελεστής εκπομπών CO₂ εξαρτώνται από τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Η χρήση του συντελεστή οξείδωσης οφείλεται στο φαινόμενο της ατελούς οξείδωσης του άνθρακα κατά τη διαδικασία της καύσης. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της ατελούς καύσης του άνθρακα που μπορεί να προκαλέσει τη μερική οξείδωσή του σε αιθάλη και στάχτη. Στην περίπτωση, βέβαια, που το φαινόμενο της οξείδωσης έχει ληφθεί υπόψη κατά τον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπών CO₂, δεν απαιτείται η εφαρμογή του συντελεστή οξείδωσης.

Αν η λειτουργία μιας θερμικής μονάδας στηρίζεται στη χρήση ενός μείγματος καυσίμων, τότε ο συντελεστής οξείδωσης μπορεί να υπολογιστεί χωριστά για κάθε καύσιμο. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις: είτε να καθοριστεί ένας μέσος συντελεστής οξείδωσης για όλα τα καύσιμα, είτε να αποδοθεί ένας συντελεστής οξείδωσης στο βασικό καύσιμο και να θεωρηθεί ότι τα υπόλοιπα καύσιμα παρουσιάζουν συντελεστή 100%.

Σύμφωνα με την ανάλυση του τρίτου κεφαλαίου της διατριβής, το κόστος καυσίμου $FC_{i,t}$ (€/h) της μονάδας i για την ώρα t μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση είτε της τετραγωνικής συνάρτησης (3.3), είτε της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης (3.4). Σε κάθε περίπτωση, πάντως, ισχύει ότι:

$$FC_{i,t}(P_{i,t}) = FUEL_{i,t}(P_{i,t}) \cdot FSC_i \quad (7.2)$$

όπου FSC_i (€/t ή €/m³) είναι το κόστος εφοδιασμού καυσίμου για τη μονάδα i . Από το συνδυασμό των σχέσεων (7.1) και (7.2) προκύπτει ότι:

$$EMS_{carb,i,t}(P_{i,t}) = CF_i \cdot FC_{i,t}(P_{i,t}) \quad (7.3)$$

όπου CF_i (tCO₂/€) είναι ο συντελεστής αναγωγής εκπομπών CO₂ της μονάδας i και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$CF_i = (NCV_i \cdot EF_i \cdot OF_i) / FSC_i \quad (7.4)$$

Στην περίπτωση, λοιπόν, που χρησιμοποιείται η τετραγωνική συνάρτηση κόστους καυσίμου, οι εκπομπές CO₂ της θερμικής μονάδας i για την ώρα t υπολογίζονται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EMS_{carb,i,t}(P_{i,t}) = CF_i \cdot (A_i \cdot P_{i,t}^2 + B_i \cdot P_{i,t} + C_i) \quad (7.5)$$

όπου A_i , B_i , C_i είναι οι συντελεστές της συνάρτησης κόστους καυσίμου της μονάδας i .

Αντίστοιχα, η χρήση της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου συνεπάγεται ότι:

$$EMS_{carb,i,t}(P_{i,t}) = CF_i \cdot (a_{1,i} \cdot P_{1,i,t} + a_{2,i} \cdot P_{2,i,t} + \dots + a_{n,i} \cdot P_{n,i,t} + c_i) \quad (7.6)$$

όπου $a_{k,i}$ ($k = 1 \dots n$) είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος k της συνάρτησης κόστους της θερμικής μονάδας i , c_i είναι ο σταθερός όρος της συνάρτησης και $P_{k,i,t}$ είναι το επίπεδο ισχύος που αντιστοιχεί στο ευθύγραμμο τμήμα k .

Στον Πίνακα 7.1 παρουσιάζονται οι συντελεστές CF_i που αντιστοιχούν σε διάφορους τύπους θερμικών μονάδων, κάνοντας χρήση τυπικών τιμών [136] για τα χαρακτηριστικά μεγέθη των αντίστοιχων καυσίμων. Είναι φανερό ότι οι λιγνιτικές μονάδες εκπέμπουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες CO₂ συγκριτικά με τις μονάδες που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο και πετρέλαιο.

Πίνακας 7.1: Συντελεστές αναγωγής εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

Τύπος Καυσίμου	NCV (KJ/Kg ή KJ/m ³)	EF (tCO ₂ /TJ)	OF (%)	FSC (€/t ή €/m ³)	CF (tCO ₂ /€)
Φυσικό Αέριο	36400	56,1	99,5	0,21	0,00967
Πετρέλαιο	40200	77,4	99,5	305,00	0,01015
Λιγνίτης	4600	101,2	99,0	8,70	0,05297

7.4.2. Ανάλυση της μεθόδου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενσωμάτωση του περιορισμού εκπομπών CO₂ στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται σε κάθε εφικτή υποψήφια λύση που παράγεται κατά την εκτέλεση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε υποψήφια λύση υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές CO₂ του συστήματος, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Ο υπολογισμός των εκπομπών πραγματοποιείται αμέσως μετά την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για την εκάστοτε τρέχουσα λύση. Συνεπώς, μετά τον καθορισμό της ενεργού παραγωγής $P_{i,t}$ κάθε θερμικής μονάδας για κάθε ώρα της περιόδου, οι συνολικές εκπομπές $EMS_{carb,tot}$ του συστήματος για κάθε λύση μπορούν να υπολογιστούν μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EMS_{carb,tot} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NT} [ST_{i,t} \cdot EMS_{carb,i,t}(P_{i,t})] \quad (7.7)$$

όπου T είναι οι ώρες της εξεταζόμενης περιόδου, NT είναι το πλήθος των θερμικών μονάδων του συστήματος και $ST_{i,t}$ είναι η μεταβλητή που απεικονίζει την κατάσταση λειτουργίας της θερμικής μονάδας i την ώρα t (1 αν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός). Οι όροι $EMS_{carb,i,t}$ υπολογίζονται μέσω της σχέσης (7.5) ή (7.6), ανάλογα με τον τύπο της συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων, ενώ οι μεταβλητές $ST_{i,t}$ είναι δεδομένες για κάθε υποψήφια λύση.

Στη συνέχεια, η τιμή του $EMS_{carb,tot}$ συγκρίνεται με το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $EMCAP_{carb}$ εκπομπών CO_2 , η τιμή του οποίου είναι άμεση συνάρτηση των δικαιωμάτων εκπομπών που έχει εξασφαλίσει το σύστημα για τη θεωρούμενη χρονική περίοδο:

- Αν $EMS_{carb,tot} \leq EMCAP_{carb}$, τα διαθέσιμα δικαιώματα επαρκούν για την κάλυψη των συνολικών εκπομπών του συστήματος που αντιστοιχούν στην τρέχουσα λύση. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργείται ένα πλεόνασμα δικαιωμάτων το οποίο μπορεί να πωληθεί στην αγορά.
- Αν $EMS_{carb,tot} > EMCAP_{carb}$, γίνεται υπέρβαση των διαθέσιμων δικαιωμάτων εκπομπών και, συνεπώς, απαιτείται η αγορά επιπλέον δικαιωμάτων.

Σε κάθε περίπτωση, η διαπραγμάτευση των δικαιωμάτων πραγματοποιείται σε μια τιμή EMP (€/tCO₂), η οποία καθορίζεται με βάση τους κανόνες της αγοράς.

Η ενσωμάτωση της παραπάνω διαδικασίας στη μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης επιτυγχάνεται με τη χρήση της ακόλουθης επανξιμένης αντικειμενικής συνάρτησης TC_{carb} του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής:

$$TC_{carb} = TC + EMP \cdot (EMS_{carb,tot} - EMCAP_{carb}) \quad (7.8)$$

όπου TC είναι το λειτουργικό κόστος της τρέχουσας λύσης, το οποίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.8). Ο δεύτερος όρος της σχέσης (7.8) εκφράζει το κέρδος ή το επιπλέον κόστος από την πώληση ή την αγορά, αντίστοιχα, των δικαιωμάτων εκπομπών CO_2 .

Η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει την αποδοχή των υποψήφιων λύσεων που οδηγούν σε παραβίαση του περιορισμού εκπομπών CO_2 , λαμβάνοντας υπόψη την επακόλουθη αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό, η τελική λύση του προβλήματος παρέχει το βέλτιστο συμβιβασμό μεταξύ του συνολικού κόστους του συστήματος και του βαθμού ικανοποίησης του περιορισμού εκπομπών, δεδομένου ότι ο διαχειριστής του συστήματος έχει δύο εναλλακτικές επιλογές:

- τη μείωση των συνολικών εκπομπών μέσω της χρήσης πιο “καθαρών” μονάδων (π.χ. μονάδων φυσικού αερίου), οι οποίες όμως συντελούν στην αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, ή
- την υπέρβαση του περιορισμού εκπομπών ρύπων και την αγορά επιπλέον δικαιωμάτων.

Προφανώς, ο καθορισμός της βέλτιστης στρατηγικής εξαρτάται από την τιμή διαπραγμάτευσης των δικαιωμάτων εκπομπών. Πιο συγκεκριμένα, αν η τιμή EMP είναι υψηλότερη από το οριακό κόστος μείωσης των εκπομπών, η πρώτη επιλογή καθίσταται περισσότερο οικονομική. Αντίθετα, η μείωση της τιμής EMP ευνοεί την αγορά επιπλέον δικαιωμάτων εκπομπών (δεύτερη εναλλακτική επιλογή).

Συμπερασματικά, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της στρατηγικής που πρέπει να ακολουθήσει ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αναφορικά με τις εκπομπές CO₂, έχοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις συνολικές εκπομπές του συστήματος και όχι τις εκπομπές κάθε επιμέρους θερμικής μονάδας. Παρόλα αυτά, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε επίπεδο μονάδας, θεωρώντας ένα μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εκπομπών χωριστά για κάθε θερμική μονάδα του συστήματος.

7.5. Μέθοδος Ενσωμάτωσης Λοιπών Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων

Η μέθοδος που περιγράφηκε προηγουμένως μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην περίπτωση των εκπομπών CO₂, δεδομένου ότι η υφιστάμενη μορφή του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων δεν λαμβάνει υπόψη τα υπόλοιπα αέρια του θερμοκηπίου. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε και μια δεύτερη μέθοδος, η οποία αποσκοπεί στην ενσωμάτωση των περιορισμών που αναφέρονται στους υπόλοιπους αέριους ρύπους. Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στη χρήση μιας συνάρτησης ποινής, η οποία προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου είναι ο υπολογισμός των εκπομπών των διαφόρων αέριων ρύπων για κάθε εφικτή υποψήφια λύση που παρέχει η μέθοδος προσομοιωμένης απόδοσης. Σε αντίθεση με τις εκπομπές CO₂, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεν έχει ακόμη καθορίσει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον υπολογισμό των εκπομπών των υπολοίπων αερίων του θερμοκηπίου. Για την ανάλυση, λοιπόν, της προτεινόμενης μεθόδου, θεωρούμε ότι οι εκπομπές $EMS_{k,i,t}$ του ρύπου k από τη θερμική μονάδα i για την ώρα t αποτελούν συνάρτηση της ενεργού παραγωγής $P_{i,t}$ της μονάδας και μπορούν να υπολογιστούν μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$EMS_{k,i,t}(P_{i,t}) = coef_{k,i} \cdot FC_{i,t}(P_{i,t}), \quad \forall k \in NE \quad (7.9)$$

όπου NE είναι το πλήθος των ρύπων που εξετάζονται σε κάθε εφαρμογή, ενώ $coef_{k,i}$ είναι ο συντελεστής αναγωγής εκπομπών του ρύπου k από τη θερμική μονάδα i . Οι μεταβλητές $P_{i,t}$ θεωρούνται δεδομένες, καθώς προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για την εκάστοτε τρέχουσα λύση.

Ουσιαστικά, η σχέση (7.9) στηρίζεται στη διαδικασία υπολογισμού των εκπομπών CO₂. Πρέπει, πάντως, να σημειωθεί ότι η μορφή της συνάρτησης $EMS_{k,i,t}(P_{i,t})$ δεν αποτελεί δεσμευτικό παράγοντα για την εφαρμογή της μεθόδου.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η συνολική ποσότητα $EMS_{k,tot}$ του ρύπου k που εκπέμπεται από το θερμικό σύστημα παραγωγής σε όλη τη διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού μπορεί να υπολογιστεί μέσω του ακόλουθου τύπου:

$$EMS_{k,tot} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{NT} [ST_{i,t} \cdot EMS_{k,i,t}(P_{i,t})], \quad \forall k \in NE \quad (7.10)$$

Μετά τον υπολογισμό της ποσότητας $EMS_{k,tot}$ για κάθε ρύπο k , γίνεται σύγκριση της τιμής αυτής με το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $EMCAP_k$ εκπομπών του αντίστοιχου ρύπου, το οποίο μπορεί να καθοριστεί μέσω των σχετικών Οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Με τον τρόπο αυτό, ελέγχεται η ικανοποίηση του ακόλουθου περιορισμού:

$$EMS_{k,tot} \leq EMCAP_k, \quad \forall k \in NE \quad (7.11)$$

Σε περίπτωση, λοιπόν, που μια υπονήφια λύση του προβλήματος οδηγεί σε παραβίαση του περιορισμού (7.11) για οποιοδήποτε ρύπο k , το λειτουργικό κόστος TC της λύσης προσυζάνεται με έναν όρο ποινής, η τιμή του οποίου είναι ανάλογη με το μέγεθος της παραβίασης. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στην ακόλουθη επαυξημένη αντικειμενική συνάρτηση TC_{emis} του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής:

$$TC_{emis} = TC + \sum_{k=1}^{NE} [VL_k \cdot PEN_k \cdot (EMS_{k,tot} - EMCAP_k)] \quad (7.12)$$

όπου PEN_k είναι ο συντελεστής ποινής που αντιστοιχεί στον περιορισμό εκπομπών του ρύπου k , ενώ η μεταβλητή VL_k ορίζεται ως εξής:

$$VL_k = \begin{cases} 1, & \text{αν } EMS_{k,tot} > EMCAP_k \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases}, \quad \forall k \in NE \quad (7.13)$$

Οι συντελεστές PEN_k εκφράζουν τη βαρύτητα που έχουν οι αντίστοιχοι όροι ποινής στη συνολική συνάρτηση του προβλήματος. Η επιλογή ιδιαίτερα υψηλών τιμών για τους συντελεστές ποινής διασφαλίζει ότι η τελική λύση του προβλήματος ικανοποιεί τον περιορισμό (7.11) για κάθε θεωρούμενο ρύπο. Πιο συγκεκριμένα, η μείωση της παραμέτρου της θερμοκρασίας σε κάθε στάδιο της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης έχει σαν αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της πιθανότητας αποδοχής οποιασδήποτε υπονήφιας λύσης οδηγεί σε παραβίαση του παραπάνω περιορισμού, λόγω της επακόλουθης αύξησης του συνολικού κόστους της αντίστοιχης λύσης.

Σε αντίθεση, λοιπόν, με τη μέθοδο ενσωμάτωσης του περιορισμού εκπομπών CO_2 , η παραπάνω διαδικασία συντελεί στην αυστηρή εφαρμογή των περιορισμών που αναφέρονται στους υπόλοιπους αέριους ρύπους. Πρέπει, πάντως, να σημειωθεί ότι, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις, η σχέση (7.8) μπορεί να πάρει τη μορφή της επαυξημένης αντικειμενικής συνάρτησης (7.12). Αυτό μπορεί να συμβεί αν αυξηθεί σημαντικά η τιμή διαπραγμάτευσης των δικαιωμάτων εκπομπών CO_2 . Στην περίπτωση αυτή, η τιμή EMP παίζει το ρόλο του συντελεστή ποινής και, συνεπώς, η χρήση της συνάρτησης (7.8) έχει σαν αποτέλεσμα την εύρεση μιας λύσης για την οποία οι συνολικές εκπομπές CO_2 του συστήματος δεν υπερβαίνουν το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΥΔΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

8.1. Γενικά

Η βραχυπρόθεσμη υδροθερμική συνεργασία αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, η δυσκολία του οποίου έγκειται στην ταυτόχρονη θεώρηση των υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων. Ο σκοπός του συγκεκριμένου προβλήματος είναι ο βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας των μονάδων ενός υδροθερμικού συστήματος παραγωγής, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς που αναλύθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας στηρίζεται στη διάσπασή του σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα, ένα υδροηλεκτρικό και ένα θερμικό, τα οποία επιλύονται διαδοχικά. Δεδομένου ότι η επίλυση του θερμικού προβλήματος έχει ήδη εξεταστεί στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής.

Η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στη λογική της μεθόδου αποκοπής αιχμών, σύμφωνα με την οποία η χρήση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των υψηλότερων τμημάτων της καμπύλης φορτίου του συστήματος συμβάλλει στη σημαντική μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Η μέθοδος αποκοπής αιχμών έχει πολύ μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις και συντελεί σε ισοκατανομή του ισοδύναμου θερμικού φορτίου, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται η άσκοπη έναρξη και παύση της λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν τη συγκεκριμένη μέθοδο ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον προγραμματισμό λειτουργίας πολύπλοκων συστημάτων παραγωγής με μεγάλο αριθμό υδροηλεκτρικών σταθμών.

Ωστόσο, το μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στη δυσκολία άμεσης ενσωμάτωσης των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αποκοπής αιχμών οδηγεί στον υπολογισμό της ενεργού παραγωγής κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους περιορισμούς ορίων παραγωγής και συνολικής διαθέσιμης ενέργειας των υδροηλεκτρικών σταθμών. Αντίθετα, δεν εξετάζονται οι υπόλοιποι υδραυλικοί περιορισμοί, οι οποίοι σχετίζονται με τη χρονική σύνδεση των διαδοχικών ωρών προγραμματισμού.

Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται αποτελεσματικά από τη βελτιωμένη μέθοδο αποκοπής αιχμών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στόχος της προτεινόμενης μεθόδου είναι η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Αυτό

επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τη μέθοδο αποκοπής αιχμών με μια μέθοδο διορθωτικού ελέγχου για την εύρεση μιας τελικής εφικτής λύσης του προβλήματος. Ο διορθωτικός έλεγχος συνίσταται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης της τελικής λύσης από αυτή που παρέχει η μέθοδος αποκοπής αιχμών, ώστε να εξαλειφθούν οι πιθανές παραβιάσεις των πολύπλοκων υδραυλικών περιορισμών. Η συγκεκριμένη διαδικασία ανάγεται στην κατάστρωση και επίλυση ενός νέου προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού.

Η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί στον υπολογισμό ενός ισοδύναμου θερμικού φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου. Η τροποποιημένη χρονολογική καμπύλη φορτίου του συστήματος αποτελεί δεδομένο εισόδου της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Η διαδοχική εφαρμογή των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης συντελεί στην επίλυση του συνολικού προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, η παράσταση του υδροηλεκτρικού συστήματος γίνεται σε επίπεδο υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής, σύμφωνα με το πλαίσιο που περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο.

8.2. Επίλυση Υδροηλεκτρικού Προβλήματος

Η επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας επιτυγχάνεται μέσω της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών. Η προτεινόμενη μέθοδος αποσκοπεί στον υπολογισμό της ενεργού παραγωγής κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς του υδροηλεκτρικού συστήματος, οι οποίοι δίνονται από τις σχέσεις (3.19) – (3.26).

Η διαδικασία επίλυσης του παραπάνω προβλήματος στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή της συνολικής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ώρα της περιόδου. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζεται μια αρχική λύση του προβλήματος χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής. Η ενσωμάτωση των εν λόγω περιορισμών επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας μια μέθοδο διορθωτικού ελέγχου, η οποία στηρίζεται στην επίλυση ενός νέου προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού. Τελικά, η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί στον υπολογισμό του ισοδύναμου θερμικού φορτίου του συστήματος, το οποίο αποτελεί δεδομένο εισόδου για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Η εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών εξαρτάται από το κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα εναλλακτικής χρήσης των παρακάτω κριτηρίων:

- Κριτήριο 1. Ικανοποίηση του περιορισμού (3.23) που αναφέρεται στην αρχική και τελική (επιθυμητή) κατάσταση κάθε ταμιευτήρα.
- Κριτήριο 2. Ικανοποίηση του περιορισμού (3.24) που αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που μπορεί να παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής στηρίζεται στην υιοθέτηση ενός από τα παραπάνω κριτήρια, ανάλογα με τους στόχους που θέτει ο διαχειριστής του εξεταζόμενου συστήματος.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών αποτελείται από τα εξής βήματα:

- Βήμα 1. Επιλογή κριτηρίου προγραμματισμού. Αν επιλεγεί το Κριτήριο 2, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 3, διαφορετικά εκτελείται το επόμενο βήμα.
- Βήμα 2. Υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό.
- Βήμα 3. Εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών ανεξάρτητα για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό.
- Βήμα 4. Εφαρμογή της μεθόδου διορθωτικού ελέγχου για την ενσωμάτωση όλων των υδραυλικών περιορισμών.
- Βήμα 5. Αν χρησιμοποιείται το Κριτήριο 2, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 7, διαφορετικά εκτελείται το επόμενο βήμα.
- Βήμα 6. Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου. Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο σύγκλισης, υπολογίζεται εκ νέου η συνολική διαθέσιμη ενέργεια από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 3, διαφορετικά εκτελείται το επόμενο βήμα.
- Βήμα 7. Υπολογισμός του ισοδύναμου θερμικού φορτίου.

Τα βασικά βήματα της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

8.2.1. Υπολογισμός της διαθέσιμης ενέργειας από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου στηρίζεται στον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας $E_{tot,j}$ που μπορεί να παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός j κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Στην ειδική περίπτωση που ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών στηρίζεται στην ικανοποίηση του περιορισμού (3.24), οι μεταβλητές $E_{tot,j}$ αποτελούν δεδομένα εισόδου του προβλήματος και, συνεπώς, δεν απαιτείται η εκτέλεση του συγκεκριμένου βήματος. Αντίθετα, η επιλογή του πρώτου κριτηρίου προγραμματισμού (περιορισμός αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων) καθιστά απαραίτητο τον υπολογισμό των παραπάνω μεταβλητών, προκειμένου να εφαρμοστεί, στη συνέχεια, η μέθοδος αποκοπής αιχμών.

Θεωρώντας, λοιπόν, δεδομένες την αρχική ($V_{j,in}$) και τελική ($V_{j,fin}$) κατάσταση όλων των ταμιευτήρων, η μέγιστη ποσότητα ύδατος $W_{max,j}$ που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός j κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$W_{max,j} = \sum_{t=1}^T Q_{j,t} = V_{j,in} - V_{j,fin} + \sum_{t=1}^T I_{j,t} + \sum_{k=1}^{UP_j} W_{max,k}, \quad \forall j \in [1, NH] \quad (8.1)$$

όπου T είναι το πλήθος των ωρών της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού, NH είναι το πλήθος των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής του συστήματος, $Q_{j,t}$ και $I_{j,t}$ είναι, αντίστοιχα, ο ρυθμός εκροής και εισροής ύδατος στον ταμιευτήρα του

υδροηλεκτρικού σταθμού j κατά τη διάρκεια της ώρας t , ενώ UP_j είναι ο αριθμός των ανάντι υδροηλεκτρικών σταθμών του σταθμού j .

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (8.1) αντιστοιχεί στη συνολική ποσότητα ύδατος που απελευθερώνεται κατά τη λειτουργία των υδροηλεκτρικών σταθμών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ακριβώς πάνω από το σταθμό j . Στην περίπτωση, λοιπόν, των αλυσωτών φραγμάτων, η συγκεκριμένη σχέση εφαρμόζεται διαδοχικά για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό που βρίσκεται στη ροή του ίδιου ποταμού, ξεκινώντας από το σταθμό που είναι τοποθετημένος στο υψηλότερο σημείο.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι στη διατύπωση της εξίσωσης (8.1) δεν λαμβάνεται υπόψη η υπερχείλιση των ταμιευτήρων και η καθυστέρηση της μεταφοράς του ύδατος από τον υδροηλεκτρικό σταθμό k στο σταθμό j , αφού η ενσωμάτωση των συγκεκριμένων παραμέτρων προϋποθέτει τον προσδιορισμό της κατάστασης κάθε ταμιευτήρα σε κάθε ώρα της περιόδου. Συνεπώς, η πραγματική ποσότητα ύδατος που μπορεί να χρησιμοποιήσει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός είναι, συνήθως, μικρότερη από την τιμή $W_{max,j}$. Το γεγονός αυτό εξετάζεται κατά τον έλεγχο σύγκλισης της μεθόδου.

Ο καθορισμός της μέγιστης ποσότητας ύδατος για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό j οδηγεί, τελικά, στον υπολογισμό της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας $E_{tot,j}$ μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$E_{tot,j} = \sum_{t=1}^T P_{j,t} = \sum_{t=1}^T (a_j \cdot Q_{j,t}) = a_j \sum_{t=1}^T Q_{j,t} = a_j \cdot W_{max,j}, \quad \forall j \in [1, NH] \quad (8.2)$$

όπου $P_{j,t}$ είναι η ενεργός παραγωγή του υδροηλεκτρικού σταθμού j την ώρα t και a_j είναι μια θετική σταθερά που σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού σταθμού j .

Παράλληλα, ελέγχεται η ικανοποίηση του ακόλουθου περιορισμού:

$$E_{tot,j} \leq T \cdot P_{max,j}, \quad \forall j \in [1, NH] \quad (8.3)$$

όπου $P_{max,j}$ είναι το τεχνικό μέγιστο ενεργού παραγωγής του υδροηλεκτρικού σταθμού j . Σε περίπτωση που διαπιστωθεί παραβίαση του περιορισμού (8.3) για οποιοδήποτε σταθμό, η συνολική ενέργεια $E_{tot,j}$ τίθεται ίση με το άνω όριο του αντίστοιχου περιορισμού.

8.2.2. Εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών ανεξάρτητα για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό

Μετά τον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας που μπορεί να παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός, καθίσταται δυνατή η εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών. Ο αντικειμενικός στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η κατανομή της συνολικής διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας στις υψηλότερες περιοχές της χρονολογικής καμπύλης φορτίου, ώστε να επιτευχθεί επιπεδοποίηση των αιχμών φορτίου. Δεδομένου ότι κάθε σύστημα παραγωγής αποτελείται από ένα πλήθος υδροηλεκτρικών σταθμών, η μέθοδος εφαρμόζεται επαναληπτικά για κάθε σταθμό, κάνοντας χρήση μιας προκαθορισμένης λίστας προτεραιότητας. Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου, η κατανομή της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας του εκάστοτε εξεταζόμενου σταθμού συντελεί στην τροποποίηση της υπάρχουσας καμπύλης φορτίου.

Η λίστα προτεραιότητας των υδροηλεκτρικών σταθμών βασίζεται στην κατάταξή τους σε φθίνουσα σειρά, με βάση ένα από τα ακόλουθα κριτήρια:

- το μέγιστο όριο ενεργού παραγωγής ή
- τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια κάθε σταθμού.

Εναλλακτικά, η λίστα προτεραιότητας μπορεί να καθοριστεί εξωτερικά από το χρήστη. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η σειρά επιλογής των υδροηλεκτρικών σταθμών έχει πολύ μικρή σημασία, διότι ο στόχος της μεθόδου αποκοπής αιχμών είναι η επιπεδοποίηση της καμπύλης φορτίου του συστήματος. Συνεπώς, η τελική λύση εξαρτάται κυρίως από τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια όλων των υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος.

Για την ανάλυση της μεθόδου αποκοπής αιχμών, θεωρούμε τη γενική περίπτωση εφαρμογής της για έναν υδροηλεκτρικό σταθμό j , η ενεργός παραγωγή του οποίου περιορίζεται μεταξύ ενός κάτω ορίου $P_{\min,j}$ (τεχνικό ελάχιστο) και ενός άνω ορίου $P_{\max,j}$ (τεχνικό μέγιστο). Δεδομένου ότι η συνολική υδροηλεκτρική ενέργεια $E_{tot,j}$ που μπορεί να παράγει ο συγκεκριμένος σταθμός κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού δίνεται από τη σχέση (8.2), ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός $HR_{\max,j}$ των ωρών λειτουργίας του σταθμού μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$HR_{\max,j} = \begin{cases} E_{tot,j} / P_{\min,j}, & \text{αν } P_{\min,j} > 0 \\ T, & \text{αν } P_{\min,j} = 0 \end{cases} \quad \forall j \in [1, NH] \quad (8.4)$$

Το πρώτο βήμα της μεθόδου αποκοπής αιχμών είναι η κατάταξη των ωριαίων φορτίων $LOAD_t$ της περιόδου σε φθίνουσα σειρά, ξεκινώντας από το μέγιστο φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας ένα βοηθητικό πίνακα φορτίων $LDC(k)$, ο οποίος περιέχει όλα τα φορτία της περιόδου ταξινομημένα σε φθίνουσα σειρά, και έναν πίνακα $IND(k)$, κάθε στοιχείο k του οποίου αποτελεί δείκτη της ώρας της περιόδου που εμφανίζεται το φορτίο $LDC(k)$. Συνεπώς, όλα τα στοιχεία των παραπάνω πινάκων ικανοποιούν τις εξής συνθήκες:

$$LDC(k) = LOAD_t \quad \text{όπου } t = IND(k), \quad \forall k, t \in [1, T] \quad (8.5)$$

$$LDC(k) \geq LDC(k+1), \quad \forall k \in [1, T-1] \quad (8.6)$$

Η διαδικασία κατασκευής των πινάκων LDC και IND μέσω των εξισώσεων (8.5) και (8.6) μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας, για παράδειγμα, μια περίοδο 4 ωρών ($T=4$) με τα αντίστοιχα ωριαία φορτία $LOAD_t = [100, 150, 120, 140]$. Στην περίπτωση αυτή, ισχύει ότι $LDC = [150, 140, 120, 100]$ και $IND = [2, 4, 3, 1]$.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών για τον υδροηλεκτρικό σταθμό j συνίσταται στην ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία:

- Βήμα 1. Κατασκευή των πινάκων LDC και IND και ορισμός $LIM = LDC(1)$. Η μεταβλητή LIM αντιπροσωπεύει το επίπεδο πάνω από το οποίο θα πραγματοποιηθεί αποκοπή φορτίων.
- Βήμα 2. Μείωση της τιμής της μεταβλητής $LIM = LIM - 1$.
- Βήμα 3. Αρχικοποίηση του δείκτη $CUT_{tot,j} = 0$. Ο δείκτης $CUT_{tot,j}$ εκφράζει την ενέργεια του υδροηλεκτρικού σταθμού j που έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι αυτό το σημείο.

Βήμα 4. Αρχικοποίηση του δείκτη $k = 1$.

Βήμα 5. Αν $LDC(k) \leq LIM$ ή $k > HR_{max,j}$, τίθεται $k = k - 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 8, διαφορετικά εκτελείται το επόμενο βήμα.

Βήμα 6. Αποκοπή φορτίου και υπολογισμός της αντίστοιχης υδροηλεκτρικής ενέργειας $CUT_{k,j}$, καθώς και της επακόλουθης αύξησης του δείκτη $CUT_{tot,j}$:

$$CUT_{k,j} = \min[P_{max,j}, LDC(k) - LIM] \quad (8.7)$$

$$CUT_{tot,j} = CUT_{tot,j} + CUT_{k,j} \quad (8.8)$$

Βήμα 7. Αν $k < T$, αυξάνεται ο δείκτης $k = k + 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 5.

Βήμα 8. Αν $CUT_{tot,j} < E_{tot,j}$, γίνεται μετάβαση στο Βήμα 2, διαφορετικά τίθεται $HRCUT = k$ και εκτελείται το επόμενο βήμα. Η μεταβλητή $HRCUT$ εκφράζει το πλήθος των ωρών για τις οποίες έχει πραγματοποιηθεί αποκοπή φορτίου.

Βήμα 9. Υπολογίζεται η διαφορά DIF μεταξύ της υδροηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για αποκοπή φορτίου και της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας του υδροηλεκτρικού σταθμού j :

$$DIF = CUT_{tot,j} - E_{tot,j} \quad (8.9)$$

Βήμα 10. Αρχικοποίηση της μεταβλητής $k = 1$.

Βήμα 11. Υπολογισμός της μεταβλητής $CUT_{k,j}$ μέσω της εξίσωσης (8.7) και ανανέωση της μεταβλητής $LDC(k)$:

$$LDC(k) = LDC(k) - CUT_{k,j} + (DIF / HRCUT) \quad (8.10)$$

Βήμα 12. Αν $k < HRCUT$, αυξάνεται ο δείκτης $k = k + 1$ και γίνεται μετάβαση στο Βήμα 11, διαφορετικά εκτελείται το επόμενο βήμα.

Βήμα 13. Εφαρμογή της σχέσης (8.5) για τον υπολογισμό των νέων φορτίων $LOAD_{new,t}$ για κάθε ώρα t της περιόδου, με βάση τις τροποποιημένες τιμές του πίνακα LDC .

Βήμα 14. Υπολογισμός της ενεργού παραγωγής $P_{j,t}$ του υδροηλεκτρικού σταθμού j για κάθε ώρα t μέσω της σχέσης:

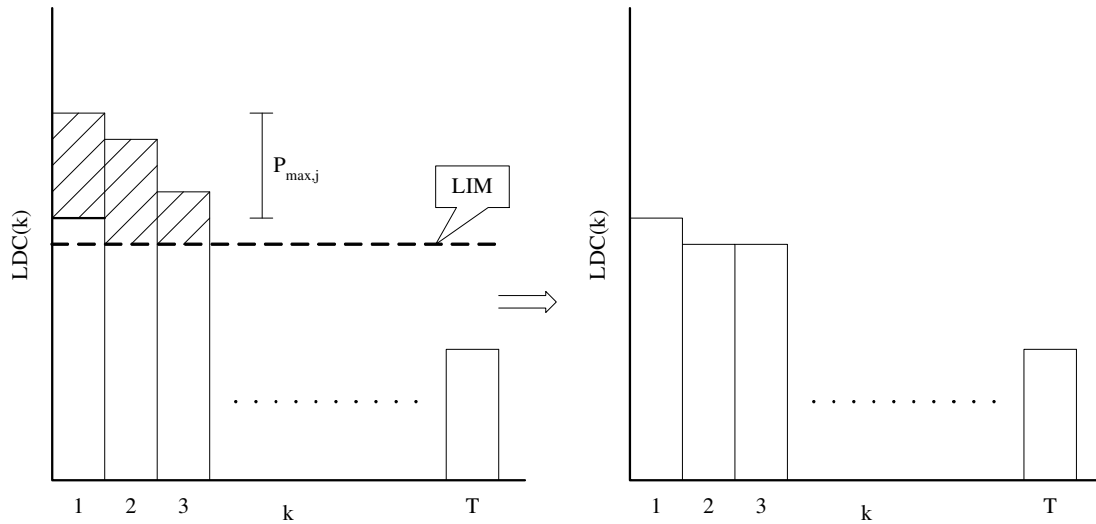
$$P_{j,t} = LOAD_t - LOAD_{new,t}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (8.11)$$

Η εξίσωση (8.10) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των τροποποιημένων φορτίων της περιόδου μετά την εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών για τον υδροηλεκτρικό σταθμό j . Όπως φαίνεται από τη συγκεκριμένη σχέση, σε περίπτωση που η συνολική διαθέσιμη ενέργεια του σταθμού είναι μικρότερη από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την αποκοπή των φορτίων, πραγματοποιείται μια μικρή διόρθωση των τελικών φορτίων, ώστε να εξαλειφθεί η συγκεκριμένη υπέρβαση. Δεδομένου, βέβαια, ότι ο στόχος της μεθόδου είναι η επιπεδοποίηση των αιχμών, η υπερβάλλουσα ενέργεια DIF κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις ώρες $HRCUT$ για τις οποίες έχει πραγματοποιηθεί αποκοπή φορτίου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου για τον πρώτο υδροηλεκτρικό σταθμό, ο πίνακας LDC κατασκευάζεται με βάση τα

πραγματικά ωραία φορτία $LOAD_t$ του συστήματος. Στη συνέχεια, για κάθε νέο υδροηλεκτρικό σταθμό χρησιμοποιούνται τα τροποποιημένα φορτία $LOAD_{new,t}$, τα οποία έχουν προκύψει μετά την εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών για τον αμέσως προηγούμενο σταθμό.

Στο Σχήμα 8.1 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της παραπάνω διαδικασίας αποκοπής αιχμών, θεωρώντας δύο διαδοχικά στιγμιότυπα. Στο πρώτο στιγμιότυπο φαίνεται η αρχική μορφή των φορτίων πριν την εφαρμογή της μεθόδου. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το επίπεδο πάνω από το οποίο πραγματοποιείται αποκοπή φορτίων, ενώ η γραμμοσκιασμένη περιοχή αντιστοιχεί στη μεταβλητή $CUT_{k,j}$. Ειδικά για την περίπτωση $k = 1$, μπορεί να φανεί και η επίδραση που έχει το τεχνικό μέγιστο του υδροηλεκτρικού σταθμού j στη συνολική διαδικασία. Το δεύτερο στιγμιότυπο του σχήματος παρουσιάζει την τελική μορφή των φορτίων μετά την εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών. Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης k του σχήματος δεν εκφράζει τις διαδοχικές ώρες της περιόδου, αλλά τη φθίνουσα σειρά κατάταξης των φορτίων στον πίνακα $LDC(k)$.



Σχήμα 8.1: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας αποκοπής αιχμών

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η διαδοχική εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών οδηγεί στον υπολογισμό της ενεργού παραγωγής $P_{j,t}$ κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j για κάθε ώρα t της περιόδου προγραμματισμού, μέσω της σχέσης (8.11), λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς (3.19) και (3.24). Παράλληλα, καθορίζεται η τιμή των δυαδικών μεταβλητών $ST_{j,t}$, οι οποίες απεικονίζουν την κατάσταση λειτουργίας του υδροηλεκτρικού σταθμού j την ώρα t (1 αν ο σταθμός είναι εντός λειτουργίας και 0 αν είναι εκτός):

$$ST_{j,t} = \begin{cases} 1, & \text{αν } P_{j,t} > 0 \\ 0, & \text{αν } P_{j,t} = 0 \end{cases} \quad \forall j \in [1, NH] \quad \forall t \in [1, T] \quad (8.12)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταβλητές $ST_{j,t}$ θεωρούνται δεδομένες κατά την εκτέλεση του επόμενου βήματος της μεθόδου, το οποίο επικεντρώνεται στην τροποποίηση των μεταβλητών $P_{j,t}$.

8.2.3. Εφαρμογή μεθόδου διορθωτικού ελέγχου για την ενσωμάτωση των υδραυλικών περιορισμών

Όπως προαναφέρθηκε, η λύση που παρέχει η μέθοδος αποκοπής αιχμών είναι εφικτή ως προς τους περιορισμούς (3.19) και (3.24). Η ενσωμάτωση των υπόλοιπων υδραυλικών περιορισμών επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής μιας μεθόδου διορθωτικού ελέγχου. Ο στόχος της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η εύρεση μιας νέας, γειτονικής λύσης του υδροηλεκτρικού προβλήματος, η οποία πρέπει να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς των υδροηλεκτρικών σταθμών.

Η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στην πρόκληση μικρών διαταραχών στις τιμές των μεταβλητών $P_{j,t}$, οι οποίες έχουν ήδη καθοριστεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών, προκειμένου να εξαλειφθούν οι τυχόν παραβιάσεις των υδραυλικών περιορισμών. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τον υπολογισμό μιας νέας τιμής $P_{new,j,t}$ για την ενεργό παραγωγή κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j για κάθε ώρα t της περιόδου.

Όπως είναι φυσικό, η τροποποίηση της αρχικής λύσης μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή της τιμής της συνολικής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ώρα της περιόδου. Συνεπώς, υφίσταται ο κίνδυνος πιθανής αλλοίωσης της λογικής της μεθόδου αποκοπής αιχμών, η οποία στηρίζεται στην επιπεδοποίηση της καμπύλης φορτίου του συστήματος.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την εύρεση της νέας εφικτής λύσης στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων SF_t , οι οποίες υπολογίζονται ως εξής:

$$SF_t = \sum_{j=1}^{NH} [ST_{j,t} \cdot (P_{new,j,t} - P_{j,t})], \quad \forall t \in [1, T] \quad (8.13)$$

Όπως προαναφέρθηκε, οι δυαδικές μεταβλητές $ST_{j,t}$ έχουν ήδη καθοριστεί στο προηγούμενο βήμα της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών και θεωρούνται δεδομένες κατά τη διαδικασία εύρεσης της νέας λύσης.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η προτεινόμενη μέθοδος διορθωτικού ελέγχου συνίσταται στην κατάστρωση και επίλυση ενός νέου προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, ο στόχος του οποίου είναι η ελαχιστοποίηση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F_{obj} = \sum_{t=1}^T SF_t^2 \quad (8.14)$$

Ουσιαστικά, η συνάρτηση (8.14) εκφράζει το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων που σχετίζονται με την τιμή της συνολικής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ώρα της περιόδου, πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου διορθωτικού ελέγχου.

Η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (8.14) υπόκειται στους περιορισμούς (3.19) – (3.26) του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής, καθώς και στον περιορισμό (8.13), ο οποίος χρησιμοποιείται για τον ορισμό των αποκλίσεων SF_t . Το συγκεκριμένο πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού περιλαμβάνει τις ακόλουθες μεταβλητές ελέγχου:

- Τις αποκλίσεις SF_t (MW) για κάθε ώρα t .
- Την ενεργό παραγωγή $P_{new,j,t}$ (MW) κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j για κάθε ώρα t . Η ενσωμάτωση της συγκεκριμένης μεταβλητής στη διατύπωση των υπόλοιπων υδραυλικών περιορισμών επιτυγχάνεται μέσω της σχέσης (3.2), σύμφωνα με την οποία η μεταβλητή $P_{new,j,t}$ αποτελεί γραμμική συνάρτηση του ρυθμού εκροής ύδατος $Q_{j,t}$ (m^3/h) του σταθμού.
- Τον όγκο ύδατος $V_{j,t}$ (m^3) που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j στο τέλος κάθε ώρας t .
- Το ρυθμό υπερχειλίσης ύδατος $S_{j,t}$ (m^3/h) κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j κατά τη διάρκεια κάθε ώρας t .

Η σύνδεση των παραπάνω μεταβλητών ελέγχου επιτυγχάνεται μέσω των προαναφερόμενων υδραυλικών περιορισμών, οδηγώντας στην κατάστρωση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης με γραμμικούς περιορισμούς και συνεχείς μεταβλητές. Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού γίνεται μέσω του υπολογιστικού κώδικα QPROG, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στη βιβλιοθήκη της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN.

8.2.4. Έλεγχος σύγκλισης της μεθόδου

Η εκτέλεση του προηγούμενου βήματος της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών οδηγεί, τελικά, στον υπολογισμό της συνολικής ενέργειας $E_{new,j}$ που παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός j κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$E_{new,j} = \sum_{t=1}^T P_{new,j,t}, \quad \forall j \in [1, NH] \quad (8.15)$$

Αν ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής στηρίζεται στην ικανοποίηση του περιορισμού της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας για κάθε σταθμό (Κριτήριο 2), η τελική τιμή της ενέργειας $E_{new,j}$ ισούται, προφανώς, με την ενέργεια $E_{tot,j}$, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου αποκοπής αιχμών για κάθε σταθμό j .

Στην περίπτωση, όμως, που θεωρούνται δεδομένες η αρχική και τελική κατάσταση των ταμιευτήρων (Κριτήριο 1), είναι πολύ πιθανό να παρατηρηθεί απόκλιση μεταξύ των τιμών $E_{new,j}$ και $E_{tot,j}$. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός, στο πρώτο στάδιο της μεθόδου, της αρχικής τιμής της ενέργειας $E_{tot,j}$ μέσω της εξίσωσης (8.2) δεν λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της υπερχειλίσης των ταμιευτήρων και την καθυστέρηση της μεταφοράς του ύδατος. Αντίθετα, οι εν λόγω παράμετροι συνυπολογίζονται, μέσω της ενσωμάτωσης των αντίστοιχων περιορισμών, κατά τη διαδικασία εύρεσης των τελικών τιμών των μεταβλητών $P_{new,j,t}$.

Το μέγεθος της απόκλισης D μεταξύ της συνολικής αρχικής και τελικής υδροηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κριτήριο σύγκλισης της προτεινόμενης μεθόδου και μπορεί να υπολογιστεί μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$D = \left| \sum_{j=1}^{NH} (E_{new,j} - E_{tot,j}) \right| / \sum_{j=1}^{NH} E_{tot,j} \quad (8.16)$$

Με βάση την εξίσωση (8.16), η σύγκλιση της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών προϋποθέτει ότι η απόκλιση D είναι μικρότερη από ένα όριο ανοχής ε πλησίον της μηδενικής τιμής. Συνεπώς, το κριτήριο σύγκλισης διατυπώνεται ως εξής:

- Αν $D \leq \varepsilon$, η βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών συγκλίνει και οι τιμές των μεταβλητών $P_{new,j,t}$ συνιστούν την τελική εφικτή λύση του υδροηλεκτρικού προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας.
- Αν $D > \varepsilon$, η μέθοδος δεν συγκλίνει. Στην περίπτωση αυτή, τίθεται $E_{tot,j} = E_{new,j}$ για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό j του συστήματος, επαναφέρεται η αρχική τιμή των φορτίων $LOAD_t$ για κάθε ώρα t της περιόδου και επαναλαμβάνονται όλα τα βήματα της προτεινόμενης μεθόδου, παρακάμπτοντας το βήμα στο οποίο γίνεται υπολογισμός της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας κάθε σταθμού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, δύο επαναλήψεις της μεθόδου είναι επαρκείς για την ικανοποίηση του συγκεκριμένου κριτηρίου σύγκλισης. Βέβαια, η χρήση του δεύτερου κριτηρίου υδροπρογραμματισμού συντελεί στην άμεση ικανοποίηση της συνθήκης $D = 0$ και, συνεπώς, δεν απαιτείται έλεγχος για τη σύγκλιση της προτεινόμενης μεθόδου.

8.2.5. Υπολογισμός του ισοδύναμου θερμικού φορτίου

Η βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών οδηγεί, τελικά, στον υπολογισμό της ενεργού παραγωγής $P_{new,j,t}$ κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού j για κάθε ώρα t της εξεταζόμενης περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς των υδροηλεκτρικών σταθμών. Συνεπώς, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του ισοδύναμου θερμικού φορτίου $LOAD_{th,t}$ για κάθε ώρα t , μέσω της ακόλουθης σχέσης:

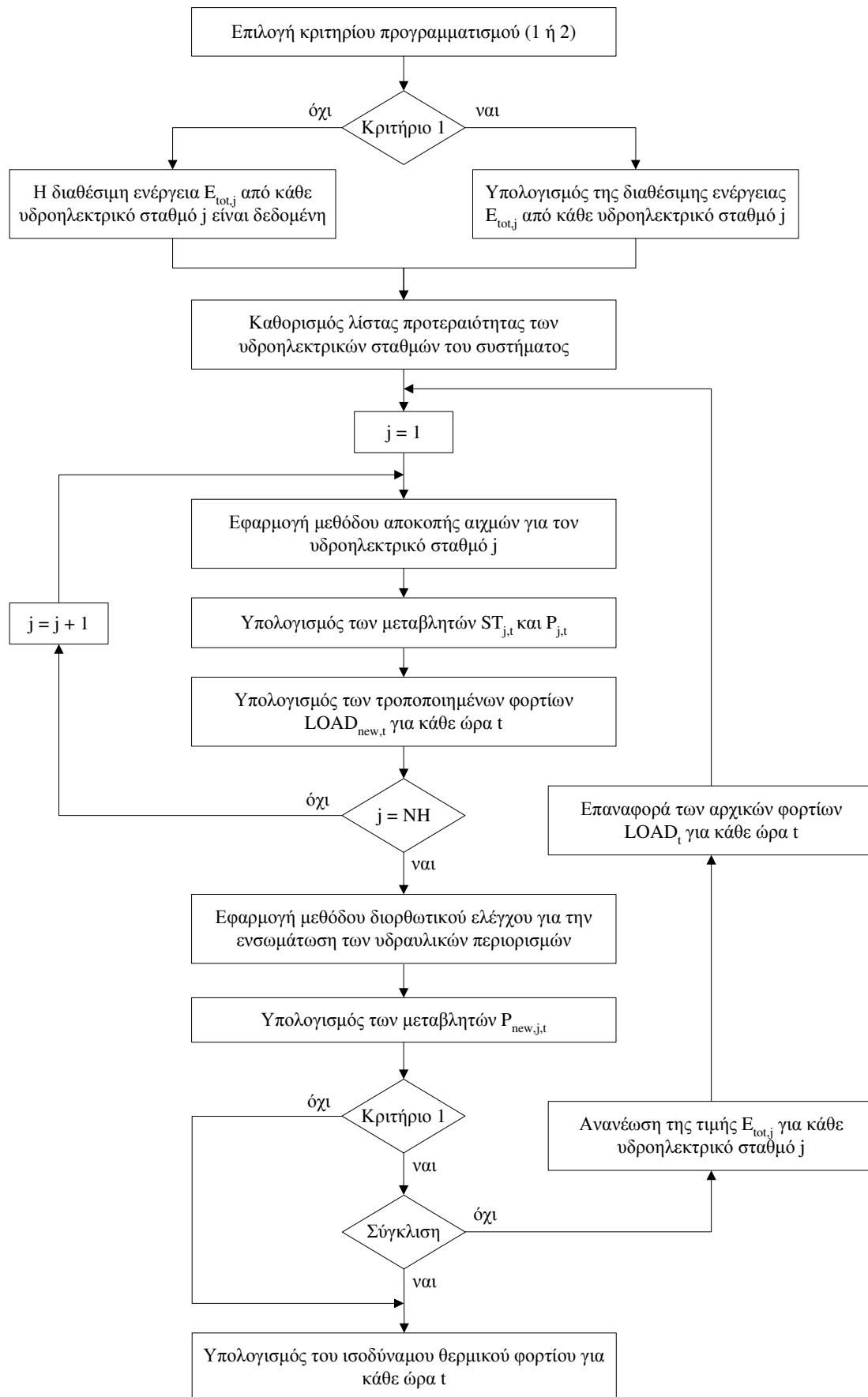
$$LOAD_{th,t} = LOAD_t - \sum_{j=1}^{NH} P_{new,j,t}, \quad \forall t \in [1, T] \quad (8.17)$$

όπου $LOAD_t$ είναι το συνολικό ωριαίο φορτίο του συστήματος για την ώρα t .

Η μεταβλητή $LOAD_{th,t}$ εκφράζει το φορτίο που καλείται να εξυπηρετήσει το θερμικό σύστημα παραγωγής για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Συνεπώς, η εξίσωση (8.17) αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στο υδροηλεκτρικό και θερμικό υποπρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας.

8.2.6. Ανακεφαλαίωση της μεθόδου

Σύμφωνα με την ανάλυση όλων των επιμέρους βημάτων, το γενικό διάγραμμα της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2: Γενικό διάγραμμα βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών

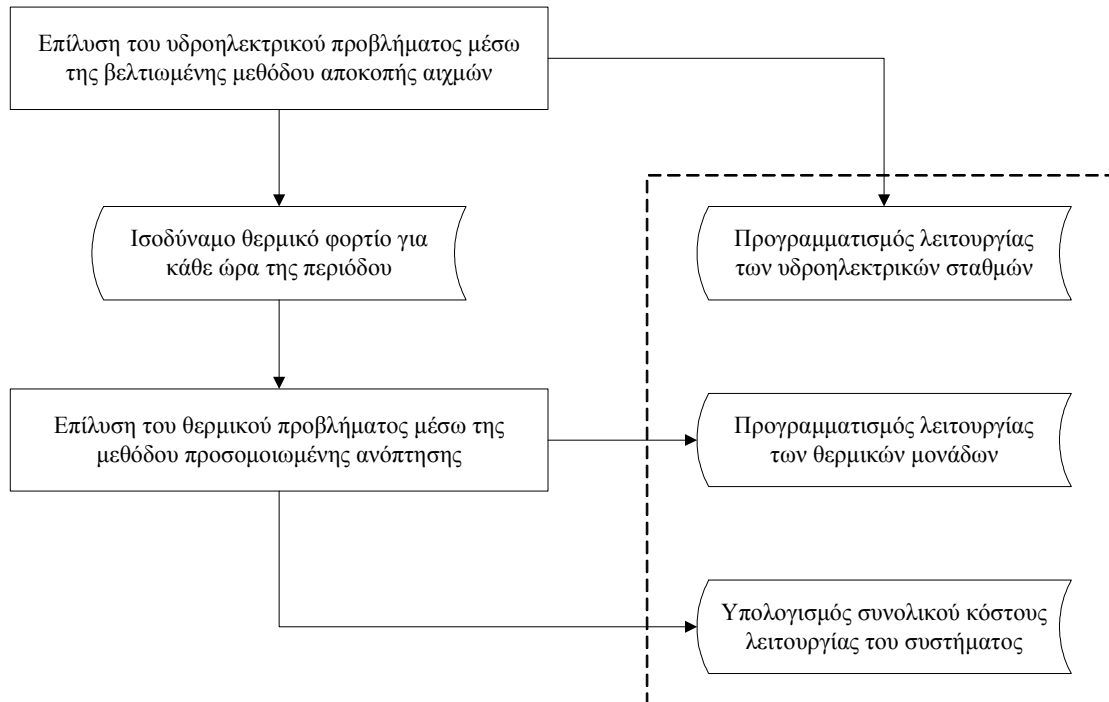
8.3. Επίλυση Θερμικού Προβλήματος

Όπως προαναφέρθηκε, η βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών συντελεί στον υπολογισμό ενός ισοδύναμου θερμικού φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου. Η εύρεση του βέλτιστου τρόπου τροφοδότησης των τροποποιημένων ωριαίων φορτίων $LOAD_{th,t}$ από το θερμικό σύστημα παραγωγής συνιστά το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Ο στόχος του προβλήματος είναι ο καθορισμός του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των θερμικών μονάδων, καθώς και της ενεργού παραγωγής κάθε θερμικής μονάδας για κάθε ώρα της θεωρούμενης περιόδου, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Η επίλυση του παραπάνω προβλήματος, θεωρώντας δεδομένο το πρόγραμμα λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, επιτυγχάνεται κάνοντας χρήση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης που παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο της διατριβής. Παράλληλα, καθίσταται δυνατή η ενσωμάτωση των περιορισμών αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων του θερμικού συστήματος παραγωγής, μέσω των αντίστοιχων μεθόδων που περιγράφηκαν στα δύο προηγούμενα κεφάλαια.

8.4. Σύνθεση Επιμέρους Προβλημάτων Υδροθερμικής Συνεργασίας

Συνοψίζοντας, το συνολικό πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας επιλύεται με τη διαδοχική εφαρμογή των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.3. Η τελική λύση του προβλήματος περιλαμβάνει τον προγραμματισμό λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών και των θερμικών μονάδων για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, καθώς και τον υπολογισμό του συνολικού κόστους του συστήματος.



Σχήμα 8.3: Συνολική μέθοδος επίλυσης βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας

8.5. Αξιολόγηση της Μεθόδου Βραχυπρόθεσμης Υδροθερμικής Συνεργασίας

Η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας παρέχει ένα αποτελεσματικό πλαίσιο για τον προγραμματισμό λειτουργίας ρεαλιστικών συστημάτων παραγωγής με μεγάλο αριθμό θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων. Η διάσπαση του προβλήματος σε δύο ανεξάρτητα υποπροβλήματα επιτρέπει την αναλυτική παράσταση του εξεταζόμενου συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύ φάσμα περιορισμών. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται εφικτή η μείωση των συνολικών υπολογιστικών απαιτήσεων, χωρίς να απαιτείται η υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών που αλλοιώνουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της τελικής λύσης.

Όπως είναι φυσικό, η διάσπαση του αρχικού προβλήματος δεν μπορεί να εγγυηθεί την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ωστόσο, η μεγάλη πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης, καθώς και η απαίτηση για ταχεία επίλυσή του, είναι παράγοντες που καθιστούν πρακτικά αδύνατη την επίτευξη ενός τόσο υψηλού στόχου, ιδιαίτερα στην περίπτωση συστημάτων με μεγάλο αριθμό μονάδων παραγωγής.

Παρόλα αυτά, η χρήση της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών συντελεί σε μια ορθολογική χρήση των υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη ποσότητα ύδατος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάθε σταθμό κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, καθώς και τους υπόλοιπους περιορισμούς του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Η εφαρμογή της μεθόδου συντελεί στην εξομάλυνση των αιχμών του συστήματος, αποφεύγοντας τις έντονες διακυμάνσεις του φορτίου. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές επιπτώσεις από τη συχνή μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας των θερμικών μονάδων. Σε συνδυασμό, λοιπόν, με τη χρήση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του θερμικού προβλήματος, επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι η διάσπαση του συνολικού προβλήματος υδροθερμικής συνεργασίας επιτρέπει την ανεξάρτητη εφαρμογή των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης για την επίλυση του υδροηλεκτρικού και θερμικού υποπροβλήματος, αντίστοιχα. Συνεπώς, καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε υφιστάμενη μέθοδο επίλυσης των επιμέρους προβλημάτων, χωρίς να επηρεαστεί η αποτελεσματικότητά της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

9.1. Γενικά

Ο σκοπός των μεθόδων που παρουσιάστηκαν είναι η μελέτη και επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής. Οι προτεινόμενες μέθοδοι υλοποιούνται μέσω ενός ενιαίου λογισμικού πακέτου.

Το πρόγραμμα αποτελείται από επιμέρους διαδικασίες, οι οποίες συντονίζονται από ένα κεντρικό πυρήνα κάνοντας χρήση μιας ενιαίας βάσης δεδομένων. Η βάση αυτή περιλαμβάνει τόσο τα δεδομένα εισόδου, όσο και τα αποτελέσματα που παράγονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Η επιτάχυνση της συνολικής υπολογιστικής διαδικασίας επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ειδικού μηχανισμού εσωτερικής ταξινόμησης των δεδομένων. Παράλληλα, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανίχνευση και διόρθωση των πιθανών σφαλμάτων που μπορούν να εμφανιστούν κατά την εκτέλεση των διαφόρων υπολογιστικών διαδικασιών.

Επιπλέον, το υπολογιστικό περιβάλλον παρέχει τη δυνατότητα εξωτερικού προγραμματισμού της μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης και της διατύπωσης των περιορισμών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου προβλήματος. Παράλληλα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού.

Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα δεδομένα που αναφέρονται στο εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής (στοιχεία των μονάδων και σταθμών παραγωγής, φορτία, απαιτήσεις εφεδρείας κ.λ.π.) και τα δεδομένα που απαιτούνται για τον εξωτερικό προγραμματισμό. Τα δεδομένα εξόδου αναφέρονται στον προγραμματισμό λειτουργίας όλων των θερμικών μονάδων και υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος, στα οικονομικά αποτελέσματα, καθώς και σε στατιστικά στοιχεία που σχετίζονται με την αξιολόγηση της απόδοσης του προγράμματος.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Πρέπει να σημειωθεί ότι δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην απλούστευση της δομής του προγράμματος, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω επέκτασής του.

9.2. Δομή του Προγράμματος

Η βασική δομή του προγράμματος περιλαμβάνει τον πυρήνα, ο οποίος διαχειρίζεται τα δεδομένα εισόδου και εξόδου και συντονίζει την εκτέλεση των επιμέρους διαδικασιών, και δύο κύριες υπολογιστικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία αφορά στην επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος μέσω της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών και η δεύτερη στην επίλυση του θερμικού προβλήματος (προγραμματισμός ένταξης των θερμικών μονάδων και οικονομική κατανομή φορτίου) μέσω της μεθόδου προσομοιωμένης απόπτησης. Οι διαδικασίες

αυτές εκτελούνται διαδοχικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο προγραμματισμός των θερμικών μονάδων παραγωγής στηρίζεται στο ισοδύναμο θερμικό φορτίο του συστήματος, το οποίο προκύπτει από την επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος.

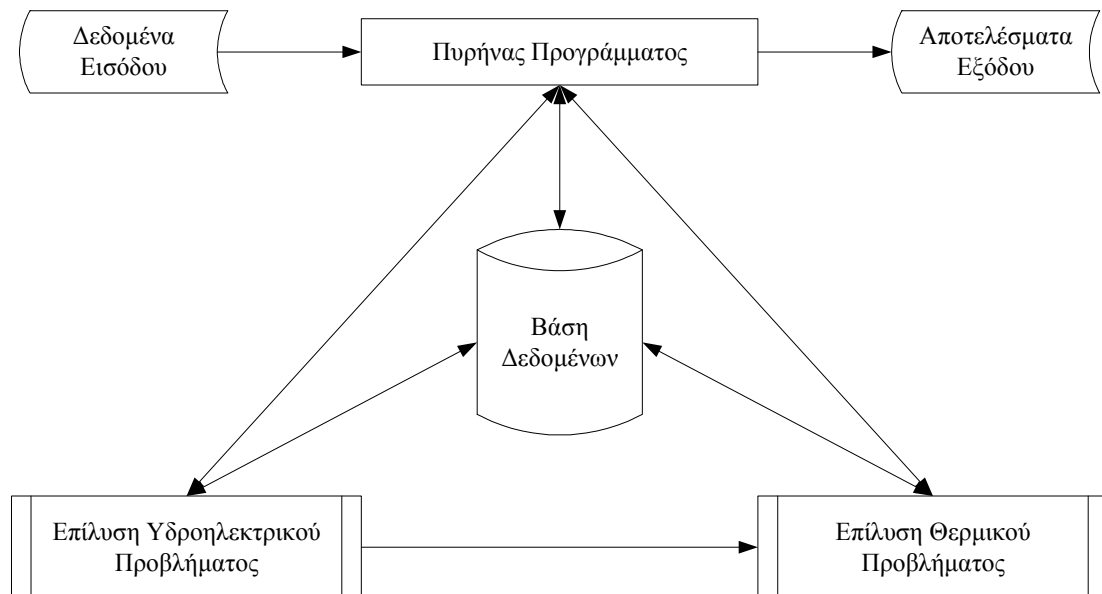
Οι δύο κύριες διαδικασίες του προγράμματος περιλαμβάνουν πολλές επιμέρους ανεξάρτητες υποδιαδικασίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται επαναληπτικά. Η σειρά εκτέλεσης των υποδιαδικασιών ρυθμίζεται από τον πυρήνα του προγράμματος.

Όλες οι υπολογιστικές διαδικασίες του προγράμματος χρησιμοποιούν την ίδια βάση δεδομένων. Η κατασκευή και διαχείριση της συγκεκριμένης βάσης στηρίζεται στην εφαρμογή ειδικών προγραμματιστικών τεχνικών, οι οποίες αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση του χώρου αποθήκευσης και του χρόνου προσπέλασης όλων των δεδομένων που χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση του προγράμματος.

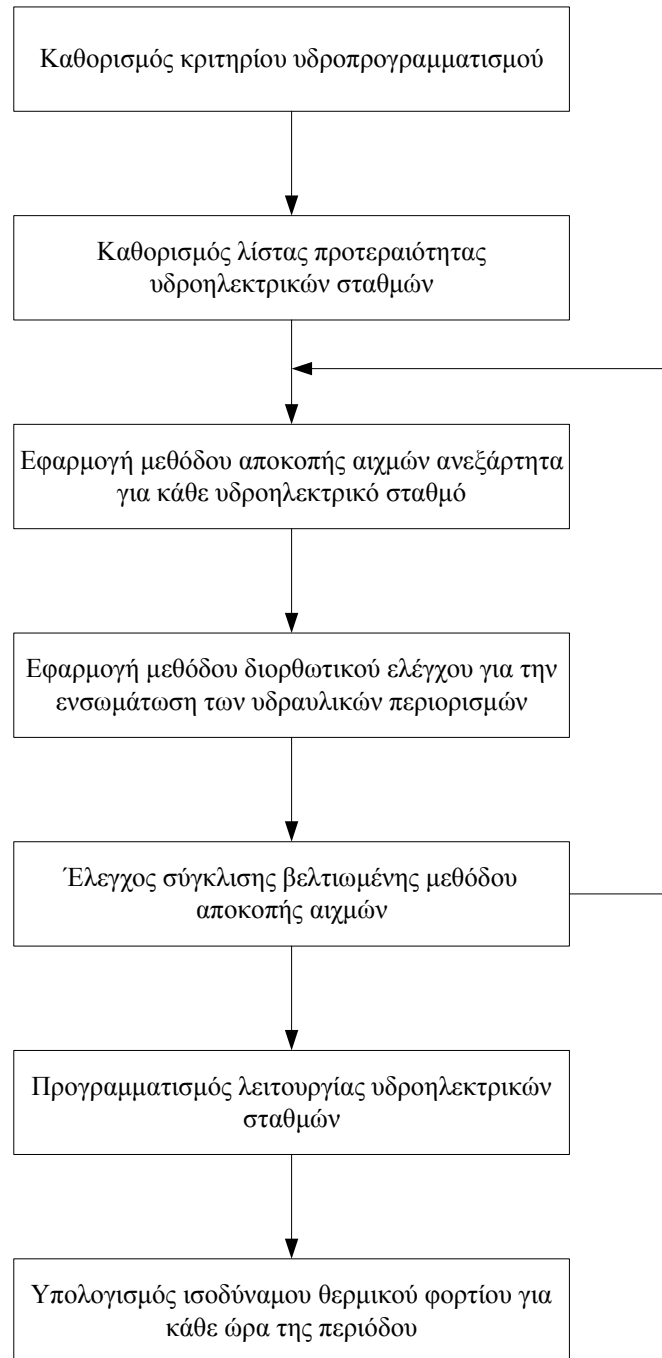
Ο συνολικός σχεδιασμός του προγράμματος αποσκοπεί στην επίτευξη τριών βασικών στόχων:

- Ορθολογική δομή του κώδικα προγραμματισμού.
- Απλοποίηση των διαδικασιών διαχείρισης δεδομένων.
- Εύκολη επεκτασιμότητα του προγράμματος.

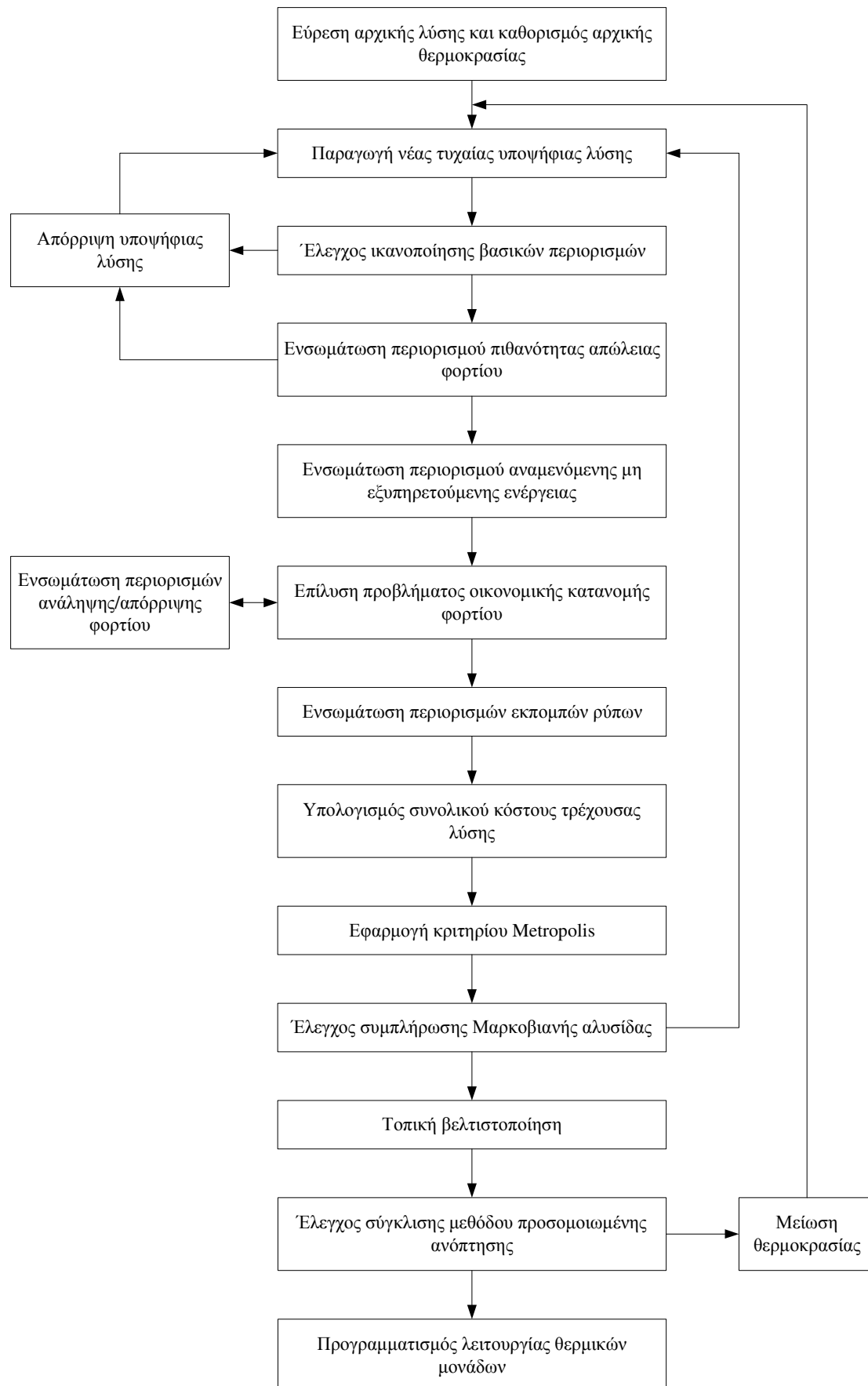
Η βασική δομή του προγράμματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.1. Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου παρατίθενται αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου. Η ακολουθία των επιμέρους υποδιαδικασιών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του υδροηλεκτρικού και θερμικού προβλήματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 9.2 και 9.3, αντίστοιχα.



Σχήμα 9.1: Βασική δομή προγράμματος



Σχήμα 9.2: Γενική παράσταση διαδικασιών επίλυσης υδροηλεκτρικού προβλήματος



Σχήμα 9.3: Γενική παράσταση διαδικασιών επίλυσης θερμικού προβλήματος

9.3. Εξωτερικός Προγραμματισμός

Το υπολογιστικό περιβάλλον έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχει τη δυνατότητα εξωτερικού προγραμματισμού, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εξεταζόμενου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προγραμματίσει εξωτερικά τις εξής διαδικασίες:

- Την κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Τη διατύπωση των περιορισμών.
- Την επιλογή του κριτηρίου υδροπρογραμματισμού.

9.3.1. Κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης

Σύμφωνα με την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο τρίτο κεφάλαιο, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής συντίθεται από το άθροισμα των ακόλουθων όρων:

- Κόστος καυσίμου των θερμικών μονάδων.
- Κόστος εκκίνησης των θερμικών μονάδων.
- Κόστος κράτησης των θερμικών μονάδων.

Η συνολική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δίνεται από το άθροισμα των παραπάνω όρων για όλες τις θερμικές μονάδες του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ώρες της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού. Σε αντίθεση με το κόστος κράτησης των θερμικών μονάδων, το οποίο θεωρείται σταθερό, η μορφή των συναρτήσεων κόστους καυσίμου και εκκίνησης επιλέγεται εξωτερικά από το χρήστη.

Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση κόστους καυσίμου μπορεί να διατυπωθεί είτε ως πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού, είτε ως τμηματικώς γραμμική και γνησίως αύξουσα καμπύλη, οπότε το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου λύνεται μέσω της χρήσης τετραγωνικού ή γραμμικού προγραμματισμού, αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση απαιτούνται οι τιμές του τετραγωνικού, του γραμμικού και του σταθερού συντελεστή για κάθε θερμική μονάδα. Στη δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης καλείται να εισάγει τα επίπεδα ισχύος στα οποία αλλάζει η κλίση της καμπύλης, καθώς και την κλίση του κάθε ευθύγραμμου τμήματός της.

Αναφορικά με το κόστος εκκίνησης των θερμικών μονάδων, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μιας από τις ακόλουθες συναρτήσεις:

- Σταθερή συνάρτηση κόστους εκκίνησης.
- Εκθετική συνάρτηση κόστους εκκίνησης.
- Βηματική συνάρτηση κόστους εκκίνησης.

Σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, η χρήση της εκθετικής ή της βηματικής συνάρτησης αποσκοπεί στην απεικόνιση την εξάρτησης του κόστους εκκίνησης κάθε θερμικής μονάδας από τη διάρκεια παραμονής της εκτός λειτουργίας.

Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι η ενσωμάτωση ορισμένων περιορισμών του προβλήματος συνεπάγεται την προσαύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος με όρους ποινής, η τιμή των οποίων είναι ανάλογη με το μέγεθος της παραβίασης των αντίστοιχων περιορισμών. Η περίπτωση αυτή αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

9.3.2. Διατύπωση των περιορισμών

Το πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής περιλαμβάνει ορισμένους ειδικούς περιορισμούς (πέραν των βασικών περιορισμών που ισχύουν σε κάθε εφαρμογή), η ενσωμάτωση των οποίων επιτυγχάνεται μέσω των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής. Η απόφαση ενσωμάτωσης των συγκεκριμένων περιορισμών εναπόκειται στο χρήστη του προγράμματος μέσω δυαδικών μεταβλητών, η τιμή των οποίων καθορίζει την επιλογή (1) ή όχι (0) των αντίστοιχων περιορισμών. Οι μεταβλητές επιλογής περιορισμών αποτελούν δεδομένα εισόδου του προγράμματος.

Η παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται για τους εξής περιορισμούς:

- **Περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου θερμικών μονάδων.** Η ενσωμάτωση των συγκεκριμένων περιορισμών επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης της μεθόδου δυναμικής οικονομικής κατανομής φορτίου που παρουσιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο.
- **Περιορισμούς αξιοπιστίας συστήματος παραγωγής.** Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής ενός από τους παραπάνω δείκτες αξιοπιστίας, καθώς και της ταυτόχρονης χρησιμοποίησής τους. Η χρήση του δείκτη αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας συνεπάγεται την προσθήκη ενός όρου ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.
- **Περιορισμούς εκπομπών ρύπων συστήματος παραγωγής.** Ανάλογα με τον τύπο των αέριων ρύπων που εξετάζονται σε κάθε εφαρμογή, γίνεται χρήση της αντίστοιχης μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών εκπομπών. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή του περιορισμού εκπομπών CO₂ προϋποθέτει το συνυπολογισμό στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος του κέρδους ή του κόστους από την πώληση ή την αγορά, αντίστοιχα, των δικαιωμάτων εκπομπών CO₂, ενώ η ενσωμάτωση των λοιπών περιορισμών εκπομπών επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης ενός όρου ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση.

9.3.3. Επιλογή κριτηρίου υδροπρογραμματισμού

Η βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών που παρουσιάστηκε στο όγδοο κεφάλαιο μπορεί να εφαρμοστεί λαμβάνοντας υπόψη δύο εναλλακτικά κριτήρια υδροπρογραμματισμού:

- Κριτήριο 1. Ικανοποίηση του περιορισμού αρχικής και τελικής (επιθυμητής) κατάστασης κάθε ταμιευτήρα.
- Κριτήριο 2. Ικανοποίηση του περιορισμού συνολικής διαθέσιμης ενέργειας που μπορεί να παράγει κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής ενός από τα παραπάνω κριτήρια, ανάλογα με το στόχο που τίθεται σε κάθε εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής.

Εκτός των παραπάνω, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει και το κριτήριο με βάση το οποίο κατασκευάζεται η λίστα προτεραιότητας των υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος παραγωγής, για τους σκοπούς της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ενός από τα ακόλουθα κριτήρια:

Κριτήριο 1. Το μέγιστο όριο ενεργού παραγωγής κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού.

Κριτήριο 2. Η συνολική διαθέσιμη ενέργεια για κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό.

Κριτήριο 3. Ο καθορισμός της λίστας προτεραιότητας εξωτερικά από το χρήστη.

9.4. Προγραμματιστικές Τεχνικές

9.4.1. Αποθήκευση των παραμέτρων

Η διαδικασία αποθήκευσης των διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία του προγράμματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις του.

Η αποθήκευση των δεδομένων εισόδου στηρίζεται, κυρίως, στη χρήση μονοδιάστατων πινάκων, ενός για κάθε παράμετρο του προβλήματος, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η αντιστοίχιση των επιμέρους παραμέτρων σε κάθε θερμική μονάδα ή υδροηλεκτρικό σταθμό του εξεταζόμενου συστήματος παραγωγής. Η διαδικασία αυτή ελαχιστοποιεί το χρόνο προσπέλασης δεδομένων κατά την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Παρόμοια λογική ακολουθείται και για την αποθήκευση των εσωτερικών παραμέτρων, οι οποίες υπολογίζονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Στην περίπτωση αυτή, όμως, οι πίνακες που δημιουργούνται περιλαμβάνουν πολλά μηδενικά στοιχεία, η ύπαρξη των οποίων αυξάνει της αποθηκευτικές απαιτήσεις του προγράμματος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται κάνοντας χρήση ενός δισδιάστατου πίνακα αποθήκευσης των μεταβλητών κατάστασης των μονάδων.

Ο συγκεκριμένος πίνακας παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση (0 ή 1) κάθε θερμικής μονάδας και υδροηλεκτρικού σταθμού του συστήματος σε κάθε ώρα της θεωρούμενης περιόδου. Η κατάσταση λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών αποφασίζεται μέσω της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών και διατηρείται αμετάβλητη κατά την επίλυση του θερμικού προβλήματος. Αντίθετα, η κατάσταση λειτουργίας των θερμικών μονάδων μεταβάλλεται συνεχώς για κάθε νέα υποψήφια λύση (πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων) που παράγεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Για το λόγο αυτό, έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στη διαδικασία ανανέωσης και επαναφοράς των τιμών του πίνακα κατάστασης κάθε φορά που γίνεται δεκτή ή απορρίπτεται, αντίστοιχα, μια νέα υποψήφια λύση του προβλήματος.

Ο πίνακας κατάστασης των μονάδων χρησιμοποιείται για την εύρεση των μη μηδενικών στοιχείων των πινάκων αποθήκευσης των εσωτερικών παραμέτρων της υπολογιστικής διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα, ο πίνακας αυτός καθορίζει τη συμμετοχή ή όχι κάθε μονάδας παραγωγής στη διατύπωση των διαφόρων περιορισμών του προβλήματος. Προφανώς, οι μονάδες που βρίσκονται εκτός λειτουργίας σε μια συγκεκριμένη ώρα της περιόδου (εμφάνιση μηδενικών στοιχείων στον πίνακα κατάστασης) δεν συμμετέχουν στη διατύπωση των περιορισμών που αναφέρονται στην αντίστοιχη ώρα.

Σημαντικό ρόλο στην επιτάχυνση της συνολικής υπολογιστικής διαδικασίας διαδραματίζει και η χρήση βοηθητικών πινάκων για την αποθήκευση των ενδιάμεσων τιμών που λαμβάνουν οι διάφορες παράμετροι κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε νέα υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης οδηγεί στη μεταβολή της κατάστασης ενός αριθμού θερμικών μονάδων για μια περίοδο διαδοχικών ωρών κατανομής. Συνεπώς, μετά την αποδοχή οποιασδήποτε νέας λύσης, απαιτείται η ανανέωση των παραμέτρων μόνο για τις ώρες κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε αλλαγή στο πρόγραμμα λειτουργίας των μονάδων. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στην υιοθέτηση ωριαίου βήματος επίλυσης του προβλήματος και εφαρμόζεται για την αποθήκευση των εξής ωριαίων παραμέτρων:

- Ενεργός παραγωγή των θερμικών μονάδων.
- Πιθανότητα απώλειας φορτίου και αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια.
- Οριακή τιμή του συστήματος.

Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η ανεξάρτητη εκτέλεση των επιμέρους διαδικασιών (οικονομική κατανομή φορτίου και ανάλυση αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής) για κάθε ώρα της περιόδου, συμβάλλοντας στη μείωση των συνολικών υπολογιστικών απαιτήσεων του προγράμματος.

9.4.2. Έλεγχος σφαλμάτων

Η επίλυση των προβλημάτων τετραγωνικού και γραμμικού προγραμματισμού που σχετίζονται με τη διαδικασία της οικονομικής κατανομής φορτίου (κεφάλαιο 5) γίνεται μέσω των υπολογιστικών κωδίκων QPROG και DLPRS, αντίστοιχα, οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι στη βιβλιοθήκη της γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN. Οι κώδικες αυτοί χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε υποψήφια λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.

Σε πολλές περιπτώσεις, η εκτέλεση των συγκεκριμένων υπολογιστικών κωδίκων μπορεί να διακοπεί λόγω της εμφάνισης συστηματικών σφαλμάτων, όπως:

- Ανακολουθία του συστήματος εξισώσεων που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του εξεταζόμενου προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα δεν έχει λύση.
- Σφάλμα στρογγυλοποίησης.

Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση μιας διαδικασίας διαγνωστικού ελέγχου, η οποία εντοπίζει κάθε πιθανό σφάλμα και προβαίνει στις απαραίτητες ενέργειες προκειμένου να αποφευχθεί η διακοπή του προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που διαπιστωθεί η εμφάνιση ενός από τα παραπάνω σφάλματα, η τρέχουσα λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης απορρίπτεται και παράγεται μια νέα υποψήφια λύση. Ταυτόχρονα, ενεργοποιείται μια ειδική παράμετρος ελέγχου των κωδίκων QPROG και DLPRS, η οποία αποτρέπει την πρόωρη διακοπή του προγράμματος.

Η διαδικασία διαγνωστικού ελέγχου διασφαλίζει την απρόσκοπτη εκτέλεση του προγράμματος κατά την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος, εκμηδενίζοντας την πιθανότητα εμφάνισης καίριων σφαλμάτων (fatal errors).

9.5. Δεδομένα Εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Δεδομένα εξωτερικού προγραμματισμού.
- Γενικά δεδομένα προβλήματος.
- Δεδομένα θερμικών μονάδων παραγωγής.
- Δεδομένα υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής.

Στους Πίνακες 9.1, 9.2, 9.3 και 9.4 γίνεται αναλυτική παρουσίαση των δεδομένων που ανήκουν σε καθεμία από τις παραπάνω κατηγορίες. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται σε κάθε εφαρμογή του προγράμματος εξαρτώνται από τη διατύπωση του εξεταζόμενου προβλήματος. Για λόγους πληρότητας, οι πίνακες παρουσιάζουν το σύνολο των δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα.

Πίνακας 9.1: Δεδομένα εξωτερικού προγραμματισμού

Παράμετρος	Τιμές
Μορφή συνάρτησης κόστους καυσίμου των θερμικών μονάδων (τετραγωνική / τμηματικώς γραμμική)	1 / 2
Μορφή συνάρτησης κόστους εκκίνησης των θερμικών μονάδων (σταθερή / εκθετική / βηματική)	1 / 2 / 3
Ενσωμάτωση περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου θερμικών μονάδων	0 / 1
Ενσωμάτωση περιορισμού πιθανότητας απώλειας φορτίου	0 / 1
Ενσωμάτωση περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	0 / 1
Ενσωμάτωση περιορισμού εκπομπών CO ₂	0 / 1
Ενσωμάτωση λοιπών περιορισμών εκπομπών αέριων ρύπων	0 / 1
Κριτήριο υδροπρογραμματισμού	1 / 2
Κριτήριο λίστας προτεραιότητας υδροηλεκτρικών σταθμών	1 / 2 / 3

Πίνακας 9.2: Γενικά δεδομένα προβλήματος

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης
Πλήθος ωρών θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού	-
Πλήθος θερμικών μονάδων συστήματος παραγωγής	-
Πλήθος υδροηλεκτρικών σταθμών συστήματος παραγωγής	-
Πλήθος ομάδων υδροηλεκτρικών σταθμών που τελούν υπό λειτουργική αλληλεξάρτηση	-
Πλήθος υδροηλεκτρικών σταθμών σε καθεμία από τις παραπάνω ομάδες	-
Ζήτηση φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου	MW
Απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία για κάθε ώρα της περιόδου	MW
Πλήθος θεωρούμενων αέριων ρύπων	-
Μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εκπομπών για κάθε αέριο ρύπο	t

Τιμή διαπραγμάτευσης δικαιωμάτων εκπομπών CO ₂	€/tCO ₂
Συντελεστής ποινής για κάθε περιορισμό εκπομπών ρύπων (εκτός CO ₂)	€/t
Χρονικό διάστημα υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των μονάδων	h
Μέγιστο επιτρεπόμενο όριο πιθανότητας απώλειας φορτίου	%
Μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας	MWh
Τυπική απόκλιση της πρόβλεψης ωριαίων φορτίων	%
Βήμα στρογγυλοποίησης του πίνακα πιθανότητας απώλειας ισχύος	MW

Πίνακας 9.3: Δεδομένα θερμικών μονάδων παραγωγής

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης
Τεχνικό ελάχιστο ενεργού παραγωγής	MW
Τεχνικό μέγιστο ενεργού παραγωγής	MW
Ρυθμός ανάληψης φορτίου	MW/h
Ρυθμός απόρριψης φορτίου	MW/h
Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας	h
Ελάχιστος χρόνος κράτησης	h
Αρχική κατάσταση λειτουργίας (εντός / εκτός)	0 / 1
Διάρκεια παραμονής στην αρχική κατάσταση λειτουργίας	h
Αναμενόμενος ρυθμός βλάβης	f/h
Συντελεστής αναγωγής εκπομπών για κάθε ρύπο	t/€
Πλήθος ευθυγράμμων τμημάτων της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου	-
Επίπεδα ισχύος στα οποία αλλάζει η κλίση της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου	MW
Γραμμικοί συντελεστές και σταθερός όρος της τμηματικώς γραμμικής συνάρτησης κόστους καυσίμου	€/MWh, €/h
Τετραγωνικός, γραμμικός και σταθερός συντελεστής της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους καυσίμου	€/MW ² h, €/MWh, €/h
Συντελεστές b ₀ , b ₁ , k της εκθετικής συνάρτησης κόστους εκκίνησης	€, €, h
Χρόνος ψυχρής εκκίνησης	h
Κόστος ψυχρής εκκίνησης	€
Κόστος θερμής εκκίνησης	€
Σταθερό κόστος εκκίνησης	€
Σταθερό κόστος κράτησης	€

Πίνακας 9.4: Δεδομένα υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής

Παράμετρος	Μονάδα Μέτρησης
Τεχνικό ελάχιστο ενεργού παραγωγής	MW
Τεχνικό μέγιστο ενεργού παραγωγής	MW
Ρυθμός ανάληψης φορτίου	MW/h
Ρυθμός απόρριψης φορτίου	MW/h
Γραμμικός συντελεστής συνάρτησης ενεργού παραγωγής – ρυθμού εκροής ύδατος	MW/m ³ /h
Ελάχιστο όριο αποθήκευσης ύδατος	m ³
Μέγιστο όριο αποθήκευσης ύδατος	m ³
Αρχική κατάσταση ταμιευτήρα	m ³
Τελική κατάσταση ταμιευτήρα	m ³
Συνολική διαθέσιμη ενέργεια κατά τη διάρκεια της περιόδου	MWh
Ρυθμός εισροής ύδατος	m ³ /h
Καθυστέρηση μεταφοράς ύδατος	h

9.6. Αποτελέσματα Εξόδου

Το πρόγραμμα παράγει ένα μεγάλο πλήθος αποτελεσμάτων, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εξεταζόμενης εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά αποτελέσματα εξόδου του προγράμματος είναι τα εξής:

- Ο χρόνος επίλυσης του υδροηλεκτρικού και του θερμικού προβλήματος (sec).
- Ο αριθμός επαναλήψεων της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών, προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης.
- Η απόκλιση στην τιμή της συνολικής υδροηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε ώρα της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του διορθωτικού ελέγχου της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών (MWh).
- Η ενεργός παραγωγή κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού σε κάθε ώρα της περιόδου προγραμματισμού (MW).
- Ο όγκος ύδατος που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού στο τέλος κάθε ώρας της περιόδου (m³).
- Ο ρυθμός υπερχείλισης ύδατος του ταμιευτήρα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού κατά τη διάρκεια κάθε ώρας της περιόδου (m³/h).
- Το ισοδύναμο θερμικό φορτίο για κάθε ώρα της περιόδου, το οποίο προκύπτει μετά την εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών (MW).
- Το τελικό πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων του συστήματος (0/1).
- Η ενεργός παραγωγή κάθε θερμικής μονάδας σε κάθε ώρα της περιόδου, με βάση το παραπάνω πρόγραμμα ένταξης (MW).
- Η διαθέσιμη στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε ώρα της περιόδου (MW).
- Η πιθανότητα απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου (%).

- Η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια της περιόδου (MWh).
- Η ποσότητα κάθε θεωρούμενου ρύπου που εκπέμπει κάθε θερμική μονάδα σε όλη τη διάρκεια της περιόδου (t).
- Η συνολική ποσότητα εκπομπών κάθε θεωρούμενου ρύπου από το θερμικό σύστημα παραγωγής (t).
- Η οριακή τιμή του συστήματος σε κάθε ώρα της περιόδου (€/MWh).
- Το συνολικό κόστος του συστήματος (€).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

10.1. Γενικά

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής εφαρμόστηκε σε διάφορα συστήματα παραγωγής που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των επιμέρους μεθόδων του προγράμματος, εξετάστηκε ένα πλήθος εφαρμογών, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο.

Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι ακόλουθες εφαρμογές:

1. Βασική εφαρμογή της μεθόδου βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.
2. Εφαρμογή της μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας.
3. Εφαρμογή της μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών εκπομπών ρύπων.
4. Συνολική εφαρμογή της μεθόδου υδροθερμικής συνεργασίας.

Στις συγκεκριμένες εφαρμογές έγινε χρήση τριών διαφορετικών συστημάτων παραγωγής. Τα στοιχεία των δύο εξ αυτών προέρχονται από τη σχετική βιβλιογραφία, ενώ το τρίτο αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

Εξαιτίας της στοχαστικής φύσης της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, το πρόγραμμα εκτελέστηκε 10 φορές για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Σε κάθε εκτέλεση του προγράμματος, οι παράμετροι της μεθόδου παρέμειναν αναλλοίωτες. Η μεταβολή της τιμής της θερμοκρασίας έγινε με βάση ένα σταθερό ρυθμό μείωσης $\alpha = 0,95$. Το μήκος κάθε Μαρκοβιανής αλυσίδας θεωρήθηκε ίσο με τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται σε κάθε εξεταζόμενο πρόβλημα, με μέγιστη τιμή το 800. Σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκαν 50 επαναλήψεις της διαδικασίας τοπικής βελτιστοποίησης. Τέλος, σε όλες τις περιπτώσεις έγινε χρήση δύο κριτηρίων τερματισμού: ένα κατώτατο όριο 0,001 για την τιμή της θερμοκρασίας ή μη αποδοχή οποιασδήποτε υποψήφιας λύσης για δύο διαδοχικές αλυσίδες.

10.2. Περιγραφή Εξεταζόμενων Συστημάτων

10.2.1. Σύστημα 1

Το πρώτο σύστημα παραγωγής αποτελείται από 10 θερμικές μονάδες. Ωστόσο, προκειμένου να εξεταστεί η δυνατότητα επίλυσης ρεαλιστικών προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, τα στοιχεία του αρχικού συστήματος τροποποιήθηκαν κατάλληλα, ώστε να προκύψουν συστήματα με 20, 40, 80 και 100 μονάδες. Ειδικότερα, το σύστημα των 20 μονάδων προέκυψε από το διπλασιασμό των φορτίων και των μονάδων του αρχικού συστήματος. Με ανάλογη διαδικασία πολλαπλασιασμού χαρακτηριστικών προέκυψαν και τα υπόλοιπα συστήματα.

Τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των 10 θερμικών μονάδων του πρώτου συστήματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 10.1 και 10.2, αντίστοιχα. Για κάθε μονάδα δίνονται το τεχνικό ελάχιστο P_{min} και μέγιστο P_{max} ενεργού παραγωγής, ο ρυθμός ανάληψης $RATEUP$ και απόρριψης $RATEDN$ φορτίου, ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας Tup και κράτησης $Tdown$, η διάρκεια DUR_0 παραμονής της μονάδας στην αρχική κατάσταση (θετικό πρόσημο αν η μονάδα είναι εντός λειτουργίας και αρνητικό αν είναι εκτός), οι συντελεστές A , B και C της τετραγωνικής συνάρτησης κόστους καυσίμου και οι συντελεστές S_h , S_c και t_{cold} της βηματικής συνάρτησης κόστους εκκίνησης.

Πίνακας 10.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 1

Μονάδα	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	$RATEUP$ (MW/h)	$RATEDN$ (MW/h)	Tup (h)	$Tdown$ (h)	DUR_0 (h)
1	150	455	91,0	90,0	8	8	8
2	150	455	91,0	90,0	8	8	8
3	20	130	26,0	26,0	5	5	-5
4	20	130	26,0	26,0	5	5	-5
5	25	162	32,4	32,4	6	6	-6
6	20	80	16,0	16,0	3	3	-3
7	25	85	17,0	17,0	3	3	-3
8	10	55	11,0	11,0	1	1	-1
9	10	55	11,0	11,0	1	1	-1
10	10	55	11,0	11,0	1	1	-1

Πίνακας 10.2: Οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 1

Μονάδα	A (\$/MW ² h)	B (\$/MW ² h)	C (\$/h)	S_h (\$)	S_c (\$)	t_{cold} (h)
1	0,00048	16,19	1000	4500	9000	5
2	0,00031	17,26	970	5000	10000	5
3	0,00200	16,60	700	550	1100	4
4	0,00211	16,50	680	560	1120	4
5	0,00398	19,70	450	900	1800	4
6	0,00712	22,26	370	170	340	2
7	0,00079	27,74	480	260	520	2
8	0,00413	25,92	660	30	60	0
9	0,00222	27,27	665	30	60	0
10	0,00173	27,79	670	30	60	0

Όλα τα στοιχεία του πρώτου συστήματος προέρχονται από την εργασία [41], με εξαίρεση τους ρυθμούς ανάληψης και απόρριψης φορτίου που καθορίστηκαν αυθαίρετα, καθώς δεν βρέθηκαν τα αντίστοιχα στοιχεία για το εξεταζόμενο σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε ότι οι ρυθμοί ανάληψης και απόρριψης φορτίου ισούνται με το 20% του τεχνικού μέγιστου κάθε θερμικής μονάδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το εν λόγω σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφόρων μεθόδων επίλυσης του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Στον Πίνακα 10.3 δίνεται η ζήτηση ισχύος του παραπάνω συστήματος για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού.

Πίνακας 10.3: Ωριαία ζήτηση ισχύος για το Σύστημα 1

Ωρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Φορτίο (MW)	700	750	850	950	1000	1100	1150	1200	1300	1400	1450	1500
Ωρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Φορτίο (MW)	1400	1300	1200	1050	1000	1100	1200	1400	1300	1100	900	800

10.2.2. Σύστημα 2

Το δεύτερο σύστημα παραγωγής αποτελείται από 26 θερμικές μονάδες και χρησιμοποιείται, κυρίως, στις εφαρμογές διαφόρων μεθόδων ανάλυσης αξιοπιστίας (IEEE Reliability Test System) [121]. Τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων του συστήματος παρουσιάζονται στους Πίνακες 10.4 και 10.5, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 10.4 παρατίθενται, εκτός των άλλων, οι τιμές του αναμενόμενου ρυθμού βλάβης λ και του συντελεστή CF αναγωγής εκπομπών CO_2 για κάθε θερμική μονάδα του συστήματος. Οι εν λόγω παράμετροι χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των μεθόδων ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι το κόστος εκκίνησης των θερμικών μονάδων δίνεται από την εκθετική συνάρτηση (3.6), η οποία καθορίζεται από τους συντελεστές b_0 , b_1 και k (Πίνακας 10.5).

Τα στοιχεία του συστήματος προέρχονται από τις εργασίες [10] και [129]. Εξαίρεση αποτελούν οι συντελεστές CF , οι οποίοι υπολογίστηκαν με βάση τη διαδικασία που αναλύθηκε στο έβδομο κεφάλαιο της διατριβής, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται σε κάθε θερμική μονάδα.

Πιο συγκεκριμένα, το εξεταζόμενο σύστημα περιλαμβάνει 11 πετρελαϊκές μονάδες (1 – 5, 14 – 16 και 21 – 23), 9 ανθρακικές (10 – 13, 17 – 20 και 24), 2 πυρηνικές (25 και 26) και 4 μονάδες φυσικού αερίου (6 – 9).

Πίνακας 10.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 2

Μονάδα	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)	T _{up} (h)	T _{down} (h)	DUR ₀ (h)	λ (f/h)	CF (tCO ₂ /\$)
1	2,40	12	0	0	-1	0,00034	0,02013
2	2,40	12	0	0	-1	0,00034	0,02013
3	2,40	12	0	0	-1	0,00034	0,02013
4	2,40	12	0	0	-1	0,00034	0,02013
5	2,40	12	0	0	-1	0,00034	0,02013
6	4,00	20	0	0	-1	0,00223	0,00800
7	4,00	20	0	0	-1	0,00223	0,00800
8	4,00	20	0	0	-1	0,00223	0,00800
9	4,00	20	0	0	-1	0,00223	0,00800
10	15,20	76	3	2	3	0,00051	0,05560
11	15,20	76	3	2	3	0,00051	0,05560
12	15,20	76	3	2	3	0,00051	0,05560
13	15,20	76	3	2	3	0,00051	0,05560
14	25,00	100	4	2	-3	0,00084	0,02013
15	25,00	100	4	2	-3	0,00084	0,02013
16	25,00	100	4	2	-3	0,00084	0,02013
17	54,25	155	5	3	5	0,00105	0,05560
18	54,25	155	5	3	5	0,00105	0,05560
19	54,25	155	5	3	5	0,00105	0,05560
20	54,25	155	5	3	5	0,00105	0,05560
21	68,95	197	5	4	-4	0,00106	0,02013
22	68,95	197	5	4	-4	0,00106	0,02013
23	68,95	197	5	4	-4	0,00106	0,02013
24	140,00	350	8	5	10	0,00087	0,05560
25	100,00	400	8	5	10	0,00091	0
26	100,00	400	8	5	10	0,00091	0

Πίνακας 10.5: Οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 2

Μονάδα	A (\$/MW ² h)	B (\$/MW ² h)	C (\$/h)	b ₀ (\$)	b ₁ (\$)	k (h)
1	0,02533	25,5472	24,3891	0	0	1
2	0,02649	25,6753	24,4110	0	0	1
3	0,02801	25,8027	24,6382	0	0	1
4	0,02842	25,9318	24,7605	0	0	1
5	0,02855	26,0611	24,8882	0	0	1
6	0,01199	37,5510	117,7551	20	20	2
7	0,01261	37,6637	118,1083	20	20	2
8	0,01359	37,7770	118,4576	20	20	2
9	0,01433	37,8896	118,8206	20	20	2
10	0,00876	13,3272	81,1364	50	50	3
11	0,00895	13,3538	81,2980	50	50	3
12	0,00910	13,3805	81,4641	50	50	3
13	0,00932	13,4073	81,6259	50	50	3
14	0,00623	18,0000	217,8952	70	70	4
15	0,00612	18,1000	218,3350	70	70	4
16	0,00598	18,2000	218,7752	70	70	4
17	0,00463	10,6940	142,7348	150	150	6
18	0,00473	10,7154	143,0288	150	150	6
19	0,00481	10,7367	143,3179	150	150	6
20	0,00487	10,7583	143,5972	150	150	6
21	0,00259	23,0000	259,1310	200	200	8
22	0,00260	23,1000	259,6490	200	200	8
23	0,00263	23,2000	260,1760	200	200	8
24	0,00153	10,8616	177,0575	200	300	8
25	0,00194	7,4921	310,0021	500	500	10
26	0,00195	7,5031	311,9102	500	500	10

Στον Πίνακα 10.6 δίνεται η ζήτηση ισχύος του παραπάνω συστήματος για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού.

Πίνακας 10.6: Ωριαία ζήτηση ισχύος για το Σύστημα 2

Ωρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Φορτίο (MW)	1700	1730	1690	1700	1750	1850	2000	2430	2540	2600	2670	2590
Ωρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Φορτίο (MW)	2590	2550	2620	2650	2550	2530	2500	2550	2600	2480	2200	1840

10.2.3. Σύστημα 3

Το τρίτο σύστημα αποτελείται από 30 θερμικές μονάδες και 13 υδροηλεκτρικούς σταθμούς και είναι μια τροποποιημένη έκδοση του ελληνικού συστήματος. Τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παρατίθενται στους Πίνακες 10.7 και 10.8, αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή έχει θεωρηθεί ότι κάθε μονάδα παρουσιάζει σταθερό κόστος εκκίνησης *SUP* και κράτησης *SDN*.

Πίνακας 10.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 3

Μονάδα	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)	RATEUP (MW/h)	RATEDN (MW/h)	T _{up} (h)	T _{down} (h)	DUR ₀ (h)	λ (f/h)	CF (tCO ₂ /€)
1	165	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
2	165	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
3	165	290	116	116	8	5	8	0,00087	0,05297
4	165	290	116	116	8	5	8	0,00087	0,05297
5	170	335	134	134	8	5	8	0,00087	0,05297
6	135	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
7	135	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
8	145	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
9	145	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
10	50	65	26	26	3	2	3	0,00051	0,05297
11	73	120	48	48	5	3	5	0,00105	0,05297
12	72	120	48	48	5	3	5	0,00105	0,05297
13	140	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
14	68	115	46	46	5	3	5	0,00105	0,05297
15	68	115	46	46	5	3	5	0,00105	0,05297
16	164	270	108	108	8	5	8	0,00087	0,05297
17	195	270	108	108	8	5	8	0,00087	0,05297
18	151	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
19	153	280	112	112	8	5	8	0,00087	0,05297
20	125	310	124	124	8	5	8	0,00087	0,05297
21	30	40	16	16	3	2	3	0,00051	0,05297
22	61	145	58	58	0	0	-4	0,00106	0,01015
23	122	285	114	114	0	0	-4	0,00106	0,01015
24	66	145	58	58	0	0	-4	0,00106	0,01015
25	61	145	58	58	0	0	-4	0,00106	0,01015
26	63	153	61	61	0	0	-4	0,00223	0,00967
27	135	185	74	74	0	0	-4	0,00223	0,00967
28	87	173	69	69	5	3	5	0,00223	0,00967
29	187	560	224	224	5	3	5	0,00070	0,00967
30	243	485	194	194	5	3	-3	0,00070	0,00967

Πίνακας 10.8: Οικονομικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων του Συστήματος 3

Μονάδα	A (€/MW ² h)	B (€/MWh)	C (€/h)	SUP (€)	SDN (€)
1	0,0020	13,70	339	200	200
2	0,0020	13,70	339	200	200
3	0,0114	9,36	740	200	200
4	0,0114	9,36	740	200	200
5	0,0040	11,05	558	200	200
6	0,0048	13,36	516	200	200
7	0,0048	13,36	516	200	200
8	0,0147	7,50	1142	200	200
9	0,0256	2,74	1731	200	200
10	0	19,08	0	33	25
11	0,0450	8,29	423	165	165
12	0	17,61	0	165	165
13	0,0086	12,18	507	200	200
14	0,0087	18,86	214	165	165
15	0,0280	14,89	309	165	165
16	0,0017	17,46	500	200	200
17	0,0051	17,44	656	200	200
18	0,0272	10,53	1658	200	200
19	0,0273	10,58	1668	200	200
20	0,0040	11,07	550	200	200
21	0	21,79	0	33	25
22	0,0109	36,57	503	36	29
23	0,0088	32,49	945	28	27
24	0,1050	15,86	1742	28	27
25	0,1314	9,02	2010	28	27
26	0,0212	52,07	405	202	30
27	0,0029	47,88	779	337	446
28	0,1050	13,02	4727	337	446
29	0,0051	39,77	1878	846	528
30	0,0050	39,70	1272	322	422

Πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο θερμικό σύστημα αποτελείται από 21 λιγνιτικές μονάδες (1 – 21), 4 πετρελαϊκές (22 – 25) και 5 μονάδες φυσικού αερίου (26 – 30).

Στον Πίνακα 10.9 παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των υδροηλεκτρικών σταθμών του συστήματος. Για κάθε σταθμό δίνονται το τεχνικό ελάχιστο P_{min} και μέγιστο P_{max} ενεργού παραγωγής, ο γραμμικός συντελεστής α της συνάρτησης

ενεργού παραγωγής – ρυθμού εκροής ύδατος, το ελάχιστο V_{min} και το μέγιστο V_{max} όριο αποθήκευσης ύδατος, η αρχική V_{in} και η τελική V_{fin} κατάσταση του ταμιευτήρα, η συνολική διαθέσιμη ενέργεια E_{tot} κατά τη διάρκεια της περιόδου και ο ρυθμός I εισροής ύδατος. Επίσης, έχει θεωρηθεί ότι οι ρυθμοί ανάληψης και απόρριψης φορτίου (MW/h) κάθε σταθμού ισούνται με το 30% του τεχνικού του μέγιστου.

Το εν λόγω σύστημα περιλαμβάνει 4 ομάδες υδροηλεκτρικών σταθμών που τελούν υπό λειτουργική αλληλεξάρτηση, θεωρώντας ότι η χρονική καθυστέρηση στη μεταφορά του ύδατος ισούται με 2 ώρες. Πιο συγκεκριμένα:

- Η πρώτη ομάδα αποτελείται από τους σταθμούς 1, 2 και 3.
- Η δεύτερη ομάδα αποτελείται από τους σταθμούς 4, 5 και 6.
- Η τρίτη ομάδα αποτελείται από τους σταθμούς 7, 8 και 9.
- Η τέταρτη ομάδα αποτελείται από τους σταθμούς 11 και 12.

Πίνακας 10.9: Χαρακτηριστικά των υδροηλεκτρικών σταθμών του Συστήματος 3

Σταθμός	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	α (MW/m ³ /s)	V_{min} (10 ⁶ m ³)	V_{max} (10 ⁶ m ³)	V_{in} (10 ⁶ m ³)	V_{fin} (10 ⁶ m ³)	E_{tot} (MWh)	I (m ³ /s)
1	75	375	1,190	926,9	1158,6	1135,4	1135,4	1700	52
2	65	315	0,544	12,8	16,0	15,7	15,7	900	2
3	20	108	0,338	8,0	10,0	9,8	9,8	600	0
4	40	437	1,012	2656,7	3320,9	3254,5	3254,5	1500	57
5	30	320	0,488	41,6	52,0	51,0	51,0	1000	17
6	15	150	0,316	9,5	11,9	11,7	11,7	700	0
7	20	210	5,250	115,5	144,3	141,4	141,4	600	4
8	30	300	0,556	275,9	344,8	337,9	337,9	750	42
9	2	32	0,070	3,2	4,1	4,0	4,0	100	0
10	3	70	1,667	37,0	46,2	45,3	45,3	700	16
11	35	384	0,901	450,4	563,0	551,7	551,7	850	33
12	10	100	0,450	55,7	69,6	68,2	68,2	450	3
13	10	130	4,815	239,2	299,0	293,0	293,0	650	5

Στον Πίνακα 10.10 δίνεται η ζήτηση ισχύος του παραπάνω υδροθερμικού συστήματος για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού.

Πίνακας 10.10: Ωριαία ζήτηση ισχύος για το Σύστημα 3

Ωρα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Φορτίο (MW)	4822	4479	4263	4167	4121	4145	4201	4432	5002	5671	6033	6351
Ωρα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Φορτίο (MW)	6553	6485	5966	5465	5279	5347	5623	6197	6479	6091	5503	5062

10.3. Βασική Εφαρμογή Μεθόδου Βέλτιστου Προγραμματισμού Θερμικών Μονάδων Παραγωγής

Ο σκοπός της εν λόγω εφαρμογής είναι να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Η μέθοδος εφαρμόστηκε στο πρώτο σύστημα παραγωγής (Πίνακες 10.1 – 10.3), τα στοιχεία του οποίου τροποποιήθηκαν κατάλληλα, ώστε να προκύψουν συστήματα με 20, 40, 80 και 100 θερμικές μονάδες.

Προκειμένου να φανεί η επίδραση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων, εξετάστηκαν δύο σενάρια:

Σενάριο 1. Εφαρμογή της μεθόδου χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου.

Σενάριο 2. Συνυπολογισμός των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων, ενώ θεωρείται ότι το περιθώριο της στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα της περιόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το 10% του αντίστοιχου φορτίου.

10.3.1. Σενάριο χωρίς περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου

Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου της βασικής εφαρμογής παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.11, όπου φαίνεται το κόστος της καλύτερης και της χειρότερης λύσης, καθώς και το μέσο κόστος που προέκυψε από 10 διαφορετικές εκτελέσεις του προγράμματος. Στον ίδιο πίνακα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης (Simulated Annealing – SA) με τα αντίστοιχα τριών άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης (Lagrange Relaxation – LR, Genetic Algorithm – GA, Seeded Memetic – SM). Τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων για το εξεταζόμενο πρόβλημα προέρχονται από την εργασία [71].

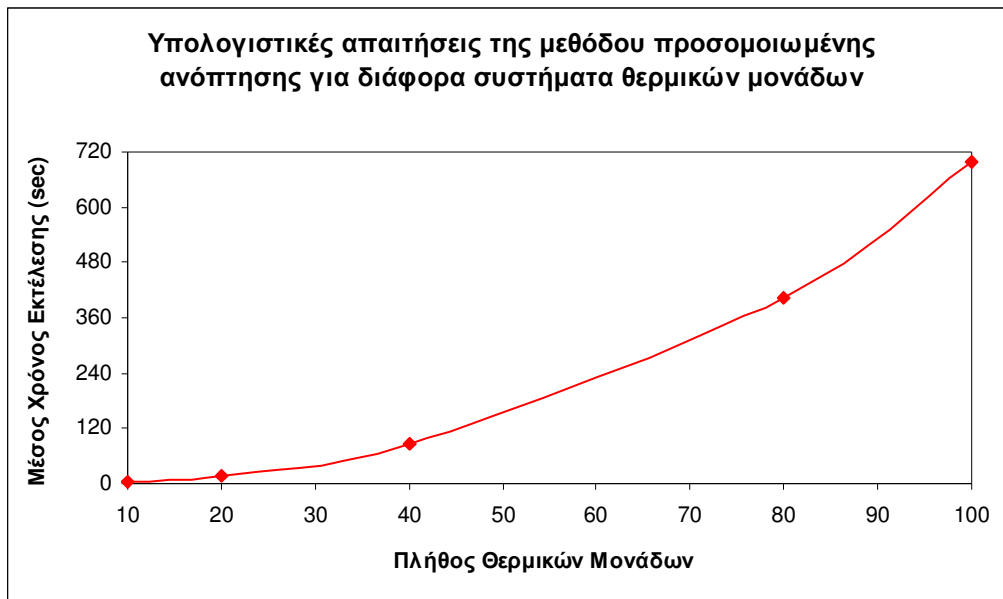
Με βάση τη σύγκριση αυτή, γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει πολύ καλές λύσεις, ακόμα και στην περίπτωση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης υπερσχύει των μεθόδων GA και LR, αναφορικά με το κόστος της καλύτερης λύσης, για όλα τα εξεταζόμενα συστήματα, με εξαίρεση το σύστημα 80 μονάδων, για το οποίο υπερέχει σε μικρό βαθμό η μέθοδος LR. Συγκριτικά με τη μέθοδο SM, τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου είναι καλύτερα για τα συστήματα των 10 και 20 μονάδων. Η απόδοση της μεθόδου SM είναι καλύτερη για μεγαλύτερα συστήματα, ωστόσο οι διαφορές στο κόστος της καλύτερης λύσης είναι πολύ μικρές: 0,021%, 0,086% και 0,028% για τα συστήματα των 40, 80 και 100 μονάδων, αντίστοιχα.

Επιπλέον, η μικρή διακύμανση που παρουσιάζει η τιμή του κόστους της τελικής λύσης για τις 10 διαφορετικές εκτελέσεις του προγράμματος αποδεικνύει τη σταθερότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Βέβαια, η διακύμανση των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη για το σύστημα των 100 μονάδων. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να αποφευχθεί αν αυξηθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας. Ωστόσο, η επιλογή αυτή θα οδηγούσε σε σημαντική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου και σε δυσανάλογα μικρή βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 10.11: Αποτελέσματα βασικής εφαρμογής χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου

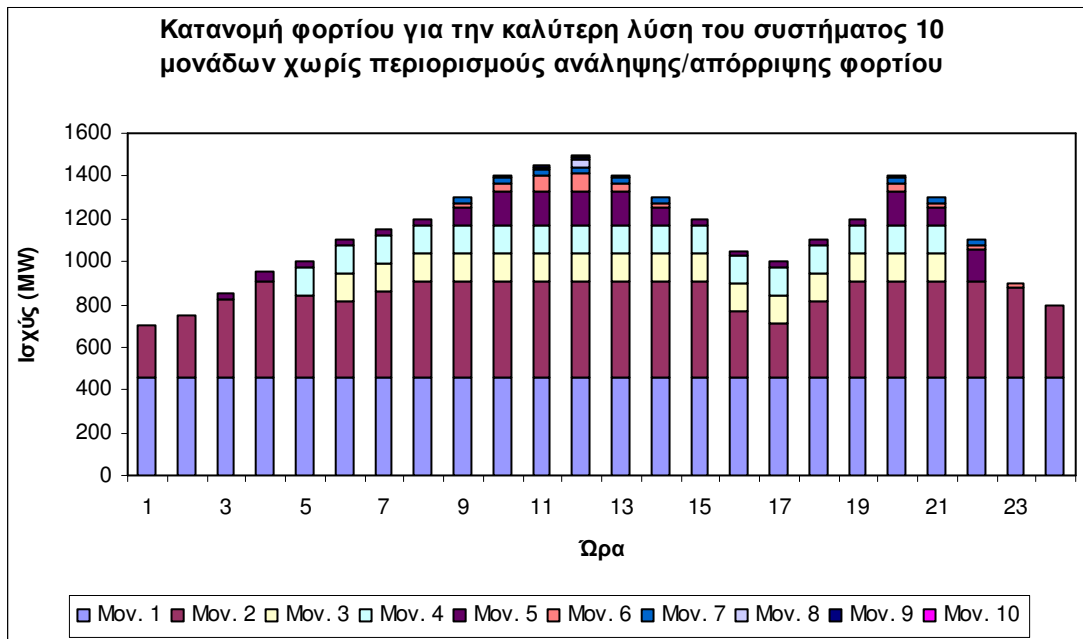
Μέθοδος	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)
10 Μονάδες			
SA	565.828	565.988	566.260
LR	566.107	566.493	566.817
GA	565.866	567.329	571.336
SM	566.686	566.787	567.022
20 Μονάδες			
SA	1.126.251	1.127.955	1.129.112
LR	1.128.362	1.128.395	1.128.444
GA	1.128.876	1.130.160	1.131.565
SM	1.128.192	1.128.213	1.128.403
40 Μονάδες			
SA	2.250.063	2.252.125	2.254.539
LR	2.250.223	2.250.223	2.250.223
GA	2.252.909	2.262.585	2.269.282
SM	2.249.589	2.249.589	2.249.589
80 Μονάδες			
SA	4.498.076	4.501.156	4.503.987
LR	4.496.729	4.496.729	4.496.729
GA	4.507.692	4.525.204	4.552.982
SM	4.494.214	4.494.378	4.494.439
100 Μονάδες			
SA	5.617.876	5.624.301	5.628.506
LR	5.620.305	5.620.305	5.620.305
GA	5.626.362	5.669.362	5.690.086
SM	5.616.314	5.616.699	5.616.900

Στο Σχήμα 10.1 παρουσιάζονται οι υπολογιστικές απαιτήσεις της προτεινόμενης μεθόδου για κάθε σύστημα μονάδων, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου. Τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε χρήση ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή Pentium IV στα 2,8 GHz. Επειδή, βέβαια, ο χρόνος εκτέλεσης κάθε προγράμματος εξαρτάται από την ταχύτητα της χρησιμοποιούμενης πλατφόρμας, δεν γίνεται αναφορά στα αντίστοιχα αποτελέσματα των άλλων μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, είναι φανερό ότι ο χρόνος εκτέλεσης αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των μονάδων του εξεταζόμενου συστήματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο χρόνο που καταναλώνεται κατά την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου. Πάντως, οι υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου κρίνονται ικανοποιητικές, ακόμα και για την περίπτωση του συστήματος των 100 μονάδων.



Σχήμα 10.1: Υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για διάφορα συστήματα θερμικών μονάδων

Τέλος, στο Σχήμα 10.2 απεικονίζεται, ενδεικτικά, η κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του προβλήματος των 10 θερμικών μονάδων παραγωγής. Προφανώς, το άθροισμα της ενεργού παραγωγής όλων των μονάδων που είναι σε λειτουργία σε κάθε ώρα της περιόδου ισούται με τη ζήτηση ισχύος της αντίστοιχης ώρας. Επίσης, είναι φανερό ότι στις ώρες αιχμής της περιόδου απαιτείται η ένταξη σχεδόν όλων των διαθέσιμων μονάδων του συστήματος.



Σχήμα 10.2: Κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του συστήματος 10 μονάδων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου

10.3.2. Σενάριο με περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου

Ο σκοπός του δεύτερου σεναρίου της βασικής εφαρμογής είναι να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων παραγωγής. Στον Πίνακα 10.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου σε σύγκριση με τα αντίστοιχα του πρώτου. Είναι φανερό ότι ο συνυπολογισμός των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου οδηγεί, όπως ήταν αναμενόμενο, σε μικρή αύξηση του κόστους του συστήματος. Παράλληλα, όμως, αυξάνεται και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος, χωρίς πάντως να φθάνει σε μη αποδεκτά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στις αυξημένες υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου αντιμετώπισης των συγκεκριμένων περιορισμών.

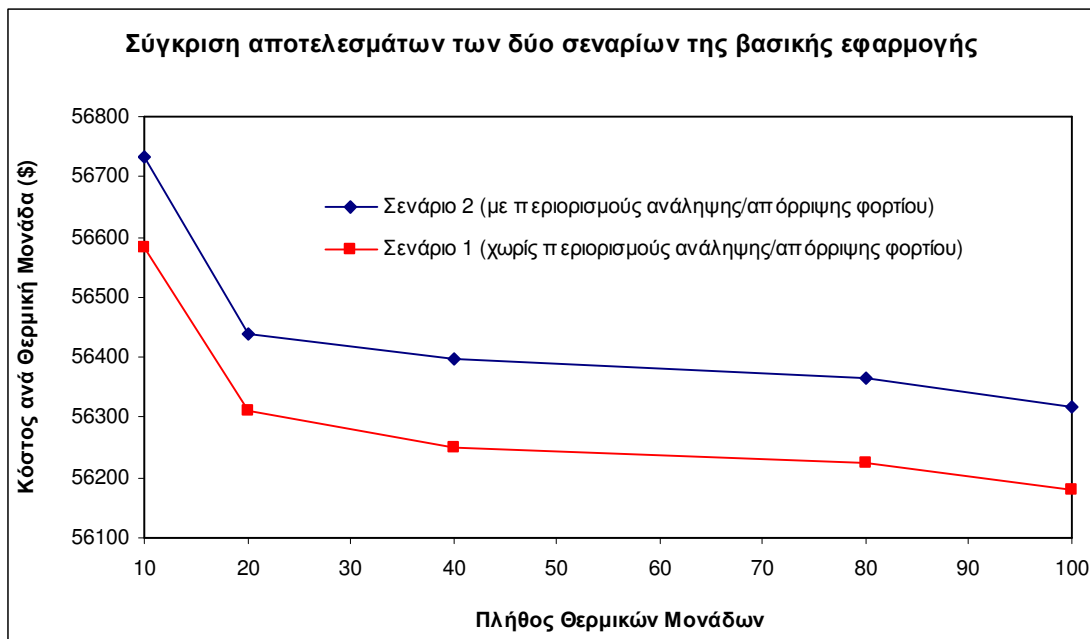
Πίνακας 10.12: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων της βασικής εφαρμογής

Σενάριο	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)
10 Μονάδες				
1	565.828	565.988	566.260	3,35
2	567.332	568.100	570.201	8,58
20 Μονάδες				
1	1.126.251	1.127.955	1.129.112	16,80
2	1.128.762	1.130.369	1.131.874	43,38
40 Μονάδες				
1	2.250.063	2.252.125	2.254.539	88,28
2	2.255.864	2.256.971	2.258.897	199,55
80 Μονάδες				
1	4.498.076	4.501.156	4.503.987	405,01
2	4.509.234	4.510.983	4.513.109	1180,14
100 Μονάδες				
1	5.617.876	5.624.301	5.628.506	696,43
2	5.631.708	5.635.848	5.642.995	2089,57

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος θα ήταν σημαντικά μεγαλύτερος στην περίπτωση ταυτόχρονης επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου για όλη την περίοδο προγραμματισμού. Συνεπώς, η χρήση της δυναμικής μεθόδου αντιμετώπισης των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου συμβάλλει στην επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων, χωρίς αυτό να αποβαίνει εις βάρος της ποιότητας των τελικών αποτελεσμάτων.

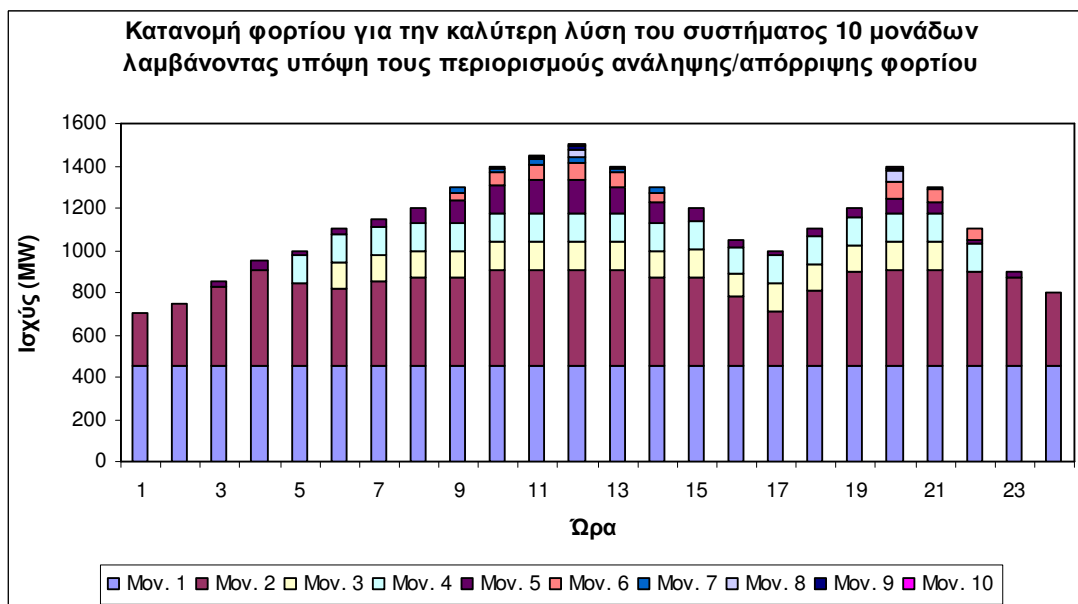
Στο Σχήμα 10.3 απεικονίζεται η σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο σεναρίων της βασικής εφαρμογής, σύμφωνα με την καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για κάθε εξεταζόμενο σύστημα. Είναι φανερό ότι και στα δύο σενάρια η αύξηση του αριθμού των θερμικών μονάδων οδηγεί σε μείωση του

κόστους του συστήματος, εφόσον αυτό αναχθεί σε επίπεδο μονάδας. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.



Σχήμα 10.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων της βασικής εφαρμογής

Τέλος, στο Σχήμα 10.4 απεικονίζεται, ενδεικτικά, η κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του προβλήματος των 10 θερμικών μονάδων για το δεύτερο σενάριο της βασικής εφαρμογής. Στην περίπτωση αυτή, ο προγραμματισμός των θερμικών μονάδων ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου.



Σχήμα 10.4: Κατανομή φορτίου για την καλύτερη λύση του συστήματος 10 μονάδων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ανάληψης/απόρριψης φορτίου

10.3.3. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της βασικής εφαρμογής της μεθόδου βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής γίνεται φανερό ότι η προτεινόμενη μέθοδος καθιστά δυνατή την επίλυση προβλημάτων μεγάλων διαστάσεων σε σύντομο υπολογιστικό χρόνο. Τα αποτελέσματα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης κρίνονται ιδιαίτερα ικανοποιητικά, σε σύγκριση με τα αντίστοιχα τριών άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης, ακόμα και για την περίπτωση του συστήματος των 100 θερμικών μονάδων. Επίσης, η σύγκλιση της προτεινόμενης μεθόδου δεν εξαρτάται από την αρχική λύση του προβλήματος, γεγονός που αποδεικνύεται από τη μικρή διακύμανση των αποτελεσμάτων για τις 10 διαφορετικές εκτελέσεις του προγράμματος.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ενσωμάτωση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων οδηγεί σε μικρή αύξηση του κόστους του συστήματος, καθώς και του μέσου χρόνου εκτέλεσης της μεθόδου. Παρόλα αυτά, η προτεινόμενη δυναμική μέθοδος οικονομικής κατανομής φορτίου συντελεί στην εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς, χωρίς να απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για όλη την περίοδο προγραμματισμού.

10.4. Εφαρμογή Μεθόδου Ενσωμάτωσης Περιορισμών Αξιοπιστίας

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εξετάζεται η ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του δεύτερου συστήματος παραγωγής (Πίνακες 10.4 – 10.6), το οποίο αποτελείται από 26 θερμικές μονάδες.

Όπως είναι φυσικό, οι διάφορες παράμετροι της μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών αξιοπιστίας επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τελική λύση του προβλήματος. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μια εκτενής ανάλυση ευαισθησίας όσον αφορά την επίδραση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Του επιπέδου αξιοπιστίας που πρέπει να παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής.
- Του χρονικού διαστήματος LT για το οποίο υπολογίζεται η πιθανότητα βλάβης των θερμικών μονάδων, μέσω της σχέσης (6.9).
- Του βαθμού αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων.

10.4.1. Επίδραση του απαιτούμενου επιπέδου αξιοπιστίας του συστήματος

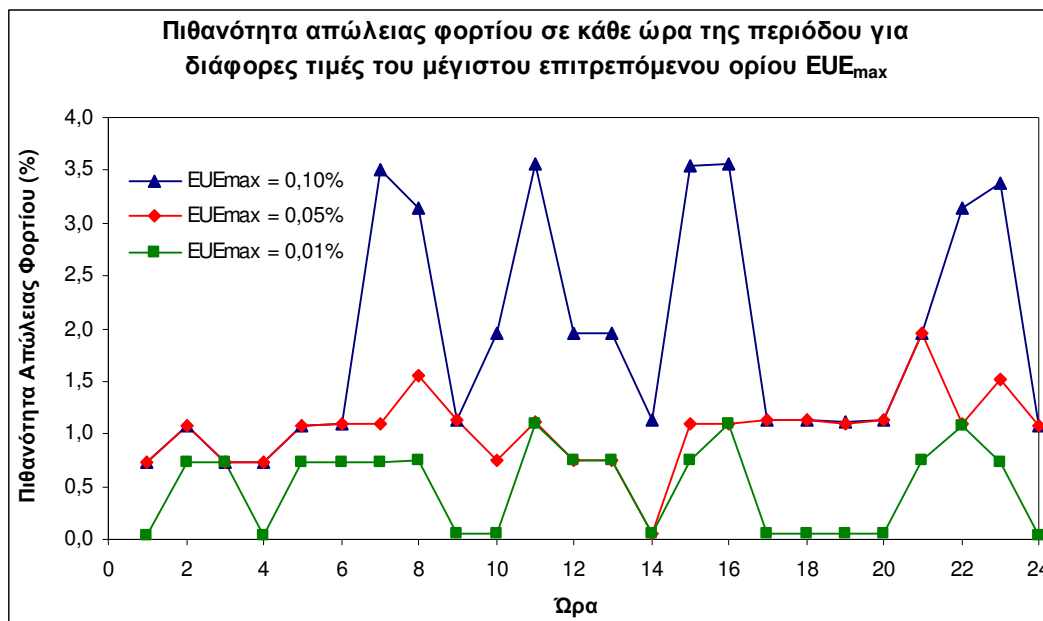
Το επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος παραγωγής καθορίζεται από τις τιμές των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων $LOLP_{max}$ και EUE_{max} , τα οποία αναφέρονται στους δείκτες πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, αντίστοιχα. Στον Πίνακα 10.13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε διάφορες τιμές των εν λόγω ορίων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το όριο $LOLP_{max}$ δίνεται σε ποσοστιαία μορφή και το όριο EUE_{max} εκφράζεται ως ποσοστό της αναμενόμενης ζήτησης ενέργειας (54910 MWh) της θεωρούμενης περιόδου. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι η παράμετρος LT ισούται με 4 ώρες, ενώ δεν ελήφθη υπόψη η αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων.

Πίνακας 10.13: Αποτελέσματα για διάφορα επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος

EUE_{max} (%)	$LOLP_{max}$ (%)	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)
0,10	-	708.789	709.052	709.471	98,65
0,05	-	712.243	713.411	713.787	123,36
0,01	-	718.747	719.078	719.868	146,40
-	1,5	710.696	710.971	711.315	90,53
-	1,0	717.938	718.039	718.135	104,93
-	0,5	722.401	722.622	723.180	84,97
0,05	1,5	712.067	712.704	713.473	98,90
0,01	1,0	718.574	718.714	718.827	105,71

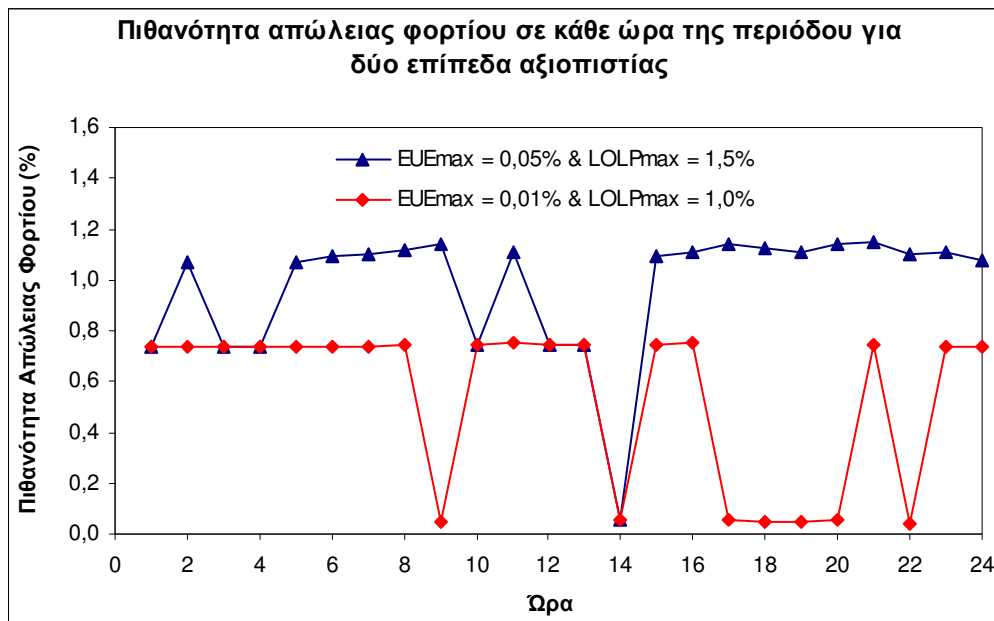
Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα υποδεικνύουν ότι η μείωση των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων $LOLP_{max}$ και EUE_{max} συντελεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η επιβολή πιο δεσμευτικών περιορισμών αξιοπιστίας προϋποθέτει την ένταξη επιπλέον θερμικών μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου. Συνεπώς, το τίμημα για την επίτευξη υψηλότερου επιπέδου αξιοπιστίας είναι η αύξηση του κόστους του συστήματος.

Στο Σχήμα 10.5 απεικονίζεται η διακύμανση της πιθανότητας απώλειας φορτίου κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, για διάφορες τιμές της παραμέτρου EUE_{max} , σύμφωνα με την καλύτερη λύση που παρέχει η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης. Στην περίπτωση αυτή, το επιθυμητό επίπεδο αξιοπιστίας καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο EUE_{max} , χωρίς να τίθεται κάποιο συγκεκριμένο όριο αναφορικά με το δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου.

**Σχήμα 10.5:** Πιθανότητα απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου για διάφορες τιμές του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου EUE_{max}

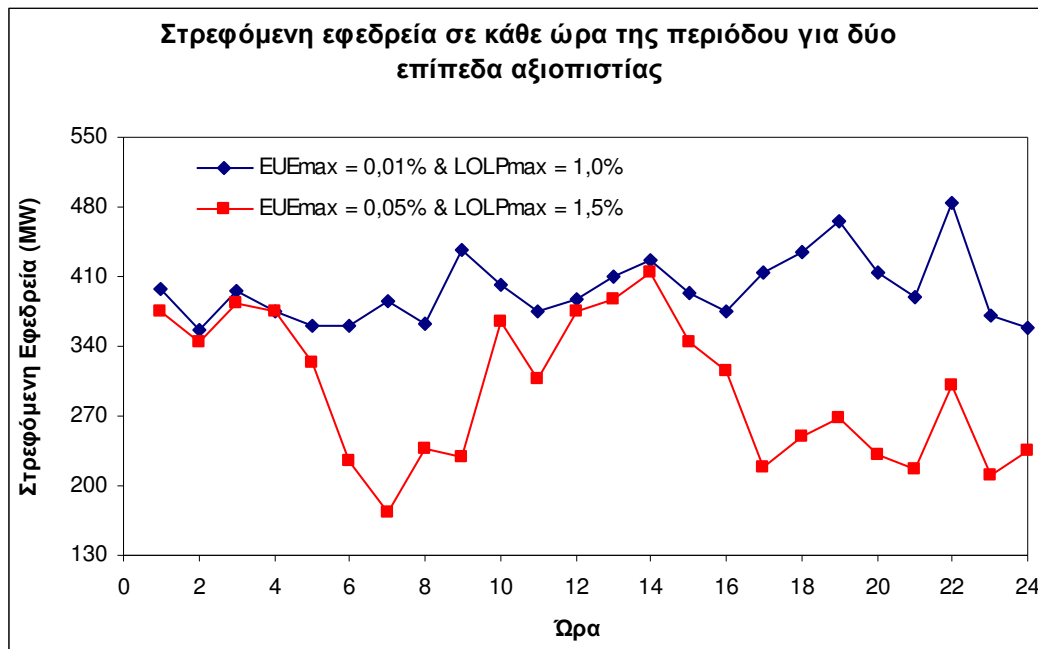
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.5, η αύξηση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου EUE_{max} συντελεί στην αύξηση του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου. Η έντονη διακύμανση της τιμής του εν λόγω δείκτη οφείλεται στην αποκλειστική θεώρηση του περιορισμού αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, η εφαρμογή του οποίου συνίσταται στο συνυπολογισμό όλων των ωρών της εξεταζόμενης περιόδου.

Αντίθετα, η ταυτόχρονη θεώρηση των περιορισμών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας συντελεί σε σημαντική εξομάλυνση των διακυμάνσεων του δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.6. Τα εν λόγω αποτελέσματα αντιστοιχούν στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, θεωρώντας δύο διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση, η ισοκατανομή του ωριαίου ρίσκου του συστήματος παραγωγής, όπως αυτό ορίζεται από το δείκτη πιθανότητας απώλειας φορτίου, αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών αξιοπιστίας.



Σχήμα 10.6: Πιθανότητα απώλειας φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος

Επίσης, στο Σχήμα 10.7 απεικονίζεται η διακύμανση της διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου, θεωρώντας δύο διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας, τα οποία καθορίζονται από την ταυτόχρονη θεώρηση των περιορισμών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του επιθυμητού επιπέδου αξιοπιστίας συντελεί στην αύξηση της συνολικής διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας σε κάθε ώρα της περιόδου.



Σχήμα 10.7: Στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος

10.4.2. Επίδραση της διακύμανσης του χρονικού διαστήματος υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των θερμικών μονάδων

Προκειμένου να φανεί η επίδραση της διακύμανσης του χρονικού διαστήματος LT υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των θερμικών μονάδων παραγωγής, η προτεινόμενη μέθοδος ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας εφαρμόστηκε για διάφορες τιμές της εν λόγω παραμέτρου θεωρώντας δύο επίπεδα αξιοπιστίας του συστήματος, τα οποία καθορίζονται από την ταυτόχρονη θεώρηση των περιορισμών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν ελήφθη υπόψη η αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων.

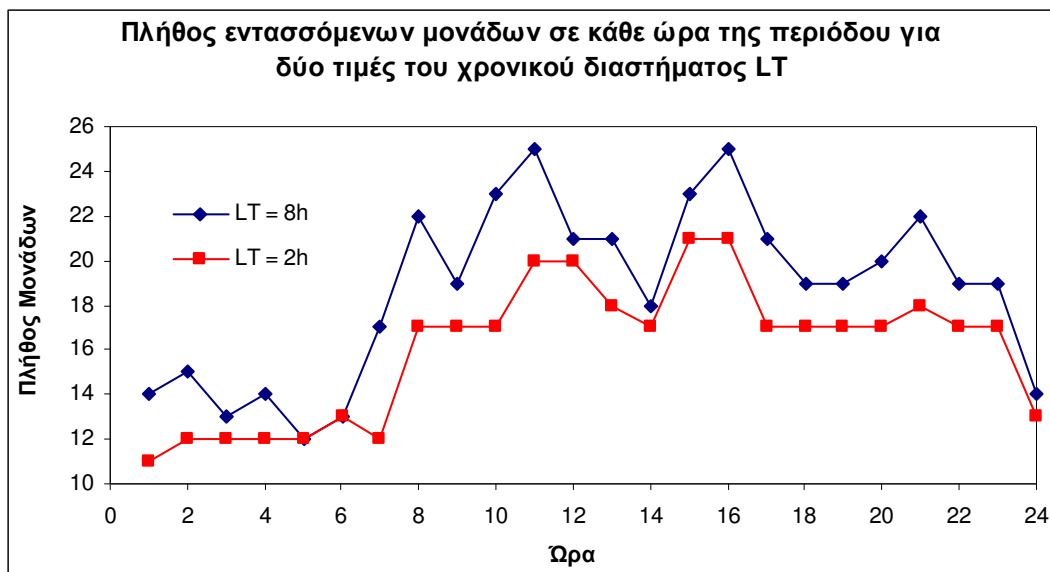
Στον Πίνακα 10.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης. Είναι φανερό ότι η αύξηση του χρονικού διαστήματος LT οδηγεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Σύμφωνα με τη σχέση (6.9), η αύξηση της εν λόγω παραμέτρου συντελεί στην αύξηση των πιθανοτήτων βλάβης των θερμικών μονάδων. Συνεπώς, απαιτείται η ένταξη περισσότερων μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας, οδηγώντας σε πιο ακριβές λύσεις του προβλήματος.

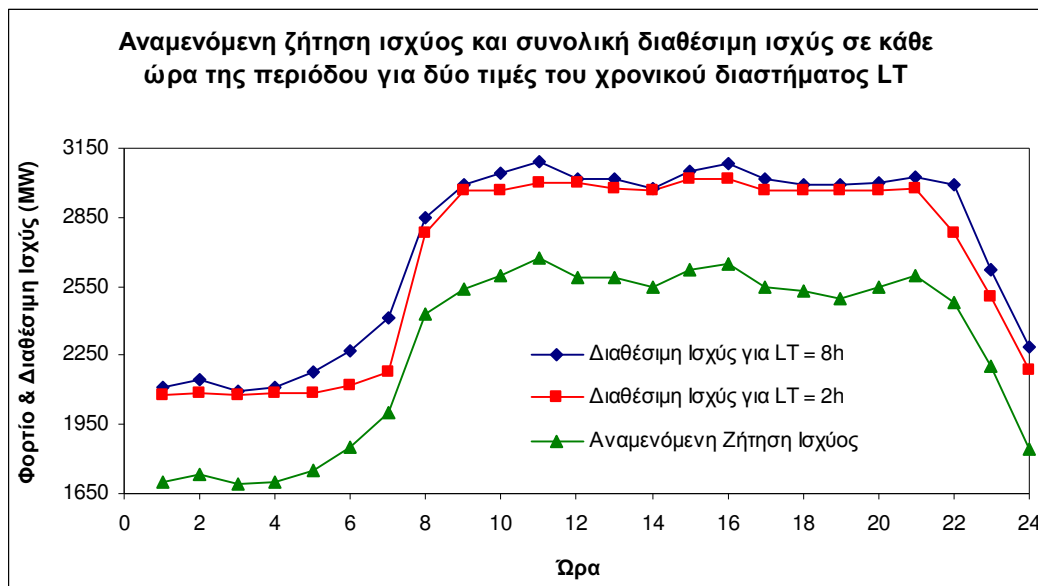
Είναι, επίσης, φανερό ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου LT οδηγεί σε σταδιακή μείωση των υπολογιστικών απαιτήσεων της μεθόδου. Δεδομένου ότι η τιμή του χρονικού διαστήματος LT επηρεάζει τις πιθανότητες βλάβης των θερμικών μονάδων, η αύξησή της συντελεί σε σημαντική συρρίκνωση του χώρου των λύσεων που είναι εφικτές ως προς τους περιορισμούς αξιοπιστίας. Το γεγονός αυτό επιταχύνει τη σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, μειώνοντας το συνολικό χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος.

Πίνακας 10.14: Αποτελέσματα για διάφορες τιμές του χρονικού διαστήματος LT

EUE_{max} (%)	$LOLP_{max}$ (%)	LT (h)	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)
0,05	1,5	2	708.791	709.068	709.421	101,18
0,05	1,5	4	712.067	712.704	713.473	98,90
0,05	1,5	8	720.718	720.821	720.966	73,20
0,01	1,0	2	716.083	716.831	717.965	135,43
0,01	1,0	4	718.574	718.714	718.827	105,71
0,01	1,0	8	723.300	723.699	724.253	74,11

Στο Σχήμα 10.8 απεικονίζεται η επίδραση της τιμής της παραμέτρου LT στο πλήθος των θερμικών μονάδων που πρέπει να ενταχθούν σε κάθε ώρα της περιόδου. Τα αποτελέσματα αντιστοιχούν στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, θεωρώντας ότι $EUE_{max} = 0,01\%$ και $LOLP_{max} = 1\%$. Είναι φανερό ότι η αύξηση της παραμέτρου LT συντελεί στην αύξηση του απαιτούμενου αριθμού των θερμικών μονάδων. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής διαθέσιμης ισχύος σε κάθε ώρα της περιόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.9. Στο συγκεκριμένο σχήμα απεικονίζεται και η αναμενόμενη ζήτηση ισχύος σε κάθε ώρα της περιόδου προγραμματισμού.

**Σχήμα 10.8:** Πλήθος εντασσόμενων μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο τιμές του χρονικού διαστήματος LT



Σχήμα 10.9: Αναμενόμενη ζήτηση ισχύος και συνολική διαθέσιμη ισχύς σε κάθε ώρα της περιόδου για δύο τιμές του χρονικού διαστήματος LT

10.4.3. Επίδραση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων

Στα σενάρια που εξετάστηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες δεν ελήφθη υπόψη η αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων. Όπως αναφέρθηκε στο έκτο κεφάλαιο της διατριβής, η αβεβαιότητα της πρόβλεψης μπορεί να περιγραφεί από την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma)$, η μέση τιμή μ της οποίας ισούται με την αναμενόμενη τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί σε κάθε ώρα της περιόδου, ενώ η τυπική απόκλιση σ αποτελεί ένα προκαθορισμένο ποσοστό της μέσης τιμής.

Η ανάλυση ευαισθησίας της τελικής λύσης του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής ως προς την τιμή της τυπικής απόκλισης της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 10.15. Στην εν λόγω ανάλυση εξετάστηκαν δύο διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας, με βάση την ταυτόχρονη θεώρηση των περιορισμών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, θεωρώντας ότι το χρονικό διάστημα LT ισούται με 4 ώρες.

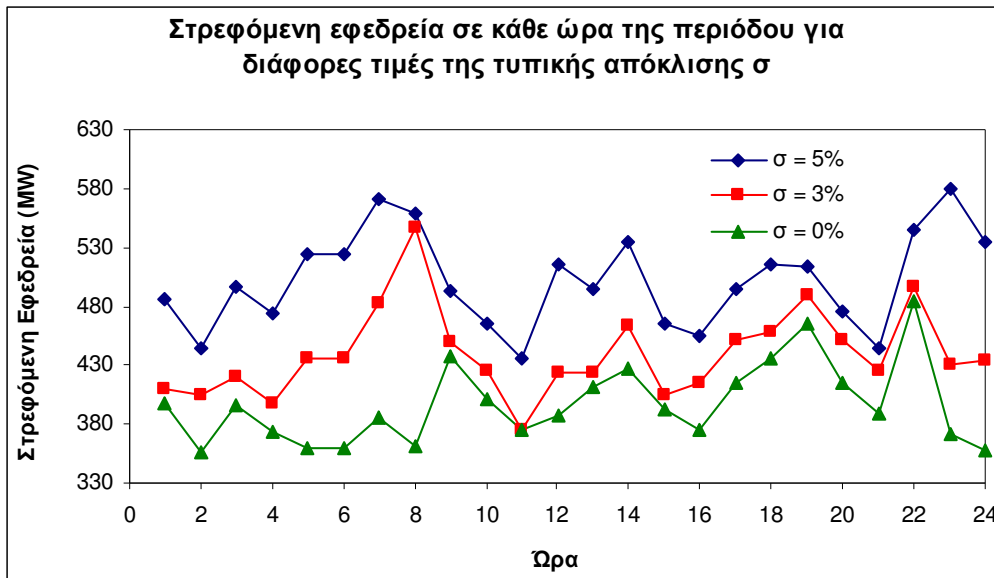
Τα αποτελέσματα του εν λόγω πίνακα υποδεικνύουν ότι ο συνυπολογισμός της αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων έχει αρνητικές επιπτώσεις στο μέσο χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απαίτηση για υπολογισμό των δεικτών αξιοπιστίας του συστήματος για κάθε τιμή των ωριαίων φορτίων, με βάση το μοντέλο επτά διακριτών βημάτων ($0, \pm 1\sigma, \pm 2\sigma, \pm 3\sigma$) που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας της ζήτησης φορτίου. Παρόλα αυτά, οι υπολογιστικές απαιτήσεις της προτεινόμενης μεθόδου παραμένουν σε αποδεκτά επίπεδα.

Είναι, επίσης, φανερό ότι η τιμή του κόστους της τελικής λύσης παρουσιάζει πολύ μικρή διακύμανση, ανεξάρτητα από την τιμή της παραμέτρου σ . Ωστόσο, η αύξηση του βαθμού αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων συντελεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, εξαιτίας της επακόλουθης αύξησης των απαιτήσεων του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία.

Πίνακας 10.15: Αποτελέσματα για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων

EUE_{max} (%)	$LOLP_{max}$ (%)	σ (%)	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)
0,05	1,5	0	712.067	712.704	713.473	98,90
0,05	1,5	1	712.216	712.384	712.638	145,28
0,05	1,5	3	713.855	714.119	714.390	162,01
0,05	1,5	5	716.862	717.098	717.318	146,22
0,01	1,0	0	718.574	718.714	718.827	105,71
0,01	1,0	1	718.843	719.071	719.334	173,07
0,01	1,0	3	722.544	722.859	723.107	172,65
0,01	1,0	5	730.675	731.027	731.448	150,21

Η ορθότητα της παραπάνω ανάλυσης επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 10.10, στο οποίο απεικονίζεται η διακύμανση της διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης περιόδου προγραμματισμού για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφέρονται στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, θεωρώντας ότι $EUE_{max} = 0,01\%$ και $LOLP_{max} = 1\%$. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση του βαθμού αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής διαθέσιμης στρεφόμενης εφεδρείας σε κάθε ώρα της περιόδου.



Σχήμα 10.10: Στρεφόμενη εφεδρεία σε κάθε ώρα της περιόδου για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης σ της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων

10.4.4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας υποδεικνύουν ότι οι διάφορες παράμετροι της μεθόδου επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την τελική λύση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αύξηση του επιθυμητού επιπέδου αξιοπιστίας συντελεί στην αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς απαιτείται η ένταξη επιπλέον θερμικών μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου.
- Η αύξηση του χρονικού διαστήματος υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των θερμικών μονάδων συντελεί στην αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς απαιτείται η ένταξη περισσότερων μονάδων σε κάθε ώρα της περιόδου προκειμένου να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο αξιοπιστίας.
- Η αύξηση του βαθμού αβεβαιότητας της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων συντελεί στην αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία.

Σε κάθε περίπτωση, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον καθορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων. Αντίθετα, ο αυθαίρετος καθορισμός των απαιτήσεων του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί να οδηγήσει σε λύσεις με έλλειμμα ή πλεόνασμα εφεδρείας. Στην πρώτη περίπτωση αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης προβλημάτων στην τροφοδότηση του φορτίου, ενώ στη δεύτερη αυξάνεται το κόστος του συστήματος.

10.5. Εφαρμογή Μεθόδου Ενσωμάτωσης Περιορισμών Εκπομπών Ρύπων

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εξετάζεται η επίδραση της ενσωμάτωσης των περιορισμών εκπομπών ρύπων στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του δεύτερου συστήματος παραγωγής, το οποίο αποτελείται από 26 θερμικές μονάδες. Ωστόσο, προκειμένου να φανεί η επίδραση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στο φαινόμενο της υποκατάστασης καυσίμου, οι πετρελαϊκές μονάδες 14 – 16 του αρχικού συστήματος αντικαταστάθηκαν από 3 πανομοιότυπες μονάδες φυσικού αερίου, τα στοιχεία των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.16.

Πίνακας 10.16: Χαρακτηριστικά των συμπληρωματικών μονάδων φυσικού αερίου

$P_{\min}$ (MW)	$P_{\max}$ (MW)	T_{up} (h)	T_{down} (h)	DUR_0 (h)	CF (tCO ₂ /\$)
20	100	0	0	-1	0,008
A (\$/MW ² h)	B (\$/MWh)	C (\$/h)	b_0 (\$)	b_1 (\$)	k (h)
0,011	37,5	117	20	20	2

Με βάση την ανάλυση του έβδομου κεφαλαίου, εξετάστηκαν δύο σενάρια:

Σενάριο 1. Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών CO₂.

Σενάριο 2. Αυστηρή εφαρμογή των περιορισμών εκπομπών CO₂ κάνοντας χρήση της συνάρτησης ποινής.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στη συγκεκριμένη εφαρμογή δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί αξιοπιστίας του συστήματος, ενώ θεωρείται ότι το περιθώριο της στρεφόμενης εφεδρείας για κάθε ώρα της περιόδου πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το 10% του αντίστοιχου φορτίου.

Η ανάλυση των δύο προαναφερόμενων σεναρίων στηρίζεται στην υιοθέτηση ενός μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου εκπομπών CO₂ για την εξεταζόμενη περίοδο. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκε ένα βασικό σενάριο χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί εκπομπών ρύπων, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.17. Οι εκπομπές CO₂ που παρατίθενται στην τελευταία στήλη του πίνακα αντιστοιχούν στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και αποτελούν βάση αναφοράς για την εξέταση των υπόλοιπων σεναρίων.

Πίνακας 10.17: Αποτελέσματα βασικού σεναρίου χωρίς περιορισμούς εκπομπών CO₂

Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)	Συνολικές Εκπομπές (tCO ₂)
735.218	735.624	735.842	35,4	23.836,36

10.5.1. Χρήση των δικαιωμάτων εκπομπών ρύπων

Το πρώτο σενάριο στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση καθίσταται δυνατή η αποδοχή λύσεων που οδηγούν σε παραβίαση του περιορισμού εκπομπών CO₂, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών, η οποία συντελεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος.

Χρησιμοποιώντας ως βάση αναφοράς τις εκπομπές του βασικού σεναρίου, εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις μείωσης των εκπομπών CO₂:

- Μείωση των εκπομπών κατά 5%. Στην περίπτωση αυτή, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $EMCAP_{carb}$ των εκπομπών τίθεται ίσο με 22.644,542 tCO₂.
- Μείωση των εκπομπών κατά 10%, οπότε $EMCAP_{carb} = 21.452,724$ tCO₂.

Στους Πίνακες 10.18 και 10.19 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αναφέρονται στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης και παρουσιάζουν την επίδραση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών στην τελική λύση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, το λειτουργικό κόστος του συστήματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης (3.8), ενώ το κόστος εκπομπών εκφράζει το επιπλέον κόστος (+) ή το κέρδος (-) από την αγορά ή την πώληση, αντίστοιχα, των δικαιωμάτων εκπομπών CO₂. Το άθροισμα του λειτουργικού κόστους και του κόστους εκπομπών παρέχει το συνολικό κόστος του συστήματος. Η τελευταία στήλη κάθε πίνακα αναφέρεται στην απόκλιση των συνολικών εκπομπών του συστήματος από το θεωρούμενο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Το θετικό πρόσημο υποδηλώνει έλλειμμα δικαιωμάτων εκπομπών (υπέρβαση του ορίου) και το αρνητικό πλεόνασμα.

Πίνακας 10.18: Αποτελέσματα για 5% μείωση των εκπομπών CO₂

<i>EMCAP_{carb}</i> = 22.644,542 tCO ₂				
Τιμή Δικαιωμάτων Εκπομπών (\$/tCO ₂)	Λειτουργικό Κόστος (\$)	Κόστος Εκπομπών (\$)	Συνολικό Κόστος (\$)	Απόκλιση Εκπομπών (tCO ₂)
10	735.374	11.991	747.365	1.199,078
15	735.335	17.759	753.094	1.183,898
20	735.640	23.519	759.159	1.175,948
25	736.261	28.378	764.639	1.135,108
30	737.779	32.699	770.478	1.089,968
35	767.795	6.159	773.954	175,968
40	775.730	-2.198	773.532	-54,962
45	778.156	-5.626	772.530	-125,022
50	780.814	-8.580	772.234	-171,592
55	780.985	-9.856	771.129	-179,202
60	788.611	-18.683	769.928	-311,382

Πίνακας 10.19: Αποτελέσματα για 10% μείωση των εκπομπών CO₂

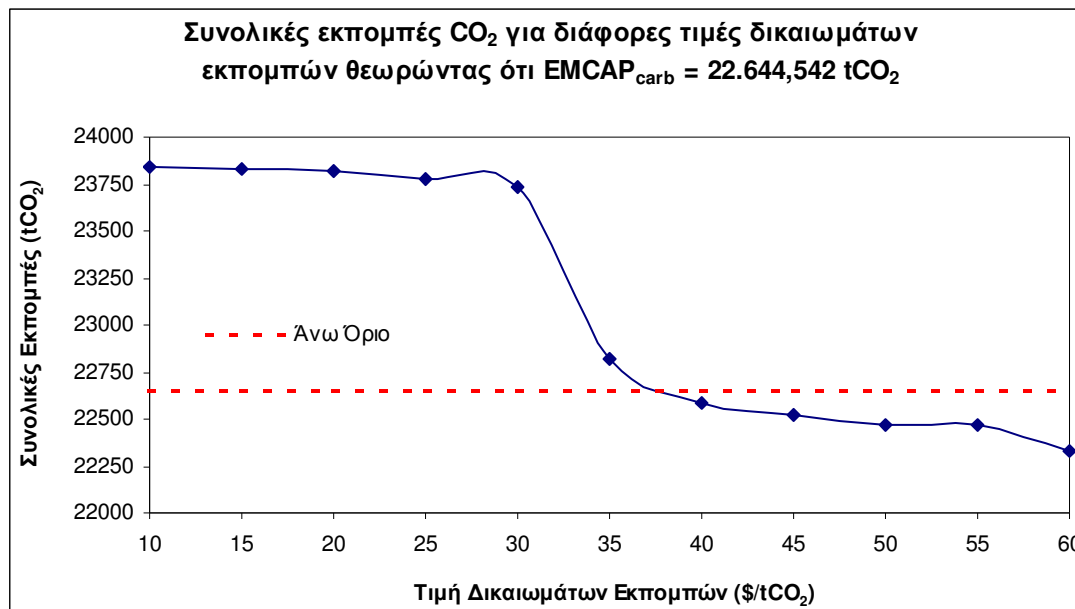
<i>EMCAP_{carb}</i> = 21.452,724 tCO ₂				
Τιμή Δικαιωμάτων Εκπομπών (\$/tCO ₂)	Λειτουργικό Κόστος (\$)	Κόστος Εκπομπών (\$)	Συνολικό Κόστος (\$)	Απόκλιση Εκπομπών (tCO ₂)
10	735.208	23.895	759.103	2.389,496
15	735.223	35.753	770.976	2.383,536
20	735.359	47.331	782.690	2.366,556
25	736.010	58.558	794.568	2.342,326
30	736.720	69.523	806.243	2.317,426
35	759.236	56.377	815.613	1.610,786
40	773.786	47.505	821.291	1.187,616
45	777.213	49.202	826.415	1.093,386
50	780.736	50.861	831.597	1.017,236
55	780.759	55.786	836.545	1.014,296
60	787.122	54.302	841.424	905,026
65	793.588	51.814	845.402	797,136
70	818.490	31.046	849.536	443,516
75	839.964	9.742	849.706	129,896
80	849.441	-1.029	848.412	-12,864
85	858.608	-10.778	847.830	-126,804
90	872.706	-29.522	843.184	-328,014

Τα αποτελέσματα των Πινάκων 10.18 και 10.19 υποδεικνύουν ότι η αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών οδηγεί σε μείωση των συνολικών εκπομπών του συστήματος και, συνεπώς, σε αύξηση του λειτουργικού κόστους, ανεξάρτητα από την τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου $EMCAP_{carb}$. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει δύο εναλλακτικές δυνατότητες:

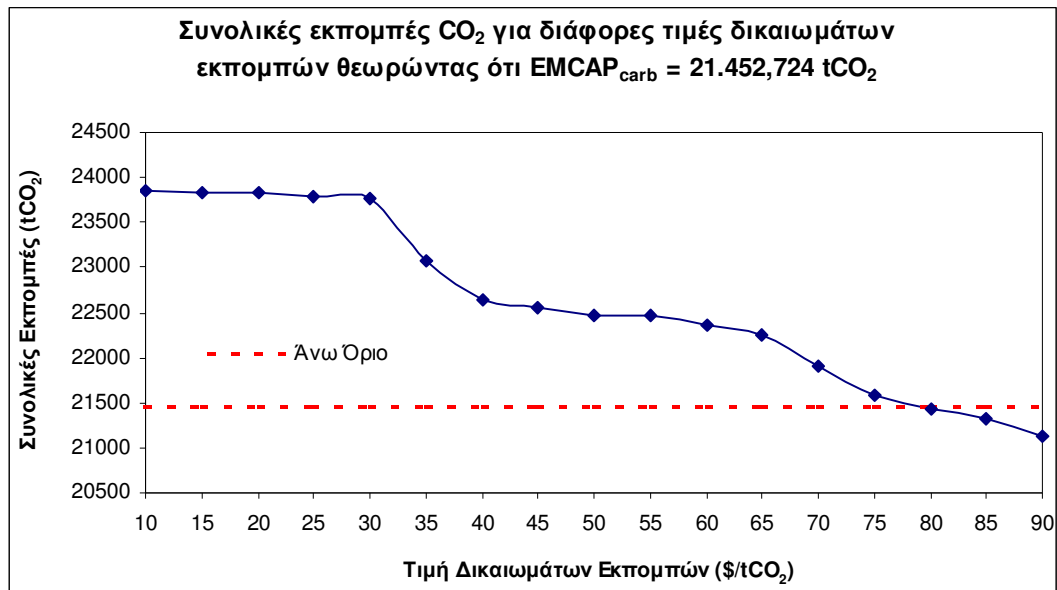
1. Υπέρβαση του ορίου $EMCAP_{carb}$ και αγορά επιπλέον δικαιωμάτων εκπομπών.
2. Μείωση των εκπομπών του συστήματος και πώληση των πλεοναζόντων δικαιωμάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης πιο “καθαρών” θερμικών μονάδων παραγωγής, οι οποίες όμως συντελούν στην αύξηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

Προφανώς, η πρώτη προσέγγιση οδηγεί σε μικρότερο συνολικό κόστος του συστήματος, εφόσον η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών είναι μικρότερη από την οριακή αύξηση του λειτουργικού κόστους που συνεπάγεται η μείωση των εκπομπών. Στην αντίθετη περίπτωση, η δεύτερη προσέγγιση καθίσταται περισσότερο οικονομική.

Η τιμή του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου $EMCAP_{carb}$ έχει άμεση επίδραση στον καθορισμό της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών, πάνω από την οποία εξασφαλίζεται η ικανοποίηση του θεωρούμενου περιορισμού, όπως φαίνεται στα Σχήματα 10.11 και 10.12. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος $EMCAP_{carb} = 22.644,542 \text{ tCO}_2$ (5% μείωση εκπομπών) επιτυγχάνεται αν η τιμή των δικαιωμάτων υπερβεί τα 40 \$/tCO₂. Το αντίστοιχο κατώφλι για την επίτευξη του στόχου $EMCAP_{carb} = 21.452,724 \text{ tCO}_2$ (10% μείωση εκπομπών) είναι τα 80 \$/tCO₂. Η υπέρβαση των συγκεκριμένων τιμών ευνοεί την εξασφάλιση πλεοναζόντων δικαιωμάτων εκπομπών, η πώληση των οποίων συντελεί στη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος.

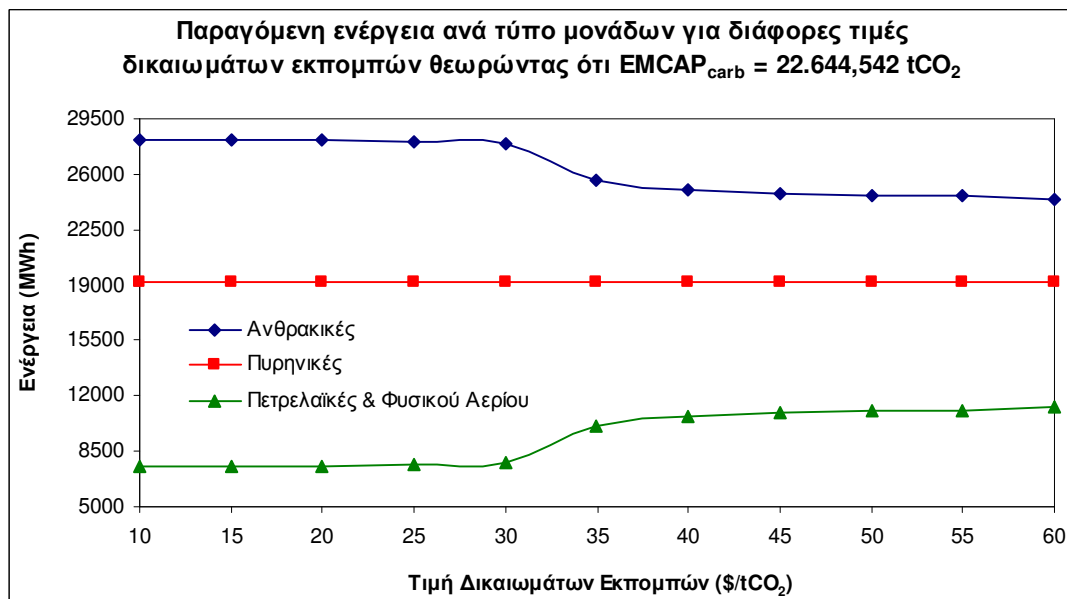


Σχήμα 10.11: Συνολικές εκπομπές CO₂ για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 22.644,542 \text{ tCO}_2$

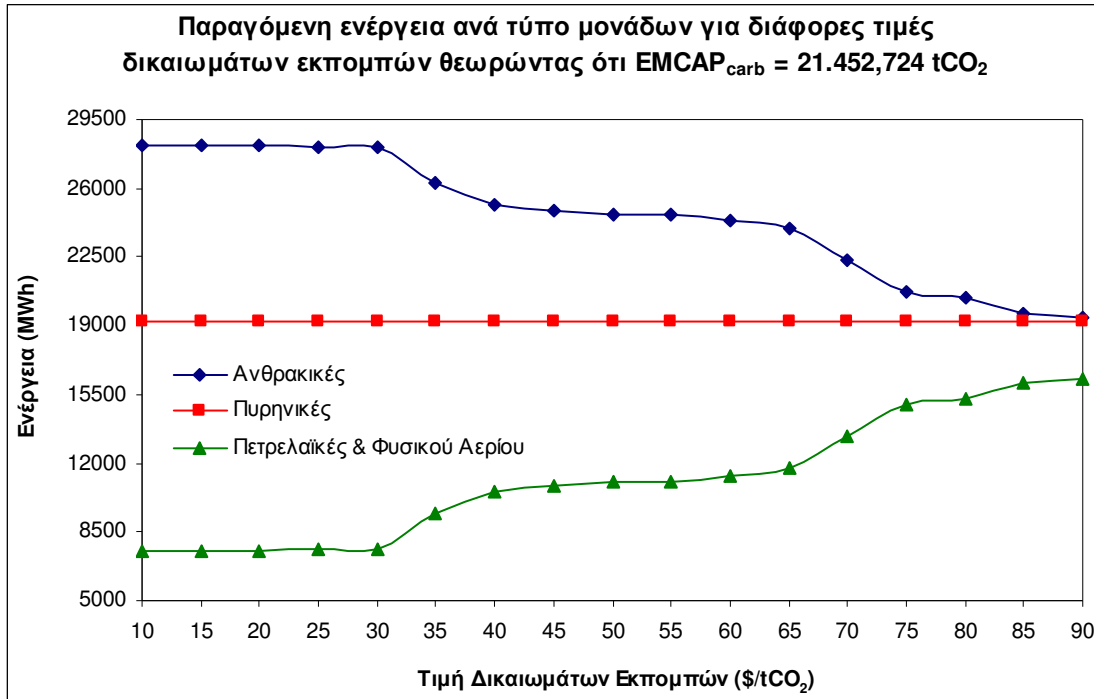


Σχήμα 10.12: Συνολικές εκπομπές CO₂ για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 21.452,724 \text{ tCO}_2$

Τέλος, στα Σχήματα 10.13 και 10.14 απεικονίζεται η επίδραση της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπών στο φαινόμενο της υποκατάστασης καυσίμου. Είναι φανερό ότι η αύξηση της τιμής των δικαιωμάτων συντελεί στην αύξηση της παραγωγής των θερμικών μονάδων που χρησιμοποιούν πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Οι μονάδες αυτές είναι λιγότερο ρυπογόνες (αλλά ακριβότερες) από τις ανθρακικές, η παραγωγή των οποίων μειώνεται σημαντικά. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την επακόλουθη αύξηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος. Επίσης, οι πυρηνικές μονάδες δεν εκπέμπουν CO₂ και καλύπτουν το φορτίο βάσης του συστήματος. Συνεπώς, η παραγωγή τους δεν επηρεάζεται από την τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών.



Σχήμα 10.13: Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 22.644,542 \text{ tCO}_2$



Σχήμα 10.14: Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών θεωρώντας ότι $EMCAP_{carb} = 21.452,724 \text{ tCO}_2$

10.5.2. Χρήση της συνάρτησης ποινής

Στο συγκεκριμένο σενάριο εξετάζεται η περίπτωση της αυστηρής εφαρμογής των περιορισμών εκπομπών ρύπων κάνοντας χρήση της συνάρτησης ποινής, η οποία προστίθεται στη συνολική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Εν προκειμένω, δεν υπάρχει η δυνατότητα αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ και, συνεπώς, οι συνολικές εκπομπές του συστήματος δεν πρέπει να υπερβαίνουν το θεωρούμενο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο.

Χρησιμοποιώντας ως βάση αναφοράς τις εκπομπές του βασικού σεναρίου, εξετάστηκαν οι ακόλουθες περιπτώσεις μείωσης των εκπομπών CO₂:

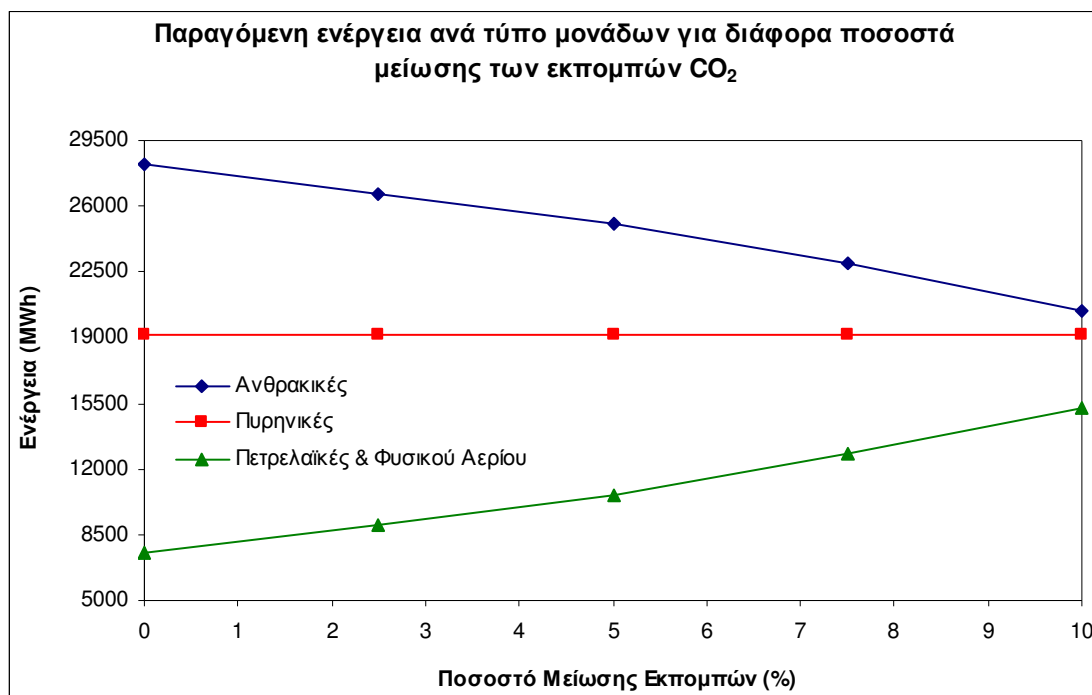
- Μείωση των εκπομπών κατά 2,5% (23.240,451 tCO₂).
- Μείωση των εκπομπών κατά 5% (22.644,542 tCO₂).
- Μείωση των εκπομπών κατά 7,5% (22.048,633 tCO₂).
- Μείωση των εκπομπών κατά 10% (21.452,724 tCO₂).

Στον Πίνακα 10.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις. Είναι φανερό ότι η μείωση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου εκπομπών CO₂ συντελεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς απαιτείται η υποκατάσταση των ρυπογόνων (αλλά φθηνών) ανθρακικών μονάδων από τις μονάδες που χρησιμοποιούν πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παραγωγή των πυρηνικών μονάδων παραμένει αμετάβλητη σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 10.20: Αποτελέσματα για διάφορα ποσοστά μείωσης των εκπομπών CO₂

Μείωση Εκπομπών (%)	Κόστος Καλύτερης Λύσης (\$)	Μέσο Κόστος (\$)	Κόστος Χειρότερης Λύσης (\$)	Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης (sec)
0	735.218	735.624	735.842	35,40
2,5	753.642	754.305	754.945	36,60
5	773.831	774.809	775.712	40,33
7,5	808.109	810.488	811.809	38,35
10	850.082	853.913	856.799	41,45

Η ορθότητα της παραπάνω ανάλυσης επιβεβαιώνεται από το Σχήμα 10.15, στο οποίο απεικονίζεται η επίδραση του ποσοστού μείωσης των εκπομπών CO₂ στη συνολική ενέργεια που παράγεται από κάθε τύπο μονάδων. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα αντιστοιχούν στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης.

**Σχήμα 10.15:** Παραγόμενη ενέργεια ανά τύπο μονάδων για διάφορα ποσοστά μείωσης των εκπομπών CO₂

10.5.3. Συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης εφαρμογής γίνεται φανερό ότι η μέθοδος που στηρίζεται στη χρήση των δικαιωμάτων εκπομπών παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της στρατηγικής που πρέπει να ακολουθηθεί ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αναφορικά με τις εκπομπές CO₂, έχοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, αν η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων εκπομπών είναι

μικρότερη από την οριακή αύξηση του λειτουργικού κόστους που συνεπάγεται η μείωση των εκπομπών, η υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου εκπομπών (αγορά επιπλέον δικαιωμάτων) οδηγεί σε μικρότερο συνολικό κόστος του συστήματος. Στην αντίθετη περίπτωση, η προσέγγιση που στηρίζεται στη μείωση των εκπομπών του συστήματος και πώληση των πλεοναζόντων δικαιωμάτων καθίσταται περισσότερο οικονομική.

Εναλλακτικά, η αυστηρή εφαρμογή των περιορισμών εκπομπών ρύπων, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών, συντελεί σε αύξηση του συνολικού κόστους του συστήματος, εξαιτίας της απαίτησης για υποκατάσταση των φθηνών, ρυπογόνων μονάδων από ακριβότερες μονάδες που χρησιμοποιούν λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα. Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο με τη μείωση του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου εκπομπών.

10.6. Εφαρμογή Μεθόδου Υδροθερμικής Συνεργασίας

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή εξετάζεται η επίλυση του προβλήματος της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας μέσω της συνδυαστικής χρήσης των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το τρίτο σύστημα παραγωγής (Πίνακες 10.7 – 10.10), το οποίο αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος.

10.6.1. Εξεταζόμενα σενάρια

Δεδομένου ότι η εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών εξαρτάται από το κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού, εξετάστηκαν δύο σενάρια:

Σενάριο 1. Επιλογή του περιορισμού αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων.

Σενάριο 2. Επιλογή του περιορισμού συνολικής διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού.

Σε κάθε σενάριο λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου, αξιοπιστίας και εκπομπών ρύπων, η ενσωμάτωση των οποίων βασίστηκε στις ακόλουθες θεωρήσεις:

- Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $LOLP_{max}$ της πιθανότητας απώλειας φορτίου ισούται με 1%.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο EUE_{max} της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας ισούται με το 0,01% της συνολικής ενέργειας της θεωρούμενης περιόδου.
- Το χρονικό διάστημα LT υπολογισμού της πιθανότητας βλάβης των θερμικών μονάδων ισούται με 4 ώρες.
- Η τυπική απόκλιση σ της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων ισούται με 2%.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο $EMCAP_{carb}$ των εκπομπών CO_2 ισούται με 100.000 t, λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών.
- Η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών ισούται με 30 €/tCO₂.

Στον Πίνακα 10.21 παρατίθενται τα αποτελέσματα του υδροηλεκτρικού προβλήματος για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Σε κάθε περίπτωση, η αρχική κατάσταση (V_{in}) των ταμιευτήρων αποτελεί δεδομένο εισόδου του προβλήματος. Στο Σενάριο 1 θεωρήθηκε δεδομένη και η τελική κατάσταση (V_{fin}) των ταμιευτήρων, χωρίς να τίθεται περιορισμός αναφορικά με τη συνολική διαθέσιμη ενέργεια (E_{tot}) κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού, η οποία υπολογίζεται μέσω της προτεινόμενης μεθόδου. Αντίθετα, στο Σενάριο 2 θεωρήθηκε ότι κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να παράγει μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας (δεδομένο εισόδου), χωρίς να υπάρχει έλεγχος για την τελική κατάσταση των ταμιευτήρων.

Προκειμένου να φανεί η επίδραση της συνολικής διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας στην τελική λύση του προβλήματος, στο Σενάριο 2 θεωρήθηκε ότι κάθε υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να παράγει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας συγκριτικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του Σεναρίου 1. Για το λόγο αυτό, το Σενάριο 2 οδήγησε σε μείωση του υδάτινου όγκου που είναι αποθηκευμένος στον ταμιευτήρα κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού.

Πίνακας 10.21: Σύγκριση αποτελεσμάτων υδροηλεκτρικού προβλήματος

Σταθμός	Δεδομένα	Σενάριο 1		Σενάριο 2	
	V_{in} (10^6 m^3)	V_{fin} (10^6 m^3)	E_{tot} (MWh)	V_{fin} (10^6 m^3)	E_{tot} (MWh)
1	1135,4	1135,4	1485	1134,8	1700
2	15,7	15,7	705	15,0	900
3	9,8	9,8	438	9,4	600
4	3254,5	3254,5	1385	3254,1	1500
5	51,0	51,0	867	50,4	1000
6	11,7	11,7	561	11,1	700
7	141,4	141,4	504	141,3	600
8	337,9	337,9	614	337,1	750
9	4,0	4,0	73	3,4	100
10	45,3	45,3	640	45,1	700
11	551,7	551,7	714	551,2	850
12	68,2	68,2	371	68,0	450
13	293,0	293,0	578	292,9	650

Επισημαίνεται ότι ο προγραμματισμός των υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνει υπόψη όλους τους περιορισμούς του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τους Πίνακες 10.22 και 10.23, τα αποτελέσματα των οποίων αναφέρονται στα Σενάρια 1 και 2, αντίστοιχα. Στους συγκεκριμένους πίνακες γίνεται αναφορά μόνο στις ώρες κατά τις οποίες οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής είναι εντός λειτουργίας.

Πίνακας 10.22: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)

Ωρα	Παραγωγή Υδροηλεκτρικών Σταθμών (MW)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	0	0	0	0	97	66	20	56	7	36	56	28	10
11	0	138	61	137	97	65	20	57	7	52	60	29	15
12	220	130	60	147	98	63	70	57	7	59	62	29	54
13	265	126	61	170	101	63	133	62	7	70	75	33	93
14	277	116	59	169	99	61	83	60	7	70	69	31	91
15	0	0	57	168	97	58	20	58	7	63	63	29	52
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	65	63	29	13
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	24
19	0	0	0	0	0	50	27	62	6	40	64	29	49
20	348	65	44	159	86	44	20	48	6	19	35	19	10
21	375	65	49	216	97	47	83	63	6	40	66	29	49
22	0	65	47	219	96	45	28	62	6	61	63	28	75
23	0	0	0	0	0	0	0	30	6	65	35	28	44

Πίνακας 10.23: Παραγωγή υδροηλεκτρικών σταθμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας (Σενάριο 2)

Ωρα	Παραγωγή Υδροηλεκτρικών Σταθμών (MW)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	0	0	0	0	104	80	20	73	7	52	63	34	55
11	114	142	78	125	96	75	20	63	7	31	38	27	35
12	193	145	82	173	105	78	83	71	9	52	70	35	74
13	236	141	82	196	108	77	146	73	9	70	83	38	113
14	255	132	81	201	106	75	83	73	9	70	81	38	100
15	0	111	75	162	95	70	20	59	9	49	45	29	61
16	0	0	0	0	0	0	20	65	9	61	61	32	35
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	31	10
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	59	32	16
19	0	0	0	0	99	64	20	68	8	59	60	32	32
20	280	75	69	209	96	62	20	65	8	39	53	30	10
21	347	77	71	248	103	63	83	71	9	60	79	36	49
22	276	78	62	187	87	55	20	30	8	39	35	23	10
23	0	0	0	0	0	0	65	39	9	60	67	33	49

Στον Πίνακα 10.24 παρατίθενται τα αποτελέσματα του θερμικού προβλήματος που αναφέρονται στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο. Είναι φανερό ότι το δεύτερο σενάριο οδηγεί σε μείωση τόσο των συνολικών εκπομπών CO₂, όσο και της αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας, λόγω της αυξημένης υδροηλεκτρικής παραγωγής.

Σε κάθε περίπτωση, οι συνολικές εκπομπές του συστήματος είναι μικρότερες από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο (100.000 tCO₂), με αποτέλεσμα την εξασφάλιση πλεοναζόντων δικαιωμάτων εκπομπών, η πώληση των οποίων συντελεί στη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος. Επίσης, η αναμενόμενη μη εξυπηρετούμενη ενέργεια είναι λίγο μικρότερη από το επιβαλλόμενο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο (12,774 MWh), γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών αξιοπιστίας.

Πίνακας 10.24: Σύγκριση αποτελεσμάτων θερμικού προβλήματος

Σενάριο	Λειτουργικό Κόστος (€)	Κόστος Εκπομπών (€)	Συνολικό Κόστος (€)	Συνολικές Εκπομπές (tCO ₂)	Αναμενόμενη Μη Εξυπηρετούμενη Ενέργεια (MWh)
1	2.480.270	-149.000	2.331.270	95.033,30	12,527
2	2.450.441	-207.025	2.243.416	93.099,16	12,029

Τα αποτελέσματα του προβλήματος βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας για κάθε εξεταζόμενο σενάριο συνοψίζονται στον Πίνακα 10.25. Είναι φανερό ότι στο Σενάριο 1 απαιτούνται δύο επαναλήψεις της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης, το οποίο εκφράζεται μέσω της σχέσης (8.16). Στην περίπτωση αυτή, το όριο ανοχής ε τέθηκε ίσο με 0,01%. Αντίθετα, στο Σενάριο 2 απαιτείται μόνο μία επανάληψη της μεθόδου, όπως προκύπτει και από την ανάλυση του όγδοου κεφαλαίου της διατριβής.

Πίνακας 10.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων υδροθερμικής συνεργασίας

Αποτελέσματα	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Συνολικό Κόστος Καλύτερης Λύσης (€)	2.331.270	2.243.416
Μέσο Συνολικό Κόστος (€)	2.332.095	2.245.609
Συνολικό Κόστος Χειρότερης Λύσης (€)	2.332.771	2.246.318
Συνολική Υδροηλεκτρική Παραγωγή (MWh)	8.935	10.500
Επαναλήψεις Βελτιωμένης Μεθόδου Αποκοπής Αιχμών	2	1
Χρόνος Επίλυσης Υδροηλεκτρικού Προβλήματος (sec)	66,59	32,68
Μέσος Χρόνος Επίλυσης Θερμικού Προβλήματος (sec)	638,68	610,65

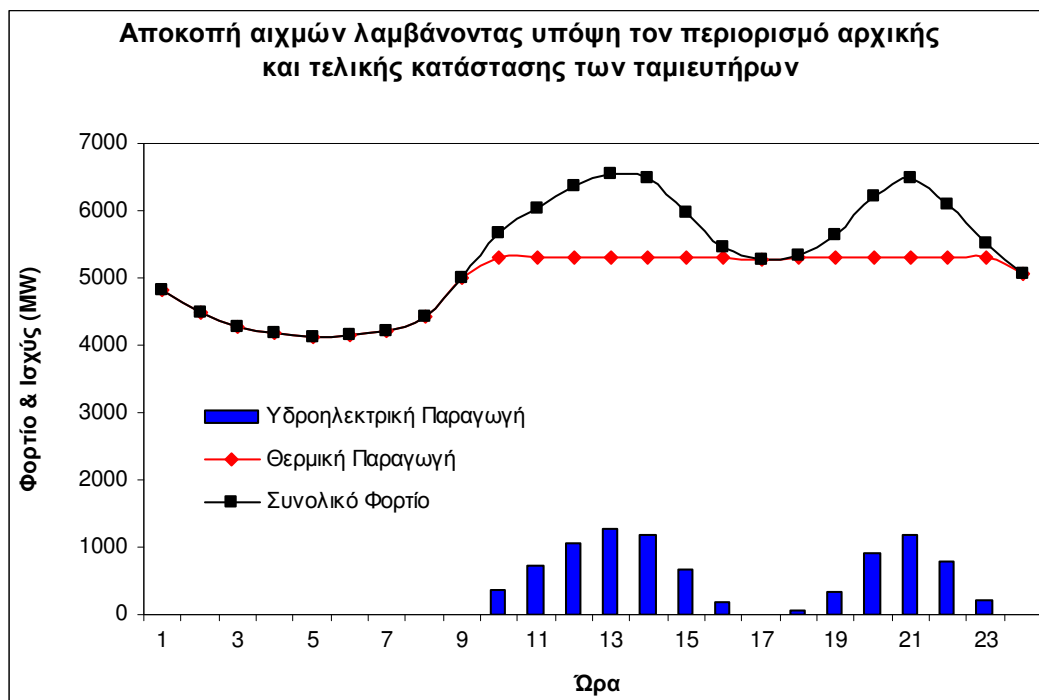
Η πολύ μικρή διακύμανση που παρουσιάζει η τιμή του κόστους της τελικής λύσης για κάθε εξεταζόμενο σενάριο αποδεικνύει τη σταθερότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του θερμικού προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αυξημένη υδροηλεκτρική παραγωγή του

δεύτερου σεναρίου έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος, σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο.

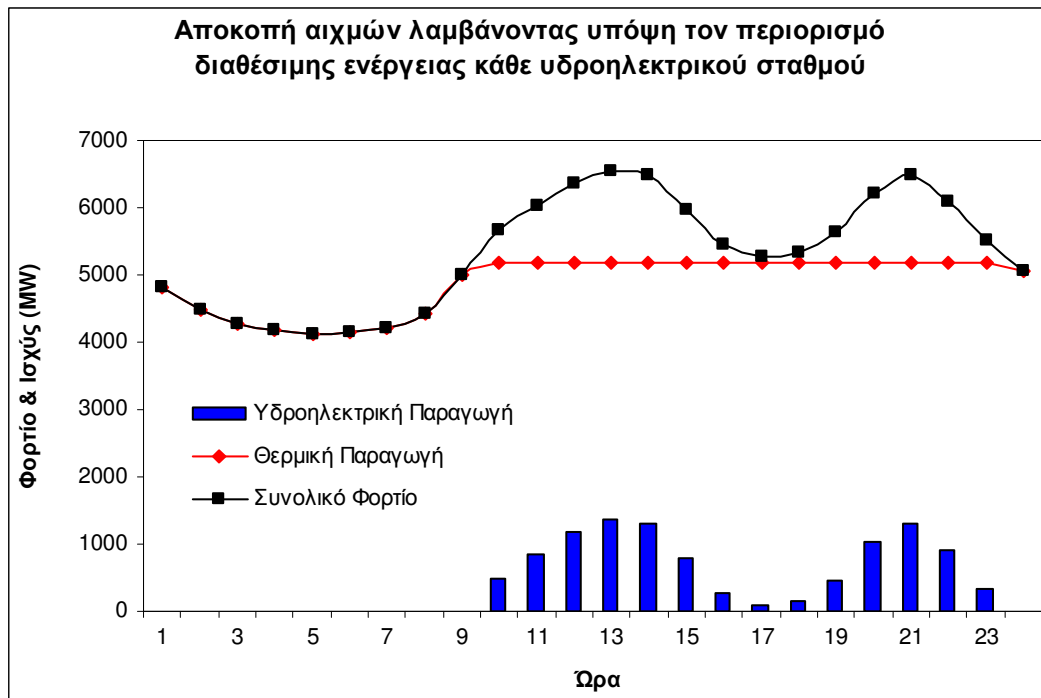
Επιπλέον, στον Πίνακα 10.25 παρουσιάζονται οι υπολογιστικές απαιτήσεις των μεθόδων επίλυσης του υδροηλεκτρικού και θερμικού προβλήματος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης ρεαλιστικών προβλημάτων βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας σε σύντομο υπολογιστικό χρόνο, ανεξάρτητα από το κριτήριο που υιοθετείται για τον προγραμματισμό των υδροηλεκτρικών σταθμών.

Στο Σχήμα 10.16 απεικονίζεται το συνολικό φορτίο του συστήματος, καθώς και η συνολική υδροηλεκτρική και θερμική παραγωγή σε κάθε ώρα της περιόδου για το Σενάριο 1. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το Σενάριο 2 απεικονίζονται στο Σχήμα 10.17. Σε κάθε περίπτωση, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται στις ώρες αιχμής, συντελώντας σε ισοκατανομή του ισοδύναμου θερμικού φορτίου. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η άσκοπη έναρξη και παύση της λειτουργίας των θερμικών μονάδων, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος.

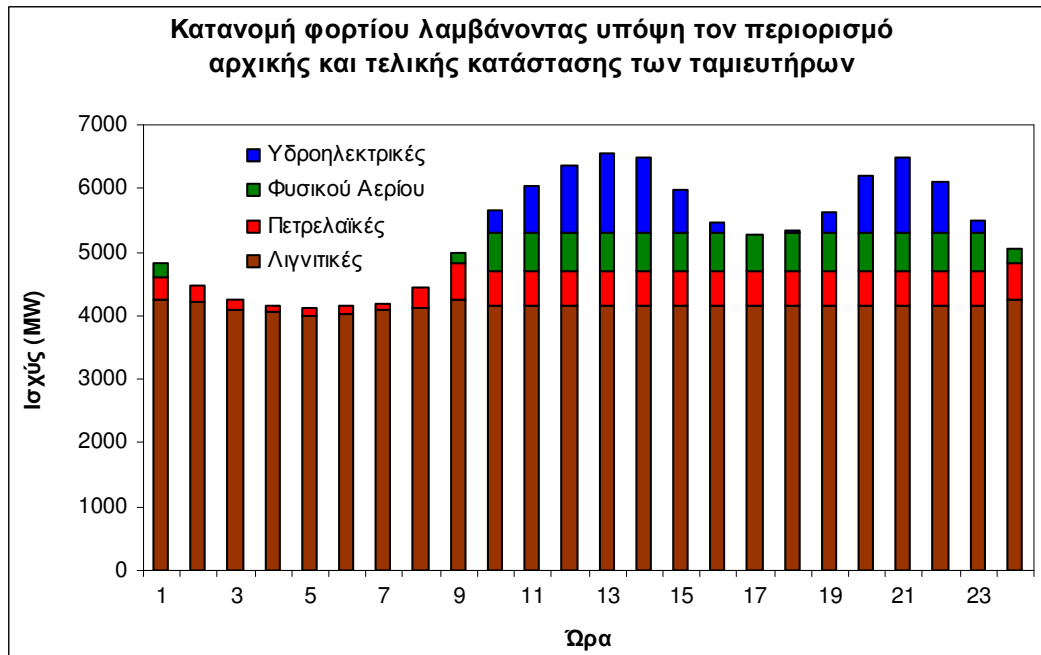
Τέλος, στα Σχήματα 10.18 και 10.19 απεικονίζεται η κατανομή φορτίου σε κάθε ώρα της περιόδου για τα Σενάρια 1 και 2, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην καλύτερη λύση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Είναι φανερό ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας προέρχεται από τις λιγνιτικές μονάδες, ενώ οι υπόλοιπες θερμικές μονάδες (πετρελαϊκές και φυσικού αερίου) έχουν σημαντικά μικρότερη συμβολή. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται στις ώρες αιχμής της περιόδου.



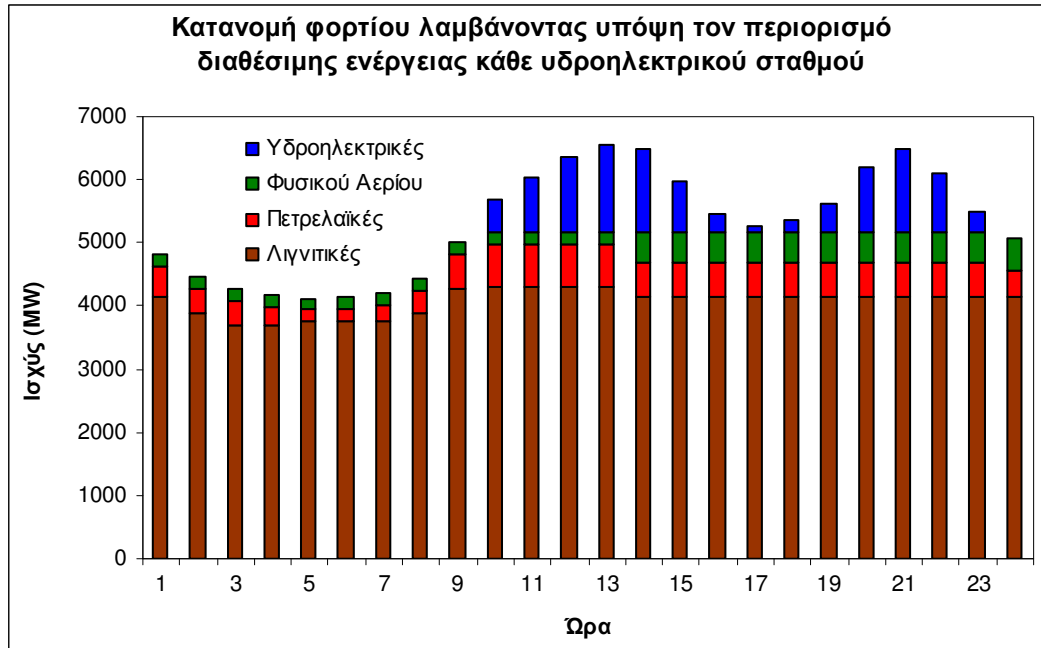
Σχήμα 10.16: Αποκοπή αιχμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)



Σχήμα 10.17: Αποκοπή αιχμών λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού (Σενάριο 2)



Σχήμα 10.18: Κατανομή φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων (Σενάριο 1)



Σχήμα 10.19: Κατανομή φορτίου λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού (Σενάριο 2)

10.6.2. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εφαρμογής αποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας καθιστά δυνατό τον προγραμματισμό λειτουργίας συστημάτων με μεγάλο αριθμό υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς να αυξάνονται σημαντικά οι συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις. Ανεξάρτητα από το κριτήριο με βάση το οποίο γίνεται η επίλυση του προβλήματος του βραχυπρόθεσμου υδροπρογραμματισμού, η εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών συντελεί στην εξομάλυνση των αιχμών του συστήματος, αποφεύγοντας τις έντονες διακυμάνσεις του φορτίου. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται οι αρνητικές επιπτώσεις από τη συχνή μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας των θερμικών μονάδων.

Επιπλέον, είναι φανερό ότι η αύξηση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους του συστήματος, καθώς και των συνολικών εκπομπών ρύπων. Παράλληλα, αυξάνεται το επίπεδο αξιοπιστίας που παρέχει το εξεταζόμενο σύστημα παραγωγής. Οι συγκεκριμένες διαπιστώσεις αναδεικνύουν τη σημασία της περαιτέρω αξιοποίησης της υδροηλεκτρικής ενέργειας τόσο για οικονομικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

11.1. Σύνοψη της Διατριβής και Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής εξετάστηκε διεξοδικά το πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, στόχος του οποίου είναι η εύρεση του βέλτιστου προγράμματος ένταξης των υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων ενός συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και, παράλληλα, ο καθορισμός της ενεργού παραγωγής κάθε μονάδας για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου προγραμματισμού. Η αντιμετώπιση του εν λόγω προβλήματος βασίστηκε στη διάσπασή του σε δύο ανεξάρτητα προβλήματα, ένα υδροηλεκτρικό και ένα θερμικό, για την επίλυση των οποίων αναπτύχθηκαν μια βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών και μια νέα μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης, αντίστοιχα. Η συνδυαστική χρήση των παραπάνω μεθόδων επιτυγχάνεται μέσω ενός ενιαίου λογισμικού πακέτου.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη μαθηματική διατύπωση του εξεταζόμενου προβλήματος, καθώς και στην περιγραφή του μοντέλου λειτουργίας των υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων παραγωγής. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η πληρέστερη απεικόνιση των τεχνικών χαρακτηριστικών του συστήματος παραγωγής, διατυπώθηκε ένα μεγάλο πλήθος περιορισμών, η ενσωμάτωση των οποίων συμβάλλει στην εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων.

Για την επίλυση του θερμικού προβλήματος αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης. Η ύπαρξη μαθηματικής απόδειξης για την ασυμπτωτική σύγκλιση της μεθόδου στη βέλτιστη λύση πολύπλοκων προβλημάτων, ανεξάρτητα από τη δομή της αντικειμενικής συνάρτησης και το είδος των περιορισμών, αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα συγκριτικά με τις περισσότερες ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Η συνδυαστική χρήση τριών πρωτότυπων μηχανισμών για την παραγωγή εφικτών υποψήφιων λύσεων, η ενσωμάτωση συστηματικών διαδικασιών για τη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων ελέγχου και η παράλληλη χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου τοπικής βελτιστοποίησης, συμβάλλουν στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης, επιταχύνοντας σημαντικά τη σύγκλισή της. Επίσης, η μέθοδος καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση πολύπλοκων περιορισμών, επιτρέποντας την αναλυτική παράσταση του συστήματος παραγωγής.

Στην παραπάνω κατηγορία ανήκουν οι χρονικά εξαρτώμενοι περιορισμοί ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων, η ενσωμάτωση των οποίων επιβαρύνει σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκε μια νέα δυναμική μέθοδος, η οποία στηρίζεται στη διαδοχική επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της εξεταζόμενης περιόδου, τροποποιώντας κατάλληλα τα όρια παραγωγής των θερμικών μονάδων. Η συγκεκριμένη μέθοδος συμβάλλει στην ενσωμάτωση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου στο πρόβλημα του

βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής και, παράλληλα, συντελεί στην επιτάχυνση της επίλυσης του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου.

Επίσης, αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη μέθοδος για την ενσωμάτωση περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού παραγωγής, η οποία στηρίζεται στη χρήση των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον καθορισμό της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας σε κάθε ώρα της περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων παραγωγής και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων, σε αντίθεση με τις πιο διαδεδομένες εμπειρικές μεθόδους, οι οποίες στηρίζονται στον αυθαίρετο καθορισμό των απαιτήσεων του συστήματος σε στεφόμενη εφεδρεία. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εμφάνισης σοβαρών προβλημάτων στην τροφοδότηση του φορτίου, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά το συνολικό κόστος του συστήματος.

Επιπρόσθετα, μελετήθηκε η επίδραση των περιορισμών εκπομπών ρύπων στην επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Με βάση τη διεθνή και ευρωπαϊκή νομοθεσία για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων, αναπτύχθηκε μια πρωτότυπη μέθοδος για την αντιμετώπιση των περιορισμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η μέθοδος στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων και παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για την αξιολόγηση της πολιτικής που πρέπει να ακολουθήσει ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αναφορικά με τις εκπομπές CO₂, έχοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους του συστήματος. Ειδικά για την εσωμάτωση των περιορισμών που αναφέρονται στους υπόλοιπους αέριους ρύπους, οι οποίοι δεν λαμβάνονται υπόψη στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων, αναπτύχθηκε μια δεύτερη μέθοδος που στηρίζεται στην προσθήκη μιας συνάρτησης ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.

Όσον αφορά την επίλυση του υδροηλεκτρικού προβλήματος, αναπτύχθηκε μια νέα, βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών, η οποία καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση όλων των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής, αυξάνοντας σημαντικά την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας παράλληλη χρήση μιας μεθόδου διορθωτικού ελέγχου, η οποία στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης της τελικής λύσης από αυτή που παρέχει η μέθοδος αποκοπής αιχμών, ώστε να εξαλειφθούν οι πιθανές παραβιάσεις των υδραυλικών περιορισμών. Η προτεινόμενη μέθοδος συμβάλλει στην ορθολογική χρήση της διαθέσιμης υδροηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις.

Για την υλοποίηση όλων των προαναφερόμενων μεθόδων αναπτύχθηκε ένα ενιαίο λογισμικό πακέτο. Η εφαρμογή ειδικών προγραμματιστικών τεχνικών συντελεί στην ελαχιστοποίηση του χρόνου προσπέλασης των δεδομένων του προγράμματος, αυξάνοντας την ταχύτητα εκτέλεσης των επιμέρους διαδικασιών. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην απλούστευση της δομής του προγράμματος, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω επέκτασής του.

Τα αποτελέσματα από τη χρήση του προγράμματος σε ένα πλήθος εφαρμογών απέδειξαν ότι ο συνδυασμός των μεθόδων προσομοιωμένης ανόπτησης [142,145] και αποκοπής αιχμών [147] καθιστά δυνατή την επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη ένα ευρύ φάσμα

περιορισμών. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης αναδείχθηκε από τη σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα τριών άλλων μεθόδων βελτιστοποίησης, ενώ η εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών απέδειξε ότι η προτεινόμενη μέθοδος συντελεί στην εξομάλυνση των αιχμών του συστήματος, αποφεύγοντας τις έντονες διακυμάνσεις του φορτίου και τις επακόλουθες αρνητικές επιπτώσεις από τη συχνή μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας των θερμικών μονάδων.

Παρά το γεγονός ότι η διάσπαση του συνολικού προβλήματος υδροθερμικής συνεργασίας δεν μπορεί να εγγυηθεί την εύρεση της βέλτιστης λύσης, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για το βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό λειτουργίας συστημάτων με μεγάλο αριθμό θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής, χωρίς να απαιτείται η υιοθέτηση σημαντικών απλοποιητικών παραδοχών που αλλοιώνουν σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της τελικής λύσης. Αντίθετα, η ενσωμάτωση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου [141,143], αξιοπιστίας [144,148] και εκπομπών ρύπων [146] συντελεί στην εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων, αυξάνοντας όμως τις συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις του προγράμματος. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, ο μέσος χρόνος εκτέλεσης διατηρείται σε αποδεκτά επίπεδα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη μέθοδος ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας συμβάλλει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργούνται από τον αυθαίρετο καθορισμό των απαιτήσεων του συστήματος σε στρεφόμενη εφεδρεία. Τέλος, η εφαρμογή της μεθόδου ενσωμάτωσης των περιορισμών εκπομπών ρύπων οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα αναφορικά με την αρνητική επίδραση των εν λόγω περιορισμών στο συνολικό κόστος του συστήματος, καθώς απαιτείται η υποκατάσταση των φθηνών, ρυπογόνων μονάδων από ακριβότερες μονάδες που χρησιμοποιούν λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα.

11.2. Συμβολή της Διατριβής

Τα πρωτότυπα στοιχεία σε σχέση με τη διεθνή βιβλιογραφία, η συνεισφορά και η συμβολή της παρούσας διατριβής εντοπίζονται, κυρίως, στα ακόλουθα σημεία:

- Επιλύεται το πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού των θερμικών μονάδων παραγωγής με πλήρη ανάλυση του θερμικού συστήματος, κάνοντας χρήση μιας νέας μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Η μέθοδος περιλαμβάνει τρεις πρωτότυπους μηχανισμούς για την παραγωγή τυχαίων εφικτών λύσεων, οι οποίοι επιτρέπουν την άμεση ενσωμάτωση των χρονικά εξαρτώμενων περιορισμών ελάχιστου χρόνου λειτουργίας/κράτησης των θερμικών μονάδων. Η συνδυαστική χρήση των εν λόγω μηχανισμών παρέχει μια δισδιάστατη διερεύνηση του χώρου των εφικτών λύσεων, επιταχύνοντας τη σύγκλιση της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Επίσης, εφαρμόζονται συστηματικές διαδικασίες για τη ρύθμιση των βασικών παραμέτρων ελέγχου της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Σε αντίθεση, δηλαδή, με τη συνήθη πρακτική, δεν απαιτούνται δοκιμαστικές εκτελέσεις του προγράμματος προκειμένου να εντοπιστούν οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων για κάθε εξεταζόμενο σύστημα.
- Παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος τοπικής βελτιστοποίησης, η οποία αποσκοπεί στην επιτάχυνση της σύγκλισης της μεθόδου προσομοιωμένης ανόπτησης. Η μέθοδος στηρίζεται στην επαναληπτική παραγωγή νέων υποψήφιων λύσεων, σε μια προσπάθεια βελτίωσης της τελευταίας λύσης που γίνεται αποδεκτή σε κάθε επίπεδο θερμοκρασίας.

- Παρουσιάζεται μια νέα δυναμική μέθοδος οικονομικής κατανομής φορτίου για την αντιμετώπιση των περιορισμών ανάληψης/απόρριψης φορτίου των θερμικών μονάδων. Η μέθοδος στηρίζεται στην εναλλακτική εφαρμογή δύο δυναμικών διαδικασιών (πρόσω και ανάδρομη δυναμική κατανομή), κάνοντας χρήση συγκεκριμένων κανόνων, προκειμένου να αποφασιστεί η διαδικασία που πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ανεξάρτητη επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου για κάθε ώρα της περιόδου, μειώνοντας σε σημαντικό βαθμό τις υπολογιστικές απαιτήσεις της μεθόδου.
- Παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση των δεικτών πιθανότητας απώλειας φορτίου και αναμενόμενης μη εξυπηρετούμενης ενέργειας. Η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ένα συστηματικό πλαίσιο για τον καθορισμό της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας σε κάθε ώρα της περιόδου, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων και την αβεβαιότητα της πρόβλεψης των ωριαίων φορτίων. Σε αντίθεση με τις αντίστοιχες μεθόδους της βιβλιογραφίας, η προτεινόμενη μέθοδος επιτρέπει τη χρήση ενός αναλυτικού μοντέλου του θερμικού συστήματος παραγωγής.
- Παρουσιάζονται δύο νέες μέθοδοι για την ενσωμάτωση των περιορισμών εκπομπών αέριων ρύπων στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής. Σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική της αυστηρής εφαρμογής των περιορισμών εκπομπών, η πρώτη μέθοδος στηρίζεται στη λογική του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων, λαμβάνοντας υπόψη τη διαδικασία αγοραπωλησίας δικαιωμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η δεύτερη μέθοδος στηρίζεται στην προσθήκη μιας συνάρτησης ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση των περιορισμών που αναφέρονται στους λοιπούς αέριους ρύπους, οι οποίοι δεν εντάσσονται στο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων.
- Παρουσιάζεται μια νέα, βελτιωμένη μέθοδος αποκοπής αιχμών για το βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών. Η προτεινόμενη μέθοδος καθιστά δυνατή την ενσωμάτωση των πολύπλοκων περιορισμών του υδροηλεκτρικού συστήματος παραγωγής, κάνοντας χρήση μιας αποτελεσματικής μεθόδου διορθωτικού ελέγχου. Ο προγραμματισμός λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής στηρίζεται στη χρήση δύο εναλλακτικών κριτηρίων. Το πρώτο εξ αυτών αφορά στον περιορισμό αρχικής και τελικής κατάστασης των ταμιευτήρων και το δεύτερο στον περιορισμό διαθέσιμης ενέργειας κάθε υδροηλεκτρικού σταθμού. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών συντελεί στην εξομάλυνση των αιχμών του συστήματος, αποφεύγοντας τις έντονες διακυμάνσεις του φορτίου.
- Επιλύεται το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης υδροθερμικής συνεργασίας, κάνοντας συνδυαστική χρήση των μεθόδων αποκοπής αιχμών και προσομοιωμένης ανόπτησης. Η διάσπαση του συνολικού προβλήματος σε δύο ανεξάρτητα υποπροβλήματα, τα οποία επιλύονται διαδοχικά, καθιστά δυνατή την εφαρμογή της μεθόδου σε συστήματα με μεγάλο αριθμό υδροηλεκτρικών και θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς να αυξάνονται σημαντικά οι συνολικές υπολογιστικές απαιτήσεις.

Τέλος, αναπτύχθηκε ένα ενιαίο λογισμικό πακέτο για την επίλυση του προβλήματος του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα εξωτερικού προγραμματισμού από το χρήστη. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην απλούστευση της δομής του προγράμματος, ώστε να καθίσταται δυνατή η περαιτέρω επέκτασή του.

11.3. Τομείς για Μελλοντική Έρευνα

Με την ολοκλήρωση της διατριβής διαφαίνονται οι ακόλουθοι τομείς για περαιτέρω έρευνα:

- Ενσωμάτωση των περιορισμών του δικτύου μεταφοράς στο πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου.
- Ενσωμάτωση των επικουρικών υπηρεσιών (πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα στρεφόμενη εφεδρεία, τριτεύουσα μη στρεφόμενη εφεδρεία, στατή εφεδρεία, ρύθμιση τάσης και συχνότητας, διακοπτόμενα φορτία) στο πρόβλημα του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής.
- Ενσωμάτωση του μοντέλου λειτουργίας των μονάδων συνδυασμένου κύκλου. Σε αντίθεση με τις συμβατικές θερμικές μονάδες, οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου παρουσιάζουν πολλαπλές καταστάσεις λειτουργίας, το πλήθος των οποίων εξαρτάται από τον αριθμό των αεριοστροβίλων που τις απαρτίζουν.
- Βελτίωση του μοντέλου λειτουργίας των υδροηλεκτρικών σταθμών, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι υδραυλικές απώλειες και οι καταστάσεις λειτουργίας (άντληση και παραγωγή) των αντλητικών σταθμών.
- Ενσωμάτωση αιολικών και άλλων μη προγραμματιζόμενων μονάδων και σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη στοχαστικά μοντέλα λειτουργίας.
- Επέκταση της μεθόδου ενσωμάτωσης περιορισμών αξιοπιστίας, ώστε να λαμβάνονται υπόψη το δίκτυο μεταφοράς, η μερική βλάβη των θερμικών μονάδων και το μοντέλο αξιοπιστίας των μονάδων συνδυασμένου κύκλου.
- Επέκταση της βελτιωμένης μεθόδου αποκοπής αιχμών, ώστε να καταστεί δυνατή η χρήση μη γραμμικών συναρτήσεων ενεργού παραγωγής – εκροής ύδατος για τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς.
- Προσαρμογή του προβλήματος βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Οι νέες συνθήκες ανταγωνισμού που διαμορφώνονται από την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις διαδικασίες που σχετίζονται με τον προγραμματισμό λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, Vol. 220, pp. 671-680, May 1983.
- [2] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, E. Teller, "Equations of State Calculations by Fast Computing Machines", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, pp. 1087-1092, June 1953.
- [3] S. Virmani, K. Imhof, S. Hukherjee, "Implementation of a Lagrangian Relaxation Based Unit Commitment Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 1373-1380, October 1989.
- [4] A. J. Svoboda, S. S. Oren, "Integrating Price-Based Resources in Short-Term Scheduling of Electric Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 760-769, December 1994.
- [5] R. Baldick, "The Generalized Unit Commitment Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 465-475, February 1995.
- [6] W. L. Peterson, S. R. Brammer, "A Capacity Based Lagrangian Relaxation Unit Commitment with Ramp Rate Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 2, pp. 1077-1084, May 1995.
- [7] S.-Y. Lai, R. Baldick, "Unit Commitment with Ramp Multipliers", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 58-64, February 1999.
- [8] W. Ongsakul, N. Petcharak, "Unit Commitment by Enhanced Adaptive Lagrangian Relaxation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 620-628, February 2004.
- [9] W. Ongsakul, N. Petcharak, "Transmission and Ramp Constrained Unit Commitment Using Enhanced Adaptive Lagrangian Relaxation", 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech Conference, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
- [10] S. J. Wang, S. M. Shahidehpour, D. S. Kirschen, S. Mokhtari, G. D. Irisarri, "Short-Term Generation Scheduling with Transmission and Environmental Constraints Using an Augmented Lagrangian Relaxation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 1294-1301, August 1995.
- [11] K. H. Abdul-Rahman, S. M. Shahidehpour, M. Aganagic, S. Mokhtari, "A Practical Resource Scheduling with OPF Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 254-259, February 1996.
- [12] A. I. Cohen, G. Ostrowski, "Scheduling Units with Multiple Operating Modes in Unit Commitment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 497-503, February 1996.
- [13] B. Lu, M. Shahidehpour, "Short-Term Scheduling of Combined Cycle Units", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 3, pp. 1616-1625, August 2004.
- [14] B. Lu, M. Shahidehpour, "Unit Commitment with Flexible Generating Units", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 1022-1034, May 2005.

- [15] A. Turgeon, "Optimal Scheduling of Thermal Generating Units", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 23, No. 6, pp. 1000-1005, December 1978.
- [16] H. Ma, S. M. Shahidehpour, "Unit Commitment with Transmission Security and Voltage Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 757-764, May 1999.
- [17] J. Martinez, J. Usaola, J. L. Fernandez, "Optimal Day-Ahead Security-Constrained Real Power Scheduling by Benders Decomposition", 3rd MED POWER Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Athens, Greece, November 4-6, 2002.
- [18] F. N. Lee, "Short-Term Thermal Unit Commitment - A New Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 421-428, May 1988.
- [19] F. N. Lee, "The Application of Commitment Utilization Factor (CUF) to Thermal Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 691-698, May 1991.
- [20] S. Hao, G. A. Angelidis, H. Singh, A. D. Papalexopoulos, "Consumer Payment Minimization in Power Pool Auctions", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 986-991, August 1998.
- [21] T. Senjyu, K. Shimabukuro, K. Uezato, T. Funabashi, "A Fast Technique for Unit Commitment Problem by Extended Priority List", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 882-888, May 2003.
- [22] H. Sasaki, T. Yamamoto, J. Kubokawa, T. Nagata, H. Fujita, "A Study of a Unit Commitment Problem with Transmission Constraints", Electrical Engineering in Japan, Vol. 144, No. 3, pp. 36-45, 2003.
- [23] W. J. Hobbs, G. Hermon, S. Warner, G. B. Sheble, "An Enhanced Dynamic Programming Approach for Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 1201-1205, August 1988.
- [24] C.-A. Li, R. B. Johnson, A. J. Svoboda, "A New Unit Commitment Method", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, pp. 113-119, February 1997.
- [25] C.-C. Su, Y.-Y. Hsu, "Fuzzy Dynamic Programming: An Application to Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 1231-1237, August 1991.
- [26] E. S. Huse, I. Wangenstein, H. H. Faanes, "Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 472-477, May 1999.
- [27] A. L. Motto, F. D. Galiana, A. J. Conejo, J. M. Arroyo, "Network-Constrained Multiperiod Auction for a Pool-Based Electricity Market", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 646-653, August 2002.
- [28] X. Guan, Q. Zhai, A. Papalexopoulos, "Optimization Based Methods for Unit Commitment: Lagrangian Relaxation versus General Mixed Integer Programming", Proceedings of the 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, pp. 1095-1100, July 2003.

- [29] J. R. Santos, A. T. Lora, A. G. Expósito, J. L. M. Ramos, "Finding Improved Local Minima of Power System Optimization Problems by Interior-Point Methods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 238-244, February 2003.
- [30] P. J. M. Van Laarhoven, E. H. L. Aarts, "Simulated Annealing: Theory and Applications", The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [31] L. Ingber, "Simulated Annealing: Practice versus Theory", Mathematical Computer Modelling, Vol. 18, No. 11, pp. 29-57, 1993.
- [32] E. L. Ulungu, J. Teghem, P. H. Fortemps, D. Tuytens, "MOSA Method: A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems", Journal Of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 8, pp. 221-236, 1999.
- [33] T. Wang, "Global Optimization for Constrained Nonlinear Programming", PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, 2001, available at: <http://manip.crhc.uiuc.edu/Wah/papers/TP13/TP13.pdf>
- [34] T. Satoh, K. Nara. "Maintenance Scheduling by Using Simulated Annealing Method", Proceedings of the 1990 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Minneapolis, Minnesota, pp. 850-857, July 1990.
- [35] K. P. Wong, B. Fan, C. S. Chang, A. C. Liew, "Multi-Objective Generation Dispatch Using Bi-Criterion Global Optimisation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 1813-1819, November 1995.
- [36] R. A. Gallego, A. Monticelli, R. Romero, "Comparative Studies on Non-Convex Optimization Methods for Transmission Network Expansion Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 822-828, August 1998.
- [37] F. Zhuang, F. D. Galiana, "Unit Commitment by Simulated Annealing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 311-318, February 1990.
- [38] A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid, S. Z. Selim, "A Simulated Annealing Algorithm for Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 197-204, February 1998.
- [39] S. Y. W. Wong, "An Enhanced Simulated Annealing Approach to Unit Commitment", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 5, pp. 359-368, 1998.
- [40] A. Viana, J. P. de Sousa, M. Matos, "Simulated Annealing for the Unit Commitment Problem", IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, September 10-13, 2001.
- [41] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis, V. Petridis, "A Genetic Algorithm Solution to the Unit Commitment Problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 83-92, February 1996.
- [42] P.-C. Yang, H.-T. Yang, C.-L. Huang, "Solving the Unit Commitment Problem with a Genetic Algorithm through a Constraint Satisfaction Technique", Electric Power Systems Research, Vol. 37, pp. 55-65, 1996.
- [43] K. S. Swarup, S. Yamashiro, "Unit Commitment Solution Methodology Using Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp. 87-91, February 2002.

- [44] W. Xing, F. F. Wu, "Genetic Algorithm Based Unit Commitment with Energy Contracts", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 24, pp. 329-336, 2002.
- [45] I. G. Damousis, A. G. Bakirtzis, P. S. Dokopoulos, "A Solution to the Unit-Commitment Problem Using Integer-Coded Genetic Algorithm", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 1165-1172, May 2004.
- [46] K. A. Juste, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, "An Evolutionary Programming Solution to the Unit Commitment Problem", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1452-1459, November 1999.
- [47] S. Mokhtari, J. Singh, B. Wollenberg, "A Unit Commitment Expert System", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 272-277, February 1988.
- [48] S. K. Tong, S. M. Shahidehpour, Z. Ouyang, "A Heuristic Short-Term Unit Commitment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 1210-1216, August 1991.
- [49] Z. Ouyang, S. M. Shahidehpour, "A Multi-Stage Intelligent System for Unit Commitment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 639-646, May 1992.
- [50] H. Sasaki, M. Watanabe, R. Yokoyama, "A Solution Method of Unit Commitment by Artificial Neural Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 974-981, August 1992.
- [51] C. Wang, S. M. Shahidehpour, "Effects of Ramp-Rate Limits on Unit Commitment and Economic Dispatch", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 1341-1350, August 1993.
- [52] M. P. Walsh, M. J. O'Malley, "Augmented Hopfield Network for Unit Commitment and Economic Dispatch", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 1765-1774, November 1997.
- [53] M. P. Walsh, M. J. O'Malley, "Augmented Hopfield Network for Constrained Generator Scheduling", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 765-771, May 1999.
- [54] P. Carpentier, G. Cohen, J.-C. Culioli, A. Renaud, "Stochastic Optimization of Unit Commitment: A New Decomposition Framework", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 1067-1073, May 1996.
- [55] T. Shiina, J. R. Birge, "Stochastic Unit Commitment Problem", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 11, pp. 19-32, 2004.
- [56] J. Valenzuela, M. Mazumdar, "Monte Carlo Computation of Power Generation Production Costs Under Operating Constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 671-677, November 2001.
- [57] C. Skoulidas, C. Vournas, G. Papavasilopoulos, "Adaptive Game Modeling of Deregulated Power Markets", *IEEE Power Engineering Letters*, pp. 42-45, September 2002.
- [58] U. A. Ozturk, "The Stochastic Unit Commitment Problem: A Chance Constrained Programming Approach Considering Extreme Multivariate Tail Probabilities", PhD Thesis, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2003.

-
- [59] U. A. Ozturk, M. Mazumdar, B. A. Norman, "A Solution to the Stochastic Unit Commitment Problem Using Chance Constrained Programming" IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, pp. 1589-1598, August 2004.
 - [60] S. Saneifard, N. R. Prasad, H. A. Smolleck, "A Fuzzy Logic Approach to Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 988-995, May 1997.
 - [61] K.-Y. Huang, H.-T. Yang, C.-L. Huang, "A New Thermal Unit Commitment Approach Using Constraint Logic Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 936-945, August 1998.
 - [62] N. S. Sisworahardjo, A. A. El-Keib, "Unit Commitment Using the Ant Colony Search Algorithm", Proceedings of the 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp. 2-6, 2002.
 - [63] S.-N. Yu, N. Chen, "A Double-Filtration Algorithm for Optimal Scheduling of Thermal Units", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1190-1195, May 2004.
 - [64] A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid, S. Z. Selim, "Integrating Genetic Algorithms, Tabu Search, and Simulated Annealing for the Unit Commitment Problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 829-836, August 1999.
 - [65] C.-P. Gheng, C.-W. Liu, C.-C. Liu, "Unit Commitment by Annealing-Genetic Algorithm", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 24, pp. 149-158, 2002.
 - [66] G. K. Purushothama, U. A. Narendranath, L. Jenkins, "Unit Commitment Using a Stochastic Extended Neighbourhood Search", IEE Proceedings on Generation Transmission Distribution, Vol. 150, No. 1, pp. 67-72, January 2003.
 - [67] G. K. Purushothama, L. Jenkins, "Simulated Annealing with Local Search – A Hybrid Algorithm for Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 273-278, February 2003.
 - [68] C.-P. Cheng, C.-W. Liu, C.-C. Liu, "Unit Commitment by Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 2, pp. 707-714, May 2000.
 - [69] H. Y. Yamin, S. M. Shahidehpour, "Unit Commitment Using a Hybrid Model between Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithm in Competitive Electricity Markets", Electric Power Systems Research, Vol. 68, pp. 83-92, 2004.
 - [70] P. Attaviriyapap, H. Kita, E. Tanaka, J. Hasegawa, "A Hybrid LR–EP for Solving New Profit-Based UC Problem Under Competitive Environment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 229-237, February 2003.
 - [71] J. Valenzuela, A. E. Smith, "A Seeded Memetic Algorithm for Large Unit Commitment Problems", Journal of Heuristics, Vol. 8, pp. 173-195, 2002.
 - [72] C. C. A. Rajan, M. R. Mohan, "An Evolutionary Programming-Based Tabu Search Method for Solving the Unit Commitment Problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 577-585, February 2004.

- [73] S.-J. Huang, C.-L. Huang, "Application of Genetic-Based Neural Networks to Thermal Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 654-660, May 1997.
- [74] N. P. Padhy, "Unit Commitment Using Hybrid Models: A Comparative Study for Dynamic Programming, Expert System, Fuzzy System and Genetic Algorithms", Electric Power Systems Research, Vol. 23, pp. 827-836, 2000.
- [75] M. F. Zaghlool, F. C. Trutt, "Efficient Methods for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydrothermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 24-30, February 1988.
- [76] T. Ohishi, S. Soares, M. F. H. Carvalho, "A Short Term Hydrothermal Scheduling Approach for Dominantly Hydro Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 637-643, May 1991.
- [77] H. Yan, P. B. Luh, X. Guan, P. M. Rogan, "Scheduling of Hydrothermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1358-1365, August 1993.
- [78] M. V. Rakic, Z. M. Markovic, "Short Term Operation and Power Exchange Planning of Hydro-Thermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 359-365, February 1994.
- [79] X. Guan, P. B. Luh, L. Zhang, "Nonlinear Approximation Method in Lagrangian Relaxation-Based Algorithms for Hydrothermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 772-778, May 1995.
- [80] O. Nilsson, D. Sjelvgren, "Mixed-Integer Programming Applied to Short-Term Planning of a Hydro-Thermal System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 281-286, February 1996.
- [81] S. Ruzic, N. Rajakovic, A. Vuckovic, "A Flexible Approach to Short-Term Hydro-Thermal Coordination Part I: Problem Formulation and General Solution Procedure", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 1564-1571, August 1996.
- [82] X. Guan, E. Ni, R. Li, P. B. Luh, "An Optimization-Based Algorithm for Scheduling Hydrothermal Power Systems with Cascaded Reservoirs and Discrete Hydro Constraints", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 1775-1780, November 1997.
- [83] M. S. Salam, R. M. Nor, A. R. Hamdan, "Hydrothermal Scheduling Based Lagrangian Relaxation Approach to Hydrothermal Coordination", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 1, pp. 226-235, February 1998.
- [84] P. B. Luh, D. Zhang, R. N. Tomastik, "An Algorithm for Solving the Dual Problem of Hydrothermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 593-600, May 1998.
- [85] D. Zhang, P. B. Luh, Y. Zhang, "A Bundle Method for Hydrothermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1355-1361, November 1999.
- [86] S. Al-Agtash, R. Su, "Augmented Lagrangian Approach to Hydro-Thermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 4, pp. 1392-1400, November 1998.

-
- [87] S. Al-Agtash, "Hydrothermal Scheduling by Augmented Lagrangian: Consideration of Transmission Constraints and Pumped-Storage Units", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 750-756, November 2001.
 - [88] A. Borghetti, A. Frangioni, F. Lacalandra, C. A. Nucci, "Lagrangian Heuristics Based on Disaggregated Bundle Methods for Hydrothermal Unit Commitment", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 313-323, February 2003.
 - [89] H. Habibollahzadeh, D. Frances, U. Sui, "A New Generation Scheduling Program at Ontario Hydro", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 65-73, February 1990.
 - [90] C. Li, P. J. Jap, D. L. Streiffert, "Implementation of Network Flow Programming to the Hydrothermal Coordination in an Energy Management System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1045-1053, August 1993.
 - [91] P. E. C. Franco, M. F. Carvalho, S. Soares, "A Network Flow Model for Short-Term Hydro-Dominated Hydrothermal Scheduling Problems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 1016-1022, May 1994.
 - [92] F. J. Heredia, N. Nabona, "Optimum Short-Term Hydrothermal Scheduling with Spinning Reserve through Network Flows", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, pp. 1642-1651, August 1995.
 - [93] R. N. Wu, T. H. Lee, E. F. Hill, "An Investigation of the Accuracy and the Characteristics of the Peak-Shaving Method Applied to Production Cost Calculations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1043-1049, August 1989.
 - [94] R. N. Wu, T. H. Lee, E. F. Hill, "Effect Of Interchange on Short-Term Hydro-Thermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 1217-1223, August 1991.
 - [95] J.-S. Yang, N. Chen, "Short Term Hydrothermal Coordination Using Multi-Pass Dynamic Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 1050-1056, August 1989.
 - [96] T.-Y. Lee, N. Chen, "The Effect of Pumped Storage and Battery Energy Storage Systems on Hydrothermal Generation Coordination", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 4, pp. 631-637, December 1992.
 - [97] J. Tang, P. B. Luh, "Hydrothermal Scheduling via Extended Differential Dynamic Programming and Mixed Coordination", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 2021-2028, November 1995.
 - [98] P.-H. Chen, H.-C. Chang, "Genetic Aided Scheduling of Hydraulically Coupled Plants in Hydro-Thermal Coordination", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 975-981, May 1996.
 - [99] S. O. Orero, M. R. Irving, "A Genetic Algorithm Modelling Framework and Solution Technique for Short Term Optimal Hydrothermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 501-518, May 1998.

- [100] A. Rudolf, R. Bayrleithner, "A Genetic Algorithm for Solving the Unit Commitment Problem of a Hydro-Thermal Power System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1460-1468, November 1999.
- [101] Y.-G. Wu, C.-Y. Ho, D.-Y. Wang, "A Diploid Genetic Approach to Short-Term Scheduling of Hydro-Thermal System", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, pp. 1268-1274, November 2000.
- [102] E. Gil, J. Bustos, H. Rudnick, "Short-Term Hydrothermal Generation Scheduling Model Using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, pp. 1256-1264, November 2003.
- [103] C. E. Zoumas, A. G. Bakirtzis, J. B. Theocharis, V. Petridis, "A Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 1356-1364, May 2004.
- [104] T. G. Werner, J. F. Verstege, "An Evolution Strategy for Short-Term Operation Planning of Hydrothermal Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1362-1368, November 1999.
- [105] P. K. Hota, R. Chakrabarti, P. K. Chattopadhyay, "Short-Term Hydrothermal Scheduling through Evolutionary Programming Technique", Electric Power Systems Research, Vol. 52, pp. 189-196, 1999.
- [106] N. Sinha, R. Chakrabarti, P. K. Chattopadhyay, "Fast Evolutionary Programming Techniques for Short-Term Hydrothermal Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 214-220, February 2003.
- [107] M. E. El-Hawary, K. M. Ravindranath, "Hydro-Thermal Power Flow Scheduling Accounting for Head Variations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1232-1238, August 1992.
- [108] G. W. Chang, M. Aganagic, J. G. Waight, J. Medina, T. Burton, S. Reeves, M. Christoforidis, "Experiences with Mixed Integer Linear Programming Based Approaches on Short-Term Hydro Scheduling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, pp. 743-749, November 2001.
- [109] J. P. S. Catalão, S. J. P. S. Mariano, V. M. F. Mendes, L. A. F. M. Ferreira, "Nonlinear Approach for Short-Term Scheduling of a Head-Sensitive Hydro Chain", 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech Conference, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
- [110] M. Basu, "Hopfield Neural Networks for Optimal Scheduling of Fixed Head Hydrothermal Power Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 64, pp. 11-15, 2003.
- [111] M. Basu, "A Simulated Annealing-Based Goal-Attainment Method for Economic Emission Load Dispatch of Fixed Head Hydrothermal Power Systems", Electric Power Systems Research, Vol. 77, pp. 147-153, 2005.
- [112] W. Uturbey, A. S. Costa, "Short Term Hydrothermal Coordination in the Presence of Price-Responsive Loads", 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech Conference, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.

-
- [113] R. Fuentes, V. Quintana, “W. Uturbey, A. S. Costa, “Semidefinite Programming: A Practical Application to Hydro-Thermal Coordination”, 14th PSCC Power Systems Computation Conference, Sevilla, Spain, June 24-28, 2002.
 - [114] S.-J. Huang, “Enhancement of Hydroelectric Generation Scheduling Using Ant Colony System Based Optimization Approaches”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 3, pp. 296-301, September 2001.
 - [115] G. X. Luo, H. Habibollahzadeh, A. Semlyen, “Short-Term Hydro-Thermal Dispatch Detailed Model and Solutions”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 4, pp. 1452-1462, October 1989.
 - [116] X. Bai, S. M. Shahidehpour, “Hydro-Thermal Scheduling by Tabu Search and Decomposition Method”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 968-974, May 1996.
 - [117] C. Li, E. Hsu, A. J. Svoboda, C.-L. Tseng, R. B. Johnson, “Hydro Unit Commitment in Hydro-Thermal Optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 764-769, May 1997.
 - [118] C. Li, R. B. Johnson, A. J. Svoboda, C.-L. Tseng, E. Hsu, “A Robust Unit Commitment Algorithm for Hydro-Thermal Optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, pp. 1051-1056, August 1998.
 - [119] S. Y. W. Wong, “Hybrid Simulated Annealing/Genetic Algorithm Approach to Short-Term Hydro-Thermal Scheduling with Multiple Thermal Plants”, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 23, pp. 565-575, 2001.
 - [120] M. Basu, “An Interactive Fuzzy Satisfying Method Based on Evolutionary Programming Technique for Multiobjective Short-Term Hydrothermal Scheduling”, Electric Power Systems Research, Vol. 69, pp. 277–285, 2004.
 - [121] R. N. Allan, R. Billinton, N. M. K. Abdel-Gawad, “The IEEE Reliability Test System – Extensions to and Evaluation of the Generating System”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, pp. 1-7, November 1986.
 - [122] S. K. Tong, S. M. Shahidehpour, “Hydrothermal Unit Commitment with Probabilistic Constraints Using Segmentation Method”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 276-282, February 1990.
 - [123] C. Wang, S. M. Shahidehpour, “Power Generation Scheduling for Multi-Area Hydro-Thermal Systems with Tie Line Constraints, Cascaded Reservoirs and Uncertain Data”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1333-1340, August 1993.
 - [124] D. Zhai, A. M. Breipohl, F. N. Lee, R. Adapa, “The Effect of Load Uncertainty on Unit Commitment Risk,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 510-517, February 1994.
 - [125] H. B. Gooi, D. P. Mendes, K. R. W. Bell, D. S. Kirschen, “Optimal Scheduling of Spinning Reserve”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1485-1492, November 1999.
 - [126] R. Billinton, G. Lian, “Composite Power System Health Analysis Using a Security Constrained Adequacy Evaluation Procedure”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 936-941, May 1994.

- [127] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, "A Basic Framework for Generating System Operating Health Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1610-1617, August 1994.
- [128] G. Lian, R. Billinton, "Operating Reserve Risk Assessment in Composite Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1270-1276, August 1994.
- [129] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, "Generating System Operating Health Analysis Considering Stand-By Units, Interruptible Load and Postponable Outages", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1618-1625, August 1994.
- [130] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, S. Aboreshaid, "Power System Health Analysis", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 55, pp. 1-8, 1997.
- [131] M. Fotuhi-Firuzabad, R. Billinton, M. E. Khan, "Extending Unit Commitment Health Analysis to Include Transmission Considerations", Electric Power Systems Research, Vol. 50, pp. 35-42, 1999.
- [132] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, "A Reliability Framework for Generating Unit Commitment", Electric Power Systems Research, Vol. 56, pp. 81-88, 2000.
- [133] R. Billinton, R. Karki, "Capacity Reserve Assessment Using System Well-Being Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp. 433-438, May 1999.
- [134] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, English Conference of the Parties, Third Session Kyoto, 1-10 December 1997.
- [135] Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council Establishing a Scheme for Greenhouse Gas Emission Allowance Trading within the Community and Amending Council Directive 96/61/EC.
- [136] Commission Decision 2004/156/EC Establishing Guidelines for the Monitoring and Reporting of Greenhouse Gas Emissions Pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council.
- [137] Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής, "Ηλεκτρική Οικονομία", Αθήνα, 2003.
- [138] Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Βουρνάς, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως", Αθήνα, 1991.
- [139] Ε. Ν. Διαλυνάς, "Ανάλυση Αξιοπιστίας Τεχνολογικών Συστημάτων", Αθήνα, 1991.
- [140] Ε. Ν. Διαλυνάς, "Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα, Οκτώβριος 1996.
- [141] D. Simopoulos, G. Contaxis, "Unit Commitment with Ramp Rate Constraints Using the Simulated Annealing Algorithm", Proceedings of IEEE MELECON 2004 Mediterranean Electrotechnical Conference, Dubrovnik, Croatia, Vol. 3, pp. 845-849, May 12-15, 2004.

-
- [142] D. Simopoulos, G. Contaxis, “An Enhanced Simulated Annealing Algorithm for the Unit Commitment Problem”, 4th MED POWER Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission and Distribution, Lemesos, Cyprus, November 14-17, 2004.
 - [143] D. Simopoulos, S. Kavatza, “Consideration of Ramp Rate Constraints in Unit Commitment Using Simulated Annealing”, 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech Conference, St. Petersburg, Russia, June 27-30, 2005.
 - [144] D. Simopoulos, S. Kavatza, “Unit Commitment with Probabilistic Spinning Reserve Assessment Using Simulated Annealing”, 15th PSCC Power Systems Computation Conference, Liège, Belgium, August 22-26, 2005.
 - [145] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, C. D. Vournas, “Unit Commitment by an Enhanced Simulated Annealing Algorithm”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 1, pp. 68-76, February 2006.
 - [146] D. N. Simopoulos, Y. S. Giannakopoulos, S. D. Kavatza, C. D. Vournas, “Effect of Emission Constraints on Short-Term Unit Commitment”, Proceedings of IEEE MELECON 2006 Mediterranean Electrotechnical Conference, Malaga, Spain, May 16-19, 2006.
 - [147] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, C. D. Vournas, “An Enhanced Peak Shaving Method for Short Term Hydrothermal Scheduling”, 19th ECOS International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Crete, Greece, July 12-14, 2006.
 - [148] D. N. Simopoulos, S. D. Kavatza, C. D. Vournas, “Reliability Constrained Unit Commitment Using Simulated Annealing”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, No. 4, pp. 1699-1706, November 2006.