



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μη/γων
Μη/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Υ.Δ. κ. ΤΣΑΛΑΒΟΥΤΗ Βασιλείου**, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & επιχειρησιακής Έρευνας . Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Τρίτη 14 Ιουλίου 2020 , ώρα 10:30π.μ διαδικτυακά*. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«*Τεχνικές Βελτιστοποίησης Βασισμένες σε Εξελικτικούς Αλγόριθμους για Προβλήματα Διαχείρισης Ενεργειακών Συστημάτων* »

Και ο Αγγλικός ως εξής:

«*Optimization Techniques based on Evolutionary algorithms for problems of Energy System Management*»



- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Επιβλέποντα του Υ.Δ. Αναπλ. Καθ. Α. Τόλη (atol@central.ntua.gr)



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΕ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΥΣ
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΓΙΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Βασίλειος Α. Τσαλαβούτης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Ι. Τόλης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2020

ΕΠΟΨΗ

Η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και η οικονομική ανάπτυξη, αύξησαν τη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) ενθαρρύνεται, αυξάνοντας τη βιωσιμότητα του τομέα ηλεκτροπαραγωγής. Οι διαχειριστές του συστήματος και οι φορείς που σχετίζονται με το σχεδιασμό του συμμετέχουν σε πολύπλοκες διαδικασίες λήψης αποφάσεων για να εξασφαλίσουν την αξιόπιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ελάχιστο κόστος σε διάφορους ορίζοντες προγραμματισμού. Η εφαρμογή εργαλείων βελτιστοποίησης έχει καταστεί απαραίτητη για την λήψη κατάλληλων αποφάσεων στα προβλήματα διαχείρισης των συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διατριβή προτείνει και αξιολογεί μεθόδους βελτιστοποίησης, για την επίλυση δύο προβλημάτων διαχείρισης ενεργειακών συστημάτων. Το πρώτο είναι το πρόβλημα του μακροχρόνιου προγραμματισμού επέκτασης του δυναμικού παραγωγής ισχύος (**Generation Expansion Planning, GEP**), που καθορίζει τις βέλτιστες προσθήκες δυναμικού σε τομέα ηλεκτροπαραγωγής για να ικανοποιηθεί η αναμενόμενη αύξηση της ζήτησης. Το δεύτερο είναι ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (**Short-term generation scheduling, STGS**), που καθορίζει το βέλτιστο πρόγραμμα παραγωγής των μονάδων για να ικανοποιηθεί το φορτίο του συστήματος.

Αναπτύχθηκε μοντέλο **GEP** για ημι-απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Στο μοντέλο αυτό οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας ομαδοποιούνται ανά τύπο τεχνολογίας παραγωγής. Η μεγιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ) του τομέα είναι η συνάρτηση στόχος του προβλήματος. Στο μοντέλο προσομοιώνεται η εξέλιξη της μέσης ετήσιας Οριακής Τιμής Συστήματος (ΟΤΣ) και η αλληλεπίδραση της με το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής. Παράλληλα, μοντελοποιούνται ενεργειακοί στόχοι, που καθορίζονται από την ενεργειακή πολιτική, για την προώθηση επενδύσεων σε ΑΠΕ. Οι βέλτιστες ετήσιες προσθήκες δυναμικού και ο ετήσιος βαθμός χρήσης των τεχνολογιών υπολογίζονται. Το μοντέλο μπορεί να συμβάλλει στην εκτίμηση του αντίκτυπου των ενεργειακών πολιτικών στην εξέλιξη του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής

και της ΟΤΣ. Για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος προτείνεται υβριδικός αλγόριθμος που συνδυάζει τις Στρατηγικές Εξέλιξης και τον Αλγόριθμο Εσωτερικού Σημείου.

Τρεις παραλλαγές του **STGS** εξετάζονται. Η πρώτη είναι το κλασικό μοντέλο του προβλήματος. Στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη η αξιοπιστία του συστήματος. Στα δύο μοντέλα η συνάρτηση στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, σε συστήματα θερμικών μονάδων. Η τρίτη, είναι ένα πολυκριτηριακό μοντέλο, που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, στο οποίο η ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων αποτελεί τη δεύτερη συνάρτηση στόχο. Αφορά συστήματα που περιλαμβάνουν, εκτός από θερμικές μονάδες, υδροηλεκτρικούς σταθμούς και ενέργεια από ΑΠΕ. Το μοντέλο παρέχει πλαίσιο καθορισμού της απαιτούμενης στρεφόμενης εφεδρείας, λαμβάνοντας υπόψη τη μη διαθεσιμότητα των μονάδων και την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη του φορτίου και της παραγόμενης ενέργειας από αιολικά πάρκα. Παρέχει σύνολο λύσεων -προγραμμάτων παραγωγής των μονάδων του συστήματος- στις οποίες ελαχιστοποιείται ταυτόχρονα το λειτουργικό κόστος και οι εκπομπές ρύπων του συστήματος.

Για τη βελτιστοποίηση των παραλλαγών του **STGS** χρησιμοποιείται η Διαφορική Εξέλιξη σε συνδυασμό με μία βηματική συνάρτηση για τον προσδιορισμό των καταστάσεων λειτουργίας των μονάδων. Ευρετικοί μηχανισμοί επιδιόρθωσης εντάσσονται στον αλγόριθμο για την επιδιόρθωση μη εφικτών υποψηφίων λύσεων. Προτείνονται δύο τεχνικές για την ένταξη πληροφορίας από τη Λίστα Προτεραιότητας στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ένας τελεστής μετάλλαξης και μία τεχνική τοπικής βελτίωσης αναπτύσσονται για να βελτιώσουν την απόδοση της Διαφορικής Εξέλιξης στα μονοκριτηριακά και το πολυκριτηριακό πρόβλημα, αντίστοιχα.

Το μοντέλο **GEP** εξετάστηκε σε μελέτη περίπτωσης από την οποία προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα. Η υβριδική μέθοδος παρείχε συστηματικά λύσεις υψηλότερης ΚΠΑ σε σύγκριση με άλλες μεθόδους βελτιστοποίησης. Επομένως, οι προσθήκες δυναμικού μπορεί να αυξήσουν τις πιθανότητες για κερδοφορία των παραγωγών. Σχετικά με την εξεταζόμενη περίπτωση, η επίτευξη των ενεργειακών στόχων επηρεάζει το μελλοντικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής. Προσθήκες δυναμικού σε χερσαίες ανεμογεννήτριες και σε συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα προτείνονται

για την επίτευξη των βραχυπρόθεσμων ενεργειακών στόχων. Επίσης, μέρος της εγκατεστημένης ισχύος σε λιγνιτικούς σταθμούς παραγωγής αντικαθίσταται από ΑΠΕ, ως συνέπεια των μακροπρόθεσμων ενεργειακών στόχων. Παράλληλα, η επίτευξη των ενεργειακών στόχων, μπορεί μακροπρόθεσμα να οδηγήσει σε μικρή μείωση της ΟΤΣ, σε παρούσες τιμές.

Σημαντικά συμπεράσματα εξάγονται και από τη βελτιστοποίηση του **STGS**. Ο προτεινόμενος τελεστής μετάλλαξης και η τεχνική ένταξης πληροφορίας από τη Λίστα Προτεραιότητας βελτίωσαν την απόδοση του αλγορίθμου. Η απόδοση της μεθόδου στα μονοκριτηριακά προβλήματα κρίνεται ανταγωνιστική, παράγοντας σε ορισμένες περιπτώσεις προγράμματα παραγωγής χαμηλότερου κόστους της τάξης του 0.8% σε σχέση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, σε μειωμένο υπολογιστικό χρόνο. Παράλληλα, ο πολυκριτηριακός ΕΑ βελτιστοποίησε αποτελεσματικά το πολυκριτηριακό μοντέλο, παρέχοντας σύνολα λύσεων που προσεγγίζουν τα μέτωπα **Pareto** του προβλήματος. Επομένως, μπορεί δυνητικά να βοηθήσει τον διαχειριστή του συστήματος ή εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής στον αποδοτικό προγραμματισμό των μονάδων. Από τα αποτελέσματα συνάγεται ότι υψηλότερη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη φορτίου ή μη διαθεσιμότητα των μονάδων αυξάνει την απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία, αυξάνοντας το κόστος και τις εκπομπές ρύπων του συστήματος. Αντίθετα, αυτό δεν προκύπτει για την περίπτωση υψηλότερης αβεβαιότητας στην πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας από τα αιολικά πάρκα.

Οι κύριες συνεισφορές της διατριβής για το **GEP** είναι οι εξής: **i)** προτείνεται διαδικασία στοχαστικής βελτιστοποίησης για να καθοριστούν οι προσθήκες δυναμικού για τη βέλτιστη συμμόρφωση με τους ενεργειακούς στόχους, **ii)** μία παράμετρος χαλάρωσης εφαρμόζεται στους περιορισμούς ισότητας των ενεργειακών στόχων και εξετάζεται η επίδρασή της στο μελλοντικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής και στη διαδικασία βελτιστοποίησης, **iii)** προτείνεται υβριδικός αλγόριθμος βασιζόμενος στις Στρατηγικές Εξέλιξης και στον Αλγόριθμο Εσωτερικού Σημείου για τη βελτιστοποίηση του **GEP**.

Για το **STGS** οι κύριες συνεισφορές είναι: **i)** προτείνεται μέθοδος βασιζόμενη στη Διαφορική Εξέλιξη και σε βηματική συνάρτηση για τη βελτιστοποίηση των παραλλαγών του **STGS**, **ii)**

αναπτύσσονται ένας τελεστής μετάλλαξης και μία τεχνική τοπικής βελτίωσης για να ενισχύσουν την απόδοσή της Διαφορική Εξέλιξης, iii) προτείνεται πολυκριτηριακό μοντέλο για το STGS, που περιλαμβάνει το λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές ρύπων του συστήματος και παρέχει πλαίσιο καθορισμού της στρεφόμενης εφεδρείας σε συστήματα με διάφορες τεχνολογίες παραγωγής.



National Technical University of Athens
School of Mechanical Engineering
Sector of Industrial Management and Operational Research

**OPTIMIZATION TECHNIQUES BASED ON EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR
PROBLEMS OF ENERGY SYSTEM MANAGEMENT**

PhD Thesis

Vasilios A. Tsalavoutis

Supervisor: Athanasios I. Tolis
Associate Professor NTUA

Athens, July 2020

EXECUTIVE SUMMARY

Over the years, progress in the industry and the living standards of people have increased electricity demand. Moreover, generation from Renewable Energy Sources (RES) has been deployed to increase the sustainability of power sectors. Due to the recent developments in power systems, system operators and planners have to manage complex decision-making processes to ensure the reliability and quality of power supply at minimal costs over different time horizons. Given the complexity of the efficient management of power systems, the application of advanced optimization tools has become essential for decision-makers in their effort to make optimal decisions. In this context, this dissertation focuses on developing and evaluating optimization tools, which aim at facilitating decision-making in two important problems associated with power system management. The first one is the Generation Expansion Planning (GEP) problem, in which the optimum generating capacity additions to an energy sector over a long term planning horizon are sought to meet the anticipated increase in electricity demand. The second one, is the Short-term Generation Scheduling (STGS) problem, in which the optimal operating schedule of a given set of generators in a power system is determined to efficiently meet the expected load.

A model for GEP of a semi-liberalized energy market is developed. In this model electricity producers are grouped by type of generating technology. The maximization of the power system's Net Present Value (NPV) is the model's objective. The evolution of the average annual System Marginal Price (SMP) and its interaction with the structure of the power sector is simulated. Moreover, energy objectives set by policy makers to promote capacity additions in RES are modelled. The optimal annual capacity orders and the load intensity factors are estimated. The model may allow for an assessment of the impact of energy policies both on the structure of the generating mix and the evolution of the SMP, assisting policy makers during indicative energy planning. A hybrid method based on Evolution Strategies and Interior Point Algorithm is developed to optimize the problem.

Regarding the STGS problem, three variants are examined. The first one is the conventional form of the model. In the second one, the system's reliability is considered. Both models attempt to minimize the operation cost in power systems comprising thermal generators. The last one is a multi-objective model, developed in this dissertation, which considers the emissions of the system as an additional objective. Specifically, it concerns power systems comprising hydro plants and RES besides thermal generators. The model may allow system operators to determine the optimal reserve capacity, considering the unavailability of the units as well as uncertainties related to load and wind power forecasting. A set of solutions is obtained which minimize both operation cost and emissions, each of which corresponds to an optimal operating schedule of the generating units of the power system.

The optimization of all variants of the STGS is implemented using a real-coded Differential Evolution. Moreover, a two-step function is included to determine the operating states (on/off) of the generators. Heuristic repair mechanisms are developed and included within the optimization method to facilitate the obtainment of feasible solutions. Two techniques are proposed allowing an efficient integration of information of the Priority List within the optimization procedure. Moreover, a novel mutation operator and a local search technique are developed to enhance the performance of the single- and multi-objective Differential Evolution, respectively.

The GEP model has been examined on an indicative case and several important conclusions have been reached. The proposed hybrid method has consistently obtained solutions of higher NPV values compared to other optimization methods. This, suggests that the derived capacity orders may increase the producer's probabilities for higher yields. Regarding the examined test case, the future structure of the power sector may be affected due to the integration of energy objectives. Capacity orders in on-shore wind turbines and concentrated solar power are proposed to meet short-term energy targets. Moreover, part of the installed capacity of lignite-fired generators will be replaced by RES as a result of long-term energy objectives. Furthermore, meeting the energy targets, might result in a slight reduction of the SMP in the long run, when present values are

considered.

Important conclusions have been derived regarding the optimization of the STGS problem. The proposed mutation operator and the procedure for efficiently integrating information of the Priority List significantly enhance the algorithm's performance. The method for the single objective problems has performed competitively, yielding in some cases generating schedules with approximately 0.8% lower operation cost compared to the previously best reported results, in reduced computational time. Moreover, the developed multi-objective algorithm has efficiently optimized the hydro-thermal-wind STGS model with economic/environmental objectives, deriving sets of solutions that approximate the Pareto fronts of the problem. Therefore, it may potentially assist system operators or generating companies towards efficiently scheduling their generating units. Furthermore, the results reveal that increased load forecasting error and unit's unavailability may require the scheduling of higher reserve capacity, resulting in operating schedules with increased operation cost and emissions. This, however, might not be the case for increased wind power uncertainty as demonstrated by the results of the method.

The main contributions of the thesis regarding the GEP model are the following: i) a stochastic optimization procedure without recourse is developed to determine the best capacity orders towards the optimal compliance with energy objectives, ii) a relaxation factor has been applied on the equality constraints of the energy objectives and its effect on the future generating mix and the optimization procedure is examined and iii) a hybrid algorithm based on Evolution Strategies and Interior Point Algorithm is developed to optimize the GEP model.

Regarding the STGS problem, the main contributions are: i) a method based on a real-coded DE and a two-step function is proposed to optimize the examined variants of the mixed-integer STGS problem, ii) a mutation strategy and a local search technique are developed and combined with the real coded DE to enhance its performance, iii) a new multi-objective formulation of the problem considering system's cost and emissions is developed and may assist system operators to determine the spinning reserve in power systems comprising several generating technologies.