



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ευέλικτα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Για Αυξημένη Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Εκτενής Ανασκόπηση Μεταδιδακτορικής Έρευνας

του

Εμμανουήλ Α. Μπακιρτζή

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Παντελής Μπίσκας

Η Μεταδιδακτορική Έρευνα υλοποιήθηκε με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτήθηκε από την Πράξη «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων Ερευνητών/Ερευνητριών» από τους πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» με άξονες προτεραιότητας 6,8,9 και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο –ΕΚΤ και το ελληνικό δημόσιο.

Απρίλιος 2019, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	5
2. Ορισμός Προβλήματος-στόχοι	6
3. Περιγραφή Αποτελεσμάτων Έρευνας.....	9
3.1. Διαχείριση αποθήκευσης σε μοντέλο κυλιόμενης στοχαστικής ένταξης μονάδων για αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ.....	9
3.1.1. Περιγραφή μοντέλου	9
3.1.2. Αποτελέσματα.....	11
3.2. Διαχείριση απόκρισης ζήτησης σε μοντέλο κυλιόμενης ένταξης μονάδων για αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ	12
3.2.1. Περιγραφή μοντέλου	12
3.2.2. Αποτελέσματα.....	13
3.3. Πιθανοτική αξιολόγηση της μακροχρόνιας επάρκειας του ΣΗΕ: εφαρμογή στο Ελληνικό ΣΗΕ.....	14
3.3.1. Περιγραφή μοντέλου	14
3.3.2. Αποτελέσματα.....	17
4. Δημοσιεύσεις Μεταδιδάκτορα Ερευνητή.....	20
4.1. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά.....	20
4.2. Ανακοινώσεις σε Διεθνή Συνέδρια.....	20
5. Αναφορές.....	21
6. ΥΛΙΚΟ.....	Error! Bookmark not defined.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν παραδοσιακά από μεγάλους θερμικούς και υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η βραχυχρόνια διαχείριση των οποίων γινόταν σε δύο χρονικά επίπεδα, σε αυτό του προημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού, όπου καθορίζεται το πρόγραμμα ένταξης μονάδων (unit commitment), και σε αυτό της λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο [1], όπου καθορίζεται η φόρτιση των μονάδων κάθε λίγα λεπτά, μέσω οικονομικής κατανομής φορτίου (economic dispatch). Με την απελευθέρωση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργήθηκαν αγορές για προϊόντα και υπηρεσίες βασισμένες στις χρονικές κλίμακες που ήδη προϋπήρχαν και έτσι δημιουργήθηκε μια προημερήσια αγορά ενέργειας (day-ahead market) και μια αγορά πραγματικού χρόνου (real-time market) [2]. Η λειτουργικότητα των αγορών κρίνεται ικανοποιητική με την προϋπόθεση ότι το ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητική ακρίβεια και η παραγωγή είναι ελεγχόμενη (προέρχεται, δηλαδή, από «κατανεμόμενες» μονάδες (θερμικές, υδροηλεκτρικές) που μπορούν να ακολουθήσουν τις εντολές κατανομής του Διαχειριστή του Συστήματος). Η παραδοχή αυτή ίσχυε μέχρι πρόσφατα όπου η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) ήταν περιορισμένη. Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, έχουν τεθεί πολιτικοί στόχοι, τόσο παγκοσμίως όσο και πανευρωπαϊκά, για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου με βασικό μοχλό την ολοένα αυξανόμενη διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα παραγωγής ηλεκτρισμού. Η παραγωγή ΑΠΕ χαρακτηρίζεται από μεταβλητότητα και αβεβαιότητα (η αβεβαιότητα αναφέρεται στην αδυναμία πρόβλεψης με ακρίβεια της μελλοντικής τους παραγωγής και η μεταβλητότητα στον διαλείποντα χαρακτήρα της παραγωγής τους), χαρακτηριστικά που καθιστούν τις μονάδες ΑΠΕ μη κατανεμόμενες ή στην καλύτερη περίπτωση μερικώς κατανεμόμενες μονάδες. Συνεπώς, λόγω της αυξημένης αβεβαιότητας που εισάγει η ολοένα αυξανόμενη παραγωγή ΑΠΕ [3] στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), το καθαρό φορτίο (φορτίο καταναλωτών μείον παραγωγή ΑΠΕ) δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια και το προημερήσιο πρόγραμμα ένταξης μονάδων μπορεί να αδυνατεί να ανταποκριθεί στις συνθήκες πραγματικού χρόνου. Αυτή η κατάσταση μπορεί να οδηγήσει σε λήψη αποφάσεων εκτός του πλαισίου της αγοράς, αυξημένη κυκλικότητα των θερμικών μονάδων ή ακόμα και απόρριψη φορτίου και αιολικής παραγωγής και γενικότερα σε μια αντιοικονομική λειτουργία του ΣΗΕ προκειμένου να διατηρηθεί το απαραίτητο επίπεδο αξιοπιστίας του συστήματος, θέτοντας σε αμφισβήτηση τη λειτουργικότητα του δι-επίπεδου μοντέλου αγοράς. Οι τεχνοοικονομικές αυτές προκλήσεις [4]-[9] καθιστούν εξαιρετικά σημαντική την έννοια της **ευελιξίας** στο ΣΗΕ. Απαραίτητη είναι τόσο η ενδελεχής αξιολόγηση των απαιτήσεων ευελιξίας ενός ΣΗΕ όσο και η διερεύνηση μεθόδων με στόχο την αύξηση της ευελιξίας.

2. ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ-ΣΤΟΧΟΙ

Η διείσδυση όλο και περισσότερων μεταβλητών μη κατανεμόμενων ΑΠΕ στο ΣΗΕ αυξάνει τις απαιτήσεις ευελιξίας του ΣΗΕ. Τα μέσα ευελιξίας που διαθέτει σήμερα ο Διαχειριστής του ΣΗΕ για να αντιμετωπίσει τις αυξημένες απαιτήσεις ευελιξίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- A. Τα μέσα που επιτρέπουν να χρησιμοποιηθεί άμεσα η παραγωγή μεταβλητών ΑΠΕ για να καλύψει τη ζήτηση, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τη στιγμιαία διείσδυση των ΑΠΕ. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει (α) η ευέλικτη συμβατική παραγωγή (από «ευέλικτες» υδροηλεκτρικές μονάδες ή από μονάδες φυσικού αερίου που συγχρονίζουν και αυξομειώνουν την ισχύ τους γρήγορα), (β) τα στοιχεία του δικτύου που επιτρέπουν την αποσυμφόρηση των γραμμών (π.χ. τα συστήματα ευέλικτης μεταφοράς ισχύος - FACTS) και (γ) η αναδιάρθρωση των επιχειρησιακών μοντέλων του βραχυπρόθεσμου ενεργειακού προγραμματισμού [10]-[15] ώστε να αντιμετωπίζονται οι απρόβλεπτες αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας του Συστήματος κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο.
- B. Τα μέσα που βελτιώνουν το συγχρονισμό της παραγωγής των μεταβλητών ΑΠΕ και της ζήτησης [16]-[23]. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν (α) η αποθήκευση ενέργειας (αντλησιοταμίευση, αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, μπαταρίες, αποθήκευση θερμικής ενέργειας κτλ.) και η (β) απόκριση ζήτησης (δυνατότητα του Διαχειριστή να προσαρμόσει τη ζήτηση των καταναλωτών, είτε με απ' ευθείας εντολές διακοπής φορτίου είτε έμμεσα μέσω της απόκρισης των καταναλωτών στις αυξομειώσεις της τιμής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο, ώστε να εξισορροπήσει τις διακυμάνσεις στην παραγωγή των ΑΠΕ). Η αναδιάρθρωση των υφιστάμενων επιχειρησιακών μοντέλων ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη λειτουργία των πόρων του συστήματος είναι απαραίτητη και για τα μέσα της δεύτερης κατηγορίας.

Οι υφιστάμενες μέθοδοι βραχυχρόνιου προγραμματισμού και λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο του ΣΗΕ δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τις προκλήσεις από την ενσωμάτωση μεγάλων ποσοτήτων στοχαστικών ΑΠΕ στο ΣΗΕ και απαιτείται σημαντική αναθεώρησή τους ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος διακοπών φορτίου ή και κατάρρευσης του συστήματος. Στην έρευνα που εκπονήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του μεταδιδάκτορα ερευνητή [24] αναπτύχθηκαν καινοτόμα μοντέλα για την αντιμετώπιση της αυξημένης αβεβαιότητας και μεταβλητότητας στον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό του ΣΗΕ, λόγω της αυξημένης διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στο μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η έρευνα εστίασε στα μέσα ευελιξίας της πρώτης (Α) κατηγορίας και συγκεκριμένα στην αναδιάρθρωση των επιχειρησιακών μοντέλων του βραχυχρόνιου προγραμματισμού ώστε να μπορεί να αυξηθεί η στιγμιαία διείσδυση των ΑΠΕ.

Στη μεταδιδακτορική έρευνα δίνεται έμφαση στην ενσωμάτωση των μέσων ευελιξίας της δεύτερης (B) κατηγορίας σε κατάλληλα επιχειρησιακά μοντέλα ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω βιώσιμη ενσωμάτωση μεταβλητών ΑΠΕ στο ΣΗΕ. Μελετάται η αποθήκευση ενέργειας (energy storage) δεδομένου ότι πρόσφατα προσελκύει αυξανόμενο ενδιαφέρον τόσο σε ερευνητικό όσο και σε βιομηχανικό επίπεδο, καθώς και η απόκριση ζήτησης (demand response). Το πλεονέκτημα της αποθήκευσης συνίσταται στο ότι είναι ένα μέσο ευελιξίας πολλαπλής χρησιμότητας. Η βασική του χρησιμότητα είναι η ευθυγράμμιση της παραγωγής με την κατανάλωση μέσω εξισορροπητικής κερδοσκοπίας: ενώ τα δίκτυα μεταφοράς μεταφέρουν την ενέργεια χωρικά, η αποθήκευση μεταφέρει την ενέργεια χρονικά με την έννοια ότι αποζευγνύει χρονικά την παραγωγή από την κατανάλωσή. Τα αποθηκευτικά μέσα μπορούν επιπλέον, λόγω της ταχύτατης αυξομείωσης της εξόδου τους μπορούν να συμμετέχουν στην παροχή ποιοτικών επικουρικών υπηρεσιών (εφεδρείες ρύθμισης, απρόοπτων γεγονότων και ευελιξίας). Τέλος, μπορούν να αναβάλουν ή να διαφοροποιήσουν τις επενδύσεις σε παραγωγή, δίκτυα μεταφοράς και διανομής, είτε βοηθώντας στην αποσυμφόρηση των δικτύων είτε προσφέροντας εγγυημένη ισχύ (firm capacity). Η επίδραση της αποθήκευσης και της απόκρισης ζήτησης σε επιχειρησιακό επίπεδο είναι παρόμοια, με τη διαφορά ότι η αποθήκευση μετατοπίζει χρονικά την παραγωγή ενώ η απόκριση ζήτησης μετατοπίζει χρονικά τη ζήτηση. Εντούτοις διαφορές εντοπίζονται στις δυνατότητες ενσωμάτωσης: οι τεχνολογίες αποθήκευσης έχουν μεγάλο κόστος κεφαλαίου και σε κάποιες περιπτώσεις χαμηλό βαθμό απόδοσης ενώ τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης έχουν μεγάλο κόστος υλοποίησης αναφορικά με την προσέλκυση και διαχείριση των πελατών.

Βασικός στόχος της μεταδιδακτορικής έρευνας είναι η μελέτη της αξίας της αποθήκευσης σε ολιστικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη την πολλαπλές υπηρεσίες που προσφέρουν τα αποθηκευτικών μέσων στο ΣΗΕ (εξομάλυνση φορτίου, παροχή επικουρικών υπηρεσιών). Δίνεται έμφαση στην επίδραση των μέσων ευελιξίας στις βραχυχρόνιες χρονικές κλίμακες από μερικά λεπτά μέχρι 48 ώρες, δηλαδή στη διαχείριση ενέργειας και εφεδρειών. Παρουσιάζονται επιχειρησιακά μοντέλα που ενσωματώνουν μοντέλα αποθήκευσης και διαχείρισης ζήτησης και αξιολογούνται μέσω προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας δεδομένα του Ελληνικού ΣΗΕ. Τα οφέλη από τη χρήση αποθηκευτικών μέσων και διαχείρισης ζήτησης αξιολογούνται υπολογίζοντας διάφορους δείκτες του ΣΗΕ όπως το ενεργειακό μείγμα, η κυκλικότητα των συμβατικών μονάδων, η απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοτήτων μεταβλητών ΑΠΕ, η οριακή τιμή του συστήματος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, η μεταδιδακτορική έρευνα ερευνά την επίδραση της μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ και της συνεπαγόμενης αύξησης των απαιτήσεων ευελιξίας, στη μακροχρόνια επάρκεια του συστήματος παραγωγής. Για την εξασφάλιση των απαραίτητων επιπέδων αξιοπιστίας, οι Διαχειριστές ΣΗΕ εκπονούν μελέτες μακροχρόνιας επάρκειας του ΣΗΕ (π.χ. 10 χρόνια μπροστά),

καθώς η κατασκευή ενός συμβατικού σταθμού απαιτεί έναν ορίζοντα προγραμματισμού αρκετών ετών. Υπό την περιορισμένη διείσδυση ΑΠΕ, οι εν λόγω μελέτες εστίαζαν στην δυνατότητα του συστήματος παραγωγής να ικανοποιεί το φορτίο κατά τη διάρκεια όλων των ωρών του έτους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη κάποια χρονική σύζευξη. Εντούτοις, υπό την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ, που, όπως προαναφέρθηκε, αυξάνει τη μεταβλητότητα και αβεβαιότητα του ΣΗΕ, οι μελέτες επάρκειας άρχισαν να εστιάζουν και στα απαραίτητα επίπεδα ευελιξίας που πρέπει να υπάρχουν στο ΣΗΕ, δηλαδή στη δυνατότητα των κατανεμόμενων πόρων να ακολουθούν τις μεταβολές στο χρόνο (ρυθμό ανόδου/καθόδου) του «καθαρού φορτίου» δηλαδή του φορτίου των τελικών καταναλωτών μείον την παραγωγή από μεταβλητές μη κατανεμόμενες ΑΠΕ. Η μεταδιδακτορική έρευνα εστιάζει στην περαιτέρω διερεύνηση της μακροχρόνιας επάρκειας ισχύος και ευελιξίας του συστήματος παραγωγής και την πρόταση νέων μεθόδων για την λεπτομερέστερη αξιολόγηση των μελλοντικών αναγκών ευελιξίας ενός ΣΗΕ στο μακροχρόνιο ορίζοντα. Οι προτεινόμενες μέθοδοι εφαρμόζονται στο Ελληνικό Σύστημα Παραγωγής για τη δεκαετία 2018-2027.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΈΡΕΥΝΑΣ

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας σε τρεις υποενότητες. Στην πρώτη ενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού του ΣΗΕ που ενσωματώνει μέσα αποθήκευσης ενέργειας [C1],[J1], στην 2^η ενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού του ΣΗΕ που ενσωματώνει διαχείριση ζήτησης [C2] και στην 3^η ενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο πιθανοτικής αξιολόγησης της μακροχρόνιας επάρκειας ισχύος και ευελιξίας του ΣΗΕ [J2].

3.1. Διαχείριση αποθήκευσης σε μοντέλο κυλιόμενης στοχαστικής ένταξης μονάδων για αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ

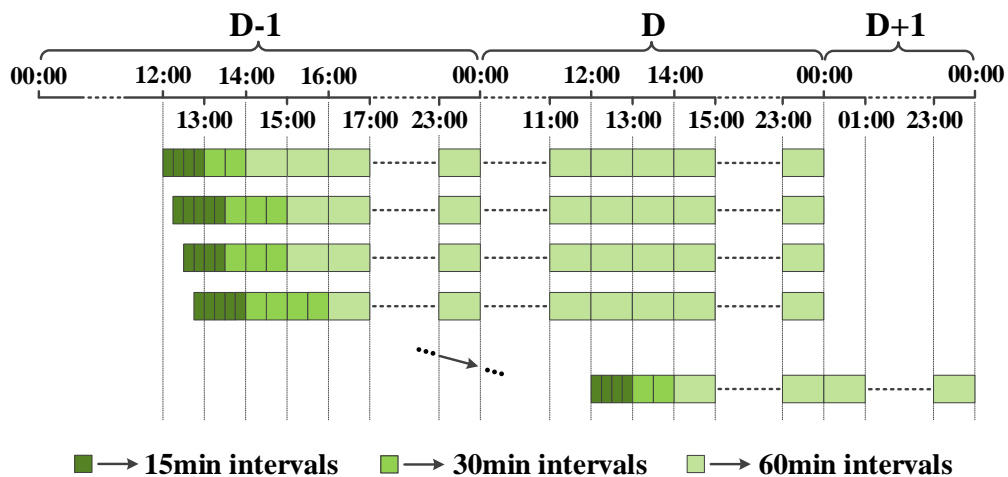
3.1.1. Περιγραφή μοντέλου

Για την αποτελεσματική ενσωμάτωση της διείσδυσης στοχαστικών ΑΠΕ για επίπεδα μέχρι 30% στο ενεργειακό μίγμα, η αναθεώρηση των υφιστάμενων επιχειρησιακών μοντέλων είναι επαρκής [25]. Εντούτοις, για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ, απαιτείται η χρήση εναλλακτικών μέσων ευελιξίας, όπως η αποθήκευση ενέργειας. Τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας αποτελούν μέσα πολλαπλής χρησιμότητας [26] μιας και μπορούν να προσφέρουν πολλαπλές υπηρεσίες στο ΣΗΕ όπως: (α) εξισορρόπηση φορτίου, (β) επικουρικές υπηρεσίες (γ) αναβολή επενδύσεων. Στη μεταδιδακτορική αυτή έρευνα ερευνάται η επίδραση της αποθήκευσης στο βραχυχρόνιο ορίζοντα, δηλαδή στις χρονικές κλίμακες από μερικά λεπτά έως και 36 ώρες στο μέλλον.

Η ενσωμάτωση της αποθήκευσης σε μοντέλα ένταξης μονάδων δεν είναι καινούρια [21],[27],[28]. Εντούτοις, η μέχρι υπάρχουσα έρευνα είχε εστιάσει τον προγραμματισμό της αποθήκευσης στον προημερήσιο ορίζοντα, χωρίς την αξιολόγηση του προημερήσιου προγράμματος στον πραγματικό χρόνο. Κατά την αξιολόγηση την ενσωμάτωσης της αποθήκευσης στον βραχυχρόνιο ορίζοντα, προκύπτει το εξής πρόβλημα: πως να οριστεί το βέλτιστο επίπεδο ενέργειας των αποθηκευτικών μέσων στο τέλος της περιόδου οικονομικής κατανομής, λαμβάνοντας υπόψη τον προημερήσιο προγραμματισμό έγχυσης/απομάστευσης ενέργειας των αποθηκευτικών μέσων, ώστε να αποφευχθεί η εξάντληση/υπερπλήρωση της ενέργειας στα μέσα αποθήκευσης. Δεν υπάρχει προφανώς μία ευθεία απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα και η υπάρχουσα βιβλιογραφία δεν έχει εξετάσει επαρκώς το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στην εργασία [29] παρουσιάζεται ένα μοντέλο στοχαστικής ένταξης μονάδων με μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιεί υπο-ωριαίες περιόδους στο δεύτερο στάδιο (αγορά πραγματικού χρόνου), παρ' όλα αυτά δεν εξετάζεται το πως θα επιλεγεί το κατάλληλο επίπεδο φόρτισης των μπαταριών στην

αγορά πραγματικού χρόνου που αποτελεί απόφαση δεύτερου σταδίου. Στην εργασία [23] γίνεται η πρώτη προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα στο πλαίσιο ενός μοντέλου στοχαστικής ένταξης μονάδων με μπαταρίες. Παρ' όλα αυτά η προσέγγιση που ακολουθείται είναι ευριστική και υποβέλτιστη. Επιπλέον χρησιμοποιούνται ωριαίες περιόδους στον πραγματικό χρόνο, επομένως δεν εξετάζεται η επίδραση της υποθήκευσης σε υπό-ωριαίο επίπεδο.

Η μεταδιδακτορική έρευνα αντιμετωπίζει το συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζοντας ένα κατάλληλο μοντέλο βραχυχρόνιου προγραμματισμού για την αποτελεσματική ενσωμάτωση αποθηκευτικών μέσων σε ΣΗΕ με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ. Συγκεκριμένα, η ιδέα του Ενοποιημένης Ένταξης Μονάδων και Κατανομής Φορτίου (ΕΜΕΚ) που παρουσιάστηκε στο [24], επεκτείνεται περιλαμβάνοντας μία γενικευμένη μοντελοποίηση για αποθηκευτικά μέσα. Το ΕΜΕΚ είναι ένα εργαλείο πραγματικού χρόνου με ορίζοντα προγραμματισμού μέχρι και 36 ώρες, πολλαπλή χρονική ανάλυση που ενοποιεί όλες τις λειτουργίες προγραμματισμού του ΣΗΕ από το προημερήσιο επίπεδο μέχρι την λειτουργία πραγματικού χρόνου. Οι αποφάσεις της πρώτης περιόδου (ένταξη και κατανομή συμβατικών μονάδων καθώς και έγχυση απομάστευση αποθηκευτικών μέσων) του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού είναι δεσμευτικές ενώ το υπόλοιπο πρόγραμμα είναι ενδεικτικό. Το μήκος του ορίζοντα προγραμματισμού μεταβάλλεται μεταξύ 12 και 36 ωρών ανάλογα με το σημείο έναρξης του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού (βλ. Σχήμα).



Σχήμα. Διαμορφώσεις του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού του ΕΜΕΚ

Προκειμένου να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις του ΕΜΕΚ υιοθετείται πολλαπλή χρονική ανάλυση: η πρώτη ώρα προσομοιώνεται με χρονική ανάλυση 15 λεπτών, η 2^η ώρα με χρονική ανάλυση 30 λεπτών και ο υπόλοιπος ορίζοντας προγραμματισμού με χρονική ανάλυση 60 λεπτών (βλ. Σχήμα). Κάθε κυλιόμενη επίλυση χρησιμοποιεί ανανεωμένες προβλέψεις/σενάρια φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ. Υπό αυτό το πλαίσιο, το πρόγραμμα έγχυσης/απομάστευσης

ενέργειας των μέσων αποθήκευσης καθορίζεται με βέλτιστο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη αναμενόμενες συνθήκες του ΣΗΕ για έναν εκτεταμένο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού. Με αυτή την προσέγγιση, το πρόβλημα καθορισμού του ενεργειακού επιπέδου των μέσων αποθήκευσης στον πραγματικό χρόνο εξαλείφεται. Η συγκεκριμένη ιδέα υλοποιήθηκε τόσο σε αιτιοκρατικό πλαίσιο (αιτιοκρατικό ΕΜΕΚ) όσο και σε στοχαστικό πλαίσιο (στοχαστικό ΕΜΕΚ). Στο αιτιοκρατικό ΕΜΕΚ χρησιμοποιούνται προβλέψεις φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ και προγραμματίζονται εφεδρείες ευελιξίας για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας του σφάλματος πρόβλεψης. Στο στοχαστικό ΕΜΕΚ χρησιμοποιούνται σενάρια φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ για την καλύτερη μοντελοποίηση της στοχαστικής φύσης αυτών των παραμέτρων, και επομένως δεν προγραμματίζονται εφεδρείες ευελιξίας. Τόσο το αιτιοκρατικό όσο και το στοχαστικό ΕΜΕΚ μοντελοποιούνται μαθηματικά ως προβλήματα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (mixed integer linear programming) με συνάρτηση στόχου την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του ΣΗΕ λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορες τεχνοοικονομικούς περιορισμούς του συστήματος παραγωγής και τους τεχνοενεργειακούς περιορισμούς των μέσων αποθήκευσης. Τα αποθηκευτικά μέσα συμμετέχουν παρέχοντας ενέργεια και εφεδρείες ευελιξίας.

3.1.2. Αποτελέσματα

Τα οφέλη της αποθήκευσης σε επιχειρησιακό επίπεδο αξιολογούνται πραγματοποιώντας ετήσιες προσομοιώσεις κυλιόμενου προγραμματισμού, χρησιμοποιώντας μία τροποποιημένη έκδοση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Συγκεκριμένα το ΕΜΕΚ εκτελείται σε κυλιόμενο μοτίβο, με συχνότητα 15 λεπτών: συνολικά εκτελούνται 35,040 κυλιόμενες επιλύσεις. Οι αποφάσεις της πρώτης χρονικής περιόδου του ορίζοντα προγραμματισμού μίας επίλυσης χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για την επόμενη επίλυση. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε μία τροποποιημένη έκδοση του Διασυνδεδεμένου Ελληνικού ΣΗΕ για το έτος 2014, όπου έγιναν οι εξής τροποποιήσεις ώστε οι ανάγκες ευελιξίας να είναι αυξημένες:

- Τριπλασιάστηκε η αιολική παραγωγή, ώστε να προσομοιωθεί ένα σενάριο αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ.
- Η ευελιξία των συμβατικών μονάδων μειώθηκε, μειώνοντας το υδροηλεκτρικό δυναμικό.
- Τα προγράμματα διασυνδέσεων αγνοήθηκαν.

Τέσσερις υποθέσεις εργασίας διερευνώνται. Οι δύο πρώτες χρησιμοποιούν το αιτιοκρατικό και στοχαστικό ΕΜΕΚ αντίστοιχα, χωρίς την ύπαρξη αποθηκευτικών μέσων. Οι δύο τελευταίες χρησιμοποιούν το αιτιοκρατικό και στοχαστικό ΕΜΕΚ με παρουσία αποθηκευτικών μέσων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενσωμάτωση αποθηκευτικών μέσων μειώνει τα επιχειρησιακά κόστη, αυξάνοντας τη χρησιμοποίηση των μονάδων βάσης, μειώνοντας την κυκλικότητά των θερμικών μονάδων καθώς και μειώνοντας την απόρριψη φορτίου και αιολικής παραγωγής. Η

χρήση στοχαστικού προγραμματισμού ενισχύσει τα παραπάνω οφέλη, μειώνοντας περαιτέρω τα επιχειρησιακά κόστη. Παρ' όλα αυτά, τα μειωμένα κόστη επιτυγχάνονται με παράλληλη αύξηση εκπομπών CO₂.

3.2. Διαχείριση απόκρισης ζήτησης σε μοντέλο κυλιόμενης ένταξης μονάδων για αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ

3.2.1. Περιγραφή μοντέλου

Όπως προειπώθηκε, για την αποτελεσματική ενσωμάτωση της διείσδυσης στοχαστικών ΑΠΕ για επίπεδα μέχρι 30% στο ενεργειακό μίγμα, η αναθεώρηση των υφιστάμενων επιχειρησιακών μοντέλων είναι επαρκής [25]. Εντούτοις, για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ απαιτείται η χρήση εναλλακτικών μέσων ευελιξίας, όπως η απόκριση ζήτησης. Η απόκριση ζήτησης πρόκειται να αποτελέσει βασικό δομικό στοιχείο των μελλοντικών χονδρικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, επιτρέποντας στους καταναλωτές να εκμεταλλευτούν το πλήρες της δυναμικής τους ευελιξίας. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε αυτά που βασίζονται στην τιμή (price based DR/implicit DR), στα οποία οι καταναλωτές αποκρίνονται σε μία δομή λιανικής τιμολόγησης που διαφέρει μεταξύ χρονικών περιόδων, και σε αυτά που βασίζονται στα κίνητρα (incentive based DR/explicit DR), τα οποία δίνουν στους καταναλωτές κίνητρα μείωσης του φορτίου ως απόκριση στις αλλαγές της χονδρικής αγοράς ενέργειας [30]. Η μεταδιδακτορική έρευνα εξετάζει τις επιχειρησιακές επιπτώσεις μιας προσέγγισης κεντρικής μετατόπισης φορτίου (central load shifting) στο βραχυχρόνιο ορίζοντα προγραμματισμού (ορίζοντας από μερικά λεπτά μέχρι και 36 ώρες στο μέλλον). Στην εργασία [22] παρουσιάστηκε ένα μοντέλο ένταξης μονάδων με περιορισμούς ασφάλειας δικτύου και απόκριση ζήτησης, όπου οι φορείς απόκρισης ζήτησης προσφέρουν εφεδρείες στο ΣΗΕ. Έχουν παρουσιαστεί μοντέλα στοχαστικής [31], εύρωστης [32] και πιθανοτικά περιορισμένης (chance-constrained) [33] ένταξης μονάδων που ενσωματώνουν απόκριση ζήτησης στο βραχυχρόνιο προγραμματισμό. Στην εργασία [34] παρουσιάστηκε ένα μοντέλο στοχαστικής ένταξης μονάδων δύο σταδίων, όπου οι προμηθευτές φορτίου προσφέρουν εφεδρείες. Στην εργασία [35] η προηγούμενη μοντελοποίηση επεκτείνεται λαμβάνοντας υπ' όψη και βιομηχανικούς καταναλωτές. Όλες οι παραπάνω εργασίες εξετάζουν την ενσωμάτωση της απόκρισης ζήτησης στο υφιστάμενο πλαίσιο του προγραμματισμού του ΣΗΕ σε δύο επίπεδα, μία υπόθεση που θα μπορούσε να περιορίσει τα οφέλη από την ενσωμάτωση της απόκρισης ζήτησης.

Στην μεταδιδακτορική έρευνα παρουσιάζεται ένα αποτελεσματικό αιτιοκρατικό πλαίσιο ενσωμάτωσης της απόκρισης ζήτησης στο βραχυχρόνιο προγραμματισμό του ΣΗΕ, επεκτείνοντας την ιδέα του μοντέλου ΕΜΕΚ που παρουσιάστηκε στην [24]. Το αιτιοκρατικό ΕΜΕΚ, όπως προαναφέρθηκε, είναι ένα κυλιόμενο εργαλείο πραγματικού χρόνου με χρονικό ορίζοντα

προγραμματισμού μέχρι 36 ώρες και πολλαπλή χρονική ανάλυση, που ενοποιεί όλες τις λειτουργίες προγραμματισμού του ΣΗΕ από το προημερήσιο επίπεδο μέχρι τη λειτουργία πραγματικού χρόνου. Το αιτιοκρατικό ΕΜΕΚ επιλύεται σε κυλιόμενο επίπεδο κάθε 15 λεπτά και χρησιμοποιεί ανανεωμένες προβλέψεις του φορτίου και της παραγωγής ΑΠΕ. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πόροι απόκρισης ζήτησης αξιοποιούνται πιο αποτελεσματικά, αφού το πρόγραμμα ενέργειας εξισορρόπησης και παροχής εφεδρειών τους, ανανεώνεται με μεγάλη συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη επικαιροποιημένες προβλέψεις του ΣΗΕ για έναν εκτεταμένο χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού.

Αναφορικά με την απόκριση ζήτησης, μοντελοποιούνται οικιακοί, εμπορικοί και βιομηχανικοί καταναλωτές οι οποίοι εκπροσωπούνται από Προμηθευτές Απόκρισης Ζήτησης (ΠΑΖ) (Demand Response Provider) στην χονδρική αγορά ενέργειας. Στην περίπτωση των οικιακών και εμπορικών φορτίων, οι ΠΑΖ μπορεί να είναι φορείς σωρευτικής εκπροσώπησης ζήτησης, ενώ οι μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές μπορούν να λειτουργούν ως ΠΑΖ για την δική τους κατανάλωση και να συμμετέχουν απευθείας στην χονδρική αγορά. Οι δυνατότητες ευελιξίας των ΠΑΖ αξιοποιούνται τόσο για την προμήθεια ενέργειας εξισορρόπησης όσο και εφεδρειών. Οι ΠΑΖ θεωρούνται κατανεμόμενοι φορείς από τον Διαχειριστή ΣΗΕ, έχοντας ένα βασικό προφίλ ζήτησης (baseline load profile), τεχνοοικονομικούς περιορισμούς λειτουργίας και υποβάλλοντας προσφορές για ενέργεια εξισορρόπησης (balancing energy) και εφεδρεία ευελιξίας (flexibility reserve). Η παρουσία των ΠΑΖ αυξάνει την ευελιξία του ΣΗΕ, αφού η κατανάλωση των αποκριτικών τους φορτίων (responsive loads) μετατοπίζεται από περιόδους υψηλής τιμής σε περιόδους χαμηλής τιμής της χονδρικής αγοράς (load shifting). Οι οικιακοί/εμπορικοί ΠΑΖ εκπροσωπούν πολλά μικρά φορτία, επομένως η απόκρισή τους μοντελοποιείται με συνεχείς μεταβλητές απόφασης, και περιορίζεται σε μια προκαθορισμένη ζώνη γύρω από το βασικό προφίλ φορτίου. Οι βιομηχανικοί καταναλωτές συμμετέχουν απευθείας στην χονδρική αγορά και η απόκρισή τους μοντελοποιείται θεωρώντας έναν αριθμό πανομοιότυπων διακριτών διαδικασιών. Η απόκριση των βιομηχανικών φορτίων περιορίζεται από τον αριθμό των διαδικασιών που πρέπει να ολοκληρωθούν μέσα σε μία μέρα, την κατανάλωση ενέργειας της διαδικασίας, την χρονική διάρκεια της διαδικασίας και τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό παράλληλων διαδικασιών. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιούνται διακριτές μεταβλητές για τη μοντελοποίηση της απόκρισης των βιομηχανικών φορτίων.

3.2.2. Αποτελέσματα

Οι επιπτώσεις της απόκρισης ζήτησης σε επιχειρησιακό επίπεδο αξιολογούνται πραγματοποιώντας ετήσιες προσομοιώσεις κυλιόμενου προγραμματισμού, χρησιμοποιώντας μία τροποποιημένη έκδοση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Συγκεκριμένα το ΕΜΕΚ

εκτελείται σε κυλιόμενο επίπεδο, με συχνότητα 15 λεπτών: συνολικά εκτελούνται 35,040 κυλιόμενες επιλύσεις. Οι αποφάσεις της πρώτης χρονικής περιόδου του ορίζοντα προγραμματισμού μίας επίλυσης χρησιμοποιούνται ως αρχικές συνθήκες για την επόμενη επίλυση. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε μία τροποποιημένη έκδοση του Διασυνδεδεμένου Ελληνικού ΣΗΕ για το έτος 2014, όπου έγιναν οι εξής τροποποιήσεις ώστε οι ανάγκες ευελιξίας να είναι αυξημένες:

- Τριπλασιάστηκε η αιολική παραγωγή, ώστε να προσομοιωθεί ένα σενάριο αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ.
- Η ευελιξία των συμβατικών μονάδων μειώθηκε, μειώνοντας το υδροηλεκτρικό δυναμικό.
- Τα προγράμματα διασυνδέσεων αγνοήθηκαν.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης θεωρούνται 5 ΠΑΖ: 1 ΠΑΖ οικιακών φορτίων, 1 ΠΑΖ εμπορικών φορτίων και 3 ΠΑΖ βιομηχανικών καταναλωτών. Τρεις διαφορετικές υποθέσεις εργασίας ερευνώνται: στην 1^η υπόθεση εργασίας δεν περιλαμβάνεται απόκριση ζήτησης, στην 2^η υπόθεση εργασίας οι προαναφερθέντες ΠΑΖ προσφέρουν μόνο ενέργειας εξισορρόπησης, ενώ στην 3^η υπόθεση εργασίας οι ΠΑΖ προσφέρουν ενέργειας εξισορρόπησης και εφεδρεία ευελιξίας.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ενσωμάτωση της απόκρισης ζήτησης μειώνει τα επιχειρησιακά κόστη του ΣΗΕ, ως αποτέλεσμα πιο οικονομικά αποδοτικών αποφάσεων που επιτυγχάνονται από αυξημένη χρησιμοποίηση των μονάδων βάσης, μειωμένη κυκλικότητα των θερμικών μονάδων, μειωμένη απόρριψη φορτίου και μειωμένη απόρριψη αιολικής παραγωγής. Στην περίπτωση που οι ΠΑΖ προσφέρουν, εκτός από ενέργειας εξισορρόπησης, και εφεδρείες, τα επιχειρησιακά οφέλη είναι μεγαλύτερα.

3.3. Πιθανοτική αξιολόγηση της μακροχρόνιας επάρκειας του ΣΗΕ: εφαρμογή στο Ελληνικό ΣΗΕ

3.3.1. Περιγραφή μοντέλου

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να καλύπτει με το ηλεκτρικό φορτίο σε πραγματικό χρόνο διατηρώντας παράλληλα κάποια επίπεδα αξιοπιστίας. Για την εξασφάλιση των απαραίτητων επιπέδων αξιοπιστίας, οι Διαχειριστές ΣΗΕ εκπονούν μελέτες μακροχρόνιας επάρκειας του ΣΗΕ (π.χ. 10 χρόνια μπροστά), μιας και η κατασκευή ενός συμβατικού σταθμού απαιτεί έναν ορίζοντα προγραμματισμού αρκετών ετών. Υπό την περιορισμένη διείσδυση ΑΠΕ, οι εν λόγω μελέτες εστίαζαν στην δυνατότητα του συστήματος παραγωγής να ικανοποιεί το φορτίο κατά τη διάρκεια όλων των ωρών του έτους, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη κάποια χρονική σύζευξη. Συγκεκριμένοι παράμετροι των μονάδων παραγωγής όπως ο Ισοδύναμος Ρυθμός μη Προγραμματισμένων Διακοπών (Equivalent Forced Outage Rate - EFOR) και συγκεκριμένοι

πιθανοτικοί δείκτες όπως η Πιθανότητα Απόρριψης Φορτίου (Loss of Load Probability - LOLP) και η Αναμενόμενη Χρονική Διάρκεια Απόρριψης Φορτίου (Loss of Load Expectation - LOLE) έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επάρκειας του ΣΗΕ, θεωρώντας συγκεκριμένους στόχους για το επίπεδο αξιοπιστίας, π.χ. μία μέρα απορριφθέντος φορτίου κάθε 10 χρόνια, ή αντίστοιχα 2.4 μέρες το χρόνο [36]-[41].

Εντούτοις, υπό την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ, που όπως προαναφέρθηκε αυξάνει τη μεταβλητότητα και αβεβαιότητα του ΣΗΕ, οι μελέτες επάρκειας άρχισαν να εστιάζουν και στην απαραίτητα επίπεδα ευελιξίας που πρέπει να υπάρχουν στο ΣΗΕ, δηλαδή στη δυνατότητα των κατανεμόμενων πόρων να ακολουθούν τις μεταβολές στο χρόνο (ρυθμό ανόδου/καθόδου) του «καθαρού φορτίου» δηλαδή του φορτίου των τελικών καταναλωτών μείον την παραγωγή από μεταβλητές μη κατανεμόμενες ΑΠΕ.

Διάφορες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της ευελιξίας του ΣΗΕ αναπτύχθηκαν, οι πιο συνηθισμένες από τις οποίες είναι οι εξής [42]:

- Screening available flexibility method: Αυτή η μέθοδος αποτυπώνει τη διαθέσιμη ευελιξία του ΣΗΕ αξιολογώντας τα φυσικά χαρακτηριστικά των παραγωγικών πόρων του συστήματος, με στόχο τον υπολογισμό της συνολικής ικανότητας μεταβολής της ισχύος τους, χωρίς όμως να αξιολογεί περαιτέρω τη λειτουργία τους [43]-[45].
- Intermediate assessment method: Αυτή η μέθοδος ακολουθεί μια πιο λεπτομερή προσέγγιση, εξακολουθώντας όμως να μην εξετάζει πλήρως τα προγράμματα ένταξης και οικονομικής κατανομής των μονάδων [46]-[49].
- Detailed assessment method: Αυτή η μέθοδος εξετάζει λεπτομερώς την πραγματική λειτουργία του συστήματος, δηλαδή, χρησιμοποιεί ολοκληρωμένα μοντέλα παραγωγής: ένα μοντέλο ένταξης μονάδων και οικονομικής κατανομής [50]-[53]. Παράλληλα, εξελίσσει καινούριους δείκτες πιθανοτικής αξιολόγησης της ευελιξίας, όπως ο δείκτης αναμενόμενης χρονικής διάρκειας ανεπαρκούς δυνατότητας αυξομείωσης ισχύος (insufficient ramping resource expectation (IRRE)) που αξιολογεί το έλλειμα ρυθμού ανόδου/καθόδου [40] των κατανεμόμενων πόρων του ΣΗΕ.

Στη μεταδιδακτορική έρευνα παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την πιθανολογική αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης επάρκειας πόρων ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Σε πρώτη φάση, η λειτουργία του ΣΗΕ προσομοιώνεται σε βάθος πολλών ετών, ανά ώρα, με βάση το ολοκληρωμένο μοντέλο ένταξης μονάδων που χρησιμοποιείται σήμερα για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού της χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας [54]. Οι πολυετείς προσομοιώσεις παράγουν, μεταξύ άλλων, την προβλεπόμενη ωριαία ένταξη μονάδων και την προγραμματισμένη έγχυση ενέργειας όλων των συμβατικών (θερμικών και υδροηλεκτρικών) μονάδων, οι οποίες είναι

τα βασικά δεδομένα εισόδου για τον λεπτομερή υπολογισμό των αντίστοιχων πιθανοτικών δεικτών επάρκειας πόρων.

Σε δεύτερη φάση, τόσο η επάρκεια ισχύος όσο και η επάρκεια της ευελιξίας εξετάζονται χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους πιθανοτικούς δείκτες, οι οποίοι καθορίζονται με λεπτομερή τρόπο, ακολουθώντας μία προσέγγιση που εμπίπτει στις λεπτομερείς μεθόδους αξιολόγησης που περιεγράφηκαν προηγουμένως.

Οι πιθανοτικοί δείκτες επάρκειας πόρων που υπολογίζονται είναι οι εξής:

- **Loss Of Load Probability (LOLP):** Είναι ο συμβατικός δείκτης μέτρησης της πιθανότητας μη ικανοποίησης της ζήτησης λόγω ανεπάρκειας ισχύος, είτε λόγω υποεπένδυσης είτε λόγω μιας σειράς μη προγραμματισμένων διακοπών.
- **Loss Of Load Expectation (LOLE):** Αυτός ο δείκτης εκφράζει τον χρόνο (σε ώρες) κατά την οποία το φορτίο υπερβαίνει τη διαθέσιμη ισχύ παραγωγής.
- **Expected Unserved Energy (EUE):** Ο δείκτης αυτός εκφράζει την ποσότητα του φορτίου (σε MWh) που αναμένεται να απορριφθεί σε ένα δεδομένο έτος, λόγω έλλειψης διαθέσιμης παραγωγικής ισχύος.
- **Insufficient Ramping Resource Probability (IRRP):** Αυτός ο δείκτης εκφράζει την πιθανότητα έλλειψης δυνατότητας μείωσης/αύξησης της ισχύος του παραγωγικού δυναμικού. Ο δείκτης υπολογίζεται σε επίπεδο συστήματος και εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας των μονάδων, την ρυθμό ανόδου/καθόδου τους, καθώς και το τεχνικά ελάχιστο επίπεδο παραγωγής τους. Ο υπολογισμός αυτής του δείκτη χρησιμοποιεί το EFOR των κατανεμόμενων μονάδων.
- **Insufficient Ramping Resource Expectation (IRRE):** Αυτός ο δείκτης εκφράζει τον χρόνο (σε ώρες) κατά τον οποίο η δυνατότητα αύξησης/μείωσης της ισχύος των μονάδων αναμένεται να είναι μικρότερη από το ρυθμό αύξησης/μείωσης του καθαρού φορτίου.
- **Expected Unserved Ramping Energy (EURE):** Ο δείκτης αυτός εκφράζει την αναμενόμενη ποσότητα μη εξυπηρετούμενης ενέργειας (σε MWh) που οφείλεται στην έλλειψη ευελιξίας του παραγωγικού δυναμικού.

Ο υπολογισμός των δεικτών επάρκειας ισχύος (LOLP, LOLE, EUE) βασίζεται στον υπολογισμό, ανά ώρα, της πιθανοτικής κατανομής της συνολικής διαθεσιμότητας ισχύος των θερμικών μονάδων, χρησιμοποιώντας το EFOR των μονάδων και τη διαθεσιμότητα των μονάδων. Για την αξιολόγηση της ευελιξίας του ΣΗΕ, επεκτείνεται η έννοια των δεικτών ευελιξίας (IRRP, IRRE, EURE), παρουσιάζοντας μια νέα μέθοδο για τον υπολογισμό του, λαμβάνοντας υπόψη το EFOR των συμβατικών μονάδων παραγωγής, σε αντίθεση με το [40], όπου χρησιμοποιήθηκε μια εμπειρική αθροιστική κατανομή της ευελιξίας του ΣΗΕ. Επιπλέον, σε αντίθεση με τη [40], ο δείκτης IRRE προς την άνω και κάτω κατεύθυνση υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη λεπτομερή

κατάσταση λειτουργίας της γεννήτριας (εκτός σύνδεσης, συγχρονισμού, κατανομή) καθώς και τον ελάχιστο χρόνο κράτησης και λειτουργίας της μονάδας. Εν τέλει, ο υπολογισμός των δεικτών επάρκειας ευελιξίας (IRRP, IRRE, EURE) βασίζεται στον υπολογισμό, ανά ώρα, της πιθανοτικής κατανομής της συνολικής δυνατότητας αύξησης/μείωσης ισχύος των θερμικών μονάδων, χρησιμοποιώντας το EFOR και την κατάσταση λειτουργίας της μονάδας όπως αυτή προέκυψε από τις κυλιόμενες επιλύσεις του προγράμματος ένταξης/κατανομής.

3.3.2. Αποτελέσματα

Όλοι οι πιθανοτικοί δείκτες που παρουσιάστηκαν, υπολογίζονται για το ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ για τον 10ετή χρονικό ορίζοντα μελέτης (περίοδος 2018-2027) χρησιμοποιώντας σενάρια για τις μελλοντικές συνθήκες λειτουργίας, όπως η πρόβλεψη φορτίου του συστήματος, η εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής και η απόσυρση υφισταμένων μονάδων, οι αναμενόμενες τιμές καυσίμων και εκπομπών CO₂, η αναμενόμενη αύξηση της εγκατεστημένης δυναμικότητας ΑΠΕ, κτλ. Δημιουργήθηκαν 12 συνολικά σενάρια από το συνδυασμούς των παραπάνω παραμέτρων και λήφθηκαν υπόψη τα προγράμματα διασυνδέσεων με γειτονικές χώρες καθώς και αναμενόμενες αλλαγές στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ όπως η διασύνδεση της Κρήτης, [55].

Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, η επάρκεια ισχύος εξαρτάται κυρίως από τη διαμόρφωση της διαθεσιμότητας των κατανεμόμενων μονάδων, ενώ η επάρκεια της ευελιξίας επηρεάζεται σημαντικά από την ωριαίο πρόγραμμα ένταξης και κατανομής των διαθέσιμων πόρων παραγωγής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αναφορικά με την επάρκεια ισχύος, δείχνουν ότι η συνολική τρωτότητα του συστήματος είναι υψηλότερη στα σενάρια που υποθέτουν πρόωρη απόσυρση δύο μονάδων Αεριοστρόβιλου Συνδυασμένου Κύκλου (CCGT), ανεξάρτητα από τη διακύμανση των άλλων υποθέσεων της προσομοίωσης (συμπεριλαμβανομένης της ζήτησης φορτίου). Επιπλέον, σε όλα τα σενάρια, η απόσυρση τεσσάρων λιγνιτικών μονάδων στο τέλος του 2019 καθώς και η πλήρης διασύνδεση του μεγαλύτερου νησιωτικού συστήματος (Κρήτη) με την ηπειρωτική χώρα από το 2025 και μετά, αναμένεται να επιδεινώσουν σημαντικά την επάρκεια ισχύος.

Αναφορικά με την επάρκεια ευελιξίας, εκτεταμένες προσομοιώσεις έδειξαν ότι όλοι οι δείκτες επάρκειας ευελιξίας τείνουν να αυξάνονται σημαντικά τα επόμενα χρόνια σε όλα τα σενάρια, λόγω της αυξημένης μεταβλητότητας του καθαρού φορτίου, κυρίως λόγω της σταδιακής αύξησης της παραγωγής μεταβλητών ΑΠΕ σε συνδυασμό με τη σταδιακή αύξηση του φορτίου συστήματος. Ομοίως με τους δείκτες επάρκειας ισχύος, η απόσυρση των παλαιών μονάδων λιγνίτη αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά τους δείκτες ευελιξίας που σχετίζονται με την ικανότητα αύξησης ισχύος. Ωστόσο, οι αντίστοιχοι δείκτες που σχετίζονται με την ικανότητα μείωσης ισχύος τείνουν να είναι

λιγότερο εξαρτημένοι από τις περισσότερες αλλαγές που αναμένεται να συμβούν στο ΣΗΕ στο εγγύς μέλλον. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι το ωραίο πρόγραμμα ένταξης/κατανομής των μονάδων λιγνίτη και CCGT, μπορεί να διαφοροποιηθεί σημαντικά μεταξύ των σεναρίων και των ετών, γεγονός που μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην ικανότητα τόσο αύξησης όσο και μείωσης της ισχύος του συστήματος παραγωγής.

Γενικά, η μελλοντική διαθεσιμότητα των θερμικών μονάδων παραγωγής είναι ο βασικός παράγοντας για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης επάρκειας πόρων και, στη συγκεκριμένη μελέτη, η έλλειψή της φαίνεται να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην επάρκεια ισχύος όσο και στην επάρκεια ευελιξίας. Συνεπώς, η ύπαρξη και η λειτουργία όλων των θερμικών μονάδων παραγωγής που είναι διαθέσιμες σήμερα καθώς και η έγκαιρη κατασκευή όλων των προγραμματισμένων σχεδίων είναι υψίστης σημασίας για τη μακροπρόθεσμη ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του ελληνικού διασυνδεδεμένου ΣΗΕ. Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, οι φιλόδοξοι στόχοι της ΕΕ αναφορικά με την απανθρακοποίηση και την αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να συνοδεύονται από λεπτομερείς μελέτες, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι στο εγγύς μέλλον δεν θα προκύψουν προβλήματα επάρκειας παραγωγικών πόρων λόγω της μαζικής απόσυρσης της συμβατικών μονάδων βάσης και, ενδεχομένως, ευέλικτων θερμικών μονάδων.

3.4. Γενικά Συμπεράσματα

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεταδιδακτορικής έρευνας αναφορικά με την ενσωμάτωση αποθήκευσης ενέργειας και απόκρισης ζήτησης, προκύπτει ότι η επίδραση της αποθήκευσης ενέργειας και της απόκρισης ζήτησης είναι, ποιοτικά, παρόμοια σε επιχειρησιακό επίπεδο, μειώνοντας τα κόστη λειτουργίας του ΣΗΕ, λόγω οικονομικά αποδοτικότερων αποφάσεων προγραμματισμού και κατανομής που περιλαμβάνουν αυξημένη χρησιμοποίηση των μονάδων βάσης, μειωμένη κυκλικότητα των θερμικών μονάδων, μειωμένη απόρριψη φορτίου και μειωμένη απόρριψη αιολικής παραγωγής. Σε επίπεδο μοντελοποίησης, η ενσωμάτωση απόκρισης ζήτησης βιομηχανικών φορτίων απαιτεί χρήση ακέραιων μεταβλητών (σε αντίθεση με την αποθήκευση ενέργειας που απαιτεί μόνο συνεχείς μεταβλητές) γεγονός που θα οδηγήσει σε πιθανό υπολογιστικό φόρτο στην περίπτωση που προσομοιωθούν πολλοί βιομηχανικοί καταναλωτές. Το μοντέλο πιθανοτικής αξιολόγησης επάρκειας ισχύος και ευελιξίας που εφαρμόστηκε στο Ελληνικό ΣΗΕ για διάφορα σενάρια φορτίου του συστήματος, εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής και απόσυρσης υφισταμένων μονάδων, τιμών καυσίμων και εκπομπών CO₂, αναδεικνύει τους μελλοντικούς κινδύνους επάρκειας ισχύος και ευελιξίας. Η ενσωμάτωση αποθήκευσης και απόκρισης ζήτησης στο Ελληνικό ΣΗΕ θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμη για την αντιμετώπιση των μελλοντικών αυτών προκλήσεων.

3.5. Ιδέες για περαιτέρω έρευνα

Ιδέες για περαιτέρω βελτίωση/μελλοντική έρευνα της έρευνας της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας θα μπορούσαν να αποτελούν:

- Εφαρμογή μεθόδων διάσπασης (decomposition) του στοχαστικού μοντέλου ΕΜΕΚ με αποθήκευση. Με αυτό τον τρόπο η ενσωμάτωση μεγαλύτερου αριθμού σεναρίων θα ήταν εφικτή.
- Ενσωμάτωση περιορισμών δικτύου στα μοντέλα ΕΜΕΚ με αποθήκευσης ενέργειας και απόκριση ζήτησης για την διερεύνηση τυχόν περιορισμών που θα επιφέρει το δίκτυο στα οφέλη από την ενσωμάτωση αποθήκευσης ενέργειας και απόκρισης ζήτησης καθώς και των πιθανών οφελών που θα έχει η αποθήκευση ενέργειας και η απόκριση ζήτησης στην αποσυμφόρηση του δικτύου.
- Συνδυαστική πιθανοτική αξιολόγηση της μακροχρόνιας επάρκειας του ΣΗΕ με μεγάλο αριθμό σεναρίων τα οποία θα προσομοιώνουν μη προγραμματισμένες απώλειες μονάδων, σφάλματα πρόβλεψης ΑΠΕ και φορτίου, διαφορετικές τιμές καυσίμων και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με παράλληλη ενσωμάτωση λήψης επενδυτικών αποφάσεων για εγκατάσταση/απόρριψη καινούριων μονάδων.

4. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΜΕΤΑΔΙΔΑΚΤΟΡΑ ΕΡΕΥΝΗΤΗ

Ο Μεταδιδάκτωρ Ερευνητής δημοσίευσε τις παρακάτω εργασίες σε διεθνή περιοδικά και διεθνή συνέδρια στα πλαίσια της μεταδιδακτορικής του έρευνας.

4.1. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά

- [J1] E. A. Bakirtzis, C. K. Simoglou, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, "Storage management by rolling stochastic unit commitment for high renewable energy penetration," Elsevier Electric Power Systems Research, vol. 158, pp. 240 - 249, May 2018.
- [J2] C. K. Simoglou, E. A. Bakirtzis, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, " Probabilistic evaluation of the long-term power system resource adequacy: The Greek case," Elsevier Energy Policy, vol. 117, pp. 295 - 306, June 2018.

4.2. Ανακοινώσεις σε Διεθνή Συνέδρια

- [C1] E. A. Bakirtzis, I. G. Marneris, D. I. Chatzigiannis, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, "Storage Management by Rolling Unit Commitment for High Renewable Energy Penetration," Proceedings of the Powertech Eindhoven 2017, Manchester, UK, Jun. 18-22, 2017.
- [C2] E. A. Bakirtzis, I. G. Marneris, S. I. Vagropoulos, P. N. Biskas, and A. G. Bakirtzis, "Demand Response Management by Rolling Unit Commitment for High Renewable Energy Penetration," Proceedings of the SEST 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, Seville, Spain, Sep. 10-12, 2018.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, “Power Generation, Operation and Control”, Wiley, New York, 1996.
- [2] S. Stoft, Power Systems Economics: Designing Markets for Electricity, IEEE Press, John Wiley and Sons, 2002.
- [3] J. Wang, A. Botterud, R. Bessa, et al., “Wind power forecasting uncertainty and unit commitment”, Applied Energy, vol. 88, no. 11, pp. 4014-4023, Nov 2011
- [4] L. Xie, P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, et al., “Wind Integration in Power Systems: Operational Challenges and Possible Solutions”, Proceedings Of The IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 214-232, Jan 2011.
- [5] C. Ummels, M. Gibescu, E. Pelgrum, et al., “Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch”, IEEE Transactions On Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 44-51, Mar 2007
- [6] A.M. Foley, B.P.O. Gallachoir, E.J. McKeogh, “Addressing the technical and market challenges to high wind power integration in Ireland”, Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 19, pp. 692-703, Mar 2013
- [7] A. Papavasiliou, S.S. Oren, R.P. O'Neill, “Reserve Requirements for Wind Power Integration: A Scenario-Based Stochastic Programming Framework”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 4, pp. 2197-2206, Nov 2011
- [8] A. Tuohy, P. Meibom, E. Denny, et al., “Unit Commitment for Systems With Significant Wind Penetration”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 2, pp. 592-601, May 2009
- [9] D. Menniti, N. Scordino, N. Sorrentino, “Secure and economic management of a power system in the presence of wind generation”, Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 11, pp. 1375-1383, Nov 2010
- [10] J. Wang, M. Shahidehpour, Z. Li, “Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 2, pp. 1319-1327, Aug 2008.
- [11] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, J. Zhao and T. Zheng, “Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 52-63, Feb. 2013.
- [12] P. Meibom, R. Barth, B. Hasche, et al., “Stochastic Optimization Model to Study the Operational Impacts of High Wind Penetrations in Ireland”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 3, pp. 1367-1379, Aug 2011
- [13] J. Kiviluoma, P. Meibom, A. Tuohy, et al, “Short-Term Energy Balancing With Increasing Levels of Wind Energy,” IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 3, no. 4, Special Issue SI : pp. 769-776, Oct 2012.

- [14] K.W. Cheung and R.R. Rios-Zalapa, "Smart Dispatch for Large Grid Operations with Integrated Renewable Resources," in Proc. 2011 Innovative Smart Grid Technology (ISGT) Conf., Jan. 2011.
- [15] Midwest ISO (2010, May 4), Look Ahead Commitment Stage 1 - Highlights from Functional Design Document v1.1. [Online]. Available: <https://www.midwestiso.org/WHATWEDO/STRATEGICINITIATIVES/Pages/LookAhead.aspx>
- [16] A. Tuohy, M. O'Malley, "Pumped storage in systems with very high wind penetration," Energy Policy, vol 39, no. 4, pp. 1965-1974, Apr 2011.
- [17] D. J. Swider, "Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 95-102, Mar 2007.
- [18] R. Madlener, J Latz, "Economics of centralized and decentralized compressed air energy storage for enhanced grid integration of wind power," vol 101, Special Issue: SI pp. 299-309, Jan 2013.
- [19] A. J. Roscoe, G. Ault, "Supporting high penetrations of renewable generation via implementation of real-time electricity pricing and demand response," IET Renewable Power Generation, vol.4, no. 5, pp. 369-382, Jul. 2010.
- [20] B. Lu and M. Shahidehpour, "Short-term scheduling of battery in a grid connected PV/battery system," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 20, pp. 1053-1061, May 2005.
- [21] H. Daneshi and A. K. Srivastava, "Impact of battery energy storage on power system with high wind penetration," in Proc. IEEE Transm.Distrib. Conf. Expo., May 2012, pp. 1-8.
- [22] M. Parvania, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Demand Response Scheduling by Stochastic SCUC," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 89-98, Jun. 2010.
- [23] N. Li, C. Uçkun, E. M. Constantinescu, J. R. Birge, K. W. Hedman, and A. Botterud, "Flexible Operation of Batteries in Power System Scheduling With Renewable Energy," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 685-696, Apr. 2016.
- [24] E. A. Bakirtzis, "Short-term power system scheduling under high renewable energy penetration", PhD Thesis, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2016. Available online: <http://ikee.lib.auth.gr/record/285240/files/GRI-2016-17561.pdf>
- [25] P. Denholm, and M. Hand. (2011), "Grid Flexibility and Storage Required to Achieve Very High Penetration of Variable Renewable Electricity", Energy Policy, Vol. 39(3), pp. 1817-1830, Mar 2011.
- [26] P. Denholm, J. Jorgenson, M. Hummon, and D. Palchak, "The Impact of Wind and Solar on the Value of Energy Storage," Technical Report, NREL/TP-6A20-60568, Nov. 2013.

- [27] R. Jiang, J. Wang, and Y. Guan, "Robust Unit Commitment With Wind Power and Pumped Storage Hydro," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 800-810, May 2012.
- [28] M. E. Khodayar, M. Shahidehpour, and L. Wu, "Enhancing the Dispatchability of Variable Wind Generation by Coordination With Pumped-Storage Hydro Units in Stochastic Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2808-2818, Aug. 2013.
- [29] D. Pozo, J. Contreras, and E. E. Sauma, "Unit Commitment With Ideal and Generic Energy Storage Units," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2974-2984, Nov 2014.
- [30] EU DG Energy, "Impact assessment study on downstream flexibility, price flexibility, demand response & smart metering, Jul 2016. Available:https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/demand_response_ia_study_final_report_12-08-2016.pdf
- [31] Q. Wang, J. Wang, and Y. Guan, "Stochastic Unit Commitment With Uncertain Demand Response," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 562- 563, Feb 2013.
- [32] C. Zhao, J. Wang, J.-P. Watson, and Y. Guan, "Multi-Stage Robust Unit Commitment Considering Wind and Demand Response Uncertainties," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2708-2717, Aug. 2013.
- [33] B. Wang, X. Yang, T. Short, and S. Yang, "Chance constrained unit commitment considering comprehensive modelling of demand response resources," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 490-500, May. 2017.
- [34] N. G. Paterakis, O. Erdnic, A. G. Bakirtzis, and J. P. S. Catalão, "Qualification and Quantification of Reserves in Power Systems Under High Wind Generation Penetration Considering Demand Response," *IEEE Trans. Sust. Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 88-103, Jan 2015.
- [35] N. G. Paterakis, O. Erdnic, A. G. Bakirtzis, and J. P. S. Catalão, "Load-Following Reserves Procurement Considering Flexible Demand-Side Resources Under High Wind Power Penetration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 3, pp. 1337-1350, May 2015.
- [36] R. Billinton, R. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", second ed. New York: Plenum, 1996.
- [37] J. Cochran, M. Miller, O. Zinaman, M. Milligan, D. Arent, B. Palmintier, M. O'Malley, S. Mueller, E. Lannoye, A. Tuohy, B. Kujala, M. Sommer, H. Holttinen, J. Kiviluoma, S.K. Soonee, "Flexibility in 21st Century Power Systems", 2014.
- [38] R. Doherty, M. O'Malley, "A New Approach to Quantify Reserve Demand in Systems with Significant Installed Wind Capacity," *IEEE Trans. on Power Syst.* 20 (2), 587-595, 2005.
- [39] E. Lannoye, "Flexibility in power systems," Electricity Research Centre, Dublin, Tech. Rep., 2010.

- [40] E. Lannoye, D. Flynn, M. O'Malley, "Evaluation of Power System Flexibility," *IEEE Trans. on Power Syst.* 27 (2), 922-931, 2012.
- [41] North American Electric Reliability Corporation, "Accommodating High Levels of Variable Generation," NERC Integration of Variable Generation Task Force, Princeton, Special Report, 2009.
- [42] Bonneville Power Administration, EPRI and Northwest Power and Conservation Council, "Flexibility Assessment Methods" DRAFT, 2015.
- [43] International Energy Agency, "Grid Integration of Variable Renewables," phase 2, 2011.
- [44] J. Ma, V. Silva, R. Belhomme, D.S. Kirschen, L.F. Ochoa, "Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems," In Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2013.
- [45] Portland General Electric, Integrated Resource Plan: 2012 Integrated Resource Plan Update, 2009.
- [46] E. Lannoye, D. Flynn, M. O'Malley, "Assessment of power system flexibility: A high-level approach," In: Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.
- [47] Electric Power Research Institute "Power System Flexibility Metrics: Framework, Software Tool and Case Study for Considering Power System Flexibility in Planning," EPRI, Palo Alto, CA, 2013.
- [48] S. Müller, "Evaluation of Power System Flexibility Adequacy - The Flexibility Assessment Tool (FAST2)," In Proc. 12th International Wind Integration Workshop, London, 2012.
- [49] M. Schilmoeller, "Imbalance Reserves: Supply, Demand, and Sufficiency," Northwest Power and Conservation Council Report, 2012.
- [50] California Independent System Operator, "Flexible Resource Adequacy Criteria and Must-Offer Obligation.," Tech. Rep, 2014.
- [51] J. Hargreaves, E. K. Hart, R. Jones, A. Olson, "REFLEX: An Adapted Production Simulation Methodology for Flexible Capacity Planning," *IEEE Trans. on Power Syst.* 30 (3), 1306-1315, 2015.
- [52] North American Electric Reliability Corporation "Methods to model and calculate capacity contributions of variable generation for resource adequacy planning," Tech. Report, 2011.
- [53] K. Studarus, R.D. Christie, "A deterministic metric of stochastic operational flexibility," Proc. 2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), Vancouver, BC, 2013.
- [54] C.K. Simoglou, P.N. Biskas, S.I. Vagropoulos, A.G. Bakirtzis, "Electricity market models and RES integration: The Greek case," *Energy Policy* 67, 531-542, 2014.

- [55] Greek IPTO (ADMIE),“10-year Transmission Expansion Planning Study 2018-2027” Tech. Rep. (in Greek) <http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDAS_DSS/MASM/DPA_2018-2027/DPA_2018-2027_Schedio_pros_RAE.pdf> , 2017.