



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 26 Φ1
Αθήνα, 29/6/20

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Υ.Δ. κ. ΒΡΥΩΝΗ Κωνσταντίνου**, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & επιχειρησιακής Έρευνας. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη Πέμπτη 16 Ιουλίου 2020, ώρα 14:00 διαδικτυακά*. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Σχεδιασμός επέκτασης της Δυναμικότητας παραγωγής ισχύος με Υψηλό μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: μόνο-και-πολύ κριτηριακή βελτιστοποίηση βασισόμενη σε εξελκτικούς αλγόριθμους υποβοηθούμενους από μεταπρότυπα.»

Και ο Αγγλικός ως εξής:

«Generation Expansion planning with high shares of Renewable Energy Sources: Single and Multi objective optimization based on Metamodel-assisted Evolutionary Algorithms»



Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ν. Μαρμαράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

- 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 & Επιχειρησιακής Έρευνας
Εργαστήριο Οργάνωσης Παραγωγής

Σχεδιασμός επέκτασης της δυναμικότητας παραγωγής ισχύος
με υψηλό μερίδιο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: μονο- και
πολυ- κριτηριακή βελτιστοποίηση βασιζόμενη σε εξελικτικούς
αλγόριθμους υποβοηθούμενους από μεταπρότυπα

Διδακτορική Διατριβή
Κωνσταντίνος Βρυώνης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Τόλης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2020

Έποψη

Σκοπός αυτής της Διδακτορικής Διατριβής είναι να αναπτύξει και να εξετάσει τη εφαρμογή Εξελικτικών Αλγορίθμων υποβοηθούμενων από μεταπρότυπα (Metamodel-assisted Evolutionary Algorithms, MAEA) για μονο- και πολυ- κριτηριακή βελτιστοποίηση του προβλήματος επέκτασης δυναμικότητας παραγωγής ισχύος (Generation Expansion Planning, GEP) με υψηλό μερίδιο παραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Ένα μοντέλο GEP μπορεί να συμβάλει στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τον μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο προγραμματισμό παραγωγής ενέργειας. Συνήθως, αποσκοπεί στην παραγωγή σεναρίων για την οικονομικά αποδοτική, βιώσιμη και ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος ισχύος που καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις πιθανές επενδύσεις σε προσθήκες δυναμικότητας όσο και τη βραχυπρόθεσμη λειτουργία του συστήματος ισχύος, π.χ. ο προσδιορισμός ενός οικονομικού και/ή περιβαλλοντικά βέλτιστου επενδυτικού πλάνου για την κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης ενέργειας και παρουσιάζει αξιόπιστη βραχυπρόθεσμη λειτουργία. Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Η επιδίωξη ενός συστήματος ισχύος χωρίς εκπομπές ρύπων και τα αυξανόμενα μερίδια παραγωγής των ΑΠΕ οδήγησαν στην εισαγωγή διαφόρων νέων παραμέτρων στα μοντέλα GEP. Μια τέτοια παράμετρος είναι ο εντοπισμός οικονομικών και τεχνικών προκλήσεων που σχετίζονται με τη βραχυπρόθεσμη λειτουργία του συστήματος ισχύος που θα μπορούσε να είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της συνέργειας της εγκατεστημένης ισχύος και των αυξανόμενων εγκαταστάσεων ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, η παραγωγή από ΑΠΕ χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα και αβεβαιότητα. Έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία ότι αυτά αναμένεται να αυξήσουν τις απαιτήσεις σε λειτουργική ευελιξία και ότι η υποτίμηση τέτοιων απαιτήσεων θα μπορούσε να έχει οικονομικές επιπτώσεις στη βραχυπρόθεσμη λειτουργία του συστήματος ισχύος. Συνεπώς, έχουν γίνει προσπάθειες για την αύξηση του επιπέδου λεπτομέρειας της μοντελοποίησης της βραχυπρόθεσμης λειτουργίας ενός συστήματος ισχύος σε όρους χωρικής, χρονικής και τεχνικής λεπτομέρειας που εισάγεται σε ένα μοντέλο GEP. Ωστόσο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο υπολογιστικό κόστος, και παράλληλα, είναι απαραίτητο να εισάγονται απλοποιήσεις.

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (EA) είναι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση που εφαρμόζουν στοχαστικούς τελεστές για να βελτιώσουν ένα σύνολο υποψηφίων λύσεων. Αυτοί δεν βασίζονται στη χρήση παραγώγων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέθοδοι άμεσης αναζήτησης για σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης. Επιπλέον, EA για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση (Multi-Objective EA, MOEA) είναι αποδοτικές μέθοδοι για πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης (Multi-Objective Optimization, MOO). Παρ' όλα αυτά, ένα βασικό τους μειονέκτημα είναι ο σχετικά μεγάλος αριθμός αξιολογήσεων που απαιτείται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου που μπορεί να είναι απαγορευτικό για προβλήματα που περιλαμβάνουν υπολογιστικά δαπανηρές προσομοιώσεις. Για τέτοιες εφαρμογές, οι EA χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μοντέλα προσέγγισης (Approximating Models, AM) τα οποία στη βιβλιογραφία αναφέρονται ως MAEA. Τα AM αντικαθιστούν εν μέρει τα αρχικά μοντέλα για να παρέχουν μια εκτίμηση της επάρκειας μιας υποψήφιας λύσης για μείωση του υπολογιστικού κόστους.

Αυτή η Διδακτορική Διατριβή επικεντρώνεται σε εφαρμογές MAEA σε GEP ενός ή πολλών στόχων που περιλαμβάνουν μοντέλο προσομοίωσης (Simulation Models, SM) για τη βραχυπρόθεσμη λειτουργία ενός συστήματος ισχύος. Οι σημαντικότερες συνεισφορές της είναι οι ακόλουθες:

1. Παρουσιάζεται μια προσέγγιση, βασισμένη σε MAEA, για GEP πολλαπλών περιόδων και ενός στόχου που περιλαμβάνει SM. Το επιλεγμένο από τη βιβλιογραφία SM είναι ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τη βραχυπρόθεσμη λειτουργία ενός συστήματος ισχύος που περιλαμβάνει παραδοχές, π.χ. η χωρική λεπτομέρεια δεν εξετάζεται. Ωστόσο, παρουσιάζει σχετικά αυξημένο επίπεδο τεχνικής και χρονικής λεπτομέρειας για το πλαίσιο του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού. Το SM

εισάγεται για την αξιολόγηση της λειτουργικής ευελιξίας κατά την διαδικασίας βελτιστοποίησης του προβλήματος. Συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του προβλήματος αξιοποιούνται για την επίλυσή του. Αυτό υλοποιείται μέσα από την χρήση των AM έτσι ώστε να παρέχουν μια εκτίμηση του SM και να μειώσουν το υπολογιστικό κόστος. Τα εξεταζόμενα AM είναι οι Συναρτήσεις Ακτινικής Βάσης (Radial Basis Function, RBF). Γίνεται χρήση τοπικών και ολικών AM που ανανεώνονται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Επίσης, εξετάζονται εξειδικευμένοι τελεστές που στοχεύουν στη βελτίωση της απόδοσης του EA που εξετάστηκε ο οποίος είναι ο αλγόριθμος της Διαφορικής Εξέλιξης (Differential Evolution, DE). Με βάση τα αποτελέσματα των υπολογιστικών πειραμάτων που έγιναν, η απόδοση του MAEA κρίνεται ικανοποιητική λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς λόγω υπολογιστικού κόστους. Επιπλέον, η ευρετική τεχνική διόρθωσης των περιορισμών του πρόβλημα βελτιστοποίησης παρείχε τη μεγαλύτερη βελτίωση στην απόδοση του αλγόριθμου βάσης μεταξύ των εξειδικευμένοι τελεστών που αναπτύχθηκαν. Επίσης, εξετάζεται η επίδραση της ενσωμάτωσης του SM. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν τη σημασία της ενσωμάτωσης τεχνικών που να εξετάζουν την λειτουργική ευελιξία για την επαρκή αξιολόγηση παρόχων ευελιξίας όταν αυτοί θεωρούνται ως επενδυτικές επιλογές. Η αξιολόγηση της ακρίβειας των AM έδειξε ότι αυτή ήταν αποδεκτή με βάση τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν. Επομένως, πραγματοποιήθηκε οπτική ανάλυση της ευαισθησίας του λειτουργικού κόστους σε σχέση με την εγκατεστημένη δυναμικότητα παραγωγής ισχύος.

2. Παρουσιάζεται μια προσέγγιση, βασισμένη σε MAEA, για ένα στατικό μοντέλο GEP που στοχεύει στην ανάλυση αντικρουόμενων στόχων σε MOO GEP. Η λειτουργική ευελιξία αξιολογείται από ένα, επιλεγμένο από τη βιβλιογραφία, SM που περιλαμβάνει τεχνική, χωρική και χρονική λεπτομέρεια της βραχυπρόθεσμης λειτουργίας ενός συστήματος ισχύος. Η μεθοδολογία αναπτύσσεται με βάση τη σχετική βιβλιογραφία για τους MOEA και τη βελτιστοποίηση με μεταπρότυπα χωρίς χρήση παραγώγων. Ως AM επιλέχθηκαν τα RBF και η Πολυωνυμική Παλινδρόμηση (Polynomial Regression, PR). Αυτά ανανεώνονται με κριτήρια που δίνουν προτεραιότητα στις εφικτές λύσεις, τη χωρική κατανομή του αποθηκευμένου συνόλου λύσεων στον χώρο αναζήτησης και πιθανές βελτιώσεις του υπερόγκου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τοπική αναζήτηση με χρήση παραγώγων, τοπικά RBF, PR και ένα μοντέλο που αποτελεί συνδυασμό αυτών. Η απόδοση του MAEA εξετάζεται σε συναρτήσεις αναφοράς για MOO προβλήματα, σε MOO GEP χωρίς SM και σε πέντε MOO GEP που συμπεριλαμβάνουν το SM. Τα τελευταία επαναλαμβάνονται για δύο διαφορετικά επίπεδα χρονικής λεπτομέρειας. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν αποδεκτή απόδοση του αλγόριθμου λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς λόγω υπολογιστικού κόστους. Επιπλέον, η ακρίβεια των AM διέφερε μεταξύ των προβλημάτων που εξετάστηκαν και αναφέρονται παράγοντες που την επηρέασαν. Ανάλυση του συνόλου εναλλακτικών λύσεων σε επίπεδο συντελεστών κόστους μπορεί να προσφέρει μια λεπτομερή αξιολόγηση αυτών συμβάλλοντας στον προσδιορισμό απαιτούμενων κινήτρων για τη λήψη αποφάσεων στρατηγικής ενεργειακής πολιτικής. Για παράδειγμα, με βάση τις ακραίες τιμές του μετώπου μη-κυριαρχούμενων λύσεων για τις συναρτήσεις λειτουργικού κόστους και κόστους επένδυσης που εξετάστηκαν, η μείωση κατά 96% του κόστους επένδυσης θα μπορούσε οδηγήσει σε μια αύξηση σχεδόν 40% του λειτουργικού κόστους.

Εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη σύνθετη και εξελισσόμενη διαδικασία λήψης αποφάσεων ενός GEP. Τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μαζί με άλλες πτυχές που προοδευτικά αναγνωρίζονται ως απαραίτητες. Παρά την ευρετική τους φύση, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι προσεγγίσεις που αναπτύχθηκαν θα μπορούσαν να είναι υποσχόμενα εργαλεία για την υποστήριξη καθιερωμένων μοντέλων GEP ώστε να συμβάλλουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων όταν λαμβάνονται υπόψη υψηλά μερίδια παραγωγής από ΑΠΕ.



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

Generation Expansion Planning with high shares of Renewable Energy Sources: Single and Multi objective optimization based on Metamodel-assisted Evolutionary Algorithms

PhD Thesis
Constantinos Vrionis

Supervisor: Athanasios Tolis
Associate Professor NTUA

Athens, 2020

Abstract

The scope of this thesis is to develop and examine single and multi objective Metamodel-assisted Evolutionary Algorithms (MAEA) for Generation Expansion Planning (GEP) models in the presence of high shares of generation by Renewable Energy Sources (RES). A GEP model may facilitate decision making in mid towards long-term energy scheduling. Commonly, a GEP model is employed to provide a road-map towards an affordable, sustainable and secure operation of a power system. These road-maps are generated in the form of scenarios for the evolution of a power system and are determined by considering both possible investments in capacity additions and the short-term operation of the power system, e.g. to determine an economic and/or environmentally optimal investment plan that is adequate to meet the growing power demand and exhibits a reliable short-term operation. Such a problem can be formulated as an optimization problem.

The pursue for emission-free power system and the increasing shares of RES, triggered by environmental considerations, have led to the introduction of various aspects to GEP models. Such an aspect is to capture economic and technical challenges related to the short-term operation of a power system with increased detail. This could be required to assess the synergy of the conventional generating fleet with the increasing installations of RES. In particular, the variability and uncertainty associated with the latter has been reported to increase the operational flexibility requirements of future generating fleets. It has also been reported that underestimating these requirements could have economic implications on the the reliable and efficient short-term operation. Towards this aim, endeavours have been made to integrate, within a GEP model, a more detailed representation of the short-term operation of a power system in terms of spatial, temporal and technical detail. However, the integration of GEP model with such detail can lead to an increased computational cost. Therefore, simplifications are required.

Evolutionary Algorithms (EA) are nature-inspired algorithms which employ stochastic operators to improve a set of candidate solutions. As derivative-free algorithms, EAs can be used as direct search methods; this feature has rendered them applicable for complex optimization problems. In addition, Muti-Objective EAs (MOEA) are well established approaches for Multi-Objective Optimization (MOO). On the other hand, one main limitation is the relatively large number of function evaluations required for the algorithm to converge. This can be binding for optimization problems involving computational costly simulations. For such applications, EAs coupled with Approximating Models (AM) have been developed which are commonly referred to as MAEAs or Surrogate-Assisted EAs. The AMs replace in part the original models and provide an estimate for the adequacy of a candidate solution to reduce the computational burden.

This thesis focuses on MAEA applications for single and multi objective GEP optimization problems that include Simulation Models (SM) for the short-term operation of a power system. The most important contributions of this thesis are the following:

1. A single objective multi-period GEP approach based on MAEAs is presented. The GEP model includes a Simulation Model (SM) to provide an indicator of the cost of the short-term operation. The adopted SM is an optimization model for the short-term operation of a power system including simplifications e.g. spatial detail is not examined. However, it exhibits an increased level of technical and temporal detail w.r.t. the context of long-term planning, and it is adopted to assess on-line the operating flexibility of a candidate installed capacity. The formulation exploits problem-specific characteristics. This is implemented by employing AMs to provide an estimate of the SM's output and reduce the number of simulations required to

achieve a near-optimal solution. The AMs are Radial Basis Functions (RBF). These are built off-line and updated on-line to improve the accuracy of the achieved approximation. Both local and global AMs are built in different stages of the search. Problem specialized operators are developed to enhance the performance of the EA examined which is Differential Evolution (DE). The performance of the MAEA and the problem-specialized operators are assessed. The MAEA achieved satisfactory results based on the performed numerical experiments. Moreover, among the developed problem-specialized operators, a repair heuristic, addressing the constraint nature of the optimization problem, provided the largest improvement in the performance of the base DE algorithm. The impact of including the SM is also examined. The results indicate the importance of capturing operational flexibility requirements to adequately assess the flexibility providers considered as investment options. The metrics employed to examine the accuracy of the attained AMs indicated that a decent approximation had been achieved. Therefore, a visual analysis of the sensitivity of the operating cost towards the installed capacity of the derived near-optimal solution was carried out.

2. A multi-objective static GEP approach based on MAEAs is presented that aims at capturing cost trade-offs emerging for a MOO GEP. Operational flexibility is assessed by an adopted SM that includes technical, spatial and temporal detail. The approach is developed based on MOEA and frameworks for surrogate-assisted derivative-free optimization. Approximation models are employed to address the computational restrictions. RBF and Polynomial Regression (PR) are used as the AMs. These are updated on-line by criteria that prioritize feasibility of the planning constraints, the spatial allocation of the attained training set w.r.t. the search space, and a possible Hypervolume improvement. A local phase is also included in which gradient-based local search is implemented employing local RBF, PR and an ensemble model. The performance of the approach is examined on a MOO benchmark test suite. Numerical experiments are carried out to assess the performance optimization approach on a MOO GEP formulation neglecting the short-term operation and on five MOO GEP formulations including a SM. The latter are repeated for two different levels of temporal detail. The results attained suggest an acceptable performance of the optimization approach w.r.t. the computational restriction. Moreover, the achieved accuracy of the AMs varied among the numerical experiments. The main factors influencing the performance of the AMs are identified. An analysis of the derived cost trade-offs for each of the five formulations examined can provide a detailed evaluation of the impact of a diverse set of alternatives. This could reveal incentives required for strategic energy policy decision making. For example, based on the extreme values of the non-dominated front attained for the considered operating and investment cost functions, a 96% reduction of the investment cost could result in a nearly 40% increase of operating cost.

Decision support tools could facilitate the complex and evolving decision making process of GEP. Economic, environmental and social criteria must be considered along with aspects that are progressively identified as essential. Towards this aim, the developed EA-based approaches have been presented. Despite their heuristic nature, the results suggested that these could be promising tools to support well established state-of-the-art GEP models that could facilitate decision makers, such as investors and energy policy makers, when high shares of RES generation are considered.