



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

**Συμβολή στην Παροχή Επικουρικών Υπηρεσιών  
από Εικονικό Σταθμό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Μουτής

Αθήνα, Ιανουάριος 2015





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

**Συμβολή στην Παροχή Επικουρικών Υπηρεσιών  
από Εικονικό Σταθμό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Παναγιώτης Μουτής

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Νικόλαος Δ. Χατζηαργυρίου  
Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς  
Σταύρος Α. Παπαθανασίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2015.

.....  
Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

.....  
Ανδρέας Σταφυλοπάτης  
Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

.....  
Αντώνιος Αλεξανδρίδης  
Καθηγητής, ΗΜ&ΤΥ Παν. Πάτρας.

.....  
Τιμολέων Σελλής  
Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Αναπλ. Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

.....  
Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής, ΗΜΜΥ ΕΜΠ.

Αθήνα, Ιανουάριος 2015

.....

Παναγιώτης Μουτής

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

Copyright © Παναγιώτης Μουτής, 2015.

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.

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

## Περίληψη

Η ευρύτατη εξάπλωση της εγκατάστασης μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ) στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) έχει εγείρει ερωτήματα σχετικά με την δυνατότητα περαιτέρω διεύθυνσης των πρώτων στα δεύτερα. Οικονομικοί και τεχνικοί λόγοι θέτουν ήδη περιορισμούς ακόμα και στη λειτουργία των υπαρχουσών εγκαταστάσεων. Πλέον τούτων, η πλήρης απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η υποχώρηση των κινήτρων ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (αποτελούν υπολογίσιμο μέρος της ΔΠ) θέτουν ειδικότερα ζητήματα και συνθετότερες απαιτήσεις προς τους ιδιοκτήτες και χειριστές της ΔΠ. Όλα τα παραπάνω στοιχειοθετούν την ανάγκη θεώρησης μίας οικονομοτεχνικής οντότητας που καλείται Εικονικός Σταθμός Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΕιΣΠ). Ο ΕιΣΠ ενσωματώνει πλήθος μονάδων ΔΠ και φορτίων, τα όποια δεν είναι απαραίτητο να μοιράζονται μεταξύ τους φυσική σύνδεση, με στόχο τη συνολική αξιοποίηση των επιμέρους χαρακτηριστικών τους προς εμπορικούς, τεχνικούς και ρυθμιστικούς (για το ΣΗΕ) λόγους και σκοπούς.

Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται ένα σύνολο μεθόδων προγραμματισμού και υλοποίησης της παροχής επικουρικών υπηρεσιών από έναν ΕιΣΠ, υπό το πρίσμα των κωδίκων και κανονισμών που υφίστανται. Αναλυτικότερα, μελετώνται: η εξασφάλιση εγγυημένης παροχής ισχύος από ΕιΣΠ, η παροχή ρύθμισης συχνότητας από στοχαστικού τύπου μονάδες ΔΠ, η αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας με αποκοπή μέρους της παραγόμενης ισχύος του ΕιΣΠ και η υποστήριξη της ρύθμισης τάσης επί γραμμής διανομής από ΕιΣΠ. Θεωρείται ότι ο εκάστοτε ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ δεν έχει τη δυνατότητα να επηρεάζει το ΣΗΕ κατά οποιονδήποτε τρόπο, ούτε μπορεί να διαθέτει πλήρη γνώση των συνθηκών και της κατάστασης λειτουργίας του. Τέλος, στο Παράρτημα της παρούσης, προτείνεται μεθοδολογία διαχείρισης μεγάλου όγκου καταγραφόμενων δεδομένων και μετρήσεων, τα οποία συλλέγονται από τους συντελεστές του ΕιΣΠ, διότι εξυπηρετούν και αξιολογούν την εκτέλεση/υλοποίηση των επικουρικών υπηρεσιών.

Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα, η εκπλήρωση των επικουρικών υπηρεσιών υποστηρίζει ένα μοντέλο ΕιΣΠ επαρκώς αφαιρετικό, χωρίς προδιαγραφές ή προαπαιτούμενα και με ικανότητα άμεσης ενσωμάτωσής του στα σύγχρονα ΣΗΕ.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αξιοπιστία, διεσπαρμένη παραγωγή, εικονικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επικουρικές υπηρεσίες, ευστάθεια, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.



## Abstract

The widespread deployment of Distributed Generation (DG) in modern Electric Power Systems (EPS) has led to doubts regarding the future of further penetration of the former in the latter. Economical and technical reasons have already been posing limitations, even to the operation of the existing installations. Moreover, due to the complete deregulation of the electricity market and the shrinking or discontinuance of incentives supporting the development of Renewable Energy Sources (RES), the owners and/or operators of DGs have to additionally consider special issues and more complex requirements. Based on the above, an entity of both technical and economical natures has to be considered: the Virtual Power Plant (VPP). A VPP can incorporate a vast number of DG units and loads, which do not necessarily share physical connection among them, in order to fully exploit their individual characteristics and, hence, to serve market, technical and regulatory (as for the EPS) requirements and concerns.

In this thesis, a set of methodologies and architectures for the provision and realization of ancillary services from a VPP has been developed, in scope of the existing grid codes and standards. In detail, the following are discussed: firm power capacity provision by a VPP, frequency control contribution by stochastic DGs, over-frequency mitigation through VPP de-loading and voltage control support of a distribution line by a VPP. It is supposed that the owner/operator of the considered VPP can neither affect the EPS nor rely on access to full information regarding the EPS status and measurements. Lastly, in the Appendix of this thesis, a methodology is proposed for managing big data and measurements logged by the actors of the VPP, since the former are required in order to serve and assess the execution/realization of the ancillary services.

According to the aforementioned points, the VPP fulfills its contribution to ancillary services in a manner adequately abstract, without prerequisites or updates in codes and standards, thus can be readily integrated in modern EPS.

**Keywords:** Ancillary services, distributed generation, electric power systems, reliability, renewable energy sources, stability, virtual power plant.





*Στον Πάνο,*

*στην Αννίτα,*

*στον Αντώνη,*

*στον Μάριο,*

*στον Γιώργο.*



## Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών του υπογράφοντα για την απόκτηση του τίτλου του Διδάκτορα Ηλεκτρολόγου Μηχανικού και Μηχανικού Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι σπουδές ξεκίνησαν τον Νοέμβριο του 2007 και ολοκληρώθηκαν τον Ιανουάριο του 2015. Πραγματοποιήθηκαν υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, στους χώρους του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και κατά τη συμμετοχή του Διδάκτορα στην ομάδα Smartgrids Research Unit ECE NTUA – Smart RUE.

Αγαπητή αναγνώστρια, αγαπητέ αναγνώστη,

Φυλλομέτρησες αυτές τις σελίδες και διαβάζεις τούτες τις γραμμές από καθαρή περιέργεια. Καλά κάνεις και σε ευχαριστώ γι' αυτό. Η περιέργεια είναι το πρώτο σου προσόν για να διερευνήσεις από τις μικρότερες έως τις μεγαλύτερες αλήθειες και να αντιληφθείς έτσι τη θέση σου στον κόσμο, τη ζωή και την εξέλιξη. Πιστεύω ακράδαντα ότι τίποτε δεν είναι σημαντικότερο αυτού.

Τα 7 χρόνια που μου κόστισε η προετοιμασία και η συγγραφή αυτού του έργου γνώρισα ανθρώπους και έζησα καταστάσεις που επηρέασαν σημαντικά τα περιεχόμενα που ακολουθούν. Ίσως όχι εμφανώς – θα πεις, αλλά αρκεί που εγώ ξέρω τούτη την αλήθεια και ως εξ αυτής συντάσσω τις παρακάτω ευχαριστίες. Θα ξεκινήσω από το 2007 λοιπόν, και θα προχωρήσω χρονολογικά.

Πρώτα και πάνω από όλα οφείλω πολλά (κι όχι απλά ευχαριστίες) στον καθηγητή Ν. Χατζηαργυρίου. Ίσως του οφείλω τα πάντα – και το εννοώ. Όταν το 2007 με επέλεγε ως Υποψήφιο Διδάκτορά του (κατόπιν ειδικής προσωπικής του προσπάθειας) αγνοούσε τι αποτελέσματα είχε η ενέργειά του για εμένα και την προσωπικότητά μου. Ακόμα αγνοεί αρκετά από αυτά βέβαια, αλλά ίσως κάποια πράγματα χάνουν την αξία τους αν μαθευτούν. Επί του πρακτέου, η ελευθερία που μου παρείχε για να σκεφτώ, να δράσω, να ερευνήσω και να προβληματιστώ είναι το «όνειρο» κάθε ερευνητή και σίγουρα κάθε υποψήφιου διδάκτορα. Συγκρουστήκαμε πολλάκις επί των θεμάτων της μελέτης μου – με εμένα ηττημένο φυσικά στις περισσότερες περιπτώσεις. Μολαταύτα, δεν έχασε ποτέ τη διάθεσή του να με εκ-παιδεύει ξανά και ξανά και ξανά.

Την τριμελή συμβουλευτική μου επιτροπή, μαζί με τον παραπάνω, συμπλήρωσαν επίσης, ο καθηγητής κ. Κωνσταντίνος Βουρνάς και ο αναπληρωτής καθηγητής κ. Σταύρος Παπαθανασίου. Ο κ. Κ. Βουρνάς αποτελούσε πάντα για εμένα έναν πόλο θαυμασμού, στα όρια του να τον ανάγω στο μυαλό μου σε ευφύια. Δυσκολεύτηκα πολύ να τον πείσω για την αξία μου ως διδάκτορας – ελπίζω να τα κατάφερα. Ο κ. Σ. Παπαθανασίου είναι ένας μοναδικά αφοσιωμένος και εξαιρετικά εργατικός ερευνητής/δάσκαλος. Συχνά τον έβρισκα στο γραφείο του ώρες βαθιά βραδινές, ενώ και μες στα αμφιθέατρα συνιστούσε και συνιστά αξιοζήλευτο παράδειγμα εκπαιδευτικού. Είχαμε μαζί δύο δημοσιεύσεις στις οποίες με καθοδήγησε με ακρίβεια. Και τους δύο προαναφερθέντες καθηγητές τούς ευχαριστώ περισσότερο για τα προσωπικά παραδείγματα που μου έδωσαν. Απέκτησα στόχους να μοιάσω ή, τουλάχιστον, να προσεγγίσω. Ίσως κάποτε να τα καταφέρω...

Από τα παλαιότερα μέλη της SmartRUE οφείλω ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη στους Δρ Ανέστη Αναστασιάδη, Δρ Άρη Δημέα, Ελένη Αυλωνίτου, Ειρήνη Γασπαράκη και Γιώργο Κατσαρό. Σε όσο βαθμό και όποιο αντικείμενο συνεργαστήκαμε έδειξαν τρομερή υπομονή με τη μανία μου και πιστεύω πως τα όποια αποτελέσματα καταφέραμε, κατά περίπτωση, ήταν θετικά. Με μικρότερη συνεργασία μεταξύ μας, αλλά σίγουρα επηρεασμένος από την προσωπικότητα και το έργο του, ευχαριστώ τον Δρ Μανώλη Βουμβουλάκη. Τέλος, αν και έχουμε χαθεί στα γρανάζια της έρευνας και κάποιων ατυχιών, στέλνω τα ευχαριστώ μου στον Μανώλη Λουκαράκη όπου κι αν αυτός βρίσκεται τώρα.

Στην πρώτη στροφή των σπουδών μου προς το διδακτικό έργο αποφάσισα ένα τολμηρό πλάνο επίβλεψης διπλωματικών εργασιών, το οποίο όμως απέδωσε καρπούς και – θέλω να πιστεύω – προσέφερε γνώσεις στους πλέον διπλωματούχους Ελένη Παυλίδου, Μαρία Αντώνη, Θανάση Ξανθόπουλο, Μαρίνα Κατσαμπάνη, Στρατή Ταξειδίδη, Αναστασία Σαμπάνη και Ηλία Σαραντάκο. Ως βοηθός σε μαθήματα, είχα τη χαρά να γνωρίσω και άλλους πολλούς (πάρα πολλούς) φοιτητές της σχολής, οι οποίοι με έκαναν χαρούμενο με τις ερχόμενες γενιές ηλεκτρολόγων μηχανικών του τομέα της ενέργειας. Λένια, Κατερίνα, Θεοδωρή, Κέλλυ, Μαριάννα, Γιώργο, Ιάσων, Ελίνα και τόσοι άλλοι που δε θα χωρούσαν όλες οι σελίδες της διατριβής μου για να σας αναφέρω, σας ευχαριστώ που βελτιώσατε τη μεταδοτικότητά μου και δοκιμάσατε τις γνώσεις μου.

Ταυτόχρονα με τις σπουδές μου επέλεξα να εργαστώ ως μηχανικός από διάφορα πόστα κυρίως τεχνικής υποστήριξης έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Από το γραφείο στο πατάρι στη Μιαούλη, έως το κέντρο δοκιμών στο Bielefeld και από εκεί πίσω στα πλημμυρισμένα φωτοβολταϊκά πάρκα και στις σχεδιαστικές πλατφόρμες του υπολογιστή μου, τίποτε άλλο δε με έπεισε για την ανάγκη απλών αλλά τυπικών και στοχευμένων λύσεων/εφαρμογών. Προς αυτό οφείλω μια αναφορά στους Δημήτρη Κανελλόπουλο, Λάμπη Μιχαλόπουλο, Κώστα Κάραλη, Χρήστο Γαντζούλα, Μιχάλη Πρίντζο, Γιώργο Παπαγιαννόπουλο, Μιχάλη Αντωνιάδη, Κώστα Μελέτη και Τηλέμαχο Τσάτσο.

Στην ιδιαίτερα τιμητική θέση του Research Fellow στο Πανεπιστήμιο του Greenwich με υποδέχτηκε ο εκπληκτικής αναλυτικής σκέψης Δρ Σπύρος Σκαρβέλης-Καζάκος, ενώ μαζί με την αξιαγάπητη Δρ Στέλλα-Καλή Ζωάννου με κάνανε να νιώθω σα στο σπίτι μου για επτά ολόκληρους μήνες. Για τη φιλία μου με τη Δρ Maria Brucoli στο ίδιο ερευνητικό πρόγραμμα θα μπορούσα να πω πολλά, αλλά δυστυχώς δε θα μπορέσει να τα διαβάσει στα ελληνικά.

Ανάμεσα στους καθηγητές που με στήριξαν στην προσπάθειά μου οφείλω ειδική μνεία κατ' αρχάς στον κ. Γιώργο Κορρέ και κατά δεύτερον στον κ. Παύλο Γεωργιλάκη. Και στους δύο χρωστώ τη συνεργασία μου σε κάποια ερευνητική προσπάθεια, μιας και οι δύο με έχουν γοητεύσει με τις γνώσεις στα αντικείμενά τους. Στην πενταμελή επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης του ερευνητικού μου έργου είχα την τύχη να υποδεχτώ τον καθηγητή κ. Αντώνιο Αλεξανδρίδη από το Πανεπιστήμιο της Πάτρας. Νομίζω πως η ματιά του στην εργασία μου ήταν παρόμοια με τα όσα έχω εγώ σκεφτεί για τον τρόπο και τη φιλοσοφία με την οποία την ανέπτυξα, εξ ου και με τίμησε με σχόλια που – ειλικρινά – δεν είχα ακούσει από εξωτερικό (του Ιδρύματος) εξεταστή. Στον καθηγητή κ. Ανδρέα Σταφυλοπάτη οφείλω ευχαριστίες ήδη από τα προπτυχιακά μου χρόνια, οπότε και μου εμφύσησε με ιδιαίτερη επιτυχία την αγάπη για τον προγραμματισμό όσο δύσκολη, σύνθετη και κοπιώδης δουλειά και αν αυτή είναι για τον πυρήνα της ιδέας που κάθε φορά θέλουμε να υλοποιήσουμε. Η συμμετοχή του στην πενταμελή επιτροπή ήταν μεγάλη μου χαρά. Η επταμελής της τελικής μου εξέτασης συμπληρώθηκε από τους καθηγητές κύριο Τιμολέων Σελλή και κύριο Ευάγγελο Διαλυνά. Ξεκινώντας από τον δεύτερο, οφείλω να παραδεχτώ ότι μου έκανε το δυσκολότερο και βαθύτερο μάθημα σχετικά με την αξία της συνεργασίας, ενώ τα σχόλιά του επί της διατριβής μου βοήθησαν σημαντικά για τη βελτίωση της ποιότητας και της παρουσίας του κειμένου. Τέλος, για τον κ. Σελλή δυσκολεύομαι στα λόγια – θα περιοριστώ να πω στο ότι ο θαυμασμός μου για τις γνώσεις και το ερευνητικό του έργο ήταν η αιτία να είναι ο μοναδικός της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τον οποίο φοβόμουν τις ερωτήσεις και παρατηρήσεις του. Αξιότιμοι κύριοι καθηγητές, αν διαβάσετε αυτές τις γραμμές, ελπίζω να άξιζα τουλάχιστον τον χρόνο σας.

Επί προσωπικού, θα ξεκινήσω εκ νέου από το 2007 και θα έρθω ως το σήμερα. Δήμητρα και Άγγελε, σας ευχαριστώ για ό,τι φέρατε στη ζωή μου και σαν άνθρωποι και σα φίλοι. Πιστεύω ότι αξίζετε πολλά και σπουδαία. Νίκο και Έλενα τίποτα δεν ανταλλάζεται με τις ώρες που περνάμε μαζί, όποιες και αν είναι οι συνθήκες. Ηλία μου δεν ξέρω αν και τι μεγαλύτερο θα μπορούσες να κάνεις υπό καλύτερες συνθήκες – πιστεύω πολύ σε εσένα, σίγουρα όμως η ηρεμία σου, όσο απλοϊκή και αν μοιάζει σε κάποιους, εμένα με βοήθησε πολύ. Χρήστο και Νατάσσα, όσο περίεργος και αν μου φαίνεται ο τρόπος σας, σας διαβεβαιώνω ότι με επηρεάζει – πάντα θετικά – και δυσκολεύομαι να σκεφτώ πόσες φορές θα μπορούσα να είχα δράσει εις βάρος μου, αν δεν ήσασταν εσείς. Λεωνίδα, θαυμάζω την αστείρευτη τόλμη σου και σε ευχαριστώ που με έφερες κοντά σου ως φίλο για να μου δίνεις πού και πού ψήγματα των απίστευτων εμπειριών σου. Κωνσταντίνε μου, ήσουν, είσαι και θα είσαι ερέθισμά μου για τις οινικές μου περιπέτειες και μια από τις ευγενέστερες ψυχές που γνωρίζω. Vasra Dikon, οι προσωπικές σου μουσικές δημιουργίες, αλλά και παροτρύνσεις προς μουσικές άλλων, με συντρόφευσαν σε πολύ δύσκολες μέρες και νύχτες.

Χριστίνα μου, η υπομονή σου, η πίστη σου, η επιμονή σου, η αντοχή σου, η τρέλα σου, η γλυκύτητά σου, η παρέα σου, η αγάπη σου, η παρουσία σου, τα ίσια και τα ανάποδά σου είναι όλα μαζί και καθένα ξεχωριστά ό,τι χρειαζόμουν από τον άνθρωπό μου σε όλα όσα με είδες να προσπαθώ.

Ομάδα SmartRUE, με όλους μαζί και με κάθε έναν ξεχωριστά, από το 2007 που σας γνώρισα και ως σήμερα τελευταίες μέρες του Γενάρη του 2015, μπορώ να θυμάμαι και από κάτι διαφορετικό που έχουμε μοιραστεί. Δουλειά, πίεση, άγχος, ανησυχία, δυσκολίες, επιτυχίες, χαρές, γιορτές. Αποτελέσατε το δεύτερο σπίτι μου – σχεδόν κυριολεκτικά – και επηρεάσατε σε τρομερό βάθος ό,τι έγινα ως ερευνητής και ως εργαζόμενος μέσα στα πλαίσια μιας δημιουργικής ομάδας.

Κλείνοντας, οφείλω να αναφερθώ στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Στην κοιτίδα αυτή γνώσης, έρευνας και πληροφορίας που ως κομμάτι της Παιδείας σε δύσκολους καιρούς για την Ελλάδα, δέχθηκε πολλαπλό και ανελέητο σφυροκόπημα. Αν προσδοκώ επειγόντως και με ιδιαίτερη ανησυχία τουλάχιστον μία σπουδαία αλλαγή όσο αφορά την εγχώρια Ανώτατη Παιδεία, αυτή είναι η αναμόρφωση, θωράκιση και η εκ νέου ενεργοποίηση του ασύλου ιδεών. Τίποτα δεν είναι σπουδαιότερο από την παροχή της βεβαιότητας στον ερευνητή ότι μπορεί (όπως και πρέπει) να μελετά και ερευνά απρόσκοπτα μέσα σε μια νησίδα καλπάζοντα πολιτισμού και ανεξέλεγκτης γνώσης που επιτρέπει την απόλυτη αμφισβήτηση προς χάριν της απόλυτης αλήθειας.

Τα δέοντα,  
Π.



## Πίνακας περιεχομένων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1	Η εξέλιξη της διεσπαρμένης παραγωγής ως προς τον ρόλο της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας .....	1
1.2	Ορισμοί και σύντομη ερευνητική αναδρομή.....	3
1.2.1	<i>Διεσπαρμένη παραγωγή .....</i>	<i>3</i>
1.2.2	<i>Επικουρικές υπηρεσίες.....</i>	<i>4</i>
1.2.3	<i>Εικονικός σταθμός παραγωγής.....</i>	<i>5</i>
1.3	Στόχος-σκοπός εργασίας.....	9
1.4	Οργάνωση κειμένου .....	10
1.5	Βιβλιογραφία.....	11
1.6	Προβληματική.....	15
<b>2</b>	<b>Παροχή εγγυημένης ενεργού ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας .....</b>	<b>17</b>
2.1	Στοχαστικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας – Ανασκόπηση .....	17
2.2	Ιδέα αντιμετώπισης της στοχαστικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπό την οργάνωση εικονικού σταθμού παραγωγής .....	19
2.3	Δέντρα αποφάσεων .....	20
2.4	Εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος σε εικονικό σταθμό παραγωγής με δέντρα αποφάσεων .....	22
2.4.1	<i>Απώλεια ισχύος.....</i>	<i>23</i>
2.4.2	<i>Στάδια αναδιανομής απώλειας ισχύος στον εικονικό σταθμό παραγωγής.....</i>	<i>23</i>
2.4.3	<i>Μέθοδος εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος σε εικονικό σταθμό παραγωγής με δέντρα αποφάσεων.....</i>	<i>25</i>
2.5	Εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ικαρίας .....	31
2.5.1	<i>Δοκιμή μεθόδου με μικρό εικονικό σταθμό παραγωγής .....</i>	<i>31</i>
2.5.2	<i>Δοκιμή μεθόδου με μεγάλο εικονικό σταθμό παραγωγής .....</i>	<i>39</i>
2.6	Απαιτούμενα μεγέθη συνόλων μάθησης και χρόνοι εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου .....	47
2.7	Σχολιασμός της μεθοδολογίας αναδιανομής απώλειας ισχύος σε εικονικό σταθμό παραγωγής μέσω δέντρων απόφασης.....	49
2.7.1	<i>Αποτελεσματικότητα και γενίκευση μεθοδολογίας.....</i>	<i>49</i>
2.7.2	<i>Αδυναμία επέκτασης χρονικού ορίζοντα μεθόδου .....</i>	<i>52</i>

2.7.3	<i>Εκτέλεση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων προγραμματισμών κάλυψης απώλειας ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής.....</i>	55
2.8	Συμπεράσματα .....	56
2.9	Βιβλιογραφία.....	57
2.10	Προβληματική.....	61
<b>3</b>	<b>Εξασφάλιση εφεδρείας και ρύθμιση συχνότητας από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....</b>	<b>63</b>
3.1	Ορισμοί .....	64
3.1.1	<i>Ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>64</i>
3.1.2	<i>Μέγιστη απομάστευση ισχύος από στοχαστικές ΑΠΕ.....</i>	<i>65</i>
3.2	Συμμετοχή ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών μεταβλητού βήματος στη ρύθμιση συχνότητας κατόπιν αποφόρτισης .....	71
3.2.1	<i>Ανασκόπηση μεθόδων συμμετοχής ανεμογεννητριών στη ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>72</i>
3.2.2	<i>Βελτιωμένες μέθοδοι αποφόρτισης και συμμετοχής ανεμογεννήτριας στη ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>77</i>
3.2.3	<i>Προσομοιώσεις, αποτελέσματα και σχολιασμός τους.....</i>	<i>81</i>
3.2.4	<i>Σύνοψη και εφαρμογές των μεθόδων σε πραγματικές εγκαταστάσεις.....</i>	<i>89</i>
3.3	Συμμετοχή φωτοβολταϊκού συστήματος στη ρύθμιση συχνότητας κατόπιν αποφόρτισης.....	91
3.3.1	<i>Ανασκόπηση μεθόδων συμμετοχής φωτοβολταϊκών συστημάτων στη ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>92</i>
3.3.2	<i>Βελτιωμένη μέθοδος αποφόρτισης και συμμετοχής φωτοβολταϊκού συστήματος στη ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>93</i>
3.3.3	<i>Προσομοιώσεις, αποτελέσματα και σχολιασμός τους.....</i>	<i>96</i>
3.3.4	<i>Σύνοψη και δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε πραγματικές εγκαταστάσεις....</i>	<i>99</i>
3.4	Συμπεράσματα .....	106
3.5	Βιβλιογραφία.....	107
3.6	Προβληματική.....	112
<b>4</b>	<b>Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας από εικονικό σταθμό παραγωγής με αποκοπή ενεργού ισχύος .....</b>	<b>113</b>
4.1	Τα στάδια ρύθμισης συχνότητας και το πρόβλημα της υπερσυχνότητας .....	114
4.1.1	<i>Πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρυθμίσεις συχνότητας και εφεδρείες.....</i>	<i>114</i>
4.1.2	<i>Εμφάνιση υπερσυχνότητας σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας .....</i>	<i>115</i>
4.2	Ανασκόπηση μεθόδων αντιμετώπισης υπερσυχνότητας.....	115
4.2.1	<i>Προδιαγραφές κωδίκων δικτύων Ευρώπης για την εξασφάλιση κάτω εφεδρείας ..</i>	<i>116</i>
4.2.2	<i>Ερευνητική προσέγγιση της κάτω εφεδρείας .....</i>	<i>119</i>



4.3	Ιδέα αντιμετώπισης της υπερσυχνότητας από εικονικό σταθμό παραγωγής .....	120
4.4	Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας μέσω αποκοπής ισχύος εικονικού σταθμού παραγωγής με δέντρα αποφάσεων .....	122
4.4.1	<i>Αποκοπή ισχύος</i> .....	122
4.4.2	<i>Μέθοδος προγραμματισμού αποκοπής ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής με δέντρα αποφάσεων</i> .....	122
4.5	Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας μέσω αποκοπής ισχύος εικονικού σταθμού παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ικαρίας .....	125
4.5.1	<i>Δοκιμή μεθόδου με μικρό εικονικό σταθμό παραγωγής</i> .....	125
4.5.2	<i>Δοκιμή μεθόδου με μεγάλο εικονικό σταθμό παραγωγής</i> .....	131
4.6	Απαιτούμενα μεγέθη συνόλων μάθησης και χρόνοι εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου .....	136
4.7	Σχολιασμός της μεθοδολογίας αναδιανομής απώλειας ισχύος σε εικονικό σταθμό παραγωγής μέσω δέντρων απόφασης.....	137
4.7.1	<i>Αξιολόγηση μεθοδολογίας μέσω σφάλματος αποτυχημένων ταξινομήσεων</i> .....	137
4.7.2	<i>Αξιολόγηση μεθοδολογίας μέσω σφάλματος δεκαπλής διασταύρωσης επί του συνόλου μάθησης</i> .....	140
4.8	Συμπεράσματα .....	143
4.9	Βιβλιογραφία.....	144
4.10	Προβληματική.....	148
<b>5</b>	<b>Υποστήριξη της ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας</b> .....	<b>149</b>
5.1	Το πρόβλημα της τάσης στην παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας .....	150
5.1.1	<i>Ρύθμιση τάσης κατά τις κλασικές μεθόδους</i> .....	150
5.1.2	<i>Ρύθμιση τάσης στα εξυπνότερα δίκτυα</i> .....	152
5.1.3	<i>Σχολιασμός υπαρχουσών μεθόδων ρύθμιση τάσης</i> .....	155
5.2	Τα ρεύματα ζυγών ως βάρη κατά μήκος γραμμής διανομής.....	156
5.3	Μέθοδος υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας σε γραμμή διανομής με αντιστάθμιση βαρύκεντρων ρευμάτων.....	157
5.3.1	<i>Ιδέα της μεθόδου</i> .....	157
5.3.2	<i>Καθορισμός βασικού κορμού γραμμής διανομής προς ρύθμιση τάσης</i> .....	158
5.3.3	<i>Αναλυτική υλοποίηση μεθόδου υποστήριξης ρύθμισης τάσης</i> .....	158
5.3.4	<i>Χαρακτηριστικά της μεθόδου</i> .....	162
5.4	Υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας σε γραμμή διανομής της Ρόδου .....	162
5.4.1	<i>Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 300kW</i> .....	164
5.4.2	<i>Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 350kW</i> .....	167

5.4.3	<i>Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 400kW.....</i>	<i>169</i>
5.4.4	<i>Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 450kW.....</i>	<i>172</i>
5.4.5	<i>Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 500kW.....</i>	<i>174</i>
5.4.6	<i>Σχολιασμός επιρροής του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής στην υποστήριξη ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής.....</i>	<i>177</i>
5.5	Προϋποθέσεις και περιορισμοί εφαρμογής της μεθόδου υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής.....	179
5.6	Συμπεράσματα .....	181
5.7	Βιβλιογραφία.....	182
<b>6</b>	<b>Επίλογος.....</b>	<b>185</b>
6.1	Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια σχετικές των προτεινόμενων μεθόδων στην παρούσα διατριβή.....	186
6.2	Συμβολή της εργασίας.....	187
6.3	Μελλοντικές προεκτάσεις .....	189
	<b>Παράρτημα.....</b>	<b>191</b>
A	Χρήση τεχνικών σύνοψης χρονοσειράς σε μετρήσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας .....	191
A.1	<i>Ερωτήματα σχετιζόμενα με δεδομένα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας .....</i>	<i>192</i>
A.2	<i>Τεχνικές σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων.....</i>	<i>193</i>
A.3	<i>Παραδείγματα σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων για ερωτήματα προς συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....</i>	<i>198</i>
A.4	<i>Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων και της μεθοδολογίας .....</i>	<i>205</i>
A.5	<i>Συμπεράσματα .....</i>	<i>206</i>
A.6	<i>Βιβλιογραφία .....</i>	<i>207</i>
B	Παράλληλη και κατανεμημένη παραγωγή συνόλου μάθησης δέντρου απόφασης.....	209
B.1	<i>Οι προσχεδιασμένες κοινότητες ως ηλεκτρική οντότητα εφαρμογής προσεγγίσεων διαχείρισης κατά το πρότυπο του μικροδικτύου .....</i>	<i>209</i>
B.2	<i>Αντιμετώπιση διαταραχών ενεργού ισχύος σε προσχεδιασμένες κοινότητες με προετοιμασία προγραμμάτων κάλυψής τους από δέντρα απόφασης.....</i>	<i>212</i>
B.3	<i>Δοκιμή μεθόδου για συμβάν νησιδοποίησης προσχεδιασμένης κοινότητας.....</i>	<i>213</i>
B.4	<i>Τοπολογία υλοποίησης μεθόδου αντιμετώπισης διαταραχών ενεργού ισχύος σε προσχεδιασμένες κοινότητες με δέντρα απόφασης και απόδοση της μεθόδου.....</i>	<i>214</i>
B.5	<i>Βιβλιογραφία .....</i>	<i>216</i>
Γ	Δίκτυο διανομής R-22 του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας Ικαρίας .....	217
Δ	Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για δοκιμή αποφόρτισης και ρύθμισης συχνότητας από ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών μεταβλητού βήματος... ..	225

E	Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για δοκιμή αποφόρτισης και ρύθμισης συχνότητας από φωτοβολταϊκό σύστημα.....	227
ΣΤ	Δίκτυο διανομής R-26 του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας Ρόδου.....	229

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Η θέση των μικροκυψελών καυσίμου όπως σχεδιάστηκαν στο ερευνητικό έργο EUVFCPP [42].

Σχήμα 1.2. Η ιδέα των κυψελών ΣΗΕ (αριστερά) και του Μεγάλης Κλίμακας ΕιΣΠ (δεξιά) σύμφωνα με το ερευνητικό έργο CRISP [44].

Σχήμα 1.3. Πιλοτικός ΕιΣΠ μεταξύ τριών απομακρυσμένων τοποθεσιών της Αττικής-Ελλάδα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EUDEEP [45].

Σχήμα 1.4. Η ιδέα του εμπορικού ΕιΣΠ και της συμμετοχής του στις αγορές όπως αναπτύχθηκε στο ερευνητικό έργο FENIX [47].

Σχήμα 1.5. Είσοδος πληροφοριών και έξοδος παραμέτρων ρύθμισης στον θεωρούμενο ΕιΣΠ κατά τη μελέτη του CCP [48].

Σχήμα 2.1. Παράδειγμα ΔΑ πολυπαραγοντικών κριτηρίων διαχωρισμού και τριών καταστάσεων ταξινόμησης.

Σχήμα 2.2. Παράδειγμα ΔΑ μονοκριτηριακού διαχωρισμού και δυαδικής ταξινόμησης (Αποδεκτό-Μη Αποδεκτό).

Σχήμα 2.3. Διάκριση μεταξύ δυνητικής έγχυσης ισχύος και απώλειας έγχυσης ισχύος πηγής ΔΠ για το πρόβλημα της εγγυημένης ισχύος ΕιΣΠ.

Σχήμα 2.4. Τμήμα του ΣΜ προς εκπαίδευση ΔΑ για εξαγωγή προγραμματισμού κάλυψης απώλειας σε ΕιΣΠ 10 συντελεστών (9 πηγές και διακοπτόμενο φορτίο υπό DSM) με θεωρούμενη απώλεια έγχυσης αυτή της ισχύος  $P_1$ .

Σχήμα 2.5. Ενδιάμεσο στάδιο ανάπτυξης ΔΑ για εξαγωγή προγραμματισμού μακροπρόθεσμης κάλυψης απώλειας ισχύος προς ερμηνεία του 2.4.3.3.(δ).

Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος από ΕιΣΠ, μέσω αναδιανομής απώλειας έγχυσης ισχύος από μονάδα του ΕιΣΠ σε δύο στάδια με χρήση ΔΑ.

Σχήμα 2.7. Γεωγραφική αναπαράσταση ροής της διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας (κόκκινη γραμμή δεξιά) και μονογραμμική ισοδύναμη αναπαράσταση του κύριου μέρους της (αριστερά).

Σχήμα 2.8. ΔΑ βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού κάλυψης απώλειας ισχύος για εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από τον μικρό ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης.

Σχήμα 2.9. ΔΑ μακροπρόθεσμου προγραμματισμού κάλυψης απώλειας ισχύος για εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από τον μικρό ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης και επίπεδο οικονομικότητας άνω 25%.

Σχήμα 2.10. Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου εκφρασμένη σε ανά μονάδα ισχύ επί της αιχμής.

Σχήμα 3.1. Τυπική καμπύλη στατισμού γεννήτριας εκφρασμένη σε ανά μονάδα ισχύ επί της ονομαστικής της γεννήτριας.

Σχήμα 3.2. Η διαταραχή φορτίου-συχνότητας για απώλεια γεννήτριας ή αύξηση του φορτίου και η αποκατάστασή της σύμφωνα με τη σχετική ρύθμιση.

Σχήμα 3.3. Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει του  $\lambda$  και με παράμετρο τη γωνία έλικας  $\beta$ .

Σχήμα 3.4. Γενικό διάγραμμα ελέγχου Α/Γ.

Σχήμα 3.5. Ισοδύναμο κύκλωμα  $\Phi/B$  στοιχείου  $n_s \cdot n_p$  κυψελών.

Σχήμα 3.6. Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσεως-ρεύματος-ισχύος  $\Phi/B$  πλαισίου ονομαστικής ισχύος 215Wp με παραμέτρους ( $\alpha$ ) τη φωτεινή ακτινοβολία και ( $\beta$ ) τη θερμοκρασία.

Σχήμα 3.7. Οι δύο πιο κοινές τοπολογίες Α/Γ οριζόντιου άξονα.

Σχήμα 3.8. Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου ψευδοαδρανειακής απόκρισης από Α/Γ.

Σχήμα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου αποφόρτισης Α/Γ και συμμετοχής της στη ΡΣ.

Σχήμα 3.10. Εναλλακτικά σημεία λειτουργίας Α/Γ υπό αποφόρτιση (over/under-speeding = με υπερ/υπο-τάχυνση δρομέα, pitching = με χρήση γωνίας έλικας  $\beta$ ).

Σχήμα 3.11. Γενικευμένο σχήμα ελέγχου αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας  $\beta$ .

Σχήμα 3.12. Σχήμα ελέγχου υβριδικής αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα.

Σχήμα 3.13. Χαρακτηριστική  $P-U_w$  Α/Γ υπό 10% αποφόρτιση κατά τη μέθοδο υβριδικής με υπερτάχυνση δρομέα.

Σχήμα 3.14. Δεύτερος πίνακας τιμών μεθόδου υβριδικής αποφόρτισης με υπερτάχυνση δρομέα Α/Γ.

Σχήμα 3.15. Χαρακτηριστική  $P-\Omega$  για εξήγηση της ισορροπίας του μηχανικού μέρους Α/Γ υπό συνδυασμένη αποφόρτιση μέσω γωνίας  $\beta$ .

Σχήμα 3.16. Σχήμα ελέγχου συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας  $\beta$  με ψευδοαδρανειακή απόκριση.

Σχήμα 3.17. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ.

Σχήμα 3.18. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους ψευδοαδρανειακής απόκρισης Α/Γ υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.19. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους ψευδοαδρανειακής απόκρισης Α/Γ υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.20. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.21. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.22. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης υβριδικής αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα και [28] υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.23. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης υβριδικής αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα και [27] υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.24. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.25. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.26. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης και της [23] υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.27. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης και της [23] υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Σχήμα 3.28. Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου για την περίπτωση μελέτης της συμπεριφοράς της Α/Γ υπό μεταβολές ανέμου.

Σχήμα 3.29. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.

Σχήμα 3.30. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.

Σχήμα 3.31. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος ανταλλασσόμενης εκ του δρομέα της Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.

Σχήμα 3.32. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό μεταβολές ανέμου.

Σχήμα 3.33. Αλγόριθμος διανομής σήματος συμμετοχής στη ΡΣ για τις Α/Γ αιολικού πάρκου σύμφωνα με το σύστημα ελέγχου της Vestas κατά τη δοκιμή στο ΣΗΕ της Κρήτης.

Σχήμα 3.34. Χρονοσειρά συχνότητας ΣΗΕ Κρήτης (εκ του σχετικού SCADA) κατά τη διαταραχή της 01/01/2012.

Σχήμα 3.35. Απόκριση ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου Βρούχα στο ΣΗΕ Κρήτης (εκ του SCADA του πάρκου) κατά τη διαταραχή της 01/01/2012.

Σχήμα 3.36. Τυπική ηλεκτρική συνδεσμολογία Φ/Β πλαισίων προς Α/Σ σε στοιχειοσειρές.

Σχήμα 3.37. Τοπολογία προτεινόμενου ελέγχου αποφόρτισης και συμμετοχής στη ΡΣ από Φ/Β σύστημα με τηλεχειριζόμενους διακόπτες συνεχούς ρεύματος επί των στοιχειοσειρών των Φ/Β Α/Σ.

Σχήμα 3.38. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και ΡΣ από Φ/Β σύστημα με εφαρμογή τηλεχειριζόμενων διακοπών στις στοιχειοσειρές των Φ/Β πλαισίων προς τους Α/Σ.

Σχήμα 3.39. Παράδειγμα μεταβολής καταστάσεων αγωγής/διακοπής διακοπών στον πίνακα *Status of Switches* για την προτεινόμενη μέθοδο – θεωρείται ότι κάθε στοιχειοσειρά έχει εκτιμώμενη ισχύ  $P_{string}=7kW$  και οι αλλαγές από βήμα σε βήμα είναι ακαριαίες.

Σχήμα 3.40. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και συμμετοχής Φ/Β συστήματος στη ΡΣ.

Σχήμα 3.41. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου υπό την προτεινόμενη μέθοδο αποφόρτισης Φ/Β συστήματος και συμμετοχής του στη ΡΣ.

Σχήμα 3.42. Απόκριση ισχύος εξόδου Φ/Β πάρκου 100kWp σε βηματική μεταβολή φορτίου υπό την προτεινόμενη μέθοδο αποφόρτισης Φ/Β συστήματος και συμμετοχής του στη ΡΣ.

Σχήμα 3.43. Χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας επί Φ/Β συστήματος αποφορτισμένο κατά την προτεινόμενη μέθοδο.

Σχήμα 3.44. Απόκριση ισχύων εξόδου και εκτιμώμενου περιθωρίου Φ/Β συστήματος, αποφορτισμένου κατά την προτεινόμενη μέθοδο, υπό μεταβολές φωτεινής ακτινοβολίας.

Σχήμα 3.45. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD για δοκιμή άμεσης σύνδεσης στοιχειοσειράς.

Σχήμα 3.46. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD για δοκιμή σύνδεσης στοιχειοσειράς από κατάσταση σβέσης του κυκλώματος MPPT.

Σχήμα 3.47. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 για δοκιμή άμεσης σύνδεσης στοιχειοσειράς.

Σχήμα 3.48. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 για δοκιμή σύνδεσης στοιχειοσειράς κατόπιν μεγάλου χρόνου σε αποσύνδεση.

Σχήμα 3.49. Τάση ακροδεκτών και ρεύμα διαμέσου ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς κατά τον οπλισμό του προς αγωγή ρεύματος στοιχειοσειράς Φ/Β.

Σχήμα 3.50. Τάση ακροδεκτών και ρεύμα διαμέσου ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς κατά την ηρέμησή του προς διακοπή ρεύματος στοιχειοσειράς Φ/Β.

Σχήμα 4.1. Φάσεις απόκρισης μονάδας ή ΣΗΕ στη ΡΣ κατόπιν αύξησης φορτίου ή απώλειας παραγωγής.

Σχήμα 4.2. Νησιδοποίηση του ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου ΣΗΕ κατά τη διαταραχή της 4<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2006 και κατάσταση συχνότητας των νησίδων [1].

Σχήμα 4.3. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου αντιμετώπισης υπερσυχνότητας από ΕιΣΠ, μέσω αποφόρτισης του κατά ζητούμενο ποσό ισχύος με χρήση ΔΑ.

Σχήμα 4.4. Υπολογισμένα  $m_r$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μικρό ΕιΣΠ.

Σχήμα 4.5. Υπολογισμένα  $m_r$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Σχήμα 4.6. Υπολογισμένα  $10f_{CV}$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μικρό ΕιΣΠ.

Σχήμα 4.7. Υπολογισμένα  $10f_{CV}$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Σχήμα 5.1. Παράδειγμα γραμμής διανομής συνδεδεμένη στο δίκτυο μεταφοράς μέσω γραμμής και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και δύο πιθανές θέσεις τοπικής αντιστάθμισης πτώσης τάσης C1 και C2.

Σχήμα 5.2. Καμπύλη ικανότητας μεταφοράς ενεργού ισχύος γραμμής προς τάση ζυγού άφιξης της με παράμετρο την αντισταθμίζουσα άεργο ισχύ στον ζυγό άφιξης.

Σχήμα 5.3. Υπολογισμός ρεύματος ζυγού  $k$  από τις τάσεις του ίδιου και των γειτονικών του ζυγών.

Σχήμα 5.4. Αναπαράσταση απορροφόμενων ρευμάτων ζυγών κατά μήκος γραμμής διανομής 175 ζυγών.

Σχήμα 5.5. Αναπαράσταση ιδέας αντιστάθμισης βαρύκεντρων εγχεόμενων/απορροφόμενων ρευμάτων (α) αρχική κατανομή ισχύος, (β) μείωση ισχύος πηγής ζυγού 128 και φόρτιση πηγών στους ζυγούς 88 και 89.

Σχήμα 5.6. Οι δύο πιθανές τοπολογίες (α) και (β) των βαρύκεντρων ρευμάτων για περίπτωση μειωμένης τάσης γραμμής διανομής και οι διευθύνσεις προτεραιότητας των  $Ls^-$  και  $Ls^+$ .

Σχήμα 5.7. Αναπροσαρμογή θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής για  $g_G > g_L$ .

Σχήμα 5.8. Αναπροσαρμογή θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής για  $g_G < g_L$ .

Σχήμα 5.9. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου υποστήριξης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ, με αντιστάθμιση βαρύκεντρων ρεύματος μέσω αναδιανομής/διανομής ισχύος του.

Σχήμα 5.10. Μονογραμμική ισοδύναμη αναπαράσταση του κύριου μέρους της γραμμής διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας.

Σχήμα Π.Α.1. Σχηματικό Παράδειγμα του Μετασχηματισμού Haar.

Σχήμα Π.Α.2. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της αιχμής φορτίου ημέρας σε ΣΗΕ.

Σχήμα Π.Α.3. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης επιλογής των Άνω-k συντελεστών του HT υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της αιχμής φορτίου ημέρας σε ΣΗΕ.

Σχήμα Π.Α.4. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_2$  χρονοσειρών για το ερώτημα του ημερήσιου κόστους ενέργειας σε ΣΗΕ.

Σχήμα Π.Α.5. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της άπληστης τεχνικής σύνοψης υπό τη μετρική  $L_2$  χρονοσειρών για το ερώτημα του ημερήσιου κόστους ενέργειας σε ΣΗΕ.

Σχήμα Π.Α.6. Κύκλωμα Μ/Σ ισχύος κατά το  $\pi$ -ισοδύναμο.

Σχήμα Π.Α.7. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της θέσης λήψης σε Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.



Σχήμα Π.Α.8. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ υπό τη μετρική  $L_{\infty}$  χρονοσειρών για το ερώτημα της θέσης λήψης σε Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.

Σχήμα Π.Α.9. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής των τεχνικών σύνοψης Garofalakis-Kumar και επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ υπό τη μετρική  $L_{\infty}$  χρονοσειρών για το ερώτημα της κατάστασης αγωγής διακόπτη ισχύος.

Σχήμα Π.Β.1. Ενδεικτική τοπολογία ΠΚ.

Σχήμα Π.Β.2. Μονογραμμικό ηλεκτρικό διάγραμμα της εγκατάστασης ΠΚ που εξετάστηκε όσο αφορά τα ηλεκτρικά της μεγέθη σε παρόντα και προβλεπόμενα σενάρια φόρτισης και ανάπτυξης.

Σχήμα Π.Γ.1. Γεωγραφική αναπαράσταση του ΣΗΕ Ικαρίας.

Σχήμα Π.Γ.2. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Α'.

Σχήμα Π.Γ.3. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Β'.

Σχήμα Π.Γ.4. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Γ'.

Σχήμα Π.Γ.5. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Δ'.

Σχήμα Π.Δ.1. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ.

Σχήμα Π.Δ.2. Μοντέλο μηχανικού μέρους γεννήτριας diesel κατά την [3].

Σχήμα Π.Ε.1. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και συμμετοχής Φ/Β συστήματος στη ΡΣ.

Σχήμα Π.ΣΤ.1. Γεωγραφική αναπαράσταση σε μονογραμμικό σχέδιο του ΣΗΕ Ρόδου.

Σχήμα Π.ΣΤ.2. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Α'.

Σχήμα Π.ΣΤ.3. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Β'.

Σχήμα Π.ΣΤ.4. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Γ'.

Σχήμα Π.ΣΤ.5. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Δ'.

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1. Κανόνες εξαγόμενοι από τα ΔΑ των Σχημάτων 2.1 και 2.2.

Πίνακας 2.2. Ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς, ωριαίος προγραμματισμός ισχύος, εφεδρείας και διαθεσίμων για τους συντελεστές ενός ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.3. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς, συνάρτηση κόστους και χρόνος εκκίνησης για τους συντελεστές του μικρού ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.4. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.5. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.6. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.7. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.8. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.9. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Θερινό σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.10. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.11. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.12. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.13. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.14. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.15. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 2.16. Βραχυπρόθεσμος και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Θερινό σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.17. Διαστήματα εμπιστοσύνης των πραγματικών διαφορών των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για τον μικρό ΕιΣΠ.

Πίνακας 2.18. Διαστήματα εμπιστοσύνης των πραγματικών διαφορών των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πίνακας 3.1. Ονομαστική ισχύς, ελάχιστη και μέγιστη εφεδρεία ανά στοιχειοσειρά του μικρότερης ισχύος εκκίνησης/λειτουργίας Φ/Β Α/Σ από κάθε κατασκευάστρια εταιρεία, υπό χειμερινή φωτεινή ακτινοβολία ημέρας.

Πίνακας 4.1. Δευτερεύουσα εφεδρεία κατά τις δύο ντετερμινιστικές μεθόδους εκ του [4]. Στοιχεία για το φορτίο ως εκ της [7] και για τις γεννήτριες ως εκ των [8-20].

Πίνακας 4.2. Φορτίο αιχμής, μέγιστη μονάδα, μέγιστη δευτερεύουσα κάτω εφεδρεία, φορτίο κοιλάδας και ποσοστό προτελευταίας προς τελευταίο ανά ΣΗΕ. Στοιχεία για το φορτίο ως εκ της [7] και για τις γεννήτριες ως εκ των [8-20].

Πίνακας 4.3. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μικρού ΕιΣΠ.

Πίνακας 4.4. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πίνακας 4.5. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.6. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.7. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πίνακας 4.8. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.9. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.10. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Πίνακας 4.11. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πίνακας 4.12. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.13. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.14. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πίνακας 4.15. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.16. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πίνακας 4.17. Ποσοστά αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μικρού ΕιΣΠ.

Πίνακας 4.18. Ποσοστά αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μεγάλου ΕιΣΠ.

Πίνακας 4.19. Ποσοστά δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μικρού ΕιΣΠ.

Πίνακας 4.20. Ποσοστά δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μεγάλου ΕιΣΠ.

Πίνακας 5.1. Τύπος ΔΠ ή φορτίου, θέση επί της γραμμής διανομής R-26 της Ρόδου και ονομαστική ισχύς για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Πίνακας 5.2. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

Πίνακας 5.3. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

Πίνακας 5.4. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

Πίνακας 5.5. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

Πίνακας 5.6. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

Πίνακας 5.7. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

Πίνακας 5.8. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

Πίνακας 5.9. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

Πίνακας 5.10. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

Πίνακας 5.11. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

Πίνακας 5.12. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

Πίνακας 5.13. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

Πίνακας 5.14. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

Πίνακας 5.15. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

Πίνακας 5.16. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

Πίνακας 5.17. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

Πίνακας 5.18. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

Πίνακας 5.19. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

Πίνακας 5.20. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

Πίνακας 5.21. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

Πίνακας 5.22. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

Πίνακας 5.23. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

Πίνακας 5.24. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

Πίνακας 5.25. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

Πίνακας 5.26. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

Πίνακας 5.27. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

Πίνακας 5.28. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

Πίνακας 5.29. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

Πίνακας 5.30. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

Πίνακας 5.31. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

Πίνακας 5.32. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

Πίνακας 5.33. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

Πίνακας 5.34. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

Πίνακας 5.35. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

Πίνακας 5.36. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

Πίνακας 5.37. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

Πίνακας 5.38. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

Πίνακας 5.39. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

Πίνακας 5.40. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

Πίνακας 5.41. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

Πίνακας 5.42. Συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι ισχύος του ΕιΣΠ και η συμβολή εκ μέρους του διακοπτόμενου φορτίου του σε σχέση με το βήμα αναδιανομής για τη ρύθμιση τάσης.

Πίνακας 5.43. Συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι ισχύος του ΕιΣΠ και η συμβολή εκ μέρους του διακοπτόμενου φορτίου του σε σχέση με το βήμα διανομής για τη ρύθμιση τάσης.

Πίνακας 5.44. Ποσοστά επιτυχημένων αναδιανομών ισχύος, μηδενικών μεταβολών ισχύος και διανομών ισχύος ΕιΣΠ σε σχέση με το βήμα διανομής για τη ρύθμιση τάσης.

Πίνακας Π.Β.1. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του Μ/Δ της ΠΚ υπό Θερινή φόρτισης προ διακοπής νησιδοποίησης.

Πίνακας Π.Β.2. Προγραμματισμοί εξισορρόπησης παραγωγής-κατανάλωσης του Μ/Δ της ΠΚ για νησιδοποιημένη λειτουργία υπό θερινή φόρτιση.

Πίνακας Π.Γ.1. Τύπος γραμμών της παροχής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας Π.Γ.2. Ονομασία και ονομαστικής ισχύς Μ/Σ ισχύος διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας.

Πίνακας Π.ΣΤ.1. Τύπος γραμμών της παροχής R-26 Γενναδίου του ΣΗΕ Ρόδου και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας Π.ΣΤ.2. Ζυγός και ονομαστικής ισχύς Μ/Σ ισχύος διανομής R-26 Γενναδίου του ΣΗΕ Ρόδου.

## Λίστα Συντμήσεων

DFIG	Doubly-Fed Induction Generator
DFS	Depth-First Search
DSM	Demand-Side Management
HT	Haar Transformation
LUT	Look-Up Table
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
VPP	Virtual Power Plant
A/T	Αντλησιοσταυμειτικός
A/Γ	Ανεμογεννήτρια
A/Σ	Αντιστροφέας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΡΤ	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης
ΒΡΦ	Βέλτιστη Ροή Φορτίου
ΔΑ	Δέντρο Απόφασης
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΕΔ	Έξυπνα/Έξυπνότερα Δίκτυα
ΕΙΣΠ	Εικονικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας
Μ/Δ	Μικροδίκτυο
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΟΤΣ	Οριακή Τιμή Συστήματος
ΠΚ	Προσχεδιασμένη Κοινότητα
ΡΜΣ	Ρυθμός Μεταβολής Συχνότητας
ΡΣ	Ρύθμιση Συχνότητας
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΔ	Σύνολο Δοκιμής
ΣΗΕ	Σύστημα/Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΜ	Σύνολο Μάθησης
Φ/Β	Φωτοβολταϊκό







# 1

## *Εισαγωγή*

### *1.1 Η εξέλιξη της διεσπαρμένης παραγωγής ως προς τον ρόλο της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας*

Διεσπαρμένη παραγωγή (ΔΠ) καλείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αποκεντρωμένο – σε σχέση με τις συμβατικές πηγές – τρόπο. Δηλαδή, η ΔΠ αναφέρεται σε πηγές που δεν οργανώνονται γεωγραφικά μακριά από τα κέντρα κατανάλωσης, αλλά συνδέονται στα δίκτυα διανομής των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και σύμφωνα βέβαια, με τη διαθεσιμότητα της πηγής ή την επιλογή του ιδιοκτήτη [1]. Δύο κυρίως λόγοι συνετέλεσαν στην ευρύτατη επέκταση και υψηλότετη διείσδυση της ΔΠ στα σύγχρονα ΣΗΕ. Πρώτη αιτία ήταν η ανησυχία για την αύξηση της μόλυνσης του περιβάλλοντος λόγω των αερίων οξειδίων του άνθρακα και του αζώτου, τα οποία εκλύονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων των συμβατικών σταθμών παραγωγής [2,3]. Δεύτερος λόγος στάθηκε η εξέλιξη στις μεθόδους απομάστευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ), ώστε αυτές να χαρακτηρίζονται από αξιόλογους βαθμούς απόδοσης [4-7].

Η ΔΠ εξαπλώθηκε κυρίως μέσω των ισχυρών οικονομικών κινήτρων εγκατάστασης ΑΠΕ [8]. Η αιολική ενέργεια αρχικά, η φωτοβολταϊκή (Φ/Β) ακολούθως και σε μικρότερο βαθμό οι υπόλοιπες ΑΠΕ (όπως μικρά υδροηλεκτρικά, βιοκαύσιμα, γεωθερμία, παλιρροϊκή ενέργεια) ήταν εκείνες οι οποίες επωφελήθηκαν από την ανωτέρω πολιτική. Η εξάρτηση της ενεργειακής απόδοσης των ΑΠΕ από το πεδίο εγκατάστασής τους, σήμαινε ευρεία διασπορά τους τόσο σε αστικό όσο και σε

αγροτικό, ορεινό ή και υπεράκτιο περιβάλλοντα. Η ελεύθερη αυτή γεωγραφική εξάπλωση προδιέγραψε την ανάγκη επέκτασης ή ενίσχυσης των υφιστάμενων ΣΗΕ [9].

Από τη μια, η αναγκαία επέκταση των ΣΗΕ και από την άλλη, τα χαρακτηριστικά των μονάδων ΔΠ καθ' εαυτών αποτέλεσαν την αρχή ζητημάτων ισχύος και τάσεως τόσο σε επίπεδο αξιοπιστίας όσο και σε επίπεδο ποιότητας [10,11]. Κυριότερο ζήτημα αναδείχθηκε εξ αρχής η στοχαστικότητα των ΑΠΕ. Ως λύσεις, έχουν εφαρμοστεί ο περιορισμός της παραγόμενης ισχύος τους σε τιμές υψηλότερης εμπιστοσύνης για λόγους ασφάλειας ή σε τιμές που δεν προκαλούν συμφόρηση των γραμμών μεταφοράς [12-14] ή/και η εξασφάλιση στρεφόμενης εφεδρείας [15,16] από συμβατικές πηγές για εξομάλυνση της μεταβλητότητας του ανέμου, της ηλιοφάνειας, κτλ. Οι πρακτικές αυτές όμως, δεν αποδίδουν στην κατεύθυνση ανάπτυξης της ΔΠ, αλλά μάλλον στην αντίθετη.

Κατά επέκταση των ανωτέρω, το μέγεθος των πηγών ΔΠ – τόσο κατά μόνες όσο και αθροιστικά – συνετέλεσε επίσης στη δημιουργία συνθηκών για να κληθούν να συμμετέχουν και εκείνες στη διασφάλιση της αξιοπιστίας, της ευστάθειας και της ποιότητας παρεχόμενης ισχύος προς το ΣΗΕ που συνδέονται [17-19]. Το πλαίσιο που δημιουργήθηκε οδήγησε σε θέσπιση υποχρεώσεων ή/και προϋποθέσεων σύνδεσης και λειτουργίας για τις μονάδες ΔΠ [20,21]. Όπου οι υποχρεώσεις αυτές κωδικοποιήθηκαν, επιβάλλουν συγκεκριμένο πλαίσιο λειτουργίας και σε αρκετές περιπτώσεις εγείρουν περιορισμό περαιτέρω διείσδυσης της ΔΠ. Επιπλέον, οι κώδικες αυτοί θέτουν εμπόδια σε προοπτική ελεύθερης συμμετοχής της ΔΠ σε απελευθερωμένες αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Τελευταία ειδικά, παρατηρήθηκε και αναδείχθηκε το ζήτημα, οι σχετικοί κανονισμοί να αποτελέσουν οι ίδιοι αφορμή για κρίσιμο φαινόμενο ευρείας αστάθειας των ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, στη Γερμανία η διείσδυση των Φ/Β (από δεδομένα διαθέσιμα στο διαδίκτυο) έχει εμφανίσει πραγματική αιχμή περί τα 24GW σε αντιστοιχία εθνικού φορτίου 60GW. Ο περιορισμός λειτουργίας των αντιστροφών των Φ/Β συστημάτων στο όριο  $\pm 0.2\text{Hz}$  [22], σημαίνει ότι μία σχετική απόκλιση συχνότητας θα οδηγήσει στη σβέση τη Φ/Β ισχύ της χώρας και σε ευρύτερη αστάθεια όλο το Ευρωπαϊκό διασυνδεδεμένο σύστημα λόγω περιορισμένων διαθεσίμων [23].

Όλα τα προαναφερθέντα αποτελούν τους λόγους βάσει των οποίων έχει αναπτυχθεί σημαντικό ερευνητικό έργο στον τομέα της παροχής επικουρικών υπηρεσιών από ΔΠ. Οι εργασίες που έχουν γίνει ασχολούνται κυρίως με την ανάπτυξη και υλοποίηση των μεθόδων ελέγχου, αποσκοπώντας στην καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της ΔΠ ή στον τοπικό συντονισμό τους για κατανομή της υπηρεσίας στους όμοιους γειτονικούς συντελεστές [17-19,24,25]. Πολλές εκ των υπηρεσιών όμως, μπορούν να οργανωθούν και προγραμματιστούν κατά τρόπο τέτοιο που να αποδίδουν προστιθέμενη αξία, συνδυάζοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ΔΠ τόσο από διαφορετικές τεχνολογίες όσο και από ευρύτερα γεωγραφικά πλαίσια. Σχετικοί προβληματισμοί έχουν διατυπωθεί σε σημαντικές αναφορές [26,27].

Στην κατεύθυνση αυτή, πολλαπλά οφέλη μπορούν να καταγραφούν από τη θεώρηση της ΔΠ υπό την οργάνωση ενός Εικονικού Σταθμού Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΕιΣΠ) [28]. Ως ΕιΣΠ

εννοείται η οργάνωση αριθμού πηγών ΔΠ σε μία ενιαία δομή, χωρίς αυτές να έχουν απαραίτητα φυσική σύνδεση υπό κοινό σημείο ενός ΣΗΕ. Ως ΕιΣΠ, οι μονάδες ΔΠ καθίστανται ανταγωνιστικότερες στις αγορές ενέργειας και μπορούν να συντονίζουν τη λειτουργία τους σε ευρεία κλίμακα. Κατά αυτόν τον τρόπο και οι επικουρικές υπηρεσίες μπορούν να σχεδιάζονται και υλοποιούνται παρόμοια, ώστε να αναιρείται η υποχρέωση που εκπορεύεται από τους κώδικες και κατά επέκταση να μπορούν οι πηγές ΔΠ να συμμετάσχουν ελεύθερα ως ΕιΣΠ στις σχετικές αγορές υπηρεσιών.

Στην παρούσα διατριβή θα συζητηθούν οι δυνατότητες και οι μέθοδοι, σύμφωνα με τις οποίες, η ΔΠ μπορεί να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες προς τα ΣΗΕ, υπό το μοντέλο οργάνωσης του ΕιΣΠ.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου θα δοθούν κάποιοι απαραίτητοι ορισμοί με σύντομη ερευνητική ανασκόπηση, ο στόχος της εργασίας όσο αφορά το πλαίσιο της ιδέας πάνω στην οποία αναπτύχθηκε και, τέλος, η σύνοψη των επόμενων ενοτήτων.

## ***1.2 Ορισμοί και σύντομη ερευνητική αναδρομή***

Αντί ιστορικής ανασκόπησης, παρατίθενται κάποιοι εκ των θεμελιωδών όρων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως αυτά αναδείχθηκαν και αναπτύχθηκαν μέσα από την έρευνα που εξελίχθηκε γύρω τους. Η σκοπιά θα περιοριστεί στα πλαίσια ενδιαφέροντος της διατριβής.

### ***1.2.1 Διεσπαρμένη παραγωγή***

Η ΔΠ δεν ορίστηκε εξ αρχής ευθέως, αλλά συγκριτικά προς τη συμβατική. Η συμβατική παραγωγή συγκροτείται στην ομαδοποίηση μονάδων μεγάλης ισχύος σε περιορισμένο γεωγραφικό χώρο για να αξιοποιούνται οι θετικές οικονομίες κλίμακας, η αποφυγή της μόλυνσης προς κατοικημένες περιοχές ή/και η εξυπηρέτηση μονάδων βιομηχανίας σε αντίστοιχες ζώνες. Η εξυπηρέτηση των αστικών φορτίων από συμβατικές πηγές γίνεται συνήθως με παρεμβολή συστήματος μεταφοράς της ενέργειας προς τα κέντρα κατανάλωσης.

Από την άλλη πλευρά, η ΔΠ έχει αποκεντρωμένα χαρακτηριστικά. Η θέση της, αν και εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της πηγής, συνήθως τοποθετείται πλησιέστερα προς τα κέντρα κατανάλωσης. Το τελευταίο έχει σχέση με τη μείωση των απωλειών, αφού, πρώτον, η δυναμική ισχύς της ΔΠ είναι γενικά περιορισμένη (συγκριτικά με τη συμβατική) και, δεύτερον, στηρίζεται κυρίως σε ΑΠΕ. Με το πνεύμα αυτό συμβαδίζει και ο τυπικός ορισμός της ΔΠ, ως το σύνολο των πηγών και μέσων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται στην πλευρά των συστημάτων διανομής.

Εκτενής καταγραφή των μονάδων ΔΠ δίνεται σε εργασίες όπως οι [28,29]. Εκεί φαίνεται ότι η τεχνολογία των πηγών δεν περιορίζεται μόνο σε ΑΠΕ, αλλά συμπεριλαμβάνονται επίσης, συσσωρευτές και μικροπηγές ορυκτών καυσίμων (diesel και, κυρίως, φυσικό αέριο). Όπως

αναφέρθηκε και νωρίτερα, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες των πηγών ΔΠ τις τελευταίες δεκαετίες [4-7] ήταν εκείνες οι οποίες συνέβαλαν και στη γενικευμένη εξάπλωσή τους στα σύγχρονα ΣΗΕ.

### **1.2.2 Επικουρικές υπηρεσίες**

Η ευσταθής λειτουργία των ΣΗΕ καθώς και η διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ποιότητας της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τους καταναλωτές από τις εταιρείες ηλεκτρισμού, απαιτεί τη διασφάλιση ορισμένων βασικών απαιτήσεων:

- α. Ισοζύγιο παραγόμενης και καταναλισκόμενης ισχύος,
- β. Γενικά σταθερά χαρακτηριστικά πλάτους και συχνότητας τάσης και
- γ. Προστασία εξοπλισμού ΣΗΕ και καταναλωτών.

Τα ανωτέρω στοιχειοθέτησαν την ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων και μέσων κατάλληλων για την εκπλήρωσή τους και τα οποία καλούνται συνολικά επικουρικές υπηρεσίες [30,31].

Η ρύθμιση συχνότητας απαντά και στις τρεις απαιτήσεις [23], η ρύθμιση τάσεως μέσω αέργου ισχύος προσφέρει στις απαιτήσεις (β) και (γ) [32,33], η ανάπτυξη και χρήση διακοπτικού εξοπλισμού φροντίζει για τα θέματα προστασίας [34] και η διαχείριση απωλειών σχετίζεται με τα (α) και (β) [35,36]. Οι τεχνικές και τεχνολογίες που μόλις αναφέρθηκαν αποτελούσαν, μέχρι πριν την εμφάνιση της ΔΠ, ευθύνη των κατά χώρες εταιρειών ηλεκτρισμού (συνήθως ολιγοπώλια, αν όχι μονοπώλια). Ο διαχειριστής του εκάστοτε ΣΗΕ, άλλοτε μέσω ρυθμιστικού πλαισίου και άλλοτε μέσω αποζημιώσεων προς τις εταιρείες ηλεκτρισμού, εξασφάλιζε την υλοποίηση των προαναφερθέντων υπηρεσιών.

Η ραγδαία ανάπτυξη της ΔΠ και, επί αφορμής της, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού (ενέργειας και ισχύος) σήμαινε αναπόδραστα ότι οι μέθοδοι και τα μέσα διασφάλισης της καλής λειτουργίας των ΣΗΕ όπως παρουσιάστηκαν νωρίτερα, μπορεί να ενταχθούν σε ένα πλαίσιο αγοράς. Για κάποιες εκ των επικουρικών υπηρεσιών, τούτο ισχύει ήδη, ενώ για άλλες αναπτύσσεται κατάλληλο πλαίσιο.

Εν συντομία, οι βασικότερες επικουρικές υπηρεσίες είναι οι ακόλουθες, σύμφωνα και με τους κώδικες που τις καταγράφουν:

- Στρεφόμενη εφεδρεία: Οι μεταβολές του φορτίου και τα συμβάντα απώλειας παραγωγής αποτυπώνονται μέσω των αποκλίσεων της ηλεκτρικής συχνότητας από την ονομαστική της τιμή. Οι γεννήτριες του συστήματος καλούνται να έχουν επαρκές διαθέσιμο περιθώριο ισχύος, ώστε να αποκαθιστούν τη συχνότητα και κατά αυτόν τον τρόπο να καλύπτουν το πρόβλημα ανισορροπίας παραγωγής-φορτίου. Ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα απόδοσης των περιθωρίων ισχύος, η εφεδρεία διαχωρίζεται σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα, τριτεύουσα και στατή. [23]
- Ρύθμιση Συχνότητας (ΡΣ): Η απόδοση της στρεφόμενης εφεδρείας γίνεται μέσω της ΡΣ, άρα ο διαχωρισμός τους είναι περισσότερο τυπικός. Οι γεννήτριες (μέσω της γωνιακής ταχύτητας των δρομέων τους) και τα ελεγχόμενα φορτία του εκάστοτε ΣΗΕ

παρακολουθούν την ηλεκτρική συχνότητα των ρευμάτων και αποκρίνονται με απόδοση ισχύος, όταν η συχνότητα πέφτει κάτω της ονομαστικής τιμής της (έλλειμμα παραγωγής ή αύξηση φορτίου) ή απορρόφηση ισχύος, όταν η συχνότητα ανεβαίνει πέραν της ονομαστικής (περίσσεια παραγωγής ή μείωση φορτίου). Αντίστοιχα με τη στρεφόμενη εφεδρεία και η ΡΣ διακρίνεται ως προς τα στάδια εκδήλωσής της σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα. [23]

- Ρύθμιση τάσεως μέσω αέργου ισχύος: Η παρεμβολή των συστημάτων μεταφοράς ισχύος μεταξύ των συμβατικών γεννητριών και των κέντρων κατανάλωσης προκαλεί πτώσεις τάσεως κατά μήκος των γραμμών. Ο κυρίαρχα επαγωγικός χαρακτήρας των γραμμών μεταφοράς σημαίνει ότι η ροή αέργου ισχύος είναι η βασική αιτία του προβλήματος και έτσι απαιτείται αντιστάθμιση της. Από τις γεννήτριες, αυτό υλοποιείται μέσω λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή τάσης (APT). Κατά τόπους, στα σημεία σύνδεσης του συστήματος μεταφοράς προς τα δίκτυα διανομής, η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται είτε με στατό εξοπλισμό, είτε με ευέλικτα μέσα τεχνολογίας ηλεκτρονικών ισχύος (Flexible AC Transmission System - FACTS) [37], είτε μέσω αυτόματης αλλαγής θέσης των μεταγωγέων των μετασχηματιστών (Μ/Σ) υψηλής προς μέση τάση με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) [38].
- Επανεκκίνηση συστήματος: Κατόπιν μερικής ή ολικής διακοπής λειτουργίας του ΣΗΕ, η αποκατάσταση πλήρους λειτουργίας και εξυπηρέτησης φορτίου σε σύντομο χρονικό διάστημα κρίνεται μείζονος σημασίας. Ως εκ τούτου, οι πηγές οι οποίες μπορούν να εκκινήσουν σε χρονικό περιθώριο λιγότερο της ώρας ή ταχύτερα εντάσσονται υπό την εν λόγω υπηρεσία. [39]
- Αντιστάθμιση απωλειών μεταφοράς/διανομής ενέργειας: Η υπηρεσία αυτή δεν έχει συγκεκριμένες παραμέτρους και εντάσσεται στη γενικότερη κατεύθυνση μείωσης των απωλειών που εκδηλώνονται κατά τη μεταφορά της ενέργειας από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής έως την κατανάλωση. [36]

Στη συνέχεια της εργασίας, οι ιδιαιτερότητες της κάθε επικουρικής υπηρεσίας σε σχέση με τη ΔΠ και τους ΕισΠΠ θα αναλυθούν ειδικά πέραν της παραπάνω αδρομερούς παρουσίασης.

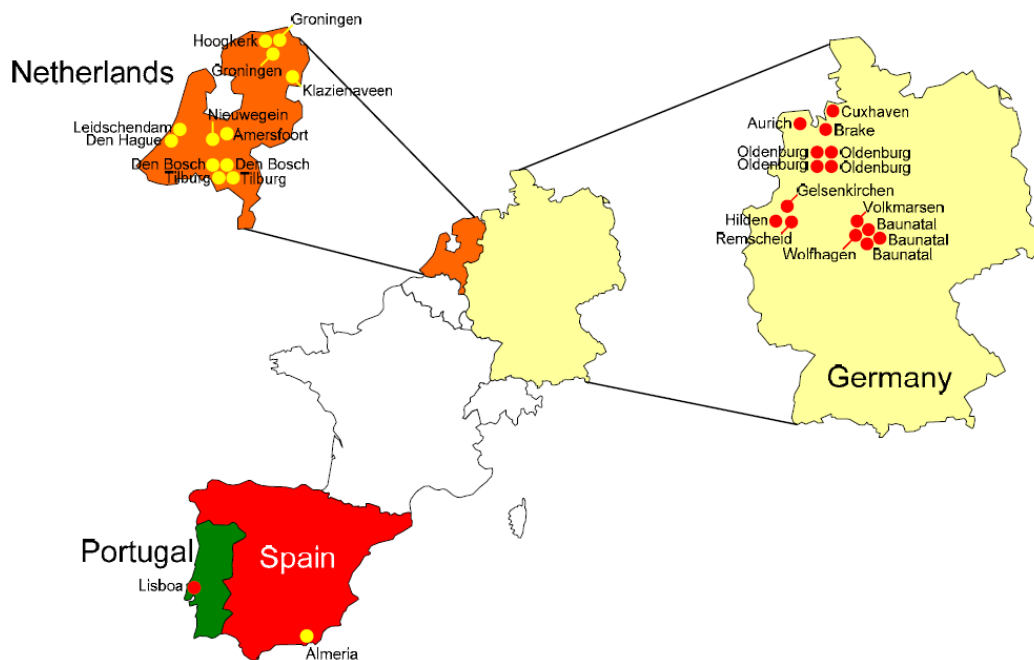
### **1.2.3 Εικονικός σταθμός παραγωγής**

Όπως δίνεται στα [1,29], το μέγεθος των μονάδων ΔΠ μπορεί να είναι από μερικά kW, ενώ και τα στατιστικά δεδομένα δείχνουν ότι η πλειονότητα των έργων ΑΠΕ είναι τάξης έως μερικά MW [40,41]. Ως εκ τούτου, στο πλαίσιο μιας ελεύθερης αγοράς ενέργειας, η ανταγωνιστικότητα τόσο μικρών πηγών μπορεί να είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Από την άλλη, η έως τώρα “fit-and-forget” φιλοσοφία ανάπτυξης της ΔΠ, την καθιστούσε δυσπρόσιτη από τους διαχειριστές και ανίκανη ενεργής συμμετοχής στις επικουρικές υπηρεσίες [26].

Για τους λόγους αυτούς, τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκε η ιδέα των ΕιΣΠ. Ένας ΕιΣΠ μπορεί να ενσωματώνει οποιονδήποτε αριθμό μονάδων ΔΠ, ανεξαρτήτως της τεχνολογίας τους, και οι οποίες δε μοιράζονται απαραίτητα φυσική σύνδεση. Ως φυσική σύνδεση εννοείται είτε ένα σημείο κοινής σύνδεσης της ΔΠ προς το ΣΗΕ, είτε ακόμα και το δίκτυο κάτω από μια παροχή διανομής. Ως εξ αυτών, γίνεται αντιληπτό ότι μεταξύ των μονάδων ΔΠ ενός ΕιΣΠ ενδέχεται να παρεμβάλλεται και σύστημα μεταφοράς. Επιπλέον, ένας ΕιΣΠ μπορεί να συμπεριλαμβάνει και φορτία (ελεγχόμενα και μη) τα οποία θα εξυπηρετεί. Άρα, η δομή και η οργάνωση ενός ΕιΣΠ μπορεί να είναι αρκετά ελεύθερη.

Η τελευταία παρατήρηση εκφράστηκε και μέσα από τους ετερόκλητους ορισμούς των ΕιΣΠ όπως αυτοί δόθηκαν στα ερευνητικά προγράμματα και δοκιμαστικά έργα που αναπτύχθηκαν στον τομέα. Παρουσιάζονται αμέσως, με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους:

- Το European Virtual Fuel Cell Power Plant (2001-2005) [42] επιχείρησε την πρώτη σύσταση ΕιΣΠ από 31 διασυνδεδεμένες μικροκυψέλες καυσίμου όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Ο ΕιΣΠ μπορούσε να παρακολουθεί συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος.

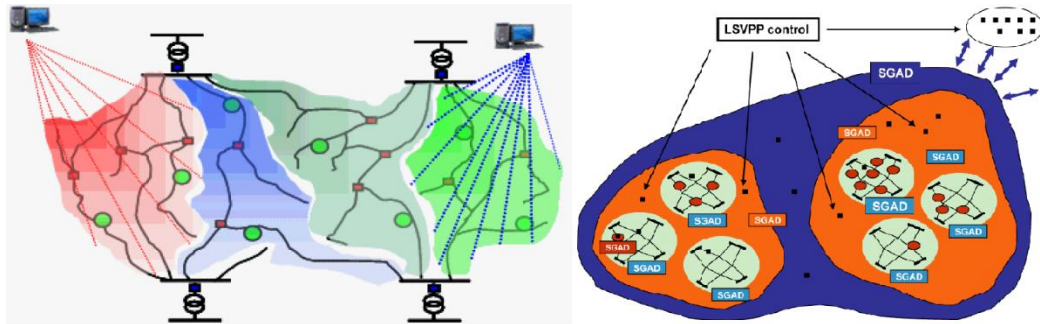


Σχήμα 1.1. Η θέση των μικροκυψελών καυσίμου όπως σχεδιάστηκαν στο ερευνητικό έργο EUVFCPP [42].

- Σχεδόν παράλληλα ακολούθησαν τα DISPOWER (2002-2005) [43] και CRISP (2002-2006) [44]. Στο DISPOWER τέθηκαν οι βάσεις προτυποποίησης της ΔΠ σε επίπεδο κανονισμών καθώς και της λειτουργίας της κατά ομάδες πηγών. Επίσης, στον οικισμό Am Steinweg δοκιμάστηκε συντονισμός των οικιακών μικροπηγών και φορτίων, ώστε να μειώνεται η ισχύς αιχμής και να μηδενίζονται οι ροές ισχύος από το υπερκείμενο ΣΗΕ προς τη σχετική παροχή. Στο CRISP ορίστηκαν οι Μεγάλης Κλίμακας ΕιΣΠ, όπως φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Οι τελευταίοι αποτελούν συνένωση κυψελών ενός ΣΗΕ – ως

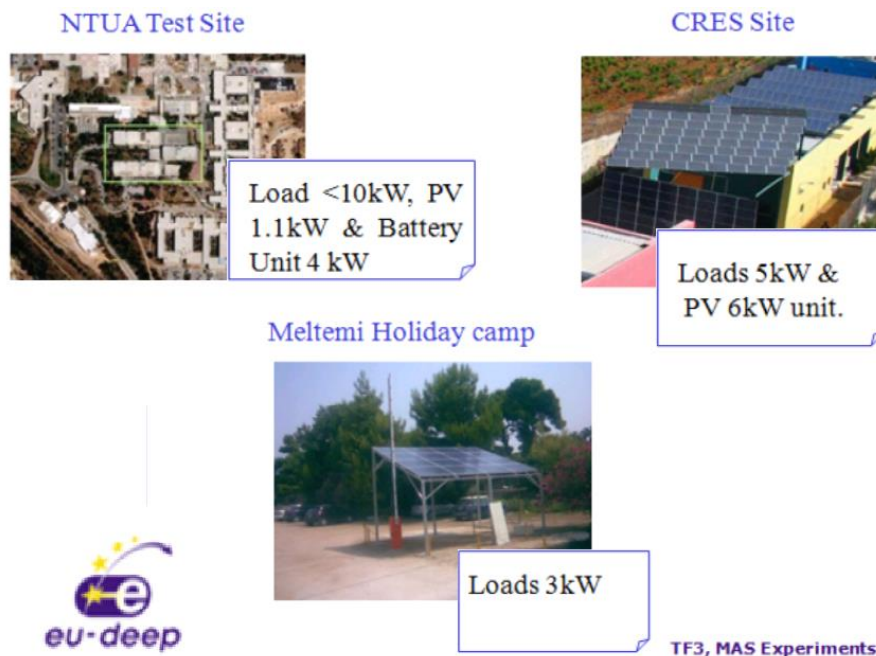


κυψέλη εννοείται τμήμα ΣΗΕ εντός γεωγραφικών ορίων με φυσική σύνδεση μεταξύ των στοιχείων του. Στο ίδιο έργο μελετήθηκε επίσης, η εξισορρόπηση παραγωγής-κατανάλωσης εντός των θεωρούμενων ΕιΣΠ, ενώ αναπτύχθηκαν και φιλοσοφίες διεσπαρμένης ρύθμισης τάσης με αποκοπές φορτίου.



Σχήμα 1.2. Η ιδέα των κυψελών ΣΗΕ (αριστερά) και του Μεγάλης Κλίμακας ΕιΣΠ (δεξιά) σύμφωνα με το ερευνητικό έργο CRISP [44].

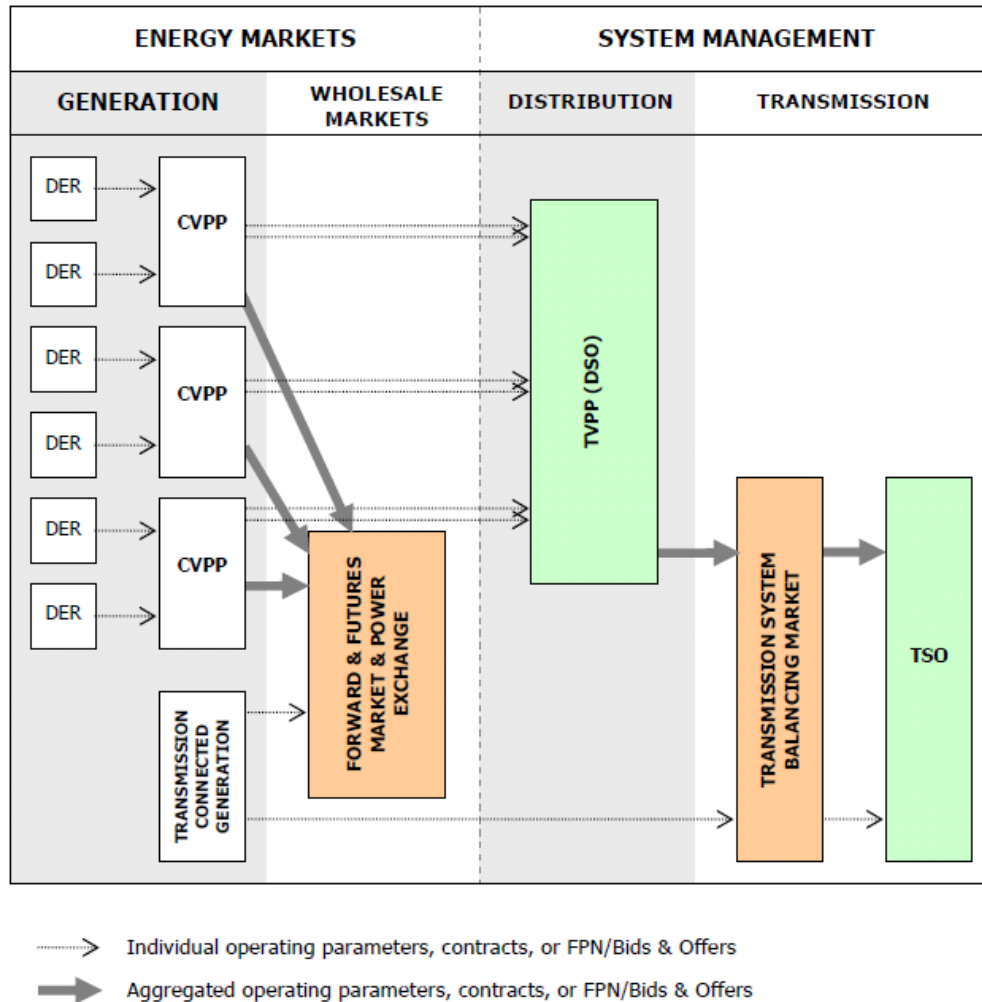
- Στα πλαίσια του έργου EUDEEP (2004-2009) [45], δοκιμάστηκε στην Ελλάδα, ΕιΣΠ από ελεγχόμενα φορτία και μικροπηγές σε τρεις απομακρυσμένες μεταξύ τους περιοχές της Αττικής (Μονάδα Συμπαγωγής Εργαστηρίου ΣΗΕ ΕΜΠ, Εργαστήριο Φ/Β Σ/των Κέντρου ΑΠΕ και Εξοχικός Οικισμός Μελτέμι Ραφίνας), όπως αποτυπώνεται ενδεικτικά και στο Σχήμα 1.3. Τα φορτία ελέγχονταν, ώστε η κατανάλωσή τους να μην ξεπερνά την παραγόμενη ισχύ των πηγών [46].



Σχήμα 1.3. Πιλοτικός ΕιΣΠ μεταξύ τριών απομακρυσμένων τοποθεσιών της Αττικής-Ελλάδα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος EUDEEP [45].

- Ακολούθησε το FENIX (2005-2009) [47] στο οποίο ο ΕιΣΠ (κι εδώ με γεωγραφικό περιορισμό) αντιμετωπιζόταν αναλόγως ως εμπορικός ή ως τεχνικός. Ως εμπορικός, ο

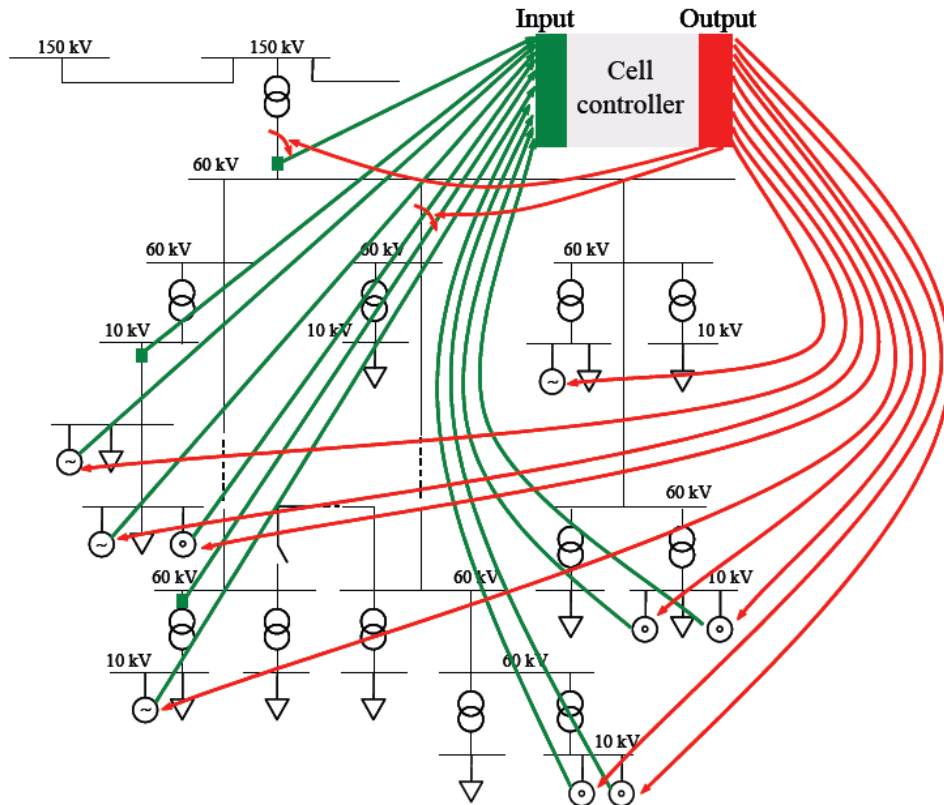
ΕιΣΠ συμμετείχε ως μία και αδιάσπαστη οντότητα στις αγορές, όπως ενδεικτικά φαίνεται και στο Σχήμα 1.4. Ως τεχνικός από την άλλη, αναλάμβανε την υλοποίηση των ενεργειακών δεσμεύσεών του από τις αγορές που συμμετείχε και υποστήριζε τη ρύθμιση τάσης στα πλαίσια των περιορισμών της ΔΠ.



Σχήμα 1.4. Η ιδέα του εμπορικού ΕιΣΠ και της συμμετοχής του στις αγορές όπως αναπτύχθηκε στο ερευνητικό έργο FENIX [47].

- Στο Cell Controller Pilot Project (2005-2011) [48] μια κυψέλη από το δίκτυο διανομής 60kV στη Δανία, χρησιμοποιήθηκε για εκτεταμένες δοκιμές ως ΕιΣΠ. Εξετάστηκαν μεν οι επικουρικές υπηρεσίες που μπορεί να εκτελεστούν, αλλά τέθηκε η προϋπόθεση της δυνατότητας πλήρους ελέγχου της κυψέλης (ΣΑΤΥΦ, αναδιαμόρφωση δικτύου, κτλ). Στο Σχήμα 1.5 δίνεται η ροή πληροφορίας και ρύθμισης του θεωρούμενου ΕιΣΠ.
- Στην πόλη Lambesc υλοποιείται το έργο PREMIO (2008-2012) [49], το οποίο στοχεύει στην προτυποποίηση ΕιΣΠ που θα διαχειρίζεται συνολικά τα φορτία και τις μονάδες ΔΠ της περιοχής με απώτερο στόχο τη μείωση της ισχύος αιχμής αξιοποιώντας κατά το μέγιστο δυνατό τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών ρύπων.

- Στην πρωτοβουλία Power Matching City (έναρξη 2009) [50] επιλεγμένα ενεργοβόρα φορτία τίθενται υπό έξυπνο έλεγχο σε αντιστοιχία προς διαθέσιμες ΑΠΕ, κατά τρόπο τέτοιο που η λειτουργία των πρώτων να ταιριάζει προς την παραγωγή των δεύτερων. Αποτέλεσμα είναι προφανώς, ο περιορισμός των αιχμών και η ομαλοποίηση της καμπύλης φορτίου.



Σχήμα 1.5. Είσοδος πληροφοριών και έξοδος παραμέτρων ρύθμισης στον θεωρούμενο ΕιΣΠ κατά τη μελέτη του CCPP [48].

### 1.3 Στόχος-σκοπός εργασίας

Από όσα συζητήθηκαν και στην *Υποενότητα 1.2.3*, φαίνεται η περιορισμένη συστηματοποίηση της παροχής επικουρικών υπηρεσιών από έναν ΕιΣΠ στη βάση της ετερομορφίας των συντελεστών που δυνητικά το αποτελούν. Μία λειτουργία ή κάποιος περιορισμός, τα οποία έως προ τινός ετίθεντο ως υποχρέωση για τη ΔΠ, μπορούν να εκτελεστούν με οργανωμένο και καταναμημένο τρόπο, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται θετικότερα αποτελέσματα τόσο για το ΣΗΕ όσο και για τη ΔΠ καθ' εαυτή. Επιπλέον, η παροχή επικουρικών υπηρεσιών από ΕιΣΠ δεν μπορεί να στηρίζεται στην προϋπόθεση της δυνατότητας απόλυτης διαχείρισης και ελέγχου του δικτύου διανομής στο οποίο συνδέεται ο ΕιΣΠ, αφού αυτό αντιβαίνει στην υπόθεση ότι το δίκτυο ελέγχεται από τον σχετικό διαχειριστή (στον οποίον ίσως και να ανήκει).

Η παρούσα εργασία, προσεγγίζει την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από ΕιΣΠ, με την υπόθεση ότι ο ιδιοκτήτης/διαχειριστής του ΕιΣΠ ελέγχει μόνο τις μονάδες ΔΠ και το ελεγχόμενο φορτίο που του ανήκουν και, επιπλέον, μπορεί να εκτελέσει εντολές του διαχειριστή – αναφορικά με τις ζητούμενες υπηρεσίες – διαθέτοντας περιορισμένη πληροφορία και μόνο εσωτερικές μετρήσεις επί του ΕιΣΠ. Η θεώρηση αυτή σχετίζεται με ένα μοντέλο ανάπτυξης ΕιΣΠ άμεσο, με ελάχιστες εμπορικές προδιαγραφές και δίχως περαιτέρω τεχνικούς περιορισμούς ή προαπαιτούμενα πέραν των ήδη υπάρχοντων από τους σχετικούς προς τη ΔΠ κώδικες.

Από μικροσκοπική άποψη, εξασφαλίστηκε εν πρώτοις, ότι όλοι οι συντελεστές ενός ΕιΣΠ μπορούν να συνδράμουν στις υπηρεσίες μέσα από τεχνικές που βελτιώνουν την απόδοση των υπηρεσιών και περιορίζουν την επιβάρυνση ή τις καταπονήσεις στις μονάδες ΔΠ. Από μακροσκοπικής πλευράς, αναπτύχθηκαν μέθοδοι και αλγόριθμοι για την υλοποίηση των επικουρικών υπηρεσιών συνολικά από τον ΕιΣΠ με συνεπή τρόπο, συνυπολογίζοντας τα ιδιαίτερα γνωρίσματα της ΔΠ και με κριτήρια που να απαντούν στις απαιτήσεις των κωδίκων και στην καλύτερη δυνατή λειτουργία του ΕιΣΠ. Σε κάθε περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψιν την εξέλιξη της ΔΠ, τόσο οι μικροσκοπικές τεχνικές όσο και οι μακροσκοπικές μέθοδοι στόχευαν στην επεκτασιμότητα και στην προσαρμοστικότητα, ανεξαρτήτως της εκάστοτε πηγής ΔΠ ή του μεγέθους και των χαρακτηριστικών οποιουδήποτε θεωρούμενου ΕιΣΠ.

## ***1.4 Οργάνωση κειμένου***

Οι Ενότητες έχουν οργανωθεί στη βάση των επικουρικών υπηρεσιών: δίνονται αρχικά τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά κάθε μιας, γίνεται ανασκόπηση της έως τώρα έρευνας για τη συμμετοχή της ΔΠ σε αυτήν και, τέλος, αναλύεται η συνδρομή της μελέτης που αναπτύχθηκε ανάλογα με το πλαίσιο οπτικής της.

Στην Ενότητα 2 παρουσιάζεται η παροχή εγγυημένης ενεργού ισχύος από τον ΕιΣΠ, σύμφωνα με τον ωριαίο προγραμματισμό παραγωγής του. Στην Ενότητα 3 η εξασφάλιση εφεδρείας στο επίπεδο των μονάδων ΔΠ, για συμμετοχή τους στη ρύθμιση συχνότητας, αναπτύσσεται για τις κυριότερες ΑΠΕ (την αιολική και τη Φ/Β). Η ρύθμιση φορτίου-συχνότητας σε επίπεδο ΕιΣΠ για φαινόμενα υπερσυχνότητας αναλύεται στην Ενότητα 4. Στην Ενότητα 5 δίνεται μια μέθοδος ρύθμισης τάσεως μέσω συντονισμένης διαχείρισης της ισχύος του ΕιΣΠ που λειτουργεί επί γραμμής διανομής. Στην Ενότητα 6 καταγράφεται η προσφορά της παρούσας εργασίας και προτείνονται οι προοπτικές περαιτέρω ανάπτυξής της σε επόμενα στάδια. Η διαχείριση μεγάλου όγκου ιστορικών δεδομένων (χρονοσειρές ηλεκτρικών μεγεθών) που απαιτούνται για την υλοποίηση των επικουρικών υπηρεσιών, συζητείται ειδικά στην Ενότητα Α του Παραρτήματος.

Η σχετική βιβλιογραφία κάθε κεφαλαίου παρουσιάζεται ξεχωριστά για ευκολότερη προσπέλαση από τον αναγνώστη. Στο τέλος κάθε ενότητας, και σε σχέση με το θέμα της, παρατίθεται μια ευρύτερη προβληματική θεωρητικού περιεχομένου.

## **1.5 Βιβλιογραφία**

- [1] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder, Distributed generation: a definition, *Electric Power Systems Research*, Τόμος 57, Τεύχος 3, 20 Απριλίου 2001, Σελίδες 195-204.
- [2] Kyoto Protocol. United Nations Framework Convention on Climate Change. 26 Νοεμβρίου 2009. Διαθέσιμο: <http://www.unfccc.int>
- [3] Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Ευρωπαϊκή Βουλή και Συμβούλιο. 23 Απριλίου 2009. Διαθέσιμο: <http://eur-lex.europa.eu/en/index.htm>
- [4] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [5] D. M. Bagnall, M. Boreland, Photovoltaic technologies, *Energy Policy*, Τόμος 36, Τεύχος 12, Δεκέμβριος 2008, Σελίδες 4390-4396.
- [6] A.V. Bridgwater, The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation, *Fuel*, Τόμος 74, Τεύχος 5, Μάιος 1995, Σελίδες 631-653.
- [7] C. Garrett, P. Cummins, The power potential of tidal currents in channels, *Proc. R. Soc.*, Αύγουστος 2005.
- [8] M. Muñoz, V. Oschmann, J. D. Tàbara, Harmonization of renewable electricity feed-in laws in the European Union, *Energy Policy*, Τόμος 35, Τεύχος 5, Μάιος 2007, Σελίδες 3104-3114.
- [9] J.A. Peças Lopes, N. Hatziaargyriou, J. Mutale, P. Djapic, N. Jenkins, Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities, *Electric Power Systems Research*, Τόμος 77, Τεύχος 9, Ιούλιος 2007, Σελίδες 1189-1203.
- [10] G. Lalor, J. Ritchie, S. Rourke, D. Flynn, M.J. O'Malley, Dynamic frequency control with increasing wind generation, in: *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Ιούνιος 2004, Σελίδες 1715-1720.
- [11] M.J. Ortega, J.C. Hernández, O.G. García, Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations, *Electric Power Systems Research*, Τεύχος 96, Μάρτιος 2013, Σελίδες 23-35.
- [12] M. de la Torre, T. Domínguez, G. Juberías, E. Prieto, O. Alonso. Operation of a power system with large integration of renewable energies, *7th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems*, Madrid, Ισπανία, 26-27 Μαΐου 2008.

- [13] R. Tonkoski, L.A.C. Lopes, T.H.M. EL-Fouly, Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Τεύχος 2, Απρίλιος 2011, Σελίδες 139-147.
- [14] J. Revuelta, J.C. Fernandez, J.L. Fernandez, Large scale integration of renewable energy sources in the Spanish power system. Curtailment and market Volumes, in: Proc. 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2011, Σελίδες 413-418.
- [15] P. Pelacchi, D. Poli, The influence of wind generation on power system reliability and the possible use of hydrogen storages, Electric Power Systems Research, Τεύχος 80, Μάρτιος 2010, Σελίδες 249-255.
- [16] P. Zhang, Y. Wang, W. Xiao, W. Li, Reliability Evaluation of Grid-Connected Photovoltaic Power Systems, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Τεύχος 3, Ιούλιος 2012, Σελίδες 379-389.
- [17] G. Joos, B.T. Ooi, D. Mcgillis, F.D. Galiana, R. Marceau, The potential of distributed generation to provide ancillary services, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Τόμος 3, Σελίδες 1762-1767.
- [18] S.K. Pandey, S.R. Mohanty, N. Kishor, A literature survey on load–frequency control for conventional and distribution generation power systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Τεύχος 25, Σεπτέμβριος 2013, Σελίδες 318-334.
- [19] A. Andreotti, A. Del Pizzo, R. Rizzo, P. Tricoli, An efficient architecture of a PV plant for ancillary service supplying, Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on, 14-16 Ιουνίου 2010, Σελίδες 678-682.
- [20] M. Tsili, S. Papathanassiou, A review of grid code technical requirements for wind farms. IET Renewable Power Generation, Τόμος 3, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2009, Σελίδες 308-332.
- [21] E. Tröster, New German grid codes for connecting PV systems to the medium voltage power grid, Concentrating Photovoltaic Power Plants: Optical Design and Grid Connection, 2nd International Workshop on, 2009.
- [22] European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC (2010).
- [23] P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C], ENTSO-E (2009).
- [24] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, R. Belmans, A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters, Power Electronics, IEEE Transactions on, Τόμος 22, Τεύχος 4, Ιούλιος 2007, Σελίδες 1107-1115.
- [25] J.M. Mauricio, A. Marano, A. Gomez-Exposito and J.L. Martinez Ramos, Frequency Regulation Contribution Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems, Power Systems, IEEE Transactions on, Τόμος 24, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2009, Σελίδες 173-180.
- [26] G. Strbac, N. Jenkins, T. Green, D. Pudjianto, Review of Innovative Network Concepts, DG GRID Project Report, Petten, Ολλανδία, 2006.

- [27] M.N. Marwali, Jung Jin-Woo, A. Keyhani, Control of distributed generation systems - Part II: Load sharing control, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Τόμος 19, Τεύχος 6, Νοέμβριος 2004, Σελίδες 1551-1561.
- [28] E.A. Setiawan, Concept and controllability of Virtual Power Plant, PhD Thesis, University of Kassel, Kassel University Press GmbH, Kassel, Γερμανία, 2007.
- [29] H. Lee Willis, W.G. Scott, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [30] Y.G. Rebours, D.S. Kirschen, M. Trotignon, S. Rossignol, A Survey of Frequency and Voltage Control Ancillary Services—Part I: Technical Features, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 22, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2007, Σελίδες 350-357.
- [31] A. Zobian, M.D. Ilic, Unbundling of transmission and ancillary services. I. Technical Issues, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 12, Τεύχος 2, Μάιος 1997, Σελίδες 539-548.
- [32] P.N. Vovos, A.E. Kiprakis, A.R. Wallace, G.P. Harrison, Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 22, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2007, Σελίδες 476-483.
- [33] P3 – Policy 3: Operational Security, ENTSO-E (2009).
- [34] A. A. Mazi, B.F. Wollenberg, M.H. Hesse, Corrective Control of Power System Flows by Line and Bus-Bar Switching, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 1, Τεύχος 3, Αύγουστος 1986, Σελίδες 258-264.
- [35] A. Gomez-Exposito, J.M. Riquelme Santos, T. Gonzalez Garcia, E.A. Ruiz Velasco, Fair allocation of transmission power losses, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 15, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2000, Σελίδες 184,188.
- [36] J. Qiu, S.M. Shahidehpour, A New Approach for Minimizing Power Losses and Improving Voltage Profile, *Power Systems, IEEE Transactions on*, Τόμος 2, Τεύχος 2, Μάιος 1987, Σελίδες 287-295.
- [37] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, John Wiley and Sons Ltd, 1999.
- [38] J.-H Choi, J.-C Kim, The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Τόμος 23, Τεύχος 2, Φεβρουάριος 2001, Σελίδες 91-98.
- [39] Wei Sun, Chen-Ching Liu, Shanshan Liu, Black start capability assessment in power system restoration, *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 24-29 Ιουλίου 2011, Σελίδες 1-7.
- [40] International Energy Agency, *Enhancing the Market Deployment of Energy Technology: a Survey of Eight Technologies*, Paris, 1997.

- [41] M. Bolinger, R. Wiser, G. Fitzgerald, An Overview of Investments by State Renewable Energy Funds in Large-Scale Renewable Generation Projects, *The Electricity Journal*, Τόμος 18, Τεύχος 1, Ιανουάριος-Φεβρουάριος 2005, Σελίδες 78-84.
- [42] EUVFCFPP Consortium, System Development, Build, Field Installation and European Demonstration of a Virtual Fuel Cell Power Plant Consisting of Residential Micro-CHP's - Management Summary Report, 2005.
- [43] P. Strauss, T. Meyer, T. Erge, T. Degner, DISPOWER - distributed generation with high penetration of renewable energy sources, *Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources*, International Conference on the, 2004, Brussels, 1-3 Δεκεμβρίου 2004, Σελίδες 54-62.
- [44] G.J. Schaeffer, H. Akkermans, CRISP – Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power – Final Summary Report, Ολλανδία, 2006.
- [45] EUDEEP Consortium, 2004-2009 Results – The birth of a European Energy Partnership that will help the large-scale implementation of distributed energy resources in Europe, 2009.
- [46] N. Hatziargyriou, A. Dimeas, S. Chatzivassiliadis, T. Tomtsi and P. Moutis, Multi-Agent System for Creation of Virtual Power Plant (VPP) with Aggregated and Decentralized Control, *Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources*, Third International Conference on the, Nice, Δεκέμβριος 2008.
- [47] D. Pudjianto, C. Ramsay, G. Strbac, The FENIX vision: The Virtual Power Plant and system integration of distributed energy resources, FENIX project deliverable report, London, Δεκέμβριος 2006.
- [48] Energinet, Cell Controller Overview and Future Perspectives, Denmark, September 2012.
- [49] C. Tranchita, J. Simmins, France Pilots Virtual Power Plant, *Transmission and Distribution World Magazine*, May 2013, διαθέσιμο: <http://tdworld.com/grid-opt-smart-grid/france-pilots-virtual-power-plant>
- [50] <http://www.powermatchingcity.nl>



## 1.6 Προβληματική

Από όσα παρουσιάστηκαν εδώ, η περιγραφή του ΕιΣΠ διαφέρει σημαντικά από εργασία σε εργασία και άπτεται των ειδικότερων αναγκών της εκάστης μελέτης που πραγματοποιείται. Όπως δηλαδή συνέβη και με τον όρο Έξυπνα Δίκτυα (ΕΔ), εκδηλώθηκε ομοίως μία τάση για αυστηρό ορισμό του ΕιΣΠ, αν και φαίνεται εξ αρχής ότι τούτοι οι όροι είναι γενικόλογoi και μάλλον φιλοσοφικοί.

Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τα ΕΔ, ο ορισμός τους εντός ενός σαφούς πλαισίου, οδηγεί αναπόδραστα στο συμπέρασμα ότι τα έως προ τινός δίκτυα ήταν μη-έξυπνα – ανόητα. Αυτό όμως αντιβαίνει στην πραγματικότητα. Ο ηλεκτρισμός και η ανάπτυξη των ΣΗΕ αποτέλεσαν την κινούσα δύναμη της Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης που ξεκίνησε στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Τα ΕΔ δεν υπήρχαν. Μολαταύτα, τα ΣΗΕ που εξυπηρέτησαν την εξέλιξη της ανθρωπότητας, πέτυχαν τον στόχο τους με αρκετά υψηλά ποσοστά αξιοπιστίας. Η έννοια της ευφυΐας/έξυπνάδας συνδέθηκε με τα ΣΗΕ στη βάση της χρήσης ψηφιακών μεθόδων (ελέγχου και επισκόπησης) καθώς και της αναίρεσης της θεώρησης μονόδρομης ροής ισχύος από τα κέντρα συμβατικής παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης. Εκ των παραπάνω κρίνεται επιτυχέστερη η περιγραφή των σύγχρονων ΣΗΕ ως «Έξυπνότερα Δίκτυα».

Αναλόγως, όσο αφορά τον ΕιΣΠ μια πληρέστερη και γενικότερη περιγραφή του θα πρέπει να είναι η εξής: ΕιΣΠ είναι η οντότητα που ενσωματώνει οποιοδήποτε πλήθος οποιωνδήποτε συντελεστών ενός ΣΗΕ, κάθε ένας εκ των οποίων μπορεί να συμμετάσχει σε τουλάχιστον μία αγορά ή να εκτελέσει συντονισμένα με άλλους συντελεστές του ΕιΣΠ τουλάχιστον μία επικουρική υπηρεσία ή συστημική λειτουργία. Από τους αναφερόμενους συντελεστές ενός ΣΗΕ, δεν εξαιρούνται ούτε οι συμβατικές πηγές (ήδη σε ερευνητικά προγράμματα έχει θεωρηθεί ΕιΣΠ αποτελούμενος και από τέτοιες μονάδες), ούτε εξοπλισμός του ΣΗΕ, όπως οι γραμμές μεταφοράς, οι Μ/Σ, κτλ. (η αναδιαμόρφωση του δικτύου μεταφοράς αποδίδει αποσυμφόρηση των γραμμών, ο χειρισμός των ΣΑΤΥΦ των Μ/Σ προσφέρει ρύθμιση τάσης, κοκ.).

Η αφαιρετικότητα της παραπάνω περιγραφής δεν μπορεί να συνιστά γενικό ορισμό, επιτρέπει όμως εξειδίκευσή προς ορισμούς στα πλαίσια εμπορικών ή τεχνικών, κατά περίπτωση, κριτηρίων.



# 2

## *Παροχή εγγυημένης ενεργού ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας*

Σημαντικός εκπρόσωπος της ΔΠ είναι οι ΑΠΕ [1-5]. Οι πιο διαδεδομένες εξ αυτών χαρακτηρίζονται από αξιοσημείωτη στοχαστικότητα, γεγονός το οποίο αποτελεί και τροχοπέδη στην περαιτέρω διεξόδυσή τους στα ΣΗΕ. Η στοχαστικότητα των ΑΠΕ είναι υπεύθυνη τόσο για ζητήματα αξιοπιστίας όσο και για ζητήματα ποιότητας ισχύος [6,7]. Στα πλαίσια ενός ΕισΠ, η αξιοποίηση του συνδυασμού πηγών σταθερής και μεταβαλλόμενης ισχύος μπορεί να απαντήσει στις παραπάνω ανησυχίες. Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσεται μία μέθοδος εξαγωγής προγραμμάτων κάλυψης απώλειας ισχύος σε έναν ΕισΠ με χρήση Δέντρων Απόφασης. Κατά τη μεθοδολογία που αναλύεται, επιτυγχάνεται η εξασφάλιση σταθερής/εγγυημένης ισχύος εξόδου από τον ΕισΠ ανεξαρτήτως της στοχαστικότητας των ΑΠΕ.

### *2.1 Στοχαστικότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας –*

#### *Ανασκόπηση*

Η αιολική, η Φ/Β και η ωκεάνια ενέργεια έχουν σαν κοινό χαρακτηριστικό τους τη στοχαστικότητα, ήτοι η ισχύς τους δεν είναι ούτε σταθερή ούτε δεδομένη. Οι ΑΠΕ αυτές εξαρτώνται από τα καιρικά φαινόμενα σε συνδυασμό με γεωγραφικά δεδομένα και ατμοσφαιρικές

συνθήκες [8]. Ως εκ τούτων, αδυνατούν αφ' εαυτών τους να προσφέρουν εγγυημένη ισχύ συγκεκριμένης τιμής και διάρκειας. Σε μία απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, αυτό θα μεταφραστεί σε χαμένα έσοδα, πρόστιμα [9] και ίσως ακόμα αδυναμία εκτέλεσης εντολών του διαχειριστή του δικτύου. Στο πνεύμα τούτο, η ραγδαία αύξηση της διείσδυσής τους στα ΣΗΕ, καθοδήγησε νέο και εντονότερο ενδιαφέρον για τη μελέτη και ανάλυση της αξιοπιστίας των δικτύων υπό την παρουσία τέτοιων στοχαστικών πηγών ΔΠ [10-13].

Στην πράξη, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέχρι στιγμής είτε προληπτικά, είτε ενεργητικά. Προληπτικά, αξιοποιούνται εν πρώτοις, μέθοδοι πρόβλεψης ισχύος από ΑΠΕ οι οποίες μπορούν με ακρίβεια να προεκβάλλουν τη χρονοσειρά παραγωγής σε ορίζοντα ωρών ή ημερών [8]. Βασιζόμενες σε αναλύσεις αξιοπιστίας, άλλες προληπτικές μέθοδοι προτείνουν τη διατήρηση ικανών περιθωρίων ισχύος εκ μέρους των συμβατικών σταθμών παραγωγής για κάλυψη της πιθανής απώλειας των στοχαστικών ΑΠΕ [10,14].

Ως ενεργητικές περιγράφονται οι τεχνικές οι οποίες είτε αποκόπτουν μέρος της στοχαστικής ισχύος εκ των προτέρων [15-17], είτε εξισορροπούν ελεγχόμενα και ευέλικτα φορτία προς τη διαθέσιμη ισχύ από σχετικές μονάδες ΔΠ [18-20]. Από τη μία, η περικοπή ισχύος των μεταβλητών ΑΠΕ γίνεται έως ενός ανωφλίου κάτω από το οποίο το ρίσκο απώλειας μέρους της ή ολόκληρης είναι μικρό (ή ελέγξιμο/αμελητέο) βάσει των κριτηρίων που θέτει ο εκάστοτε διαχειριστής. Από την άλλη, η στρατηγική της αποκοπής και επανασύνδεσης ελεγχόμενου φορτίου σύμφωνα με τη διαθεσιμότητα της στοχαστικής ΑΠΕ δεν απαντά ουσιαστικά στο πρόβλημα. Οι δύο κυριότεροι λόγοι είναι ότι, πρώτον, αγνοείται η προτεραιότητα εξυπηρέτησης του φορτίου και, επίσης, σε μία απελευθερωμένη αγορά ενέργειας ο καταναλωτής μπορεί να επιλέξει να τροφοδοτηθεί από σταθερότερη πηγή (εκτός αν δεσμεύεται από διμερές συμβόλαιο ή πιστοποιητικό χρήσης πράσινης ενέργειας). Τέλος, στο ίδιο πνεύμα ενεργητικών πρακτικών εντάσσονται και οι τοπολογίες συντηρητών ισχύος (power conditioners) [41] και συστημάτων αποθήκευσης [42]. Οι τοπολογίες αυτές, ειδικά αν διαστασιολογούνται σε κλίμακα ΣΗΕ ενέχουν πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης.

Πιο πρόσφατα έχει προταθεί παρόμοια, αλλά θετικότερη ενεργητική πρακτική μέσω υβριδικών σταθμών. Οι υβριδικοί σταθμοί αποτελούνται από στοχαστική πηγή (συνήθως αιολικό πάρκο, Φ/Β σταθμό, κτλ) και μια μονάδα αποθήκευσης ενέργειας (αντλησιοταμιευτικό υδροηλεκτρικό σύστημα, συσσωρευτές υψηλής χωρητικότητας, κτλ) [21-23]. Κατά την αναφερόμενη πρακτική, η ισχύς εξόδου των στοχαστικών πηγών εξομαλύνεται μέσω αποθήκευσης και αξιοποιείται αναλόγως και ασύγχρονα. Η μελέτη έχει αποδείξει ότι σε βάθος ενεργειακού σχεδιασμού έτους/ετών, τα οφέλη από τη διείσδυση των ΑΠΕ είναι αξιοσημείωτα, χωρίς να διακυβεύονται οι αξιοπιστία και ευστάθεια του συστήματος.

## ***2.2 Ιδέα αντιμετώπισης της στοχαστικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υπό την οργάνωση εικονικού σταθμού παραγωγής***

Οι παραπάνω παρουσιασθείσες μέθοδοι αυξάνουν μεν, αλλά δεν απελευθερώνουν την ευρύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο των ΣΗΕ, μειώνουν την εξυπηρέτηση των φορτίων, προδιαγράφουν επιπλέον δαπανηρές επενδύσεις για εξασφάλιση αυξημένης διείσδυσης και παρουσιάζουν απώλειες μετατροπής. Η επέκταση της ενεργής πρακτικής των υβριδικών σταθμών μέσα από το πρίσμα συνδυασμού στοχαστικής και σταθερής εξόδου πηγών ενός ΕιΣΠ, θα μπορεί να καλύψει σημαντική απώλεια ισχύος και έτσι να αποδίδει συνολικά εγγυημένη ισχύ, όπως αυτή ορίζεται στην [24]. Το τελευταίο ισοδυναμεί και με τη δυνατότητα της ΔΠ να εκτοπίζει συμβατική παραγωγή, ικανότητα που έως τώρα είναι περιορισμένη και αποτελούσε θεμελιώδες ζήτημα που εμπόδιζε ευρύτερη διείσδυση της ΔΠ στα σύγχρονα ΣΗΕ [25].

Αν υποθεθεί ότι υπάρχει ημερήσιος προγραμματισμός λειτουργίας και εφεδρειών των πηγών του ΕιΣΠ [26], τότε η απώλεια ισχύος μιας μονάδας μπορεί να καλυφθεί με κατάλληλη αναδιανομή της στις υπόλοιπες πηγές. Η αναδιανομή όμως, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο με μοναδικό και άμεσο τρόπο, για τους παρακάτω λόγους:

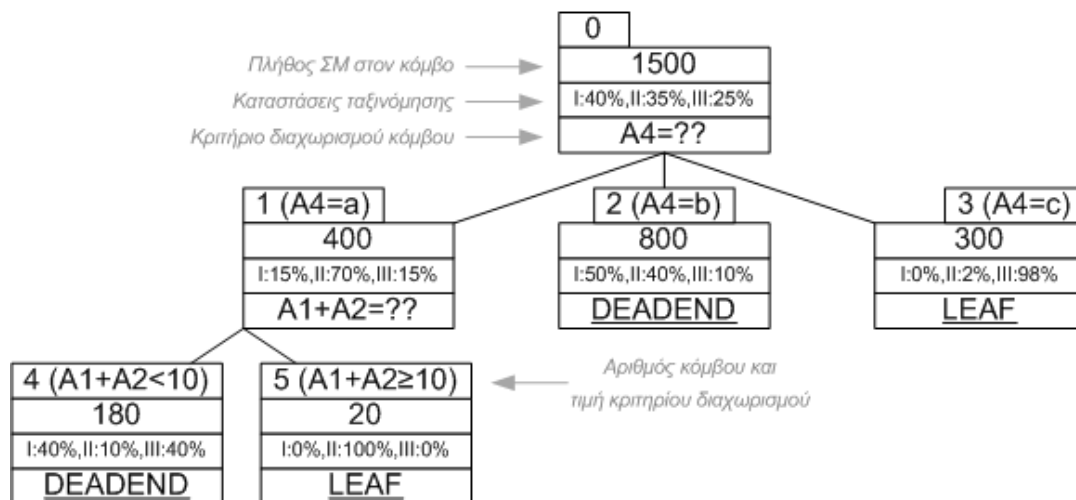
- Κάθε μονάδα ΔΠ περιγράφεται από διαφορετική συνάρτηση κόστους, χρόνο και κόστος εκκίνησης [27] καθώς και διαθέσιμα περιθώρια, άρα υπονοείται τεράστιο πλήθος πιθανών συνδυασμών φόρτισής τους,
- Το φορτίο του ΕιΣΠ (μέρος του οποίου διακοπτόμενο) μπορεί να αποκλίνει από το αναμενόμενο,
- Η φόρτιση των Μ/Σ και γραμμών μεταφοράς (εξαρτάται και από το αμέσως προηγούμενο σημείο) μπορεί να περιορίζει τους πιθανούς συνδυασμούς αναδιανομής της απώλειας,
- Οι εφεδρείες από τον ημερήσιο προγραμματισμό που είτε έχουν αποδοθεί, είτε απομένουν να προσφερθούν προς το ΣΗΕ δεν μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστές, αλλά καθορίζονται σε πραγματικό χρόνο από τον εκάστοτε διαχειριστή και
- Η εφεδρεία που είναι σε λειτουργία («θερμή») μπορεί να μην επαρκεί ή/και η «ψυχρή» να προσφέρει αποδοτικότερους συνδυασμούς ανακατανομής της απώλειας.

Γίνεται προφανές ότι τόσο το πεδίο των πιθανών αναδιανομών της απώλειας, όσο και το πλαίσιο λειτουργίας του ΣΗΕ μες στο οποίο αυτές θα εφαρμοστούν χαρακτηρίζονται από ασάφεια και στοχαστικότητα. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται παρακάτω το εργαλείο του τομέα της Εξόρυξης Δεδομένων, τα Δέντρα Αποφάσεων (ΔΑ).

## 2.3 Δέντρα αποφάσεων

Στον τομέα της Θεωρίας Πληροφορίας η ραγδαία αύξηση του όγκου των δεδομένων, καθιστά δύσκολο για οποιονδήποτε αναλυτή την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη λήψη αποφάσεων. Για να απαντηθεί το πρόβλημα, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία εξόρυξης δεδομένων. Κυριότερο εξ αυτών είναι τα ΔΑ [28]. Τα ΔΑ είναι μία δενδρική δομή που βασίζεται στην εξαγωγή κανόνων από ένα Σύνολο Μάθησης (ΣΜ) προταξινομημένων δεδομένων. Το ΣΜ μπορεί να ειπωθεί ως μία βάση δεδομένων. Κατά το τελευταίο, κάθε εγγραφή του ΣΜ περιλαμβάνει τις τιμές των χαρακτηριστικών του και την κατάσταση ταξινόμησής του (θα ακολουθήσει αναλυτικό παράδειγμα στην Υποενότητα 2.4.3.2). Κάθε εσωτερικός κόμβος του ΔΑ διαχωρίζει το υποσύνολό του σε έναν αριθμό μικρότερων υποσυνόλων προς τους κόμβους-τέκνα του. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση κάποιο/α κριτήριο/α επί των χαρακτηριστικών του ΣΜ. Κάθε κόμβος αξιολογείται αν είναι αρκετά καθαρός ως προς μία από τις καταστάσεις ταξινόμησής του. Αν είναι, τότε καλείται τερματικός, διαφορετικά, θα διαχωριστεί περαιτέρω.

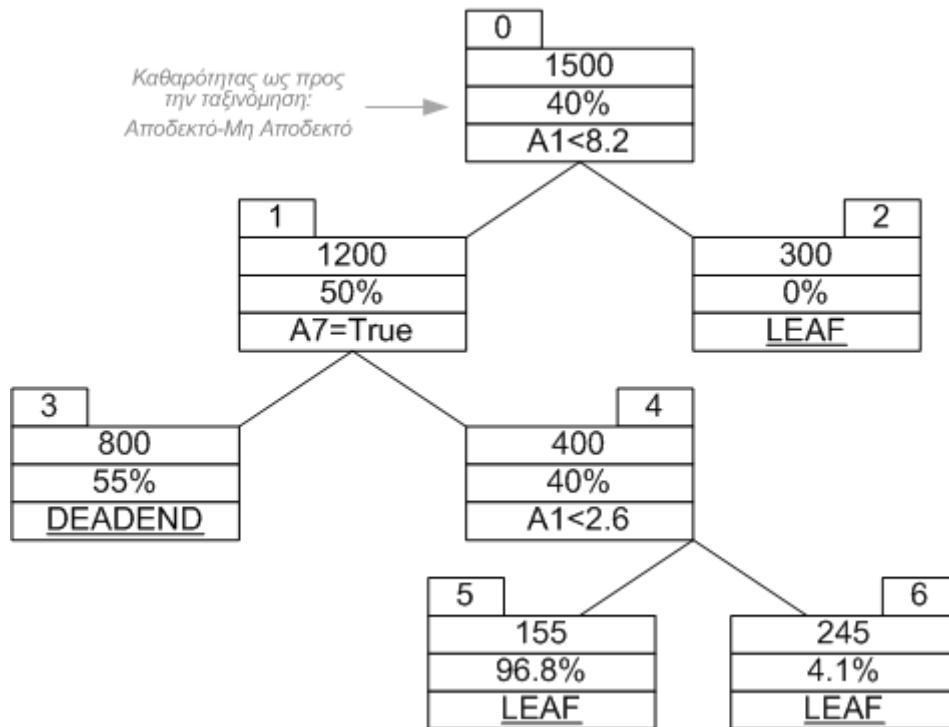
Στη γενική μορφή του ένα ΔΑ ταξινομείται ως προς ποικίλες καταστάσεις, οι κόμβοι του αναπτύσσονται με ελεύθερο πλήθος απογόνων (τουλάχιστον δύο) και με πολυπαραγοντικό κριτήριο διαχωρισμού. Τέτοια ΔΑ εφαρμόζονται κυρίως στην αναγνώριση προτύπων και ενδεικτικό παράδειγμά τους είναι αυτό του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1. Παράδειγμα ΔΑ πολυπαραγοντικών κριτηρίων διαχωρισμού και τριών καταστάσεων ταξινόμησης.

Στις περισσότερες μελέτες επί ενός ΣΗΕ, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε μία δυαδική κατάταξη των παρατηρούμενων καταστάσεων, ήτοι Αποδεκτή/Απορριφθείσα, Ασφαλής/Επικίνδυνη, κτλ. Επιπλέον, το περιορισμένο πλήθος των χαρακτηριστικών του ΣΗΕ (ισχύεις, τάσεις, ρεύματα, κτλ) και η περιορισμένη αλληλεξάρτηση των όμοιων μεταξύ τους (π.χ. τάσεις μεταξύ διαφορετικών ζυγών) επιτρέπει μονοπαραγοντικό διαχωρισμό της πληροφορίας. Σε τέτοιου τύπου ΔΑ κάθε

κόμβος διαχωρίζεται στη βάση ενός χαρακτηριστικού, προς δύο τέκνα τα οποία αξιολογούνται ως προς την καθαρότητά τους στη δυαδική ταξινόμηση, όπως δίνεται και στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Παράδειγμα ΔΑ μονοκριτηριακού διαχωρισμού και δυαδικής ταξινόμησης (Αποδεκτό-Μη Αποδεκτό).

Συνήθως, το αριστερό τέκνο κάθε κόμβου περιλαμβάνει το υποσύνολο του ΣΜ που πληροί το κριτήριο διαχωρισμού. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.2 ο κόμβος 4 περιλαμβάνει το υποσύνολο του ΣΜ για το οποίο  $A1 < 8.2$  και  $A7 = \text{False}$ , ενώ ο κόμβος 2 το υποσύνολο του ΣΜ για το οποίο  $A1 \geq 8.2$ . Η κυριαρχία των μεταβλητών συνεχούς πεδίου πραγματικών τιμών καθιστούν σχεδόν αποκλειστικά ιδανική την αξιολόγηση και τελικά επιλογή των κριτηρίων διαχωρισμού σε κάθε φάση ανάπτυξης του ΔΑ, την εντροπία πληροφορίας κατά Shannon.

Κατόπιν της αξιολόγησης των κόμβων ενός ΔΑ, ένας τερματικός κόμβος μπορεί να είναι είτε φύλλο (επαρκής καθαρότητα ως προς τη δυαδική ταξινόμηση), είτε αδιέξοδο (ανεπαρκής καθαρότητα ως προς τη δυαδική ταξινόμηση). Από κάθε φύλλο, το μονοπάτι ως τη ρίζα του ΔΑ, μπορεί να γραφεί στη μορφή *if-then-else* εκφράσεων που συνιστούν κανόνα. Στον Πίνακα 2.1 δίνονται οι κανόνες που εξάγονται από τα δύο παραπάνω ΔΑ.

Πίνακας 2.1. Κανόνες εξαγόμενοι από τα ΔΑ των Σχημάτων 2.1 και 2.2.

ΔΑ	Κανόνας
Σχήμα 2.1	<i>if</i> ( $A4=c$ ) <i>then</i> III <i>if</i> ( $A4=a$ ) <i>and</i> ( $A1+A2 \geq 10$ ) <i>then</i> II
Σχήμα 2.2	<i>if</i> ( $A1 \geq 8.2$ ) <i>then</i> FALSE <i>if</i> ( $A1 < 8.2$ ) <i>and</i> ( $A7 = \text{FALSE}$ ) <i>and</i> ( $A1 < 2.6$ ) <i>then</i> TRUE <i>if</i> ( $A1 < 8.2$ ) <i>and</i> ( $A7 = \text{FALSE}$ ) <i>and</i> ( $A1 \geq 2.6$ ) <i>then</i> FALSE

Σε κάθε περίπτωση εφαρμογής ΔΑ, τα ακόλουθα γνωρίσματα του εργαλείου πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν:

- α. Το πρόβλημα γνώσης που θα περιγραφεί μέσω του ΔΑ, υποτίθεται (χωρίς απαραίτητα να είναι) γραμμικά διαχωρίσιμο. [29]
- β. Το μέσο βάθος ενός ΔΑ (καθορίζεται ουσιαστικά από τα κριτήρια παύσης του περαιτέρω διαχωρισμού των κόμβων του) αντιπροσωπεύει την αποτελεσματικότητά του, ήτοι «μπορούν οι κανόνες του ΔΑ να γενικευθούν ή έχουν προσαρμοστεί (overfitted) στο ΣΜ;». Το μέσο πλάτος του ΔΑ (καθορίζεται ουσιαστικά από τη μέθοδο επιλογής των κριτηρίων διαχωρισμού) αντιπροσωπεύει την ακρίβειά του, ήτοι «παράγει το ΔΑ αρκετούς κανόνες;». [29]
- γ. Η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια ενός ΔΑ δεν μπορούν να βελτιστοποιηθούν ταυτόχρονα. [30]
- δ. Το ΔΑ, σαν εργαλείο επαγωγής, μπορεί να επιδείξει αμφισβητήσιμη επίδοση σε καταστάσεις του προβλήματος γνώσης εκτός του ΣΜ (ικανότητα γενίκευσης). [31]
- ε. Ειδικότερα του (δ), για να αποφευχθεί η προσαρμογή του ΔΑ στο ΣΜ (overfitting), χρησιμοποιείται είτε κριτήριο παύσης που αποτρέπει την δημιουργία εξειδικευμένων τέκνων κατά την ανάπτυξη του ΔΑ, είτε κλάδεμα των εξειδικευμένων τέκνων μετά την ανάπτυξη του ΔΑ, είτε και τα δύο μαζί. [28]
- στ. Όταν για ένα ΣΜ ενός προβλήματος γνώσης υπάρχουν εναλλακτικά ΔΑ (π.χ. διαφορετικός αλγόριθμος επιλογής κριτηρίων διαχωρισμού, διαφορετικό κριτήριο παύσης, κτλ.) που το περιγράφουν, τότε το ΔΑ με την ευρύτερη γενίκευση πρέπει να επιλέγεται ως το αντιπροσωπευτικότερο για το πρόβλημα. Αυτό μπορεί ισοδύναμα να διατυπωθεί και για εναλλακτικά ΣΜ κάθε ένα εκ των οποίων εκπαιδεύει ένα ΔΑ. [32]

## **2.4 Εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος σε εικονικό σταθμό**

### ***παραγωγής με δέντρα αποφάσεων***

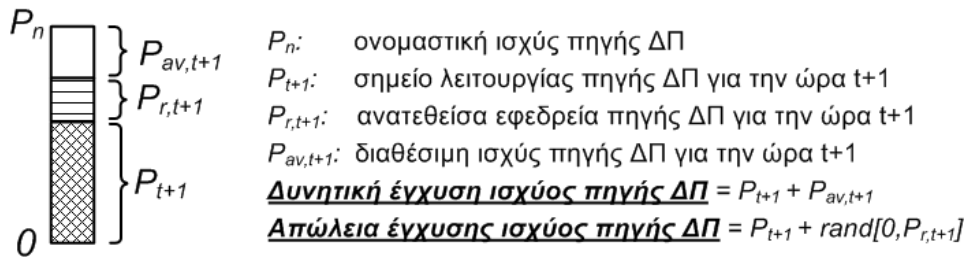
Για την εξασφάλιση παροχής εγγυημένης ισχύος σε συμβάν απώλειας, ο διαχειριστής/ιδιοκτήτης του ΕισΠ καλείται να έχει προετοιμάσει πρόγραμμα αναδιανομής της απολεσθείσας ισχύος στις υπόλοιπες μονάδες. Ως εκ τούτου, κάθε ώρα  $t$  θα εξάγεται, από την προτεινόμενη μέθοδο, αναδιανομή απώλειας για την ώρα  $t+1$ . Οι κανόνες που θα προκύπτουν από ΔΑ θα είναι οι προγραμματισμοί της εν λόγω αναδιανομής. Παρακάτω θα οριστεί το πλαίσιο, οι αλγόριθμοι και οι παράμετροι της μεθοδολογίας.



### 2.4.1 Απώλεια ισχύος

Βάσει του ωριαίου προγραμματισμού ημέρας του ΕιΣΠ, ως **απώλεια ισχύος επιλέγεται η δυνητικά υψηλότερη έγχυση ισχύος μονάδας/ων ΔΠ συνδεδεμένης/ων υπό κοινό σημείο κοινής σύνδεσης**. Με το τελευταίο εννοείται ότι ένα αιολικό πάρκο από πέντε ανεμογεννήτριες, ένας σταθμός βιομάζας αποτελούμενος από δύο γεννήτριες, ένα Φ/Β πάρκο με δεκάδες αντιστροφείς και εκατοντάδες πλαίσια, κτλ. αποτελούν κάθε ένα από αυτά έναν υποψήφιο ως πιθανή απώλεια. Ως *δυνητική έγχυση* μιας πηγής ΔΠ θεωρείται το άθροισμα της καθορισμένης ισχύος (από τον ωριαίο προγραμματισμό) συν το διαθέσιμο περιθώριό της. Εξαιρείται η οποιαδήποτε ανατεθείσα στρεφόμενη εφεδρεία. Κατά τον ορισμό αυτό, εξετάζεται το χειρότερο σενάριο, αφού συνυπολογίζοντας το διαθέσιμο περιθώριο κάθε μονάδας ΔΠ, η αναδιανομή της απώλειας θα είναι δυσχερέστερη.

Ας τονιστεί ότι η *δυνητικά υψηλότερη έγχυση ισχύος* δε σχετίζεται με την *απώλεια ισχύος* καθ' εαυτή. Η *απώλεια ισχύος* μιας μονάδας ΔΠ είναι ίση με την καθορισμένη ισχύ (από τον ωριαίο προγραμματισμό) συν ένα τυχαίο ποσό της ανατεθείσας στρεφόμενης εφεδρείας. Διευκρινιστικά δίνεται το Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3. Διάκριση μεταξύ δυνητικής έγχυσης ισχύος και απώλειας έγχυσης ισχύος πηγής ΔΠ για το πρόβλημα της εγγυημένης ισχύος ΕιΣΠ.

### 2.4.2 Στάδια αναδιανομής απώλειας ισχύος στον εικονικό σταθμό παραγωγής

Οι χρόνοι εκκίνησης των πηγών ΔΠ κυμαίνονται από μερικά δευτερόλεπτα έως αρκετά λεπτά [27]. Συνεπώς, αν κάποιος προγραμματισμός που εξαχθεί από τη μεθοδολογία εμπλέκει μονάδα ΔΠ αργής εκκίνησης, ένα μέρος της απώλειας θα αποδοθεί καθυστερημένη. Ο ΕιΣΠ θα καταγράψει χαμένα κόστη ευκαιρίας, ποινές ελλείμματος [9], αδυναμία να εκτελέσει εντολές του διαχειριστή στον οποίο υπάγεται και, αναλόγως, να χρεωθεί μέρος της ελλειμματικής ισχύος κατά τις τιμές της αγοράς αποκλίσεων, εφόσον δεν καταφέρει να το καλύψει μες στην περίοδο προγραμματισμού [43-45]. Για να αντιμετωπιστούν τα ανωτέρω, προτείνονται δύο στάδια εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος από τον ΕιΣΠ: ένα βραχυπρόθεσμης κάλυψης (ταχύ και όχι απαραίτητα οικονομικά αποδεκτό) και ένα μακροπρόθεσμης κάλυψης (τουλάχιστον κάποιας ορισμένης στάθμης οικονομικότητας). Δηλαδή, από τη μεθοδολογία θα εξαγονται δύο προγράμματα αναδιανομής της απώλειας.

#### 2.4.2.1 Βραχυπρόθεσμη κάλυψη απώλειας ισχύος εικονικού σταθμού παραγωγής

Σε αυτή τη φάση, μόνο οι ήδη ενεργές και ταχύτερης εκκίνησης πηγές ΔΠ προκρίνονται, ανεξαρτήτως του κόστους λειτουργίας τους. Από όλα τα πιθανά προγράμματα αναδιανομής της απώλειας στις ΔΠ του ΕιΣΠ (που συνιστούν το ΣΜ του αντίστοιχου ΔΑ που θα εκπαιδευτεί ακολούθως), εκείνα τα οποία υλοποιούνται σε χρόνο ο οποίος είναι τάξης ταχύτερος από τα υπόλοιπα, κρίνονται ως αποδεκτά. Ο χρόνος αυτός αναφέρεται στο εξής ως **χρονικό ανώφλι**. Εναλλακτικά ή/και αν υπάρχει ποινή ή υποχρέωση του ΕιΣΠ να μην αποκλίνει εκ της προγραμματισμένης ισχύος του παρά έως ενός μέγιστου χρόνου  $t_{off,max}$ , τότε το χρονικό ανώφλι μπορεί να τίθεται ίσο ακριβώς με το  $t_{off,max}$ .

Για την αξιολόγηση των προγραμμάτων αναδιανομής της απώλειας συνεξετάζονται επίσης, τεχνικοί περιορισμοί. Πιο συγκεκριμένα η φόρτιση των Μ/Σ [33,34], η φόρτιση των γραμμών και οι τάσεις [35] σε όλους τους ζυγούς του ΣΗΕ στο οποίο εντάσσεται ο ΕιΣΠ πρέπει να περιορίζονται κατά τους σχετικούς κώδικες.

#### 2.4.2.2 Μακροπρόθεσμη κάλυψη απώλειας ισχύος εικονικού σταθμού παραγωγής

Σε αυτό το στάδιο, εφαρμόζεται αξιολόγηση στη βάση ανάλυσης κέρδους των προγραμμάτων αναδιανομής. Για όλα τα πιθανά προγράμματα αναδιανομής της απώλειας στις μονάδες ΔΠ του ΕιΣΠ (που συνιστούν τις εγγραφές του ΣΜ του αντίστοιχου ΔΑ που θα εκπαιδευτεί ακολούθως), υπολογίζεται η αντίστοιχη συνάρτηση κόστους ως εκ της (2.1).

$$Dispatch\ Cost = -\rho_{E,t+1}E_{t+1} + \rho_{R,t+1}R_{t+1} + \rho_{L,t+1}\widetilde{Load}_{t+1} - \sum_{i \in S_{DG}} [C_{DG,i,t+1}(P_{DG,i,t+1} + R_{DG,i,t+1})I_{i,t+1} + SC_{DG,i,t+1}J_{i,t+1}] - \sum_{i \in S_{int}} C_{int,i,t+1}R_{curt,i,t+1} - \sum_{i \in S_{str}} C_{str,i,t+1}(P_{str,i,t+1}) \quad (2.1)$$

Όπου,  $t+1$  εννοείται η επόμενη ώρα,  $\rho_E$ ,  $\rho_R$  και  $\rho_L$  είναι οι τιμές ενέργειας, στρεφόμενης εφεδρείας και λιανικής φορτίου αντιστοίχως,  $E$  είναι η ενέργεια που πωλείται (αρνητικού προσήμου) ή αγοράζεται (θετικού προσήμου) από τον ΕιΣΠ προς το ΣΗΕ,  $R$  είναι το άθροισμα της στρεφόμενης εφεδρείας όλων των συντελεστών του ΕιΣΠ,  $Load$  είναι το εξυπηρετούμενο φορτίο του ΕιΣΠ, το  $C$  αντιπροσωπεύει τη συνάρτηση κόστους κάθε μονάδας ΔΠ, διακοπτόμενου φορτίου (δείκτης  $int$ ) ή μέσου αποθήκευσης (δείκτης  $str$ ),  $SC$  είναι το κόστος εκκίνησης κάθε πηγής ΔΠ,  $I$  και  $J$  είναι δυαδικές μεταβλητές που αντιπροσωπεύουν τη λειτουργία και την εκκίνηση κάθε μονάδας ΔΠ, αντιστοίχως. Περαιτέρω λεπτομέρειες για την (2.1) δίνονται και στην [26], όπου η εν λόγω αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του βέλτιστου ωριαίου προγραμματισμού ημέρας του ΕιΣΠ.

Μετά τον υπολογισμό της (2.1) για όλες τις πιθανές αναδιανομές της απώλειας, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση μεταξύ των τιμών που υπολογίστηκαν και προσδιορίζεται κόστος άνω του οποίου οι αναδιανομές θεωρούνται αποδεκτές. Αυτό το κέρδος ξεχωρίζει την άνω  $X\%$

οικονομικότητα των τιμών, π.χ. άνω-30%, άνω-20%, κτλ. κατά την επιλογή του ιδιοκτήτη ή του χειριστή του ΕιΣΠ. Στο εξής το ποσό αυτό θα καλείται **κατώφλι κέρδους**. Η εν λόγω αξιολόγηση είναι συγκριτική και δεν μπορεί να είναι πιο ξεκάθαρη (αγγλικά: crisp), διότι, πρώτον, η συνάρτηση (2.1) παράγει ένα γενικά συνεχές πεδίο τιμών με σχετικά σταθερή μονοτονία και, δεύτερον, το πρόβλημα χαρακτηρίζεται από ασάφεια/στοχαστικότητα όπως περιγράφηκε στην *Υποενότητα 2.2*.

Επιπλέον, στην περίπτωση που δεν ήταν εφικτό να προκύψει πρόγραμμα βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας (βλ. *Υποενότητα 2.4.2.1*) τότε στη συνάρτηση (2.1) πρέπει να προσμετρηθεί, πέραν του χαμένου κόστους ευκαιρίας, εκτιμώμενη ποινή μη εξυπηρετούμενου φορτίου ή/και κόστος αγοράς αποκλίσεων. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί, έτσι ώστε να εξεταστεί αν το πρόγραμμα βραχυπρόθεσμης κάλυψης μπορεί να παραλειφθεί εκ των προτέρων υπέρ του αντίστοιχου της μακροπρόθεσμης κάλυψης, αφού το τελευταίο μπορεί να είναι συνολικά πιο αποδοτικό/αποδεκτό. Όμως, το τελευταίο αναιρεί την υπόθεση ότι το ωριαίο πρόγραμμα ημέρας είναι βέλτιστο, κάτι το οποίο δεν απασχολεί στην πορεία της παρούσας.

Και εδώ συνεξετάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί [33-35] που πρέπει να πληρούνται για κάθε πιθανή αναδιανομή της απώλειας ισχύος. Επιπλέον, αν υποτεθεί ότι διατίθεται υποδομή έξυπνων μετρητών, ο διαχειριστής του ΕιΣΠ μπορεί να θέσει αυστηρότερα όρια από αυτά των κωδίκων, στο πλαίσιο υψηλότερης ποιότητας παρεχόμενης ισχύος [36].

### **2.4.3 Μέθοδος εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος σε εικονικό σταθμό παραγωγής με δέντρα αποφάσεων**

#### **2.4.3.1 Προαπαιτούμενα της μεθοδολογίας**

Τα κάτωθι δεδομένα είναι απαραίτητα για την προτεινόμενη τεχνική:

- Ο ωριαίος προγραμματισμός ημέρας του ΕιΣΠ, π.χ. από [26],
- Πρόβλεψη/εκτίμηση του φορτίου για την ώρα  $t+1$ , είτε ως εκ νευρωνικών δικτύων [8], είτε ως εξ ανάλυσης ιστορικών δεδομένων καταγεγραμμένων από μετρητές [36],
- Η τιμή αγοράς ενέργειας, εφεδρειών, φορτίου ΕιΣΠ (ειδική τιμολόγηση, στη βάση συμφωνίας), κτλ.,
- Οι συναρτήσεις κόστους όλων το μονάδων των ΕιΣΠ συμπεριλαμβανομένων και των μέσων αποθήκευσης,
- Η συνάρτηση μεταφοράς κάθε μονάδας ΔΠ (δυναμικό μοντέλο) για αναπαράσταση του ΕιΣΠ σε σχετικό πρόγραμμα προσομοίωσης, π.χ. Simulink® και
- Στοιχειώδες σύστημα τηλεπικοινωνίας για ανταλλαγή μετρήσεων και οδηγιών μεταξύ του διαχειριστή του ΕιΣΠ και των συντελεστών του [37].

#### 2.4.3.2 Δημιουργία συνόλων μάθησης για την εκπαίδευση των δέντρων απόφασης

Για κάθε ένα εκ των δύο σταδίων κάλυψης της θεωρούμενης απώλειας θα παραχθεί ένα ΣΜ. Πρώτα θα δημιουργηθεί το ΣΜ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης και θα εκπαιδευτεί το αντίστοιχο ΔΑ. Έτσι, θα διαπιστωθεί αν εξάγεται προγραμματισμός και αν πρέπει να προσμετρηθούν ή όχι χαμένα κόστη ευκαιρίας και ποινή μη εξυπηρετούμενο φορτίου για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη. Στη συνέχεια, παράγεται το δεύτερο ΣΜ που εκπαιδεύει το ΔΑ της μακροπρόθεσμης αναδιανομής της απώλειας.

Η δημιουργία των ΣΜ εκτελείται μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων για τις καταστάσεις προ και κατόπιν της θεωρούμενης απώλειας. Οι τρεις κυριότεροι λόγοι που χρησιμοποιήθηκε Monte Carlo προσομοίωση για τη δημιουργία των ΣΜ είναι, πρώτον, δε διατίθενται πραγματικά δεδομένα (εργαζόμαστε σε ορίζοντα μιας ώρας μπροστά), αλλά μόνο κάποια πρόβλεψή τους, δεύτερον, το πρόβλημα έχει χαρακτηριστικά βελτιστοποίησης και, τρίτον, μαθηματική μοντελοποίηση του εν λόγω προβλήματος θα κινδύνευε από τη στοχαστικότητα των συντελεστών που εμπλέκονται.

Πρακτικά και πιο συγκεκριμένα:

- Το φορτίο όλων των ζυγών του θεωρούμενου ΣΗΕ λαμβάνει τυχαία τιμή μεταξύ της τιμής του για την ώρα  $t$  και της πρόβλεψης/εκτίμησής του για την ώρα  $t+1$  ένα-προς-ένα,
- Η ανατεθείσα εφεδρεία κάθε μονάδας ΔΠ, διαιρείται σε τέταρτα και δεσμεύεται τυχαία (ενδεχομένως δηλαδή, να έχει κληθεί προς ρύθμιση από τον διαχειριστή) και
- Η θεωρούμενη απώλεια έγχυσης ισχύος συν την ανατεθείσα εφεδρεία της που δεν έχει κληθεί προ σφάλματος (βάσει του μόλις παραπάνω) αναδιανέμεται με τυχαίο τρόπο σε όλες τις υπόλοιπες πηγές της ΔΠ και στα ελεγχόμενα φορτία.

Σε κάθε περίπτωση, όλες οι μονάδες ΔΠ και τα ελεγχόμενα φορτία του ΕιΣΠ ρυθμίζονται εντός των τεχνικών ελαχίστων και των διαθέσιμων μεγίστων τους. Οι προγραμματισμοί αναδιανομής αξιολογούνται ως ακολούθως.

ΣΜ βραχυπρόθεσμης κάλυψης απώλειας: Για όλες τις μονάδες ΔΠ του ΕιΣΠ, τα σημεία λειτουργίας τους αρχικής κατάστασης (προ απώλειας) και τα αντίστοιχα της τελικής (κατόπιν αναδιανομής της απώλειας) εφαρμόζονται στο μοντέλο του ΕιΣΠ στην πλατφόρμα της δυναμικής προσομοίωσης. Ο προσομοιωμένος χρόνος επίτευξης της ισχύος τελικής κατάστασης του ΕιΣΠ συν ο μέγιστος χρόνος εκκίνησης ΔΠ (για όσες εκκινούν από κατάσταση σβέσης βάσει του προγραμματισμού) είναι ο χρόνος εκτέλεσης της αναδιανομής της απώλειας. Διευκρινίζεται εδώ ότι αν αντί για χρήση πλατφόρμας δυναμικής προσομοίωσης, είχε προτιμηθεί – προς χάριν απλότητας – αξιολόγηση των χρόνων ράμπας των συντελεστών του ΕιΣΠ, ενδέχεται να προσδιορίζονταν λανθασμένοι χρόνοι, αφού ο έλεγχος κάποιων πηγών ΔΠ μπορεί να αποδώσει σε πρώτη ή σε δεύτερη φάση μεταβολή στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του επιθυμητού (βλέπε υδραυλικό πλήγμα για υδροηλεκτρικές μονάδες και μονάδες υγρού καυσίμου με έλεγχο πίεσης τροφοδοσίας [46] και μεταβατικό ναδίρ υπό έλεγχο γωνιακής ταχύτητας Α/Γ προς αύξηση ισχύος

[47]) και με τη σειρά της αυτή να προκαλέσει αντίδραση ελέγχου ισχύος-συχνότητας μεταξύ των μονάδων, ειδικά για ΣΗΕ μικρής αδράνειας. Κάθε προγραμματισμός αναδιανομής κρίνεται ως Αποδεκτός (Αληθής) τόσο αν τηρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί, όσο και αν ο χρόνος εκτέλεσης της αναδιανομής της απώλειας είναι μικρότερος του χρονικού ανωφλίου.

ΣΜ μακροπρόθεσμης κάλυψης απώλειας: Από τα κέρδη/κόστη όλων των πιθανών προγραμματισμών αναδιανομής της απώλειας που υπολογίστηκαν κατά τη (2.1), προσδιορίζεται η τιμή εκείνη που διαχωρίζει το άνω X% από το κάτω (100-X)%. Κάθε προγραμματισμός αναδιανομής κρίνεται ως Αποδεκτός (Αληθής) τόσο αν τηρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί, όσο και αν η τιμή του ως εκ της συνάρτησης (2.1) είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου κέρδους.

P <sub>1</sub> (kW)	P <sub>2</sub> (kW)	P <sub>3</sub> (kW)	P <sub>4</sub> (kW)	P <sub>5</sub> (kW)	P <sub>6</sub> (kW)	P <sub>7</sub> (kW)	P <sub>8</sub> (kW)	P <sub>9</sub> (kW)	P <sub>10</sub> (kW)	T/F
0	0	0	20	0	0	17	30	110	0	FALSE
0	0	0	0	0	0	9	35	141	0	TRUE
0	0	14	16	11	11	20	43	60	0	FALSE
0	73	0	0	0	0	0	35	55	0	FALSE
0	34	0	0	0	0	0	30	122	2	FALSE
0	0	0	0	17	0	14	49	124	0	TRUE
0	0	0	0	0	18	14	30	102	0	FALSE
0	41	10	0	18	0	0	32	79	0	FALSE
0	0	20	0	0	14	0	49	91	0	FALSE
0	75	0	0	0	0	0	32	55	0	FALSE
0	0	0	0	0	0	0	35	145	0	TRUE

Σχήμα 2.4. Τμήμα του ΣΜ προς εκπαίδευση ΔΑ για εξαγωγή προγραμματισμού κάλυψης απώλειας σε ΕισΠ 10 συντελεστών (9 πηγές και διακοπτόμενο φορτίο υπό DSM) με θεωρούμενη απώλεια έγχυσης αυτή της ισχύος P<sub>1</sub>.

Συνοψίζοντας, κάθε εγγραφή του ΣΜ είναι ένας προσομοιωμένος προγραμματισμός κάλυψης της απώλειας, με χαρακτηριστικά τη φόρτιση κάθε μονάδας ΔΠ και το ποσό του διακοπτόμενου φορτίου που κλήθηκαν για την κάλυψη της απώλειας ισχύος, καθώς και την αξιολόγηση Αποδεκτή-Μη Αποδεκτή. Για εποπτικούς λόγους δίνεται στο Σχήμα 2.4 δείγμα μέρους εγγραφών ενός ΣΜ που χρησιμοποιήθηκε σε δοκιμές της μεθόδου παρακάτω.

Οι αλγόριθμοι για τη δημιουργία των ΣΜ αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον MATLAB® (έκδοση 7.6.0 του 2008a) και εκτελέστηκαν με το Parallel Computing Toolbox™. Να σημειωθεί επίσης ότι ο αλγόριθμος μπορεί να συνυπολογίζει πληροφορία για τη χρονική στιγμή εκδήλωσης της απώλειας, για παράδειγμα από βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη μείωσης αιολικής ισχύος.

#### 2.4.3.3 Εκπαίδευση των δέντρων απόφασης

Οι κανόνες των Αποδεκτών φύλλων (ορίζονται παρακάτω) των ΔΑ που εκπαιδεύονται από τα παραπάνω ΣΜ αποτελούν τους προγραμματισμούς κάλυψης/αναδιανομής της θεωρούμενης απώλειας. Η μέθοδος ΔΑ που χρησιμοποιείται είναι παραλλαγή της C4.5 [28]. Αναλυτικά, το ΣΜ στη ρίζα του ΔΑ και τα υποσύνολά του σε όλους τους μετέπειτα τερματικούς κόμβους διαχωρίζονται με βάση τη μετρική πληροφορίας του Shannon. Πιο συγκεκριμένα ακόμα, το

κανονικοποιημένο μέσο αμοιβαίο κέρδος πληροφορίας  $C$  υπολογίζεται για κάθε πιθανό διαχωρισμό σε κάθε τερματικό κόμβο (που δεν έχει χαρακτηριστεί φύλλο ή αδιέξοδο) σε κάθε βήμα ανάπτυξης/εκπαίδευσης του ΔΑ. Το  $C$  υπολογίζεται ως εκ της:

$$C_C^T(S) = \frac{2I_C^T(S)}{H_C(S) + H_T(S)} \quad (2.2)$$

με

- $I_C^T(S) = H_C(S) + H_{C|T}(S)$  ως το μέτρο της ικανότητας του χαρακτηριστικού διαχωρισμού  $T$  να παράγει καθαρούς απογόνους,
- $H_{C|T}(S) = p(S_y|S)H_C(S_y) + p(S_n|S)H_C(S_n)$  ως η μέση μεταγενέστερη εντροπία ταξινόμησης του  $S$  δεδομένου του αποτελέσματος του διαχωρισμού κατά το χαρακτηριστικό  $T$ ,
- $H_T(S) = -[p(S_y|S)\log_2(p(S_y|S)) + p(S_n|S)\log_2(p(S_n|S))]$  ως η εντροπία του  $S$  δεδομένου του αποτελέσματος του διαχωρισμού κατά το χαρακτηριστικό  $T$  και
- $H_T(S) = -[p(+|S)\log_2(p(+|S)) + p(-|S)\log_2(p(-|S))]$  ως η προγενέστερη εντροπία ταξινόμησης του  $S$ .

Όπου,  $p$  το ποσοστό (ή η πιθανότητα) να επαληθεύεται ο έλεγχος που περιγράφεται εντός της παρένθεσης για το εκάστοτε σύνολο  $S$ .

Η ανάπτυξη του ΔΑ γίνεται με απλό, γρήγορο, τοπικά βέλτιστο, αλλά όχι ολικά βέλτιστο τρόπο [29]. Τονίζονται τα ακόλουθα ιδιαίτερα γνωρίσματα που επιλέχθηκαν:

- α. Η  $X^2$  κατανομή εκτιμήτριας χρησιμοποιείται σαν κριτήριο παύσης της περαιτέρω ανάπτυξη του ΔΑ που ελέγχεται σε κάθε κόμβο. Το επίπεδο σημαντικότητας επιλέχθηκε  $\alpha=0.001$  [38].
- β. Ένας τερματικός κόμβος των εξαχθέντων ΔΑ είναι φύλλο όταν είναι καθαρότητας άνω του 90% (Αποδεκτός/Αληθής) ή κάτω του 10% (Μη Αποδεκτός/Ψευδής) και αδιέξοδος σε κάθε άλλη περίπτωση. Αν δεν υπάρχει Αποδεκτό φύλλο κατά τις ως άνω προδιαγραφές, τότε ο αδιέξοδος κόμβος με τη μεγαλύτερη καθαρότητα θεωρείται, κατ' εξαίρεση, φύλλο.
- γ. Κατόπιν της ολοκλήρωσης ανάπτυξης του ΔΑ, εφαρμόζεται απλοϊκό κλάδεμα. Συγκεκριμένα, κλαδεύονται όλοι οι αδιέξοδοι κόμβοι με καθαρότητα 42-58%.
- δ. Κατά την ανάπτυξη/εκπαίδευση του ΔΑ κάποιες μονάδες ΔΠ, λόγω των τεχνικών ελαχίστων τους, ενδέχεται να συμμετέχουν σε ελάχιστους πιθανούς προγραμματισμούς αναδιανομής της απώλειας του εκάστοτε υποσυνόλου του ΣΜ. Ως εκ τούτου δε θα είναι διακριτές από τον αλγόριθμο του ΔΑ. Για το λόγο αυτό στο υποσύνολο του ΣΜ που περιλαμβάνει κάθε τερματικός κόμβος διεξάγεται ξεχωριστός έλεγχος μηδενικής εξόδου των πηγών: για κάθε μονάδα ΔΠ αν οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας που την εμπλέκουν (που λειτουργεί δηλαδή υπό κάποια – μη μηδενική – ισχύ) δεν ξεπερνούν το 5% του μεγέθους του υποσυνόλου του ΣΜ του κόμβου, τότε η εν λόγω μονάδα

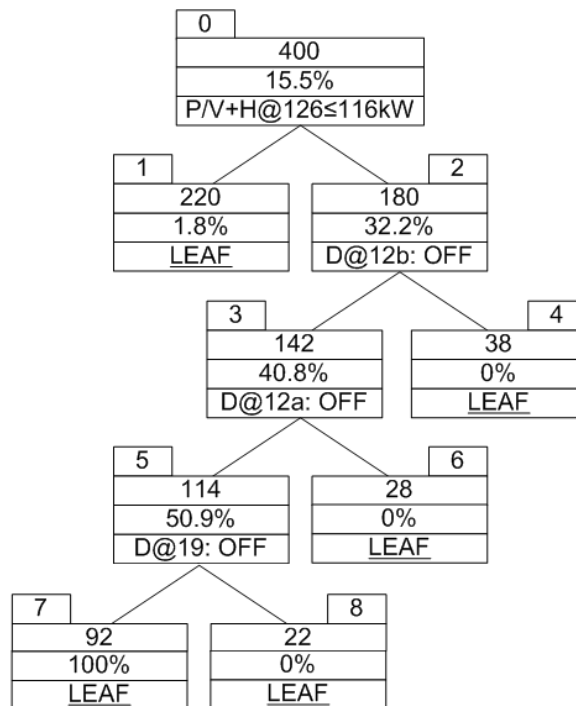
θεωρείται εκτός λειτουργίας για τον προγραμματισμό που περιγράφεται από τον κανόνα του σχετικού τερματικού κόμβου.

ε. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του ΔΑ αναπτύχθηκε πλήρως σε C++.

Ειδικά για το (δ), δίνεται διευκρινιστικά αναλυτικό παράδειγμα. Έστω ο ΕισΠ με τις μονάδες τεχνικών χαρακτηριστικών και προγραμματισμού που φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Θεωρείται η απώλεια ισχύος 70kW του αιολικού πάρκου στον ζυγό 43. Από ΣΜ που αναπτύχθηκε, εκπαιδεύεται ΔΑ για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας. Το εν λόγω ΔΑ δίνεται στο Σχήμα 2.5.

Πίνακας 2.2. Ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς, ωριαίος προγραμματισμός ισχύος, εφεδρείας και διαθεσίμων για τους συντελεστές ενός ΕισΠ.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{min}$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{r,t+1}$ (kW)	$P_{av,t+1}$ (kW)
D@12a	20.1	6	0	0	20.1
D@12b	20.1	6	0	0	20.1
D@19	20.1	6	0	0	20.1
WP@43	200.1	0	70.035	0	50
G/T@58	50.1	12	30.06	10.02	10
B/M@89	99.9	35	0	0	99.9
PV+H@126	150	0	49.5	10.5	90



Σχήμα 2.5. Ενδιάμεσο στάδιο ανάπτυξης ΔΑ για εξαγωγή προγραμματισμού μακροπρόθεσμης κάλυψης απώλειας ισχύος προς ερμηνεία του 2.4.3.3.(δ).

Ήδη από τον κόμβο-ρίζα του ΔΑ φαίνεται ένα μεγάλο μέρος της απώλειας να καλύπτεται από τη μονάδα PV+H@126, αφού καθοδηγείται να εγχύσει ισχύ τουλάχιστον 55kW (συνυπολογίζοντας να έχει εξαντληθεί ακόμα και η ανατεθείσα στρεφόμενη εφεδρεία της προ της απώλειας). Άρα, σε

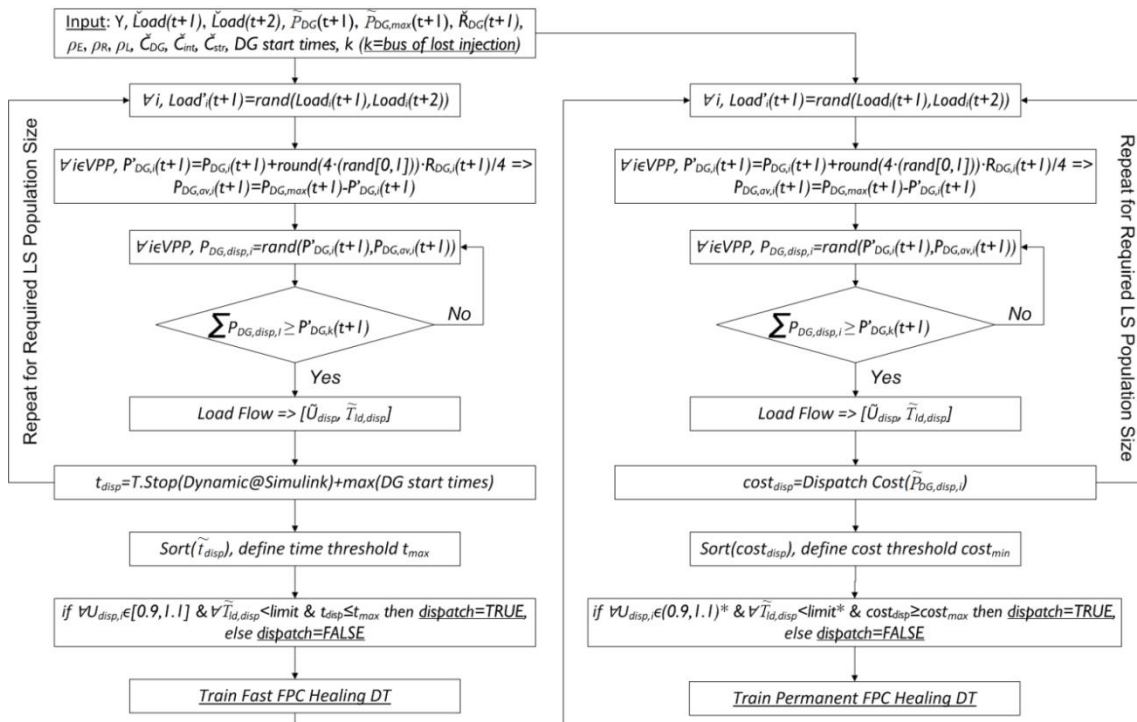
κάθε δεξιό απόγονο της ρίζας η αναδιανομή της απώλειας αποκλείεται να εμπλέκει τη B/M@89 λόγω του τεχνικού ελαχίστου της (δηλαδή οι πιθανοί προγραμματισμοί/εγγραφές του υποσυνόλου του ΣΜ θα αναφέρουν μηδενική ισχύ στη B/M@89). Ως εκ τούτου, το ΔΑ δε θα μπορεί να διακρίνει την κατάσταση φόρτισης της B/M@89. Για να είναι πληρέστερη η εικόνα του προγράμματος αναδιανομής της απώλειας ισχύος προς τις υπόλοιπες μονάδες του ΕισΠ, χρησιμοποιείται στα Αποδεκτά φύλλα ο ξεχωριστός έλεγχος μηδενικής ισχύος που περιγράφηκε στο (δ). Οι μονάδες οι οποίες προσδιορίζονται μηδενικής εξόδου θα σημαίνονται με υπογράμμιση.

#### 2.4.3.4 Περίπτωση απώλειας έγχυσης διαφορετικής της δυναμικά μέγιστη

Το ερώτημα που τίθεται είναι πώς αναπροσαρμόζονται οι παραπάνω προγραμματισμοί σε περίπτωση που χαθεί έγχυση διαφορετική της δυναμικά μέγιστης που επιλέχθηκε σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν στην Υποενότητα 2.4.1. Ουσιαστικά, αυτό απαιτεί να ενταχτεί η μονάδα της ΔΠ που αφορά τη δυναμικά μέγιστη έγχυση (στο εξής: **μονάδας απώλειας**) στους δύο προγραμματισμούς αναδιανομής απώλειας, δηλαδή:

- Για τον προγραμματισμό βραχυπρόθεσμης κάλυψης απώλειας και βάσει τη συνάρτησης μεταφοράς της μονάδας απώλειας, αυτή μπορεί να συνδράμει ποσό ισχύος το οποίο μπορεί να αποδώσει σε χρόνο μικρότερο του χρονικού ανωφλίου και
- Για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη, αρκεί μία απλή ανάλυση λάμδα μεταξύ των πηγών ΔΠ του σχετικού προγραμματισμού και της μονάδας απώλειας.

Συνολικά, η μέθοδος παρουσιάζεται από το διάγραμμα ροής της στο Σχήμα 2.6.

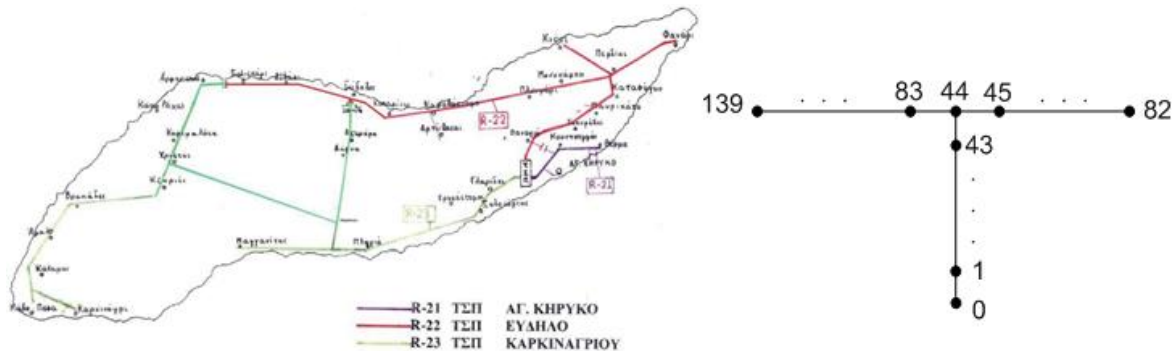


Σχήμα 2.6. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος από ΕισΠ, μέσω αναδιανομής απώλειας έγχυσης ισχύος από μονάδα του ΕισΠ σε δύο στάδια με χρήση ΔΑ.



## 2.5 Εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ικαρίας

Το ΣΗΕ της Ικαρίας έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητικών έργων, ειδικά για την προοπτική εγκατάστασης και λειτουργίας υβριδικού αιολικού αντλησιοταμιευτικού (Α/Τ) υδροηλεκτρικού σταθμού [21]. Οι μελέτες αυτές συμπέραναν ότι μέσω της προαναφερθείσας ηλεκτρικής τοπολογίας, η διείσδυση της αιολικής ισχύος μπορεί να μεγιστοποιηθεί.



Σχήμα 2.7. Γεωγραφική αναπαράσταση ροής της διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας (κόκκινη γραμμή δεξιά) και μονογραμμική ισοδύναμη αναπαράσταση του κύριου μέρους της (αριστερά).

Η διανομή R-22 (δίνεται και στο Σχήμα 2.7) είναι το ΣΗΕ στο οποίο θα δοκιμαστεί η προτεινόμενη μέθοδος. Αποτελείται από 140 ζυγούς μέσης τάσης, οι 57 εκ των οποίων είναι εξοπλισμένοι με Μ/Σ διανομής μέσης προς χαμηλή τάση. Το κύριο μέρος της διανομής αυτής διατρέχει τα βόρειο και δυτικό τμήματα του νησιού σε γραμμές ACSR-35. Οι κλάδοι της εν λόγω διανομής (εκτός του κύριου μέρους) είναι αναλόγως τύπου ACSR-35, ACSR-16, AAAC-70, AAAC-35, CU-35 και CU-16. Η θερινή αιχμή του συστήματος είναι ίση προς 2.4MW και αντιστοιχεί σε μέσο συντελεστή φόρτισης των Μ/Σ διανομής 78%, υποθέτοντας συντελεστή ισχύος 0.8. Η χειμερινή κοιλάδα του είναι περί 0.5MW. Στο Παράρτημα Γ' δίνονται τα στοιχεία των Μ/Σ διανομής, αναλυτικά οι οδεύσεις των γραμμών μεταξύ των ζυγών και γραφική απεικόνιση του θεωρούμενου ΣΗΕ.

### 2.5.1 Δοκιμή μεθόδου με μικρό εικονικό σταθμό παραγωγής

Ένας ΕιΣΠ αποτελούμενος από 9 μονάδες ΔΠ σε 8 ζυγούς διανομής και διακοπτόμενο φορτίο σε 4 ζυγούς διανομής (υπό Demand Side Management – DSM) θεωρείται συνδεδεμένο στην παροχή R-22 του ΣΗΕ της Ικαρίας. Τα ονομαστικά στοιχεία, οι συναρτήσεις κόστους λειτουργίας, τα τεχνικά ελάχιστα και οι χρόνοι εκκίνησης των μονάδων του ΕιΣΠ δίνονται στον Πίνακα 2.3. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο ΕιΣΠ είναι 680kW. Το διακοπτόμενο φορτίο μπορεί να κληθεί ως εφεδρεία η οποία ισούται με συγκεκριμένο ποσοστό του φορτίου. Διευκρινίζεται ότι το κόστος λειτουργίας δίνεται σε σχετική ισοτιμία και όχι απόλυτες τιμές.

Πίνακας 2.3. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς, συνάρτηση κόστους και χρόνος εκκίνησης για τους συντελεστές του μικρού ΕιΣΠ.

Ζυγός	Τύπος ΔΠ - Ισοδύναμος Συμβολισμός	$P_n$ (kW)	$P_{min}$ (kW)	$C(P\%)$ (eq/kWh)	Χρόνος εκκίνησης (min)
5	Diesel - D@5	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
7	Diesel - D@7	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
12	Diesel - D@12a	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
12	Diesel - D@12b	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
19	Diesel - D@19	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
43	Wind Park - WP@43	200.1	4	0	0.1
58	Geothermal - G/T@58	50.1	12	$0.09 \cdot P^2 - 0.13 \cdot P + 0.07$	10
89	Biomass - B/M@89	99.9	30	$0.23 \cdot P^2 - 0.32 \cdot P + 0.07$	20
126	PV-Hydro Hybrid - PV+H@126	150	4	0.03	0.1
----	Διακοπτόμενο φορτίο	80	0	$C_{int}$	0.0

### 2.5.1.1 Σενάρια φόρτισης συστήματος

Για την επιλογή των σεναρίων φόρτισης του ΣΗΕ επελέγησαν περιπτώσεις τέτοιες που να επιδεικνύουν τα θετικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες εφαρμογής της μεθόδου. Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας ζητείται να πληρούν ταυτόχρονα τόσο τους τεχνικούς περιορισμούς όσο και τα κριτήρια αποδεκτής υλοποίησης των δύο σταδίων κάλυψης της απώλειας. Ως εκ τούτων στοιχειοθετούνται τρία σεναρία φόρτισης:

1. Χειμερινό Τεχνικό: Σε αυτό το σενάριο η φόρτιση του ΣΗΕ ισούται με την ετήσια κοιλάδα, ο ωριαίος προγραμματισμός του ΕιΣΠ είναι βέλτιστος και η απώλεια της έγχυσης από τη μονάδα ΔΠ της δυνητικά μέγιστης έγχυσης μπορεί, κατά περίπτωση, να προκαλέσει φόρτιση Μ/Σ πέραν του μέσου συντελεστή φόρτισης 78% που διευκρινίστηκε παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η μονάδα G/T@58 συνδέεται σε Μ/Σ διανομής 75kVA και ως εκ τούτου δεν πρέπει να εγχέει άνω των 47kW υπό συντελεστή ισχύος 0.8.
2. Χειμερινό Μη-Βέλτιστο: Σε αυτό το σενάριο το φορτίο του ΣΗΕ είναι ίσο με την ετήσια κοιλάδα. Σε αντίθεση όμως, με την υπόθεση βέλτιστου ωριαίου προγραμματισμού, εδώ θεωρείται ένας αρχικός προγραμματισμός με μικρότερη οικονομικότητα. Αυτό μπορεί να στηριχθεί σε λόγο/ους έκτακτης συντήρησης, σφάλματος ελέγχου ή απώλειας ισχύος που είχε προηγηθεί.
3. Θερινό: Στο σενάριο αυτό το φορτίο του ΣΗΕ ισούται με τη θερινή αιχμή και ο προγραμματισμός των πηγών του ΕιΣΠ είναι ο βέλτιστος.

Για κάθε σενάριο φόρτισης εξετάστηκαν τρία επίπεδα οικονομικότητας για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας.

### 2.5.1.2 Αποτελέσματα

Οι κανόνες/προγραμματισμοί είναι εκφρασμένοι σε kW.

#### a. Χειμερινό Τεχνικό

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 2.4. Εξετάζεται η αναδιανομή της απώλειας του αιολικού πάρκου στον ζυγό 43.

Πίνακας 2.4. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{r,t+1}$ (kW)	$P_{av,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	0	0	20.1
D@7	20.1	0	0	20.1
D@12a	20.1	0	0	20.1
D@12b	20.1	0	0	20.1
D@19	20.1	0	0	20.1
WP@43	200.1	70.035	0	50
G/T@58	50.1	30.06	10.02	10
B/M@89	99.9	0	0	99.9
PV+H@126	150	49.5	10.5	90

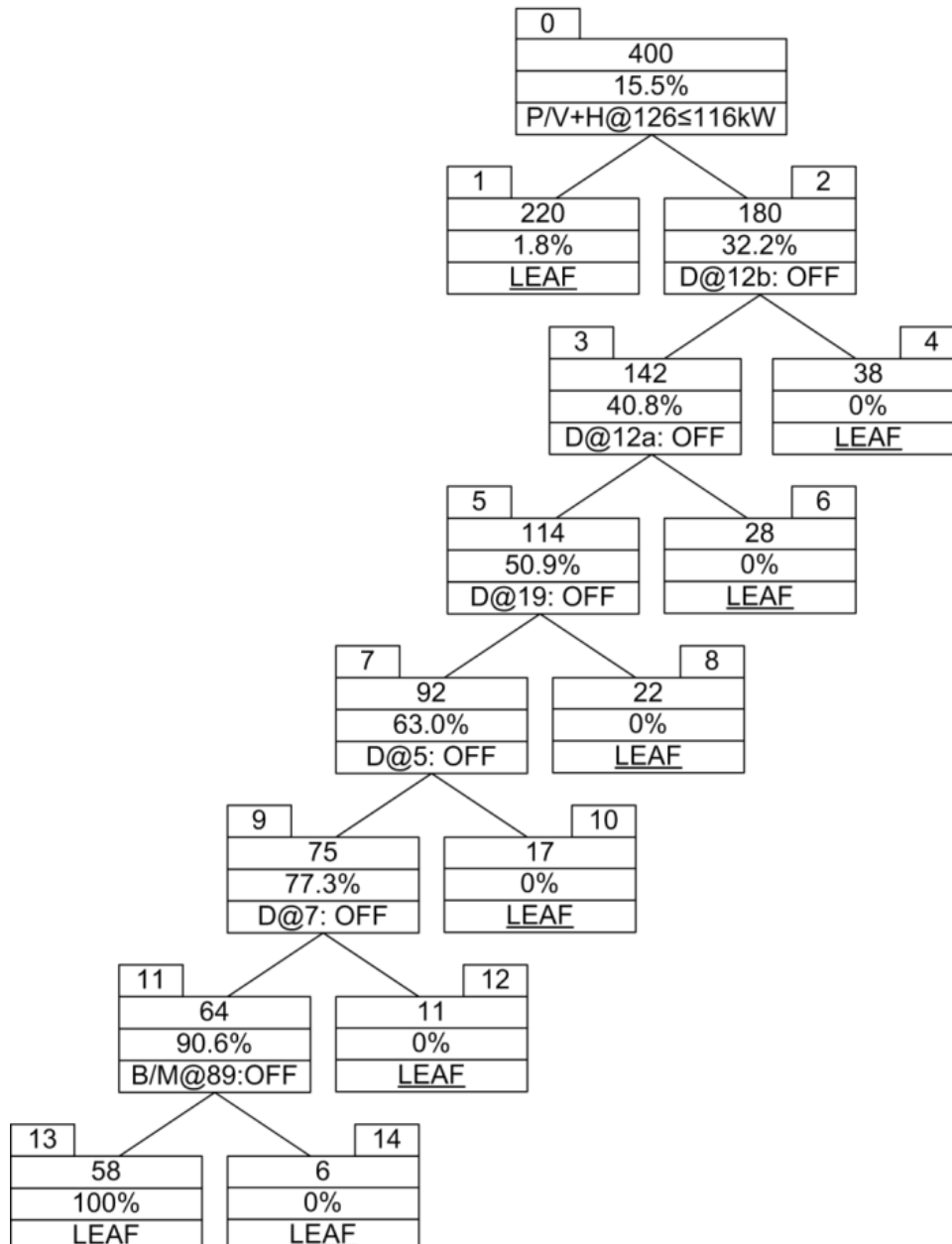
Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕιΣΠ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126<math>\geq</math>116) then TRUE (purity=100%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (107<math>\leq</math>PV+H@126&lt;128) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7<math>\geq</math>11) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (105<math>\leq</math>PV+H@126&lt;130) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	iii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (118<math>\leq</math>PV+H@126&lt;130) and (DSM=0) then TRUE (purity<math>\approx</math>95%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (98<math>\leq</math>PV+H@126&lt;130) and (DSM=0) then TRUE (purity&gt;99%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19<math>\geq</math>11) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (112<math>\leq</math>PV+H@126&lt;130) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>

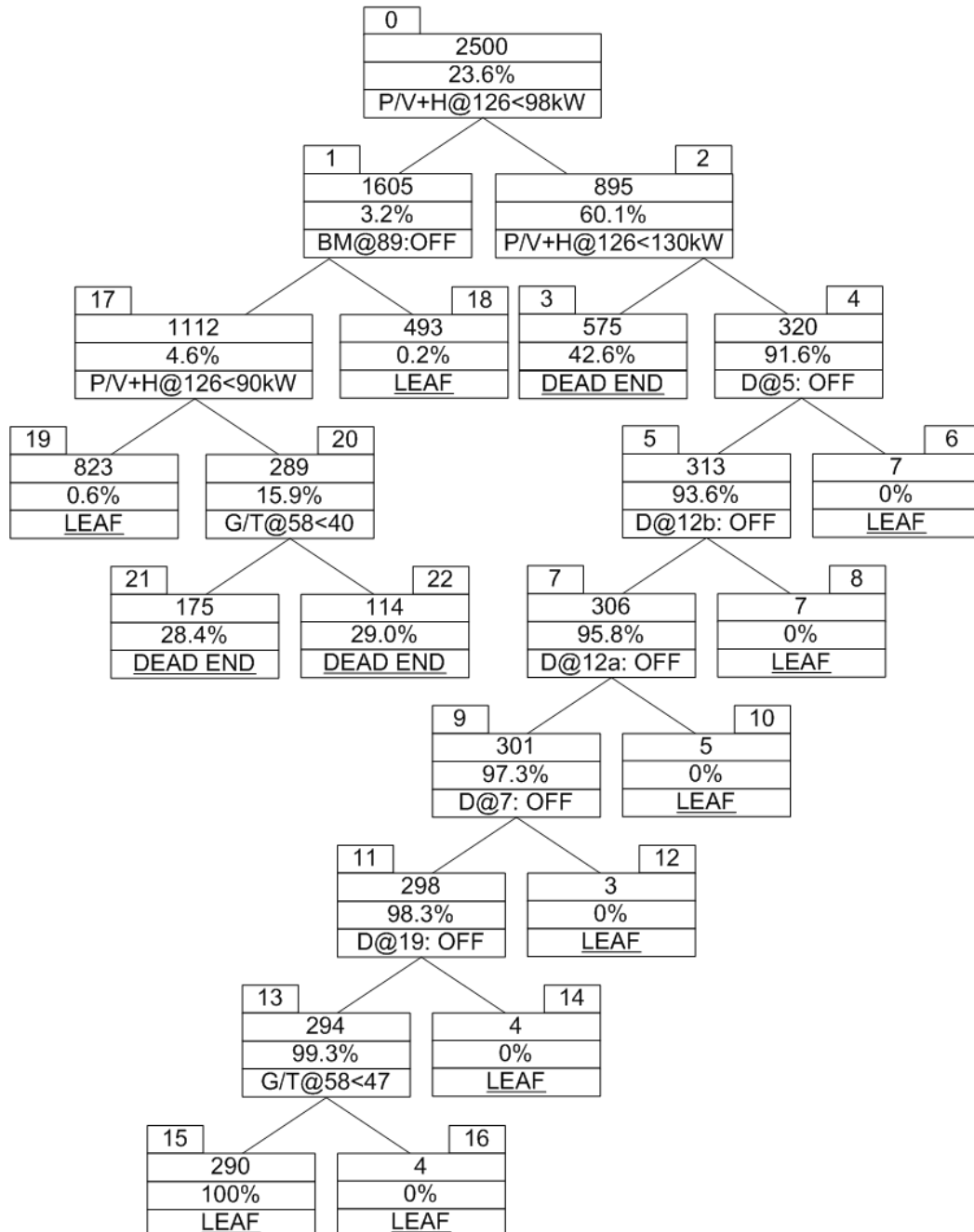
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-15% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) and (111≤PV+H@126&lt;128) and (DSM=0) then TRUE (purity&gt;97%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (B/M@89=OFF) and (115≤PV+H@126&lt;128) and (DSM=0) then TRUE (purity≈89%)</i>

Ενδεικτικά δίνονται τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης (Σχήμα 2.8) καθώς και ένα εκ των ΔΑ για την μακροπρόθεσμη κάλυψη σε επίπεδο οικονομικότητας άνω του 25% (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.8. ΔΑ βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού κάλυψης απώλειας ισχύος για εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από τον μικρό ΕιΣΠΙ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης.

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Για την μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας στο άνω-35% κατώφλι κέρδους κάθε ΔΑ παράγει οποιονδήποτε έναν από τους τρεις προγραμματισμούς ή τους προγραμματισμούς (i,ii) μαζί. Όμοια για το άνω-25% κέρδος κάθε ΔΑ θα περιέγραφε είτε τον προγραμματισμό (i) είτε τους (i,ii) μαζί. Τέλος, για την υψηλότερα ζητούμενη οικονομικότητα, κάποιο ΔΑ θα παρήγαγε είτε τον κανόνα (i) είτε τον κανόνα (ii).



Σχήμα 2.9. ΔΑ μακροπρόθεσμου προγραμματισμού κάλυψης απώλειας ισχύος για εξασφάλιση εγγυημένης ισχύος από τον μικρό ΕισΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης και επίπεδο οικονομικότητας άνω 25%.

b. Χειμερινό Μη-Βέλτιστο

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕισΠΙ δίνεται στον Πίνακα 2.6. Εξετάζεται η αναδιανομή της απώλειας του υβριδικού Φ/Β-Α/Τ σταθμού στον ζυγό 126.

Πίνακας 2.6. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕισΠΙ υπό το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{r,t+1}$ (kW)	$P_{av,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	10.05	0	10
D@7	20.1	0	0	20
D@12a	20.1	0	0	20
D@12b	20.1	0	0	20
D@19	20.1	10.05	0	10
WP@43	200.1	50.025	0	20
G/T@58	50.1	30.06	0	20
B/M@89	99.9	0	0	100
PV+H@126	150	49.5	10.5	90

Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕισΠΙ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>and</i> (G/T@58≥37) <i>then</i> TRUE <b>(purity=100%)</b>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (34≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈99%)</b>
	ii. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (D@19≥13) <i>and</i> (WP@43≥60) <i>and</i> (36≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈98%)</b>
	iii. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (WP@43≥60) <i>and</i> (33≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈99%)</b>
	iv. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (D@19≥13) <i>and</i> (36≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈95%)</b>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-25% κέρδος	i. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (36≤G/T@58<47) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈97%)</b>
	ii. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (D@19≥13) <i>and</i> (WP@43≥53) <i>and</i> (36≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈99%)</b>
	iii. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (D@19≥13) <i>and</i> (36≤G/T@58<48) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈97%)</b>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-15% κέρδος	i. <i>if</i> (D@7=OFF) <i>and</i> (D@12a=OFF) <i>and</i> (D@12b=OFF) <i>and</i> (39<G/T@58<47) <i>and</i> (B/M@89=OFF) <i>then</i> TRUE <b>(purity≈70%)</b>

ii. <i>if (13≤D@5&lt;15) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19≥13) and (WP@43≥53) and (36≤G/T@58&lt;49) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
iii. <i>if (D@5&lt;15) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19&lt;12) and (WP@43≥53) and (38≤G/T@58&lt;48) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
iv. <i>if (14≤D@5&lt;17) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥53) and (37≤G/T@58&lt;47) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈96%)</i>

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Για την μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας κάθε ΔΑ παράγει οποιονδήποτε έναν από τους προγραμματισμούς. Επίσης, σε όλες τις περιπτώσεις προγραμματισμού της μονάδας diesel του ζυγού 5, εναλλακτικά μπορεί να εμφανίζεται η μονάδα diesel του ζυγού 19. Το τελευταίο αποδίδεται στα πανομοιότητα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και στην κοινά μηδενική προ σφάλματος κατάστασή τους.

c. Θερινό

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕισΠ δίνεται στον Πίνακα 2.8. Εξετάζεται η κάλυψη της απώλειας του αιολικού πάρκου στον ζυγό 43.

Πίνακας 2.8. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕισΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	P <sub>n</sub> (kW)	P <sub>t+1</sub> (kW)	P <sub>r,t+1</sub> (kW)	P <sub>av,t+1</sub> (kW)
D@5	20.1	0	0	20.1
D@7	20.1	10.05	0	10.1
D@12a	20.1	10.05	0	10.1
D@12b	20.1	10.05	0	10.1
D@19	20.1	10.05	0	10.1
WP@43	200.1	110.055	0	40
G/T@58	50.1	35.07	0	15
B/M@89	99.9	59.94	19.98	20
PV+H@126	150	100.5	0	49.5

Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Θερινό σενάριο φόρτισης για τον μικρό ΕισΠ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if (D@5=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (PV+H@126≥120) and (DSM&lt;45) then TRUE (purity≈98.5%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@12a&lt;20) and (DSM&lt;38) then TRUE (purity&gt;97%)</i>

	iii. <i>if (D@5=OFF) and (B/M@89&lt;70) and (PV+H@126≥146) and (DSM≥45) then TRUE (purity=100%)</i>
	iv. <i>if (D@5=OFF) and (PV+H@126≥110) then TRUE (purity≈91%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7&lt;20) and (DSM&lt;35) then TRUE (purity&gt;97%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (DSM&lt;35) then TRUE (purity&gt;90%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω15% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (DSM&lt;20) then TRUE (purity&gt;98%)</i>

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Κάθε ΔΑ της μακροπρόθεσμης αναδιανομής της απώλειας ισχύος παράγει οποιονδήποτε έναν από τους προγραμματισμούς που δίνονται στον παραπάνω πίνακα.

### 2.5.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Σχετικά με τον προγραμματισμό της αναδιανομής της εκάστοτε απώλειας μπορούν να γίνουν οι κάτωθι παρατηρήσεις:

- Για τη βραχυπρόθεσμη κάλυψη, οι προγραμματισμοί είναι της υψηλότερης καθαρότητας διότι το κριτήριο είναι crisp. Αν όλες ή οι περισσότερες μονάδες ΔΠ είχαν παρόμοιους χρόνους εκκίνησης και καλούνταν να συμμετάσχουν στην αναδιανομή της απώλειας, τότε το σχετικό ΔΑ δε θα παρήγαγε κανέναν προγραμματισμό/κανόνα.
- Όπως αναφέρθηκε και στην Υποενότητα 2.5.1.1 η ισχύς εξόδου της μονάδας γεωθερμίας στον ζυγό 58 πρέπει να περιοριστεί στα 47kW για το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο. Ο προγραμματισμός κάλυψης (ii) του άνω 15% κέρδους, φαίνεται να επιτρέπει το αντίθετο. Όμως, υπολογίζοντας τα διαθέσιμα όρια ισχύος του προγραμματισμού, φαίνεται ότι η μοναδική περίπτωση να οδηγηθεί η μονάδα G/T@58 πέραν των 47kW, είναι να έχουν κληθεί οι ανατεθείσες εφεδρείες τόσο της ίδιας όσο και του υβριδικού PV+H@126 πριν την απώλεια του αιολικού πάρκου WP@43 και, ταυτόχρονα, ο υβριδικός PV+H@126 να συμμετάσχει στην αναδιανομή της απώλειας μόνο με ελάχιστη ισχύ από το όριο που του δίνεται (π.χ. να τεθεί PV+H@126 = 115kW).
- Το ΔΑ για μακροπρόθεσμη κάλυψη απώλειας με άνω του 15% ζητούμενο κέρδος υπό το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης, παράγει έναν κανόνα/προγραμματισμό (i) που προέκυψε από αναβάθμιση αδιέξοδου κόμβου σε κατ' εξαίρεση φύλλο, σύμφωνα με τα όσα περιγράφηκαν στην Υποενότητα 2.4.4.3 (β). Όπως φαίνεται όμως, η αναδιανομή που περιγράφεται είναι σχεδόν ταυτόσημη με τον κανόνα (i) του κέρδους άνω 25%. Αυτό ερμηνεύεται ως ότι το 30% των πιθανών ανακατανομών που περιγράφει ο προγραμματισμός αυτός και δεν είναι άνω του 15% κατωφλίου κέρδους, είναι άνω του 25% κατωφλίου κέρδους με εκτιμώμενη πιθανότητα (καθαρότητα) 97%.



- Από τις παραπάνω τρεις παρατηρήσεις αιτιολογείται και η προσέγγιση των διαφορετικών επιπέδων οικονομικότητας/κέρδους που αναλύθηκε στην *Υποενότητα 2.4.2.2*.
- Για τη θερινή φόρτιση οι κανόνες/προγραμματισμοί που παράγονται είναι μικρότεροι, που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός πιθανών συνδυασμών της ΔΠ και του διακοπτόμενου φορτίου για κάλυψη της απώλειας. Αυτό εξηγείται από το ότι όλες οι μονάδες είναι εν λειτουργία και προ του σφάλματος (άρα τα κόστη εκκίνησης δεν περιορίζουν το πεδίο λύσεων) και τα επίπεδα λειτουργίας των περισσοτέρων πηγών είναι πλησίον του βέλτιστου, άρα πολλοί διαφορετικοί συνδυασμοί μπορούν να αποδώσουν τη ζητούμενη οικονομικότητα.
- Τα κόστη εκκίνησης προκρίνουν σχεδόν αποκλειστικά τις μονάδες ΔΠ που ήταν σε λειτουργία και προ της μελετώμενης απώλειας για τον προγραμματισμό της μακροπρόθεσμης κάλυψης. Αν, μάλιστα, τα περιθώρια τους επαρκούν για την κάλυψη της απώλειας θα αποτρέψουν τη συμμετοχή του διακοπτόμενου φορτίου.
- Όταν πηγές ΔΠ θερμικού τύπου συμπεριλαμβάνονται στη μακροπρόθεσμη κάλυψη της εκάστοτε απώλειας, τότε τα σχετικά ΔΑ καθοδηγούν τη λειτουργία τους προς τα οικονομικά βέλτιστά τους.

### **2.5.2 Δοκιμή μεθόδου με μεγάλο εικονικό σταθμό παραγωγής**

Για να επιβεβαιωθεί η γενικότερη εφαρμογή της μεθόδου, εξετάζεται περίπτωση ΕιΣΠ 23 μονάδων ΔΠ σε 16 ζυγούς διανομής και διακοπτόμενο φορτίο σε 9 ζυγούς διανομής της παροχής R-22 της Ικαρίας. Τα ονομαστικά στοιχεία, οι συναρτήσεις κόστους λειτουργίας, τα τεχνικά ελάχιστα και οι χρόνοι εκκίνησης των μονάδων του ΕιΣΠ δίνονται στον Πίνακα 2.9. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο ΕιΣΠ είναι 2.1MW. Το διακοπτόμενο φορτίο μπορεί να κληθεί ως εφεδρεία η οποία ισούται με συγκεκριμένο ποσοστό του φορτίου. Διευκρινίζεται ότι το κόστος λειτουργίας δίνεται σε σχετική ισοτιμία και όχι απόλυτες τιμές.

Πίνακας 2.10. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Ζυγός	Τύπος ΔΠ - Ισοδύναμος Συμβολισμός	$P_n$ (kW)	$P_{min}$ (kW)	$C(P\%)$ (eq/kWh)	Χρόνος εκκίνησης (min)
5	Diesel - D@5	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
7	Diesel - D@7	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
12	Diesel - D@12a	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
12	Diesel - D@12b	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
19	Diesel - D@19	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
19	Fuel Cell - FC@19	80.1	5	$0.09 \cdot P^2 - 0.01 \cdot P + 0.04$	8
19	PV - PV@19a	9.9	2.5	0	0.1
19	PV - PV@19b	30	4	0	0.1
32	LPG Gen. - LPG@32	80.1	20	$0.25 \cdot P^2 - 0.35 \cdot P + 0.16$	2
43	Wind Park - WP@43	200.1	4	0	0.1
48	Wind Park - WP@48	150	4	0	0.1
58	Geothermal - G/T@58	50.1	12	$0.09 \cdot P^2 - 0.13 \cdot P + 0.07$	10
62	Diesel - D@62	39.9	10	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
76	Tidal Gen. - Tdl@76	129.9	10	0	0.1
89	Biomass - B/M@89	99.9	30	$0.23 \cdot P^2 - 0.32 \cdot P + 0.07$	20
95	Diesel - D@95	50.1	15	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$	0.5
109	LPG Gen. - LPG@109	150	40	$0.25 \cdot P^2 - 0.35 \cdot P + 0.16$	2
126	PV-Hydro Hybrid - PV+H@126	150	4	0.03	0.1
128	PV - PV@128a	20.1	4	0	0.1
128	PV - PV@128b	39.9	4	0	0.1
128	PV - PV@128c	9.9	2.5	0	0.1
128	PV - PV@128d	39.9	4	0	0.1
139	Wind Park - WP@139	219.9	4	0	0.1
----	Διακοπτόμενο φορτίο	450	0	$C_{int}$	0.0

#### 2.5.2.1 Σενάρια φόρτισης συστήματος

Κατά τα όσα αναλύθηκαν στην Υποενότητα 2.5.1.1 θα εξεταστούν τα ίδια σενάρια και για την περίπτωση του μεγάλου ΕιΣΠ.

#### 2.5.2.2 Αποτελέσματα

Οι κανόνες/προγραμματισμοί είναι εκφρασμένοι σε kW.

##### a. Χειμερινό Τεχνικό

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 2.11. Εξετάζεται η αναδιανομή της απώλειας του αιολικού πάρκου στον ζυγό 139.

Πίνακας 2.11. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	P <sub>n</sub> (kW)	P <sub>t+1</sub> (kW)	P <sub>r,t+1</sub> (kW)	P <sub>av,t+1</sub> (kW)
D@5	20.1	0	0	20.1
D@7	20.1	0	0	20.1
D@12a	20.1	0	0	20.1
D@12b	20.1	0	0	20.1
D@19	20.1	0	0	20.1
FC@19	80.1	32.04	40.05	8.01
PV@19a	9.9	0	0	0
PV@19b	30	0	0	0
LPG@32	80.1	0	0	80.1
WP@43	200.1	70.035	0	50
WP@48	150	52.5	0	37.5
G/T@58	50.1	30.06	10.02	10
D@62	39.9	0	0	39.9
Tdl@76	129.9	71.445	0	32.5
B/M@89	99.9	0	0	99.9
D@95	50.1	0	0	50.1
LPG@109	150	0	0	150
PV+H@126	150	49.5	10.5	90
PV@128a	20.1	0	0	0
PV@128b	39.9	0	0	0
PV@128c	9.9	0	0	0
PV@128d	39.9	0	0	0
WP@139	219.9	76.965	0	55

Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.12.

Πίνακας 2.12. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (LPG@32=OFF) and (D@62=OFF) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (51≤FC@19&lt;72) and (D@19=OFF) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥116) and (34≤G/T@58&lt;47) and (D@62=OFF) and (Tdl@76&lt;92) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (78≤PV+H@126&lt;130) and (DSM=0) then TRUE (purity≈93%)</i>

	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (51≤FC@19&lt;72) and (D@19=OFF) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥116) and (34≤G/T@58&lt;47) and (D@62=OFF) and (Tdl@76≥92) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (PV+H@126&lt;110) and (DSM=0) then TRUE (purity≈92%)</i>
Μακροπρόθεσμο @Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (FC@19≥52) and (D@19=OFF) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥110) and (35≤G/T@58&lt;45) and (D@62=OFF) and (Tdl@76&lt;92) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (74≤PV+H@126&lt;129) and (DSM=0) then TRUE (purity≈85%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥114) and (WP@48≥82) and (D@62=OFF) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (PV+H@126&lt;132) and (DSM=0) then TRUE (purity≈85%)</i>
Μακροπρόθεσμο @Άνω-15% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (FC@19≥52) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥117) and (WP@48≥84) and (D@62=OFF) and (33≤G/T@58&lt;42) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (50≤PV+H@126&lt;129) and (DSM=0) then TRUE (purity≈90%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (FC@19≥51) and (LPG@32=OFF) and (76≤WP@43&lt;109) and (D@62=OFF) and (Tdl@76&lt;102) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (PV+H@126≥88) and (DSM=0) then TRUE (purity≈93%)</i>

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Για τα επίπεδα οικονομικότητας άνω-25% και ανώ-15% κέρδους, κάθε ΔΑ παράγει έναν προγραμματισμό από όσους παρουσιάζονται.

b. Χειμερινό Μη-Βέλτιστο

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 2.13. Εξετάζεται η αναδιανομή της απώλειας του υβριδικού Φ/Β-Α/Τ σταθμού στον ζυγό 126.

Πίνακας 2.13. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{r,t+1}$ (kW)	$P_{av,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	10.05	0	10.1
D@7	20.1	0	0	20.1
D@12a	20.1	0	0	20.1
D@12b	20.1	0	0	20.1
D@19	20.1	10.05	0	10.1
FC@19	80.1	32.04	40.05	8.01
PV@19a	9.9	0	0	0
PV@19b	30	0	0	0
LPG@32	80.1	0	0	80.1
WP@43	200.1	50.025	0	20
WP@48	150	52.5	0	37.5
G/T@58	50.1	30.06	0	20
D@62	39.9	0	0	39.9
Tdl@76	129.9	71.445	0	32.5
B/M@89	99.9	0	0	99.9
D@95	50.1	0	0	50.1
LPG@109	150	0	0	150
PV+H@126	150	49.5	10.5	90
PV@128a	20.1	0	0	0
PV@128b	39.9	0	0	0
PV@128c	9.9	0	0	0
PV@128d	39.9	0	0	0
WP@139	219.9	98.955	0	0

Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.14.

Πίνακας 2.14. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (LPG@32=OFF) and (D@62=OFF) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if (D@5&lt;11) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (FC@19&lt;63) and (11≤D@19&lt;18) and (LPG@32=OFF) and (WP@43≥56) and (WP@48≥87) and (G/T@58&lt;49) and (D@62=OFF) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈90%)</i>
	ii. <i>if (D@5≥18) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (11≤D@19&lt;16) and (LPG@32=OFF) and (G/T@58&lt;49) and (D@62=OFF) and (Tdl@76≥90) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈91%)</i>

Μακροπρόθεσμο @ Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (12≤D@5&lt;16) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (FC@19≥63) and (D@19≥12) and (LPG@32=OFF) and (G/T@58&lt;49) and (D@62=OFF) and (Tdl@76≥91) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈90%)</i>
	ii. <i>if (12≤D@5&lt;16) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (FC@19≥63) and (LPG@32=OFF) and (WP@48≥89) and (G/T@58&lt;49) and (D@62=OFF) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity&gt;93%)</i>
	iii. <i>if (D@5≥16) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19≥12) and (LPG@32=OFF) and (WP@48≥70) and (G/T@58&lt;49) and (D@62=OFF) and (Tdl@76&lt;77) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈96%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-15% κέρδος	i. <i>if (13≤D@5&lt;17) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (12≤D@19&lt;16) and (LPG@32=OFF) and (G/T@58&lt;48) and (D@62=OFF) and (Tdl@76≥76) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈92%)</i>
	ii. <i>if (13≤D@5&lt;17) and (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (12≤D@19&lt;16) and (LPG@32=OFF) and (WP@48≥66) and (G/T@58&lt;48) and (D@62=OFF) and (Tdl@76&lt;76) and (B/M@89=OFF) and (D@95=OFF) and (LPG@109=OFF) and (DSM=0) then TRUE (purity≈92%)</i>

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Για την μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας κάθε ΔΑ παράγει οποιονδήποτε έναν από τους προγραμματισμούς του Πίνακα 2.14.

c. Θερινό

Ο προ σφάλματος προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 2.15. Εξετάζεται η κάλυψη της απώλειας του αιολικού πάρκου στον ζυγό 43.

Πίνακας 2.15. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{r,t+1}$ (kW)	$P_{av,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	0	0	20.1
D@7	20.1	10.05	0	10.05
D@12a	20.1	10.05	0	10.05
D@12b	20.1	10.05	0	10.05
D@19	20.1	10.05	0	10.05
FC@19	80.1	32.04	40.05	8.01
PV@19a	9.9	0	0	9.9
PV@19b	30	22.5	7.5	0
LPG@32	80.1	56.07	8.01	16.02
WP@43	200.1	110.055	0	40.02
WP@48	150	82.5	0	30
G/T@58	50.1	35.07	0	15.03
D@62	39.9	31.92	1.995	5.985
Tdl@76	129.9	71.445	0	32.475
B/M@89	99.9	59.94	19.98	19.98
D@95	50.1	30.06	0	20.04
LPG@109	150	105	45	0
PV+H@126	150	100.5	0	30
PV@128a	20.1	12.06	0	8.04
PV@128b	39.9	11.97	7.98	19.95
PV@128c	9.9	0	0	9.9
PV@128d	39.9	31.92	7.98	0
WP@139	219.9	120.945	43.98	0

Οι προγραμματισμοί αναδιανομής της απώλειας σε δύο στάδια δίνονται στον Πίνακα 2.16.

Πίνακας 2.16. Βραχυπρόθεσμοι και μακροπρόθεσμοι προγραμματισμοί εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος υπό Θερινό σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Βραχυπρόθεσμο	i. <i>if</i> (D@5=OFF) <i>then</i> TRUE ( <b>purity=100%</b> )
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-35% κέρδος	i. <i>if</i> (D@5=OFF) <i>and</i> (PV+H@126≥104) <i>and</i> (PV@128d≥36) <i>and</i> (WP@139≥144) <i>and</i> (DSM=0) <i>then</i> TRUE ( <b>purity=100%</b> )
	ii. <i>if</i> (D@5=OFF) <i>and</i> (D@12a<14) <i>and</i> (D@12b<14) <i>and</i> (FC@19<55) <i>and</i> (B/M@89≥64) <i>and</i> (LPG@109≥143) <i>and</i> (PV+H@126<104) <i>and</i> (PV@128d≥36) <i>and</i> (WP@139≥144) <i>and</i> (DSM=0) <i>then</i> TRUE ( <b>purity≈97%</b> )
	iii. <i>if</i> (D@5=OFF) <i>and</i> (D@12a≥14) <i>and</i> (D@12b<14) <i>and</i> (LPG@109≥135) <i>and</i> (PV@128d<36) <i>and</i> (WP@139≥144) <i>and</i> (DSM=0) <i>then</i> TRUE ( <b>purity≈97%</b> )

	iv. <i>if (D@5=OFF) and (D@12b≥14) and (LPG@109≥135) and (PV@128d&lt;36) and (WP@139≥144) and (DSM=0) then TRUE (purity≈97%)</i>
	v. <i>if (D@12a&lt;14) and (D@12b&lt;14) and (D@19&lt;14) and (FC@19≥36) and (Tdl@76≥94) and (LPG@109&lt;139) and (PV@128b&lt;20) and (132≤WP@139&lt;147) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	vi. <i>if (D@12a&lt;14) and (D@12b&lt;14) and (D@19&lt;14) and (LPG@109&lt;139) and (PV+H@126≥104) and (132≤WP@139&lt;147) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (D@5=OFF) and (D@7&lt;12) and (D@12a&lt;12) and (D@12b&lt;12) and (D@19&lt;12) and (G/T@58&lt;42) and (Tdl@76&lt;79) and (D@95&lt;32) and (LPG@109&lt;130) and (PV+H@126&lt;103) and (PV@128b≥22) and (WP@139≥143) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@12a&lt;12) and (D@12b&lt;12) and (D@19&lt;12) and (Tdl@76≥74) and (B/M@89&lt;70) and (D@95&lt;32) and (LPG@109≥130) and (WP@139≥143) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	iii. <i>if (D@5=OFF) and (D@7≥13) and (D@12a≥13) and (WP@139≥143) and (DSM=0) then TRUE (purity≈99%)</i>
	iv. <i>if (D@7&lt;14) and (D@12b&lt;14) and (D@19&lt;14) and (FC@19≥36) and (B/M@89&lt;90) and (LPG@109&lt;131) and (PV+H@126≥104) and (143≤WP@139&lt;155) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	v. <i>if (D@12a&lt;14) and (B/M@89&lt;68) and (LPG@109≥131) and (143≤WP@139&lt;155) and (DSM=0) then TRUE (purity≈91%)</i>
Μακροπρόθεσμο @ Άνω-15% κέρδος	i. <i>if (D@7≥13) and (D@12a&lt;13) and (D@12b&lt;13) and (D@19&lt;13) and (Tdl@76&lt;75) and (PV+H@126&lt;104) and (PV@128b≥29) and (WP@139&lt;155) and (DSM=0) then TRUE (purity=100%)</i>
	ii. <i>if (D@5=OFF) and (D@12b≥13) and (D@19&lt;13) and (B/M@89≥74) and (LPG@109≥130) and (PV+H@126&lt;119) and (WP@139&lt;155) and (DSM=0) then TRUE (purity≈94%)</i>

Όλα τα ΔΑ της βραχυπρόθεσμης κάλυψης της απώλειας περιγράφουν τον ίδιο κανόνα/προγραμματισμό. Για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη στο κατώφλι κέρδους άνω του 35%, κάθε ΔΑ αποδίδει οποιοδήποτε ζεύγος ή τετράδα κανόνων που δίνεται από τον Πίνακα 2.15. Για οικονομικότητα άνω του 25% παράγονται είτε οι προγραμματισμοί αναδιανομής απώλειας (i-iii) ή οι (iv,v). Για το μέγιστο κατώφλι κέρδους κάθε ΔΑ θα περιελάμβανε είτε μόνο τον κανόνα (i) ή και τους δύο κανόνες μαζί.

### 2.5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όλα όσα αναλύθηκαν στην Υποενότητα 2.5.1.3 επιβεβαιώνονται εν πολλοίς και από τα αποτελέσματα για τον μεγάλο ΕιΣΠ. Προστίθενται ή συμπληρώνουν τα εξής σημεία:



- Για το Χειμερινό Τεχνικό σενάριο φόρτισης, οι προγραμματισμοί (ii) για κέρδος άνω 25% και (ii) για κέρδος άνω 15% φαίνεται να μην περιορίζουν τη μονάδα G/T@58 σε ισχύ κάτω των 47kW όπως προδιαγράφεται από την 2.5.1.1. Για τον κανόνα (ii) της οικονομικότητας άνω 25%, παρατηρείται εύκολα ότι και με την ελάχιστη συμμετοχή από τα αιολικά πάρκα των ζυγών 43 και 48 στην αναδιανομή της απώλειας, προκύπτει άθροισμα ισχύος 75.5kW. Αφού η απώλεια είναι 77kW, επαγωγικά προκύπτει ότι δεν τίθεται θέμα για την G/T@58. Όσο αφορά τον προγραμματισμό (ii) του επιπέδου κέρδους άνω 15%, μπορεί να αναπτυχθεί παρόμοια συλλογιστική όπως στην αντίστοιχη περίπτωση του μικρού ΕιΣΠ. Δηλαδή, εν γένει, αν αξιοποιούνται πλήρως τα όρια που δίνονται ρητά από τους κανόνες των σχετικών ΔΑ, οι τεχνικοί περιορισμοί θα πληρούνται σε κάθε περίπτωση.
- Όπως εξήχθη στην Υποενότητα 2.5.1.1, για τη μακροπρόθεσμη κάλυψη της απώλειας, προκρίνεται η ΔΠ που ήταν σε λειτουργία και προ σφάλματος. Αυτό δεν ισχύει για τη μονάδα PV@19 του Θερινού σεναρίου φόρτισης, αφού η ταχύτερη ικανότητα απόδοσης της διαθέσιμης ισχύος της (από ψυχρή εφεδρεία) ισοδυναμεί με μηδενικό κόστος εκκίνησής της.

## **2.6 Απαιτούμενα μεγέθη συνόλων μάθησης και χρόνοι εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου**

Η απαίτηση για προετοιμασία των προγραμμάτων των δύο σταδίων σε ένα χρονικό περιθώριο μιας ώρας, θέτει ένα άνω όριο στο χρόνο εκτέλεσης της μεθόδου. Η παρατήρηση σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του επεξεργαστή που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης ήταν ένας Intel® Core™2 Duo @2GHz με λειτουργικό Microsoft Windows XP Professional, Service Pack 3.

Η επίδοση οποιουδήποτε ταξινομητή μπορεί να υποθεθεί ως πραγματικά Μπαγεσιανός (όπως τα ΔΑ), δεν μπορεί να χειροτερέψει αυξανόμενου του μεγέθους του ΣΜ και συνεπώς της πολυπλοκότητας του ταξινομητή [39]. Όμως, ενδέχεται η αποδιδόμενη βελτίωση της ακρίβειας από την αύξηση του μεγέθους του ΣΜ να μην αξίζει τον χρόνο υπολογισμού ή να είναι εξ αρχής αδιάφορη. Βάσει των παραπάνω, το μέγεθος του ΣΜ για κάθε ένα από τα δύο στάδια αναδιανομής της απώλειας ισχύος αυξανόταν μέσω της τακτικής δοκιμής-και-λάθους (trial and error) έως ότου για οποιοδήποτε σενάριο φόρτισης και επίπεδο οικονομικότητας να παράγεται τουλάχιστον ένας κανόνας/προγραμματισμός από κάθε ΔΑ. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των 2.5.1.2 και 2.5.2.2, μόνο ένα ΔΑ εκπαιδεύτηκε χωρίς να φέρει Αποδεκτό φύλλο και ο αδιέξοδος κόμβος της

υψηλότερης καθαρότητας θεωρήθηκε κατ' εξαίρεση στη θέση του. Η εγκυρότητα της θεώρησης αυτής τεκμηριώθηκε και στην *Υποενότητα 2.5.1.3*.

Κατόπιν τούτων παρουσιάζονται τα μεγέθη των ΣΜ κάθε προβλήματος καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος παραγωγής τους.

- Μικρός ΕιΣΠ 10 συντελεστών (9 μονάδες ΔΠ και διακοπτόμενο φορτίο):
  1. Βραχυπρόθεσμη κάλυψη απώλειας  $|\Sigma M| = 400$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 250 s.
  2. Μακροπρόθεσμη κάλυψη απώλειας  $|\Sigma M| = 2200$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 360 s.
- Μεγάλος ΕιΣΠ 24 συντελεστών (23 μονάδες ΔΠ και διακοπτόμενο φορτίο):
  1. Βραχυπρόθεσμη κάλυψη απώλειας  $|\Sigma M| = 1000$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 630 s.
  2. Μακροπρόθεσμη κάλυψη απώλειας  $|\Sigma M| = 5500$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 930 s.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το μέγεθος του ΣΜ αυξάνεται σχεδόν αναλογικά με το πλήθος των χαρακτηριστικών (attributes) που περιγράφουν το πρόβλημα μέσω του ΔΑ, αλλά επηρεάζεται προφανώς και από το μέγεθος του θεωρούμενου ΣΗΕ, αφού ζητείται εκτέλεση ροής φορτίου για κάθε εγγραφή του ΣΜ.

Το άθροισμα των χρόνων δημιουργίας των ΣΜ των δύο σταδίων είναι ο απαιτούμενος χρόνος εκτέλεσης της μεθόδου. Ο χρόνος εκπαίδευσης κάθε ΔΑ δεν ξεπερνά τα 2 δευτερόλεπτα. Από τα ανωτέρω συμπεραίνεται ότι ο μέγιστος ΕιΣΠ για τον οποίο μπορεί να εξάγει προγραμματισμούς κάλυψης απώλειας ισχύος ο επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι 55 συντελεστών. Προφανώς, η παράλληλη λειτουργία όμοιων επεξεργαστών πολλαπλασιάζει ανάλογα την ικανότητα αυτή. Επεκτείνοντας την τελευταία παρατήρηση, σημειώνεται εδώ ότι στην *Ενότητα Β* του Παραρτήματος παρατίθεται πειραματική υλοποίηση της μεθοδολογίας σε τοπολογία παράλληλων μικροεπεξεργαστών Raspberry Pi στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας σχετικής με την εξισορρόπηση παραγωγής-κατανάλωσης σε νησιδοποιημένο μικροδίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Κλείνοντας, αξιωματικώς σημειωθεί ότι τόσο για το παράδειγμα που παρουσιάστηκε, όσο και, εν γένει, για περιπτώσεις ΕιΣΠ που συνδέονται προς ΣΗΕ ακτινικής δομής μπορεί να υπάρξει σημαντική μείωση του χρόνου εκτέλεσης της μεθόδου. Ο λόγος είναι η δυνατότητα υποκατάστασης της ροής φορτίου που περιλαμβάνεται στη μέθοδο για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών μεγεθών και που εκτελείται για κάθε πιθανό προγραμματισμό στο ΣΜ, με μία απλούστερη ρουτίνα υπολογισμών πτώσεων τάσης.

## 2.7 Σχολιασμός της μεθοδολογίας αναδιανομής απώλειας ισχύος

### σε εικονικό σταθμό παραγωγής μέσω δέντρων απόφασης

Υπάρχουν δύο καίρια σημεία σχετικά με την προτεινόμενη μέθοδο που απαιτούν διευκρινίσεις και θα αναλυθούν διεξοδικά στην παρούσα υποενότητα.

Το πρώτο ζήτημα, είναι ότι για κάθε διαφορετικό ΣΜ, το σχετικό ΔΑ που εκπαιδεύεται παράγει διαφορετικούς κανόνες/προγραμματισμούς αναδιανομής της απώλειας ισχύος από άλλο ΣΜ. Αναπόδραστα εγείρεται η απορία για το αν κάποιο ΣΜ (και ως εκ τούτου ΔΑ) παράγει πιο αξιόπιστους και ορθότερους κανόνες από άλλα.

Το δεύτερο, είναι το ερώτημα γιατί επιλέχθηκε ορίζοντας μόνο μιας ώρας μπροστά και όχι παραπάνω ωρών ή ακόμα και ορίζοντας ημέρας, εβδομάδας, κτλ. Το συγκεκριμένο σημείο σχετίζεται άμεσα με το ζήτημα ότι η μέθοδος, όπως αναπτύχθηκε, δεσμεύει υπολογιστικούς πόρους σε τακτική βάση.

#### 2.7.1 Αποτελεσματικότητα και γενίκευση μεθοδολογίας

Το κριτήριο για το αν οι παραγόμενοι κανόνες από ένα ΔΑ είναι αντιπροσωπευτικοί, είναι το ποσοστό/σφάλμα αποτυχημένων ταξινομήσεων (misclassification rate/error –  $mr$ ) [29]. Το ποσοστό αυτό, και στα πλαίσια της διεξαχθείσας μελέτης, ορίζεται ως εξής: για τυχαία προσομοιωμένο προγραμματισμό κάλυψης της απώλειας, αποτυχημένη ταξινόμηση προκύπτει, αν ο τυχαίος προγραμματισμός κρίνεται Αποδεκτός (Μη Αποδεκτός) από τον αλγόριθμο δημιουργίας του ΣΜ και Μη Αποδεκτός (Αποδεκτός) από τον κανόνα του αντίστοιχου ΔΑ με τον οποίο ο τυχαίος προγραμματισμός έχει τη μεγαλύτερη ταύτιση. Και το ποσοστό:

$$mr = \frac{\text{προγραμματισμοί διαφορετικά ταξινομημένοι από ΔΑ κ' αλγόριθμο ΣΔ}}{|TS|} \quad (2.3)$$

Όπου  $|TS|$  το μέγεθος του Συνόλου Δοκιμής (ΣΔ). Συνήθως, επιλέγεται ίσο με το 1/3 του ΣΜ.

##### 2.7.1.1 Δέντρα απόφασης βραχυπρόθεσμης κάλυψης απώλειας

Όλα τα ΔΑ του σταδίου αυτού έχουν σφάλμα αποτυχημένων ταξινομήσεων μικρότερο του 2%. Η διαφορά τάξεως χρόνου μεταξύ των πηγών ΔΠ γρήγορης και αργής εκκίνησης, συμβάλλει σε απόλυτα ξεκάθαρους κανόνες οι οποίοι αιτιολογούν τις ελάχιστες λανθασμένες ταξινομήσεις.

##### 2.7.1.2 Δέντρα απόφασης μακροπρόθεσμης κάλυψης απώλειας

Μετά από μερικές προκαταρκτικές δοκιμές επί των διαφορετικών ΔΑ κάθε σεναρίου και επιλεχθέντος κατωφλίου κέρδους, διαπιστώθηκαν διαφορές μεταξύ των ποσοστών τους αποτυχημένων ταξινομήσεων. Απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία.

Έστω  $T_i$  το ΔΑ εκπαιδευμένο από το ΣΜ<sub>i</sub>. Αν για το ίδιο πρόβλημα (σενάριο φόρτισης και επίπεδο οικονομικότητας) έχουν δημιουργηθεί  $n$  ΣΜ, τα οποία εκπαιδεύουν αντιστοίχως  $n$  ΔΑ, και το  $T_i$  έχει το ελάχιστο  $mr$ , τότε το  $T_i$  είναι το ΔΑ το οποίο περιλαμβάνει την καλύτερη λύση του προβλήματος (δηλ. τους αντιπροσωπευτικότερους/ορθότερους προγραμματισμούς κάλυψης της απώλειας). Όμως, αφ' ης στιγμής μπορεί να υπολογιστεί μόνο μία εκτίμηση του ποσοστού των αποτυχημένων ταξινομήσεων [29], ενδέχεται να εμφανίζεται στατιστική συσχέτιση μεταξύ των ΔΑ στη βάση των υπολογιζόμενων ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεών τους.

Σύμφωνα με το [40], τα  $mr_i$  και  $mr_j$  των ΔΑ<sub>i</sub> και ΔΑ<sub>j</sub>, εκπαιδευμένα αντίστοιχα από τα ΣΜ<sub>i</sub> και ΣΜ<sub>j</sub>, μπορεί να υποτεθεί ότι ακολουθούν κανονική κατανομή. Ως εκ τούτου, ο κάτωθι έλεγχος υποθέσεων μπορεί να διατυπωθεί για την πραγματική διαφορά των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων  $d_i = mr_i - mr_j$ :

- $H_0: d_i = 0$  (ή  $mr_i = mr_j$ ) και
- $H_1: d_i \neq 0$  (ή  $mr_i \neq mr_j$ )

Η υπόθεση  $H_0$  μπορεί να αποδοθεί και ως «τα ΔΑ είναι στατιστικά ισοδύναμα» και η  $H_1$  ως «τα ΔΑ δεν είναι στατιστικά ισοδύναμα». Το διάστημα εμπιστοσύνης του  $d_i$  δίνεται από:

$$d_i = d \pm z_{\alpha/2} \hat{\sigma}_d \quad (2.4)$$

Όπου  $(1-\alpha)\%$  είναι το επίπεδο εμπιστοσύνης. Επίσης,  $d = |\widehat{mr}_i - \widehat{mr}_j|$  είναι η παρατηρούμενη διαφορά μεταξύ των εκτιμήσεων των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων των δύο ΔΑ. Τέλος,  $\hat{\sigma}_d^2$  είναι η διακύμανση του  $d$  κατά το:

$$\hat{\sigma}_d^2 = \frac{\widehat{mr}_i(1 - \widehat{mr}_i)}{|TS_i|} + \frac{\widehat{mr}_j(1 - \widehat{mr}_j)}{|TS_j|}$$

Αν το  $d_i$  εκτείνεται γύρω από το μηδέν (δεν είναι δηλαδή, μόνο θετικό ή μόνο αρνητικό), τότε η υπόθεση  $H_0$  δεν μπορεί να απορριφθεί προς χάριν της  $H_1$ , διαφορετικά η  $H_1$  είναι έγκυρη.

Από όλα τα ΔΑ που εκπαιδεύτηκαν για τους δύο διαφορετικούς ΕισΠ, για κάθε σενάριο φόρτισης και κάθε κατώφλι κέρδους, τα δύο ακραία ΔΑ (από άποψης  $mr$ ) εξετάζονται με τουλάχιστον δύο διαφορετικά ΣΔ κάθε ένα. Αν τα δύο ακραία ΔΑ δε συσχετίζονται στατιστικά, τότε υπολογίζεται ενδεικτικά το μέσο  $mr$  των υπόλοιπων ΔΑ του ίδιου προβλήματος. Οι Πίνακες 2.17 και 2.18 συνοψίζουν τα αποτελέσματα.

Πίνακας 2.17. Διαστήματα εμπιστοσύνης των πραγματικών διαφορών των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για τον μικρό ΕιΣΠ.

Άνω-35%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο			Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>avg</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	
κέρδος								
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	8.91	9.51	4.77	12.23	<u>8.81</u>	10.16	12.83	
$d_t$	-0.034	<b>0.046</b>	0.036	<b>0.113</b>		-0.017	<b>0.071</b>	
Άνω-25%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο			Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>		DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>avg</sub>
κέρδος								
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	3.86	6.65	6.81	9.54		7.07	13.89	<u>10.34</u>
$d_t$	-0.003	<b>0.059</b>	-0.010	<b>0.065</b>		0.026	<b>0.110</b>	
Άνω-15%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο			Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>		DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	
κέρδος								
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	2.11	2.54	4.29	5.08		6.17	9.63	
$d_t$	-0.017	<b>0.025</b>	-0.021	<b>0.037</b>		-0.003	<b>0.072</b>	

Όπως φαίνεται για τον μικρό ΕιΣΠ, υπάρχει στατιστική συσχέτιση μεταξύ των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων για σχεδόν κάθε σενάριο φόρτισης και επιλεγθέν κατώφλι κέρδους. Σε δύο περιπτώσεις προβλημάτων που τα δύο ακραία ΔΑ δε συσχετίζονται, το μέσο  $m\bar{r}$  των υπόλοιπων ΔΑ που εκπαιδεύτηκαν για το κάθε πρόβλημα είναι σχεδόν ίσο με τη μέση τιμή των δύο ακραίων  $m\bar{r}$ . Το μέσο  $m\bar{r}$  συσχετίζεται στατιστικά με τα  $m\bar{r}$  των δύο ακραίων ΔΑ.

Πίνακας 2.18. Διαστήματα εμπιστοσύνης των πραγματικών διαφορών των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Άνω-35%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο		Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	
κέρδος							
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	8.28	12.25	10.27	13.8	11.85	13.05	
$d_t$	-0.002	<b>0.081</b>	-0.010	<b>0.0802</b>	-0.034	<b>0.058</b>	
Άνω-25%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο		Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>avg</sub>
κέρδος							
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	11.55	13.95	11.70	12.65	13.70	19.60	<u>14.05</u>
$d_t$	-0.022	<b>0.070</b>	-0.036	<b>0.055</b>	0.008	0.110	
Άνω-15%	Χειμ. Τεχνικό		Χειμ. Μη-Βέλτιστο		Θερινό		
	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	DT <sub>min</sub>	DT <sub>max</sub>	
κέρδος							
$\widehat{m\bar{r}}_{avg}$ (%)	8.20	11.00	6.95	9.75	19.90	20.50	
$d_t$	-0.013	<b>0.069</b>	-0.010	<b>0.066</b>	-0.049	<b>0.061</b>	

Όμοια αποτελέσματα συγκεντρώνονται και για τον μεγάλο ΕιΣΠ, για τον οποίο μόνο σε ένα σενάριο φόρτισης και επιπέδου οικονομικότητας δεν προκύπτει στατιστική συσχέτιση μεταξύ των ακραίων ΔΑ.

Συνάγονται και διευκρινίζονται τα ακόλουθα σημεία:

- Οι θερινές φορτίσεις τείνουν να εκπαιδεύουν ΔΑ μεγαλύτερων ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων. Αυτό αιτιολογείται από την αυξημένη μη-γραμμικότητα του προβλήματος.

ΔΑ που εκπαιδεύτηκαν για ακόμα μεγαλύτερο ΕιΣΠ (33 πηγές ΔΠ και διακοπτόμενο φορτίο) υπό θερινή φόρτιση έχουν μέσο ποσοστό αποτυχημένων ταξινομήσεων της τάξης του 17%.

- Οι κυριότεροι λόγοι αποτυχημένων ταξινομήσεων αφορούν προγραμματισμούς αναδιανομής της απώλειας οι οποίοι:
  1. Είναι ταυτόσημοι σχεδόν με τους δεδομένους, αλλά με εναλλακτική/ές πηγή/ές ΔΠ ισοδύναμων χαρακτηριστικών. Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα είναι για τον μικρό ΕιΣΠ, το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο σενάριο φόρτισης, βλ. 2.5.1.2 (β).
  2. Βρίσκονται οικονομικά πλησιέστερα προς το κατώφλι κέρδους κάθε επιπέδου οικονομικότητας και έχουν μικρό αριθμό εγγραφών μες στο ΣΜ. Αποτέλεσμα είναι ο αλγόριθμος του ΔΑ να μην μπορεί να τους διακρίνει και εξάγει ως κανόνες του.
  3. Προκύπτουν από κανόνες αδιέξοδων τερματικών κόμβων οι οποίοι αξιολογήθηκαν οριακά Αποδεκτοί ή Μη Αποδεκτοί βάσει του κατωφλίου κέρδους από τη συνάρτηση (2.1).

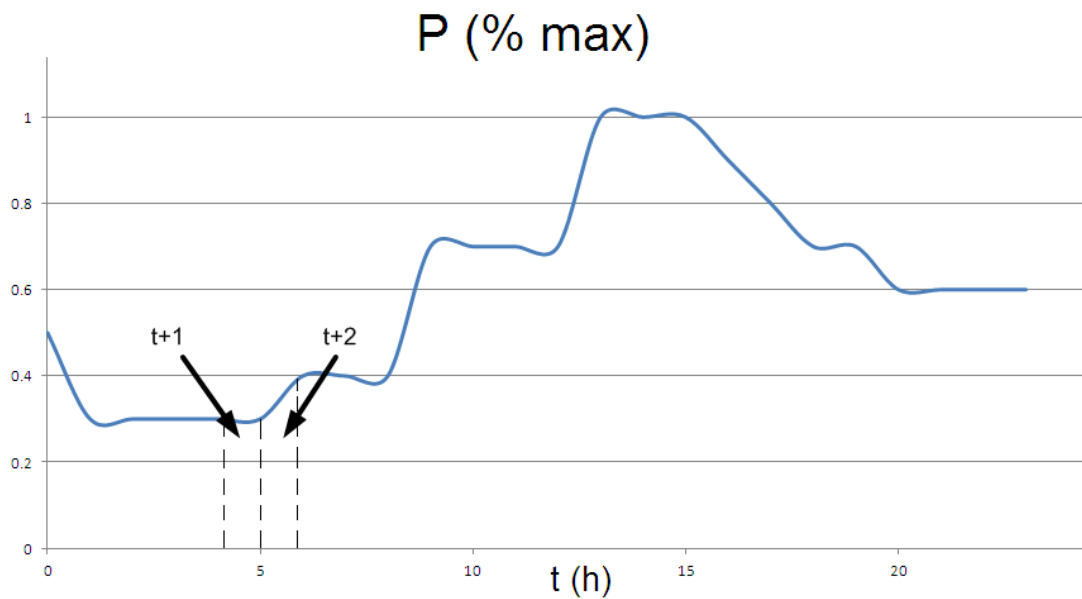
### 2.7.1.3 Συμπεράσματα

Συνολικά, φάνηκε ότι οποιοδήποτε ΣΜ και αν χρησιμοποιηθεί για εκπαίδευση ΔΑ που θα αποδώσει προγραμματισμούς μακροπρόθεσμης αναδιανομής απώλειας ισχύος για το ίδιο σενάριο φόρτισης και επίπεδο οικονομικότητας, θα είναι ισοδύναμο με αυτό το ΣΜ (και ΔΑ) του χαμηλότερου ποσοστού αποτυχημένων κατατάξεων του προβλήματος (κι άρα εξίσου αντιπροσωπευτικό) ή – στη χειρότερη περίπτωση και σπανιότερα – με εκείνο το ΣΜ (και ΔΑ) του μέσου ποσοστού αποτυχημένων κατατάξεων. Κατά τον τρόπο αυτό, εξασφαλίζεται η γενίκευση της μεθόδου ανεξαρτήτως του ΣΜ.

### 2.7.2 Αδυναμία επέκτασης χρονικού ορίζοντα μεθόδου

Για να επιβεβαιωθεί ο περιορισμός στον ορίζοντα σχεδιασμού, θα χρησιμοποιηθεί χαρακτηριστικό παράδειγμα για εξαγωγή προγραμματισμών μακροπρόθεσμης ανακατανομής απώλειας ισχύος για χρονικό ορίζοντα έστω και 2 ωρών εμπρός. Ουσιαστικά, αυτό που ζητείται είναι το προκύπτον ΣΜ να εκπαιδεύει ΔΑ που θα μπορεί να διακρίνει σε κάποιον εσωτερικό κόμβο τη μία ώρα προγραμματισμού από την άλλη. Για να επιτευχθεί αυτό, οι εγγραφές του ΣΜ, όπως ενδεικτικά παρουσιάστηκαν στην Υποενότητα 2.4.3.2, θα πρέπει να ενσωματώνουν επιπλέον χαρακτηριστικό/ά (attribute/s σε ορολογία Βάσεων Δεδομένων).

Έστω τυπική καμπύλη φορτίου σαν αυτή του Σχήματος 2.10. Σε μία απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, η τιμή της είναι χαμηλότερη για συνθήκες χαμηλού φορτίου και υψηλότερη για συνθήκες υψηλού φορτίου.



Σχήμα 2.10. Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου εκφρασμένη σε ανά μονάδα ισχύ επί της αιχμής.

Προφανώς, ο ΕισΠ θα συμμετέχει στην παροχή ισχύος με τις μονάδες ΔΠ μηδενικού κόστους λειτουργίας για οποιαδήποτε τιμή ενέργειας. Άρα, για συνθήκες χαμηλού φορτίου το κέρδος του ΕισΠ είναι ίσο με την τιμή ενέργειας μείον όποια κόστη φόρτισης/πλήρωσης των μονάδων αποθήκευσης (αμελητέα). Για συνθήκες υψηλότερου φορτίου (και αντίστοιχες τιμές ενέργειας), ο ΕισΠ θα μπορεί να ενσωματώσει στην προσφορά ισχύος και πηγές με λειτουργικό κόστος, όπως, για παράδειγμα, μονάδες θερμικού τύπου. Στην περίπτωση αυτή, το κέρδος του ΕισΠ είναι η τιμή ενέργειας της αγοράς μείον τα κόστη λειτουργίας των μονάδων.

Ας υποτεθεί ότι η υψηλότερη τιμή ενέργειας για συνθήκες χαμηλού φορτίου είναι  $X \text{ €/kWh}$  και δίνεται την ώρα  $t+1$  κατά το Σχήμα 2.10. Χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα, μπορεί να υποτεθεί ότι  $X \text{ €/kWh}$  είναι και η χαμηλότερη τιμή ενέργειας για συνθήκες υψηλού φορτίου που δίνεται την ώρα  $t+2$ , σύμφωνα πάλι με το Σχήμα 2.10. Έστω, επίσης, το κόστος λειτουργίας της ΔΠ για την ώρα  $t+1$  μηδενικό, ενώ για την ώρα  $t+2$  ίσο με  $Y \text{ €/kWh}$ . Ως εκ τούτων και απλοποιημένα από την (2.1) προκύπτει:

$$Profit(t+1) = P_{t+1}X$$

$$Profit(t+2) = P_{t+2}(X - Y)$$

Λόγω διαφορετικής προσφοράς ενέργειας από την ώρα  $t+1$  στην ώρα  $t+2$  τα μεγέθη είναι μη συγκρίσιμα. Εφαρμόζεται κανονικοποίηση ως προς την προσφερόμενη ισχύ ώρας.

$$\overline{Profit}(t+1) = X$$

$$\overline{Profit}(t+2) = (X - Y)$$

Προφανώς  $\overline{Profit}(t+1) > \overline{Profit}(t+2)$ . Από εδώ, η οποιαδήποτε απώλεια ισχύος θεωρηθεί για κάθε ώρα, θα οδηγήσει σε κέρδη μικρότερα μεν των  $\overline{Profit}(t+1)$  και  $\overline{Profit}(t+2)$ , αλλά σίγουρα πλησίον τους. Συνεπώς η σχέση  $\overline{Profit}(t+1) > \overline{Profit}(t+2)$  θα διατηρηθεί.

Βάσει του παραδείγματος εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Με το πλαίσιο αξιολόγησης των προγραμματισμών του ΣΜ που αναπτύχθηκε στην Υποενότητα 2.4.3.2, όλοι οι προγραμματισμοί για την ώρα  $t+2$  θα κριθούν ως Μη Αποδεκτοί.
2. Έστω ότι, σε αντίθεση με την προηγούμενη παρατήρηση, διακριθεί – με κάποιον τρόπο – η αξιολόγηση των προγραμματισμών για τις ώρες  $t+1$  και  $t+2$ . Τότε:
  - i. Χειρότερη περίπτωση – Οι προ σφάλματος ωριαίοι προγραμματισμοί του ΕιΣΠ διαφέρουν σημαντικά: Η εκπαίδευση του ΔΑ θα οδηγήσει στον διαχωρισμό των προγραμματισμών κάλυψης της απώλειας για  $t+1$  και  $t+2$  αρκετά κοντά στη ρίζα, άρα το μέγεθος του ΣΜ θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιο αυτού που απαιτείται για τον προγραμματισμό σε ορίζοντα 1 ώρας εμπρός για να παραχθούν οι ζητούμενοι κανόνες/προγραμματισμοί.
  - ii. Καλύτερη περίπτωση – Οι προ σφάλματος ωριαίοι προγραμματισμοί του ΕιΣΠ ομοιάζουν σημαντικά: Η εκπαίδευση του ΔΑ δε θα διαχωρίσει τους προγραμματισμούς κάλυψης για  $t+1$  και  $t+2$ , αφού το πρόγραμμα κάλυψης θα είναι σχεδόν ταυτόσημο και, έτσι, το μέγεθος του ΣΜ για τον ορίζοντα 2 ωρών εμπρός μπορεί να είναι ίσο αυτού που απαιτείται για τον προγραμματισμό σε ορίζοντα 1 ώρας εμπρός.
  - iii. Μέση περίπτωση: Η εκπαίδευση του σχετικού ΔΑ θα διαχωρίσει τους προγραμματισμούς κάλυψης της απώλειας για  $t+1$  και  $t+2$  σε κάποιο βάθος από τη ρίζα, αφού ένα μέρος των προγραμματισμών θα είναι κοινό. Το μέγεθος του απαιτούμενου ΣΜ θα είναι μεταξύ του ίσου και του διπλάσιου προς το αντίστοιχο ΣΜ για τον προγραμματισμό 1 ώρας εμπρός.

Να σημειωθεί ότι παρά τις πολυάριθμες δοκιμές που έγιναν, με κανένα επιπλέον χαρακτηριστικό/attribute δεν κατέστη εφικτό να εκπαιδευτεί ΔΑ το οποίο να διαχωρίζει τους προγραμματισμούς των ωρών. Επιπλέον, στην πλειοψηφία των ΔΑ που εκπαιδεύτηκαν, προέκυπταν μόνο αδιέξοδοι τερματικοί κόμβοι και κανόνες/προγραμματισμοί που ανταποκρίνονταν στη μία εκ των δύο ωρών του ορίζοντα.

Ως εκ των ανωτέρω, συμπεραίνεται ότι, ακόμα και αν προσδιοριζόταν χαρακτηριστικό/attribute που να διαχωρίζει τους προγραμματισμούς κάλυψης της απώλειας μεταξύ των ωρών, το μέγεθος του ΣΜ που απαιτείται για την εκπαίδευση του αντίστοιχου ΔΑ (ουσιαστικά αποτελεί και τον παράγοντα τακτικής δέσμευσης υπολογιστικών πόρων) είναι άγνωστο και εξαρτάται από τη διαφορετικότητα των ωριαίων προγραμμάτων συμμετοχής του ΕιΣΠ στην αγορά ενέργειας προ σφάλματος.



### **2.7.3 Εκτέλεση των βραχυπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου προγραμματισμών κάλυψης απώλειας ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής**

Μετά τον προσδιορισμό των δύο προγραμματισμών κάλυψης της εκάστοτε απώλειας, αυτοί θα πρέπει να συνδυαστούν καταλλήλως για την εκτέλεσή τους σε περίπτωση συμβάντος. Προφανώς, το κοινό μέρος των δύο προγραμματισμών εκτελείται άμεσα ως εκ της υλοποίησης της βραχυπρόθεσμης κάλυψης και εν αναμονή ολοκλήρωσης της μακροπρόθεσμης κάλυψης, αν εμπλέκονται στη δεύτερη πηγές με μεγάλους χρόνους ράμπας ή που απαιτούν εκκίνηση από κατάσταση σβέσης.

Αν η απώλεια ισχύος καθυστέρησε να διαγνωστεί για να καλυφθεί καταλλήλως και διατίθεται χρόνος στην περίοδο προγραμματισμού, ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ μπορεί να επιλέξει να υπερφορτίσει κατάλληλα τις μονάδες του μες στα πλαίσια του εξαχθέντος μακροπρόθεσμου προγραμματισμού, ώστε να αποφύγει και τις χρεώσεις της αγοράς αποκλίσεων.

Κωλύματα επικοινωνίας και αστοχίες ελέγχου που μπορεί να εμφανιστούν κατά την υλοποίηση του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού του μέγιστου ανωφλίου κέρδους, μπορούν να αντιμετωπιστούν εφαρμόζοντας προγραμματισμό του αμέσως μικρότερου κέρδους. Αξιολογώντας τη δυνατότητα εκτέλεσης και την οικονομικότητα των μακροπρόθεσμων προγραμματισμών που παράγονται από τη μέθοδο, ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ μπορεί, επίσης, να αποφασίσει να χρεωθεί το έλλειμμα ισχύος του από την αγορά αποκλίσεων αν εκτιμάται ότι είναι οικονομικά καλύτερη επιλογή.

## 2.8 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή αναπτύχθηκε μέθοδος χάρις την οποία ένας ΕισΠ μπορεί να εξασφαλίζει εγγυημένη ισχύ εξόδου εν όψει συμβάντων απώλειας ισχύος είτε λόγω στοχαστικότητας ΑΠΕ είτε λόγω έκτακτων περιστάσεων. Η μέθοδος συμπεριλαμβάνει δύο στάδια υλοποίησης της κάλυψης της απώλειας, ένα ταχύ (βραχυπρόθεσμο) και ένα μόνιμο (μακροπρόθεσμο), έτσι ώστε σε πρώτη φάση ο ΕισΠ να μπορεί να πληροί αδιάλειπτα τις υποχρεώσεις/δεσμεύσεις του προς το ΣΗΕ και σε δεύτερη φάση να μπορεί να υποκαταστήσει την απώλεια με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Η μέθοδος δομήθηκε πάνω στη χρήση μηχανικής μάθησης με ΔΑ τα οποία σε έναν ορίζοντα 1 ώρας εμπρός προετοιμάζουν προγραμματισμούς αναδιανομής της απώλειας ισχύος της μονάδας ΔΠ του ΕισΠ με τη δυναμικά μέγιστη έγχυση. Η μη-γραμμικότητα του προβλήματος καθώς και η εκπαίδευση ΔΑ διαφορετικών κανόνων λόγω διαφορετικών ΣΜ, έθεσε το ερώτημα αν οποιοδήποτε ΣΜ και, ως εκ τούτου, σύνολο προγραμματισμών αναδιανομής που παράγει το αντίστοιχο ΔΑ είναι αντιπροσωπευτικό της λύσης του προβλήματος. Η σχετική ανάλυση των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων μεταξύ των σχετικών ΔΑ κάθε προβλήματος απέδειξε την ικανότητα γενίκευσης της μεθόδου. Αν και για τον επεξεργαστή που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, υπάρχει ένα άνω όριο για τον ΕισΠ για τον οποίο μπορεί να εξάγει σχετικούς προγραμματισμούς, ο παραλληλισμός επιπλέον επεξεργαστών μπορεί να άρει τον περιορισμό.

## 2.9 Βιβλιογραφία

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley, Chichester, 2001.
- [2] V. Salas, E. Olías, Overview of the photovoltaic technology status and perspective in Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τεύχος 13, 2009, Σελίδες 1049–1057.
- [3] F. Jurado, A. Cano, Optimal placement of biomass fuelled gas turbines for reduced losses, *Energy Conversion and Management*, Τόμος 47, Τεύχος 16, 2006, Σελίδες 2673–2681.
- [4] N.P.A. Smith, Key factors for the success of village hydro-electric programmes, *Renewable Energy*, Τόμος 5, Τεύχος 8, 1994, Σελίδες 1453–1460.
- [5] Centre for Renewable Energy Sources. Ocean energy conversion in Europe: recent advances and prospects, 2006.
- [6] G. Lalor, J. Ritchie, S. Rourke, D. Flynn, M.J. O'Malley, Dynamic frequency control with increasing wind generation, in: *Proc. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Ιούνιος 2004, Σελίδες 1715-20.
- [7] M.J. Ortega, J.C. Hernández, O.G. García, Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations, *Electric Power Systems Research*, Τεύχος 96, Μάρτιος 2013, Σελίδες 23-35.
- [8] G. Sideratos, N.D. Hatziaargyriou, Probabilistic Wind Power Forecasting Using Radial Basis Function Neural Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 27, Τεύχος 4, Νοέμβριος 2012, Σελίδες 1788-1796.
- [9] A.T. Al-Awami, M.A. El-Sharkawi, Coordinated Trading of Wind and Thermal Energy, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Τόμος 2, Τεύχος 3, Ιούλιος 2011, Σελίδες 277-287.
- [10] P. Pelacchi, D. Poli, The influence of wind generation on power system reliability and the possible use of hydrogen storages, *Electric Power Systems Research*, Τόμος 80, Τεύχος 3, Μάρτιος 2010, Σελίδες 249-255.
- [11] S.T. Lee, Z.A. Yamayee, Load-Following and Spinning-Reserve Penalties for Intermittent Generation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Τόμος 100, Τεύχος 3, Μάρτιος 1981, Σελίδες 1203-1211.
- [12] R. Billinton, Dange Huang, Incorporating Wind Power in Generating Capacity Reliability Evaluation Using Different Models, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 26, Τεύχος 4, Νοέμβριος 2011, Σελίδες 2509-2517.
- [13] R. Karki, Hu Po, R. Billinton, Reliability Evaluation Considering Wind and Hydro Power Coordination, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 25, Τεύχος 2, Μάιος 2010, Σελίδες 685-693.

- [14] P. Zhang, Y. Wang, W. Xiao, W. Li, Reliability Evaluation of Grid-Connected Photovoltaic Power Systems, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Τόμος 3, Τεύχος 3, Ιούλιος 2012, Σελίδες 379-389.
- [15] P. Bousseau, F. Fesquet, R. Belhomme, S. Nguefeu, T.C. Thai, Solutions for the grid integration of wind farms - a survey, *Wind Energy*, Τόμος 9, Τεύχη 1-2, 2006, Σελίδες 13-25.
- [16] R. Tonkoski, L.A.C. Lopes, T.H.M. EL-Fouly, Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Τόμος 2, Τεύχος 2, Απρίλιος 2011, Σελίδες 139-147.
- [17] J. Revuelta, J.C. Fernandez, J.L. Fernandez, Large scale integration of renewable energy sources in the Spanish power system. Curtailment and market issues, in: *Proc. 8th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2011, Σελίδες 413-418.
- [18] G.J. Schaeffer, H. Akkermans, *CRISP – Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power – Final Summary Report*, Ολλανδία, 2006.
- [19] N. Hatziaargyriou, A. Dimeas, S. Chatzivassiliadis, T. Tomtsi and P. Moutis, Multi-Agent System for Creation of Virtual Power Plant (VPP) with Aggregated and Decentralized Control, *Integration of Renewable Energy Sources and Distributed Energy Resources*, Third International Conference on the, Nice, Δεκέμβριος 2008.
- [20] <http://www.powermatchingcity.nl>
- [21] S.V. Papaefthymiou, E.G. Karamanou, S.A. Papathanassiou, M.P. Papadopoulos, A Wind-Hydro-Pumped Storage Station Leading to High RES Penetration in the Autonomous Island System of Ikaria, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Τόμος 1, Τεύχος 3, Οκτώβριος 2010, Σελίδες 163-172.
- [22] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, T. Funabashi, A hybrid power system using alternative energy facilities in isolated island, *Energy Conversion*, *IEEE Transactions on*, Τόμος 20, Τεύχος 2, Ιούνιος 2005, Σελίδες 406-414.
- [23] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam, Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system, *Journal of Power Sources*, Τόμος 161, Τεύχος 1, Οκτωβρίου 2006, Σελίδες 707-722.
- [24] I. Sanders, *Network Reliability and Firm Power Capacity Workshop. Issues, needs, conclusions and action points*, Industrial Research Ltd., Gracefield, Lower Hutt, Wellington, Νέα Ζηλανδία, Δεκέμβριος 2005.
- [25] G. Strbac, N. Jenkins, T. Green, D. Pudjianto, *Review of Innovative Network Concepts*, DG GRID Project Report, Petten, Ολλανδία, 2006.
- [26] E. Mashhour, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part I: Problem Formulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 26, Τεύχος 2, Μάιος 2011, Σελίδες 949-956.

- [27] H. Lee Willis, W.G. Scott, Distributed Power Generation: Planning and Evaluation, Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
- [28] J.R. Quinlan, Induction of Decision Trees, Machine Learning, Τόμος 1, Μάρτιος 1986, Σελίδες 81-106.
- [29] S.R. Safavian, D. Landgrebe, A survey of decision tree classifier methodology, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Τόμος 21, Τεύχος 3, Μάιος/Ιούνιος 1991, Σελίδες 660-674.
- [30] C. Wu, D. Landgrebe, P. Swain, The decision tree approach to classification, West Lafayette, Purdue University, School of Electrical Engineering, 1975.
- [31] C. Schaffer, A conservation law for generalization performance, in: Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning, 1994, Σελίδες 259-265.
- [32] S.K. Murthy, Automatic Construction of Decision Trees from Data: A Multi-Disciplinary Survey, Data Mining and Knowledge Discovery, Τεύχος 2, 1997, Σελίδες 345-389.
- [33] IEC 60076-8, Power transformers – Application guide, IEC, Ελβετία (1997).
- [34] IEC 60905, Loading guide for dry-type power transformers, IEC, Ελβετία (1987).
- [35] European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC (2010).
- [36] S.T. Mak, A synergistic approach to implement demand response, asset management and service reliability using smart metering, AMI and MDM systems, Power & Energy Society General Meeting, 2009, PES '09, IEEE, 26-30 Ιουλίου 2009, Σελίδες 1-4.
- [37] IEC 61850, Communication networks and systems for power utility automation, IEC, Ελβετία.
- [38] L. Wehenkel, M. Pavella, Decision Trees and Transient Stability of Electric Power Systems, Automatica, Τεύχος 27, 1991, Σελίδες 115-134.
- [39] J.M. Van Campenhout, 36 Topics in measurement selection, In: P.R. Krishnaiah, L.N. Kanal, Handbook of Statistics, Τόμος 2, Elsevier, 1982.
- [40] P.N. Tan, M. Steinbach, V. Kumar, Introduction to Data Mining, Addison-Wesley, Boston, 2005.
- [41] M. Farhoodnea, A. Mohamed, H. Shareef, H. Zayandehroodi, Optimum placement of active power conditioners by a dynamic discrete firefly algorithm to mitigate the negative power quality effects of renewable energy-based generators, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Τεύχος 61, Οκτώβριος 2014, Σελίδες 305-317.
- [42] J. Escudero-González, P. Amparo López-Jiménez, Iron redox battery as electrical energy storage system in the Spanish energetic framework, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Τεύχος 61, Οκτώβριος 2014, Σελίδες 421-428.
- [43] Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΠΑΕ Ελλάδαδος (1<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2012).

- [44] M. Bueno-Lorenzo, M. Ángeles Moreno, J. Usaola, Analysis of the imbalance price scheme in the Spanish electricity market: A wind power test case, *Energy Policy*, Τεύχος 62, Νοέμβριος 2013, Σελίδες 1010-1019.
- [45] The Balancing and Settlement Code, ELEXON Ltd (21<sup>η</sup> Μαρτίου 2001).
- [46] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [47] J. Ekanayake, N. Jenkins, Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Τόμος 19, Τεύχος 4, Δεκέμβριος 2004, Σελίδες 800- 802.

## 2.10 Προβληματική

Δύο σημεία που αξίζουν πιο ελεύθερου προβληματισμού είναι οι εναλλακτικές μέθοδοι εξόρυξης πληροφορίας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αντί των ΔΑ (ως του μέσου μηχανικής μάθησης για το συγκεκριμένο πρόβλημα) καθώς και η επιλογή της θεωρούμενης απώλειας στη βάση της δυνητικά υψηλότερης έγχυσης ισχύος.

Κατά τα περιγραφόμενα στη βιβλιογραφία που παρατέθηκε ήδη και με επιπλέον επιχειρηματολογία που επεκτείνεται αναλυτικά στο “The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction In The Elements of Statistical Learning” των T. Hastie, R. Tibshirani και J. Friedman, εκδόσεις Springer (Καναδάς 2003), τα ΔΑ είναι ταχύτατης κατασκευής, με διαισθητικά κατανοητούς κανόνες, δεν επηρεάζονται από ασήμαντη πληροφορία, από μεγάλη ποσότητα δεδομένων και από τις ακραίες περιοχές κατανομών της πληροφορίας. Μοναδικές τους δύο ελλείψεις είναι η αδυναμία εξαγωγής γραμμικών σχέσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών του ΣΜ από το οποίο εκπαιδεύονται και η περιορισμένη ικανότητάς τους στην πρόβλεψη, δηλαδή στην αξιόπιστη προεκβολή των κανόνων τους σε πεδίο εκτός της γνώσης που έχουν λάβει από το ΣΜ. Για τα δύο μειονεκτήματα που μόλις αναφέρθηκαν μπορεί να ειπωθούν τα εξής. Πρώτον, η εξαγωγή γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών του μελετώμενου προβλήματος ήταν αδιάφορη στην προκείμενη εργασία και, ως εκ τούτου, δεν επηρεάζει τη μελέτη. Δεύτερον, όσο αφορά την αντιμετώπιση της φτωχής απόκρισης του εργαλείου σε συνθήκες εκτός του ΣΜ (υπαρκτό πρόβλημα), χρησιμοποιήθηκαν ήδη οι πολλαπλές στάθμες οικονομικότητας κατά τρόπο τέτοιο που ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ να μπορεί να διαθέτει εναλλακτικούς προγραμματισμούς όταν οι διαθέσιμες προβλέψεις (ειδικά για τις μονάδες ΔΠ στοχαστικού τύπου) αποκλίνουν από το αναμενόμενο. Στο Κεφάλαιο 4 η προσέγγιση των πολλαπλών επιπέδων οικονομικότητας βελτιώνεται περαιτέρω χρησιμοποιώντας ένα ΣΜ, αξιολογώντας το διαδοχικά για όλα τα επίπεδα οικονομικότητας και εκπαιδεύοντας από κάθε διαδοχική αξιολόγησή του ένα ΔΑ. Κατά τον τρόπο αυτό, η επιλογή των ΔΑ ως του εργαλείου μηχανικής μάθησης στην εργασία αυτή, είναι η ποιοτικά καλύτερη επιλογή για την εξαγωγή των κανόνων προγραμματισμού στις προσεγγίσεις που αναπτύσσονται.

Η δυνητικά υψηλότερη έγχυση ισχύος χρησιμοποιήθηκε ως το μέτρο επιλογής της απώλειας που εξετάζεται προς αναδιανομή στις υπόλοιπες πηγές του ΕιΣΠ (2.4.1). Επιχειρηματολογήθηκε ότι αντιπροσωπεύει το χειρότερο σενάριο αφού με την επιλογή αυτή περιορίζεται η διαθεσιμότητα κάλυψης της απώλειας από μεριάς του ΕιΣΠ. Η θεώρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τις μελέτες  $n-1$ , όπου η χειρότερη περίπτωση αφορά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε μελετώμενου ΣΗΕ και εξετάζεται διεξοδικά για απώλεια οποιουδήποτε συντελεστή του ΣΗΕ και όχι μόνο πηγές. Όμως, στην παρούσα εργασία ο εκάστοτε ΕιΣΠ υποτίθεται κλάσμα του ΣΗΕ. Θεωρητικά δηλαδή, και στη βάση της ευρύτερης οπτικής που αναπτύχθηκε στην *Προβληματική* του

προηγούμενου κεφαλαίου, ένα ΣΗΕ θα περιλαμβάνει (ή αποτελείται από) μεγάλο αριθμό ΕιΣΠ. Ως εκ της υπόθεσης αυτής, συνάγεται ότι το συμβάν απώλειας έχει χαμηλό – αν όχι αμελητέο – ταυτοχρονισμό μεταξύ των ΕιΣΠ. Άρα, η επιρροή της εκάστοτε απώλειας έγχυσης ισχύος από συντελεστή του ΕιΣΠ στην τάση και τη συχνότητα του ΣΗΕ προς το οποίο συνδέεται δεν είναι κρίσιμη. Μεταβατικά (έως εκτέλεσης των προγραμματισμών κάλυψης) τόσο η συχνότητα όσο και η τάση μπορούν να υποστηριχθούν από τους υπόλοιπους ΕιΣΠ, από μονάδες ΔΠ ή και από τα συμβατικά μέσα του ΣΗΕ.



# 3

## *Εξασφάλιση εφεδρείας και ρύθμιση συχνότητας από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*

Ανάμεσα στα βασικά χαρακτηριστικά των ΑΠΕ που αφορούν στοχαστική πηγή είναι η εξάρτηση της ισχύος εξόδου τους από τη διαθεσιμότητα της εν λόγω πηγής και η προσπάθεια της μέγιστης δυνατής απομάστευσής της [1,2]. Το τελευταίο σημείο υπονοεί ότι οι ΑΠΕ στοχαστικού χαρακτήρα έχουν περιορισμένη συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας, αφού είναι αδύνατον να αποδώσουν ισχύ πέραν του μεγίστου διαθεσίμου. Δηλαδή, απαιτείται να υπάρχουν μέθοδοι οι οποίες να καθοδηγούν με συνεπή τρόπο κάθε τέτοια μονάδα ΔΠ να απορρίπτει ή να αποθηκεύει μέρος της διαθέσιμης ισχύος της πηγής ως εφεδρεία, έτσι ώστε να την αποδίδει κατά την εκδήλωση των φαινομένων συχνότητας. Να συμμετέχει δηλαδή στη ΡΣ.

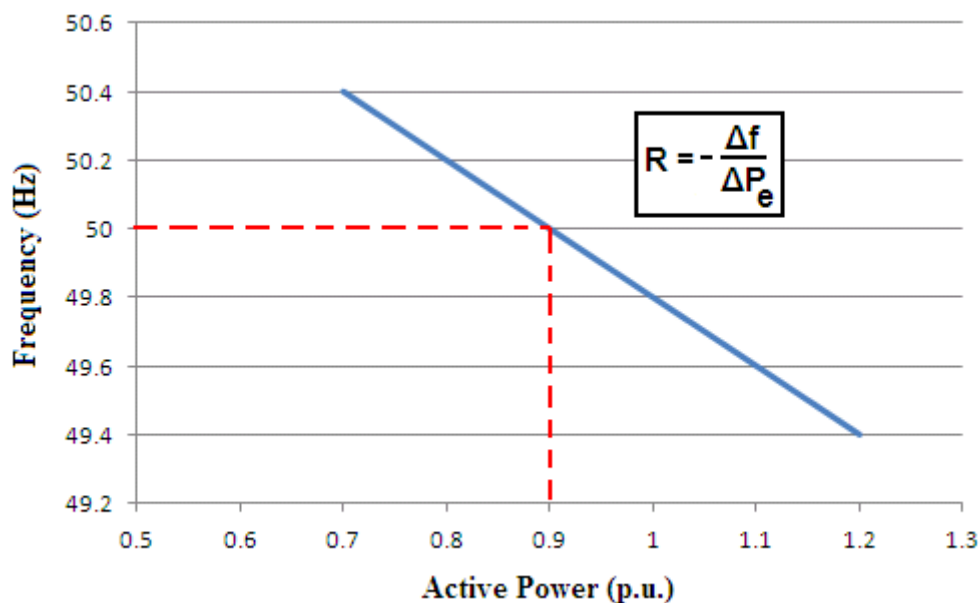
Κατόπιν κάποιων σύντομων ορισμών στην επόμενη υποενότητα, θα παρουσιαστούν μέθοδοι αποφόρτισης των δύο κυριότερων στοχαστικών πηγών ΔΠ, των ανεμογεννητριών (Α/Γ) και των Φ/Β συστημάτων μέσω των αντιστροφών τους (Φ/Β Α/Σ), που εξασφαλίζουν εφεδρεία για τη συμμετοχή τους στη ρύθμιση συχνότητας των ΣΗΕ.

## 3.1 Ορισμοί

### 3.1.1 Ρύθμιση συχνότητας

Η συχνότητα τάσεων/ρευμάτων των ΣΗΕ πρέπει να διατηρείται σταθερή για να πληρούνται οι προδιαγραφές ορθής λειτουργίας των φορτίων, να περιορίζεται το ρεύμα μαγνήτισης των μηχανών επαγωγής και των Μ/Σ ισχύος, να λειτουργεί ορθά ο υποστηρικτικός εξοπλισμός των σύγχρονων γεννητριών και να διατηρείται η ακρίβεια των ηλεκτρικών ρολογιών [3]. Για τους παραπάνω λόγους καθορίζονται όρια ασφάλειας πέραν των οποίων διακόπτες ισχύος αποσυνδέουν φορτία, παροχές και γεννήτριες για την προστασία τους [4,5]. Για την επαναφορά της συχνότητας στην ονομαστική τιμή της ή τουλάχιστον τη διατήρησή της εντός των ορίων ασφαλείας, οι γεννήτριες του ΣΗΕ αντιδρούν αναλόγως της παρατηρούμενης μεταβολής.

Εξηγείται αναλυτικότερα το φαινόμενο ως εξής. Τα φορτία εφαρμόζονται σαν αντιρροπή επί των δρομέων των γεννητριών που στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα κατά τη φορά της ροπής της κινούσας δύναμης (ατμός, νερό, diesel, κτλ). Σημαντική αύξηση του φορτίου ή απώλεια παραγωγής θα οδηγήσει σε μείωση της συχνότητας, ενώ τα αντίθετα φαινόμενα θα προκαλέσουν αύξησή της. Σύμφωνα με τη ζητούμενη απόδοση ισχύος εκ μέρους κάθε γεννήτριας στο τέλος της διαταραχής, καθορίζεται σχετικός συντελεστής ελέγχου. Ο συντελεστής αυτός καλείται στατισμός και αποδίδεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.1. [3]

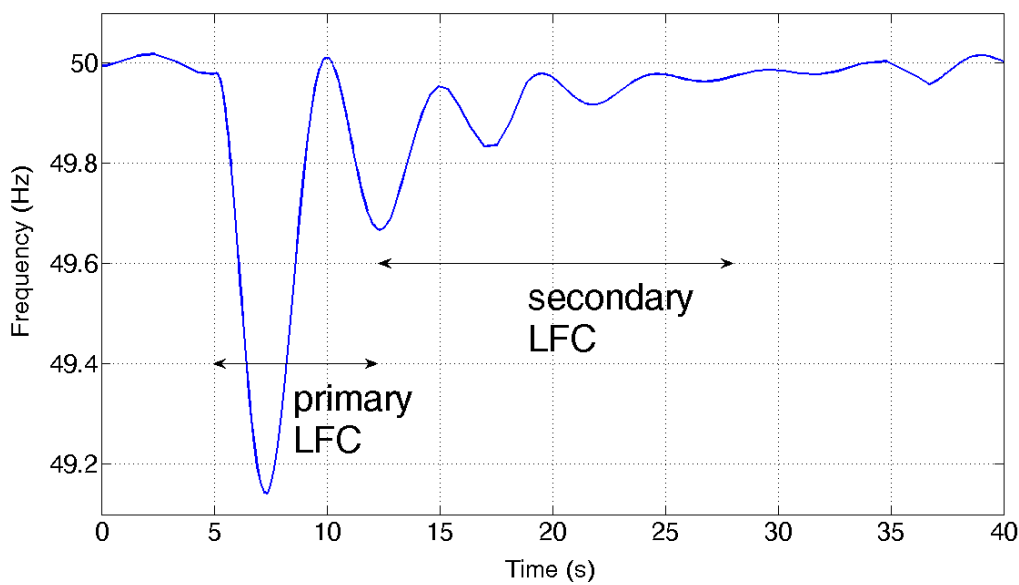


Σχήμα 3.1. Τυπική καμπύλη στατισμού γεννήτριας εκφρασμένη σε ανά μονάδα ισχύ επί της ονομαστικής της γεννήτριας.

Ειδικά για την περίπτωση της πτώσης συχνότητας, απαιτείται αύξηση της ισχύος εξόδου των γεννητριών. Αυτό προϋποθέτει τη λειτουργία των τελευταίων σε σημείο μικρότερο του μεγίστου,

ώστε να διατίθεται περιθώριο (εφεδρεία) για τη ρύθμιση. Για τις πηγές χωρίς στοχαστικότητα η διατήρηση εφεδρείας είναι τεχνικά εφικτή και εύλογη, όμως η αποφόρτιση των ΑΠΕ δε δικαιολογείται επενδυτικά μέχρι προ τινός και αναπτύχθηκε μόνο πρόσφατα, όπως και θα συζητηθεί παρακάτω.

Από τη σκοπιά του ηλεκτρομηχανικού φαινομένου, η διαταραχή και επακόλουθη ρύθμιση/αποκατάσταση της συχνότητας σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή, φαίνεται αμέσως στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2. Η διαταραχή φορτίου-συχνότητας για απώλεια γεννήτριας ή αύξηση του φορτίου και η αποκατάστασή της σύμφωνα με τη σχετική ρύθμιση.

Κατά το Σχήμα 3.2, στα πρώτα δευτερόλεπτα επενεργεί η πρωτεύουσα ρύθμιση σύμφωνα με τον στατισμό της μονάδας, όπως αυτός περιγράφηκε παραπάνω, ενώ ακολουθεί η πλήρης αποκατάσταση της συχνότητας μέσω του δευτερεύοντος ελέγχου (περισσότερες πληροφορίες στο [3]). Η μέγιστη βύθιση της συχνότητας στην προκειμένη περίπτωση (ή η υπερακόντισή της στο συμμετρικό φαινόμενο ανισορροπίας) εξαρτάται αποκλειστικά από τη στιγμιαία αδράνεια των μονάδων παραγωγής και των κινητήρων, οι οποίοι είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένοι στο ΣΗΕ μέσω της ηλεκτρικής τους γωνιακής ταχύτητας – η απόκριση του σταδίου αυτού καλείται αδρανειακή. Μονάδες αποξευγμένες του ΣΗΕ μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, δε συμβάλλουν στη συγκράτηση των αποκλίσεων συχνότητας και μπορούν να συνδράμουν μεταβατικά μόνο με ψηφιακό προγραμματισμό τους προς παροδική έγχυση ισχύος – η τελευταία πρακτική καλείται εξομοίωση αδρανειακής απόκρισης ή ψευδοαδρανειακή απόκριση.

### 3.1.2 Μέγιστη απομάστευση ισχύος από στοχαστικές ΑΠΕ

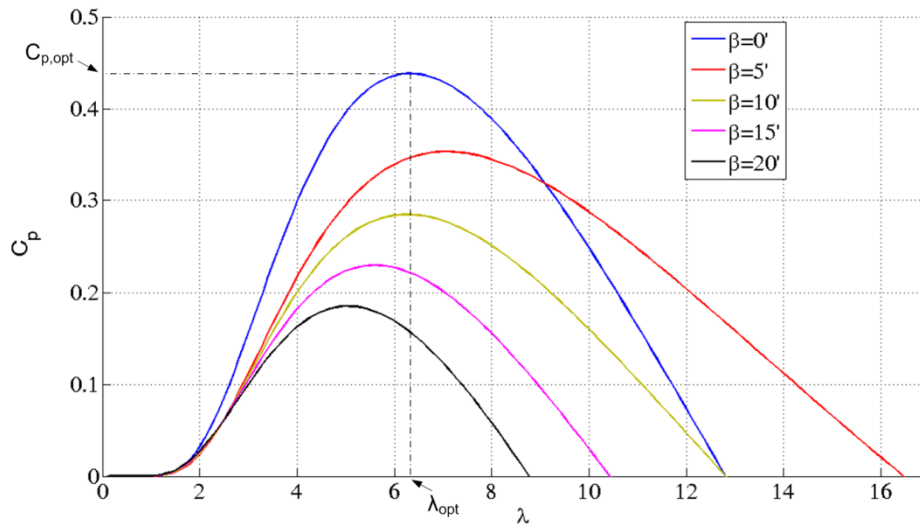
Για την κάθε στοχαστική ΑΠΕ έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι οι οποίοι αξιοποιώντας τα φυσικά χαρακτηριστικά της, επιτυγχάνουν τη μέγιστη δυνατή αξιοποίησή της. Για τις τεχνολογίες των Α/Γ οριζόντιου άξονα και των Φ/Β αντιστροφών παρατίθενται αμέσως οι σχετικές μέθοδοι.

### 3.1.2.1 Μέγιστη απομάστευση ισχύος σε ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

Ο οριζόντιος άξονας είναι η πιο διαδεδομένη κατασκευαστική τοπολογία Α/Γ παγκοσμίως [6]. Για έλικα ακτίνας  $R$  (επιφάνειας  $\pi R^2$ ), με γωνία πτερυγίων  $\beta$ , σε πυκνότητα αέρα  $\rho$ , στρεφόμενη υπό κάθετη ταχύτητα ανέμου  $U_w$  με γωνιακή ταχύτητα  $\Omega$ , η εν λόγω Α/Γ απορροφά αεροδυναμική ισχύ που δίνεται από τη σχέση (3.1):

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (3.1)$$

Ως  $C_p$  συμβολίζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος των πτερυγίων της έλικας, είναι χαρακτηριστικός της γεωμετρίας τους και αποτυπώνεται ως οικογένεια καμπυλών (βλ. Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3. Καμπύλες αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει του  $\lambda$  και με παράμετρο τη γωνία έλικας  $\beta$ .

Γενικά, ο  $C_p$  προσεγγίζεται από εκφράσεις [7,14] όπως αυτή της (3.2) [14]:

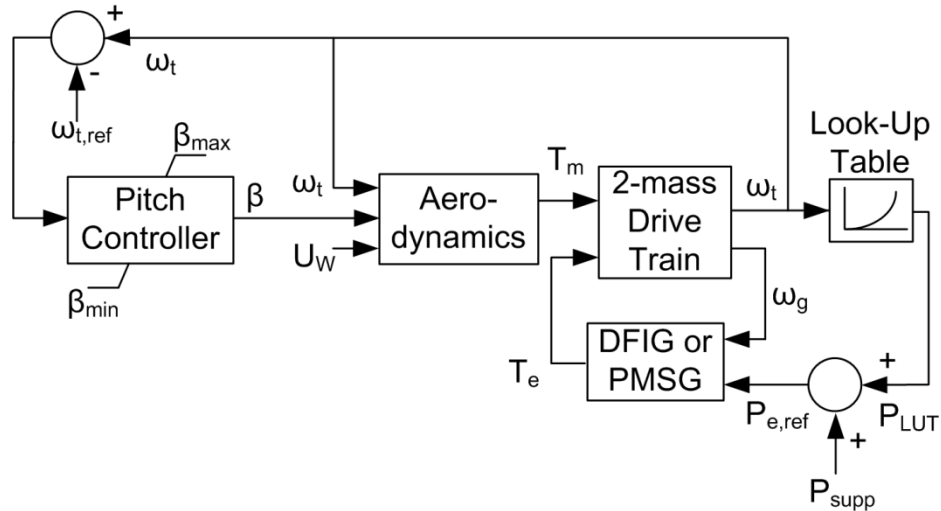
$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot (c_2 \cdot Z - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^x - c_5) \cdot e^{-c_6 \cdot Z} \quad \text{με } Z = R/\lambda \quad (3.2)$$

Όπου  $\lambda$  είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου και  $c_1$ - $c_6$ ,  $x$  παράμετροι. Όπως φαίνεται από την (3.1), η απορροφώμενη αεροδυναμική ισχύς είναι ουσιαστικά συνάρτηση της  $U_w$ , με παράμετρο  $C_p$ . Γενικά, η τακτική μέγιστης απομάστευσης αιολικής ισχύος [8] χωρίζεται σε δύο στάδια αναλόγως της  $U_w$  ως προς την ονομαστική τιμή της  $U_{w,n}$ :

- α. για  $U_w < U_{w,n}$  επιδιώκεται μέγιστη απορρόφηση ισχύος από τον άνεμο, διατηρώντας το  $C_p$  στη μέγιστη τιμή του ( $C_{p,opt}$ ) και
- β. για  $U_w \geq U_{w,n}$  επιδιώκεται περιορισμός της απορροφώμενης ισχύος από τον άνεμο στην ονομαστική τιμή ισχύος της Α/Γ  $P_n$ .

Όσο αφορά την περιοχή ελέγχου (α) η εξασφάλιση του μέγιστου  $C_{p,opt}$  επιτυγχάνεται με διατήρηση της  $\beta$  στην ελάχιστη τιμή της και του  $\lambda$  στην τιμή  $\lambda_{opt}$ , όπως αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 3.3. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται πίνακας τιμών (look-up table, LUT) που αντιστοιχίζει  $\Omega$  δρομέα προς εκτιμώμενη απορροφώμενη ισχύ ( $P_{wt}$ ) από την έλικα. Η  $P_{wt}$  οδηγεί

τη (συνδεδεμένη προς τον δρομέα της έλικας) γεννήτρια και κατά τον τρόπο αυτό, ο λόγος  $\lambda$  διατηρείται στην επιθυμητή τιμή. Για την περιοχή ελέγχου ( $\beta$ ), η γεννήτρια απορροφά την ονομαστική ισχύ  $P_n$  και η  $\Omega$  σταθεροποιείται στην τιμή  $\Omega_n$  χάρις τον έλεγχο της  $\beta$ . Στο Σχήμα 3.4 δίνεται το διάγραμμα του ελέγχου που μόλις περιγράφηκε.

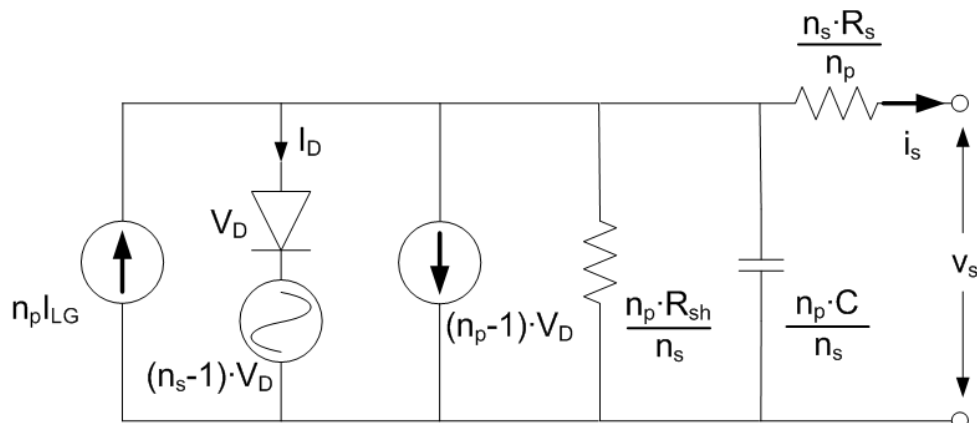


Σχήμα 3.4. Γενικό διάγραμμα ελέγχου Α/Γ.

Ας τονισθεί εδώ ότι υπάρχουν και εναλλακτικές αρχιτεκτονικές ελέγχου, όλες όμως στηρίζονται στην (3.1) θεωρώντας την  $U_w$  ή τη  $\Omega$  ως τη μεταβλητή και το  $C_p$  ως παράμετρο ελέγχου. Για τη μοντελοποίηση του μηχανικού μέρους χρησιμοποιείται συνήθως το μοντέλο 2 μαζών.

### 3.1.2.2 Μέγιστη απομάστευση ισχύος από αντιστροφέα φωτοβολταϊκής συστοιχίας

Μία Φ/Β κυψέλη και κατά επέκταση ένα Φ/Β πλαίσιο ή μια Φ/Β συστοιχία (ως σειριακοί και παράλληλοι συνδυασμοί Φ/Β κυψελών), μπορούν να μοντελοποιηθούν σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.5 [9].



Σχήμα 3.5. Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου  $n_s \cdot n_p$  κυψελών.

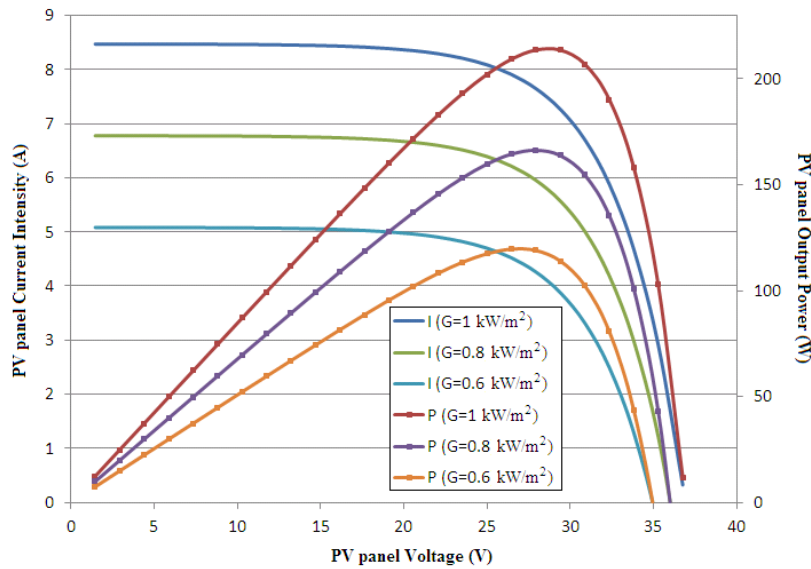
Ως φαίνεται, το Φ/Β στοιχείο εν γένει, μπορεί να ειπωθεί ως πηγή ρεύματος. Το μαθηματικό μοντέλο του αποτυπώνεται από το σύνολο εξισώσεων (3.3) [10]:

$$\left. \begin{aligned}
 i_s(v_s) &= n_p \cdot I_{LG} - n_p \cdot I_{OS} \cdot \left( e^{\frac{G \cdot v_s}{n_s}} - 1 \right) \\
 G &= \frac{1}{A \cdot T_C \cdot k/q} \\
 I_{OS} &= I_{OR} \cdot \left( \frac{T_C}{T_r} \right)^3 e^{\frac{E_{Go}}{B \cdot k/q} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} \\
 I_{LG} &= [I_{SCR} + k_I \cdot (T_C - 301.18)] \cdot \frac{H}{100} \\
 T_C &= 3.12 + 0.25 \cdot H + 0.899 \cdot T_a - 1.3 \cdot w_s
 \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

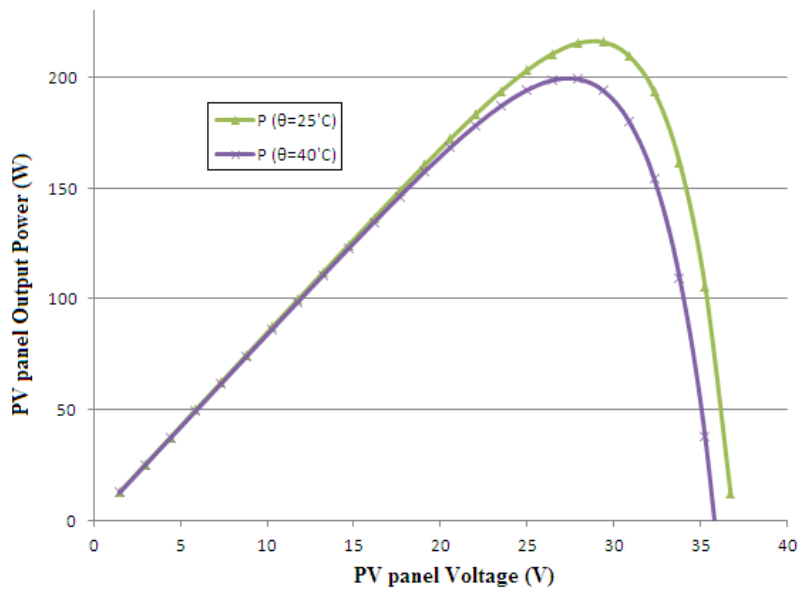
Όπου:

- $i_s$  : ρεύμα εξόδου στοιχείου,
- $v_s$  : τάση εξόδου στοιχείου,
- $n_s$  : αριθμός κυψελών συνδεδεμένων εν σειρά,
- $n_p$  : αριθμός κυψελών συνδεδεμένων εν παραλλήλω,
- $I_{LG}$  : ρεύμα εκ Φ/Β φαινομένου,
- $I_{OR}$  : ρεύμα ανάστροφου κορεσμού υπό  $T_r$ ,
- $A=B$  : συντελεστές ιδανικότητας (= 1.92),
- $k$  : σταθερά Boltzmann,
- $q$  : ηλεκτρονική φόρτιση (1 eV),
- $T_r$  : θερμοκρασία αναφοράς (= 301.18°K),
- $I_{OS}$  : ρεύμα ανάστροφου κορεσμού στοιχείου,
- $T_C$  : θερμοκρασία στοιχείου σε °C,
- $T$  : θερμοκρασία στοιχείου σε °K,
- $k_I$  : θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος βραχυκύκλωσης σε A/°C,
- $H$  : φωτεινή ισχύς επί του στοιχείου,
- $I_{SCR}$  : ρεύμα βραχυκύκλωσης στοιχείου υπό  $T_r$ ,
- $E_{Go}$  : ενεργειακό διάκενο πυριτίου (= 1.11 eV),
- $R_s$  : αντίσταση σειράς στοιχείου,
- $R_{sh}$  : παράλληλη αντίσταση στοιχείου,
- $T_a$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος σε °C,
- $w_s$  : ταχύτητα ανέμου σε m/sec.

Η (3.3) αποδίδει χαρακτηριστικές καμπύλες τάσης-ρεύματος και τάσης-ισχύος με παράμετρο τη φωτεινή ένταση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες ( $T_a$  και  $w_s$ ) για κάθε Φ/Β στοιχείο. Ως παράδειγμα, δίνονται οι σχετικές καμπύλες Φ/Β πλαισίου 215Wp τεχνολογίας πολυκρυσταλλικού πυριτίου στο Σχήμα 3.6.



(α)



(β)

Σχήμα 3.6. Χαρακτηριστικές καμπύλες τάσεως-ρεύματος-ισχύος Φ/Β πλαισίου ονομαστικής ισχύος 215Wp με παραμέτρους (α) τη φωτεινή ακτινοβολία και (β) τη θερμοκρασία.

Όπως φαίνεται, για κάθε φωτεινή ισχύ, υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος  $P_{mpp}$  («γόνατο»), το οποίο επιτυγχάνεται υπό συγκεκριμένη τάση  $V_{mpp}$ . Άρα, οδηγώντας το Φ/Β πλαίσιο στη  $V_{mpp}$ , απορροφάται από αυτό η  $P_{mpp}$ . Τεχνικά, αυτό απαιτεί την εφαρμογή ενός μετατροπέα συνεχούς ρεύματος εξοπλισμένο με κατάλληλης χωρητικότητας πυκνωτή στους ακροδέκτες του εκάστοτε Φ/Β στοιχείου. Στις περισσότερες τοπολογίες Φ/Β Α/Σ ο αναφερόμενος μετατροπέας ενσωματώνεται για τον σκοπό αυτό.

Το γεγονός ότι από τη μια, η μέτρηση της πραγματικής φωτεινής ακτινοβολίας είναι πρακτικά αδύνατη και από την άλλη, οι συνθήκες περιβάλλοντος επηρεάζουν την αποδιδόμενη ισχύ, αναγκάζει την ανάπτυξη αλγόριθμων οι οποίοι μπορούν να αναγνωρίζουν κατά προσέγγιση το

σημείο  $P_{mpp}$  ενός Φ/Β στοιχείου (Maximum Power Point Tracking – MPPT). Το γενικό πλάνο του αλγορίθμου είναι το κάτωθι.

Γενικευμένος αλγόριθμος προσδιορισμού  $P_{mpp}$  Φ/Β στοιχείου

**Βήμα 0:** Θέσε αρχική τάση  $v_{s,0}$ .  $v_{s,t}=v_{s,0}$ .

**Βήμα 1:** Μέτρα ρεύμα φόρτισης πυκνωτή  $i_s$ . Υπολόγισε  $P_0=v_{s,t}i_s$ .

**Βήμα 2:** Άλλαξε την τάση  $v_{s,t}$  με κάποια συνάρτηση  $f(t)=v_{s,t}$ .

**Βήμα 3:** Μέτρα ρεύμα φόρτισης πυκνωτή  $i_s$ . Υπολόγισε  $P=v_{s,t}i_s$ .

**Βήμα 4:** Είναι  $P>P_0$ ;

**Βήμα 4a:** Ναι.  $P_0=P$ . Πήγαινε στο Βήμα 2.

**Βήμα 4b:** Όχι. Πήγαινε στο Βήμα 5.

**Βήμα 5:** Πληρούνται κριτήρια τερματισμού;

**Βήμα 5a:** Ναι. **TEΛΟΣ** αλγόριθμου, η τάση  $v_{s,t}$  αντιστοιχεί στο  $P_{mpp}$ .

**Βήμα 5b:** Όχι. Πήγαινε στο Βήμα 2.

Ως κριτήρια τερματισμού εννοούνται προϋποθέσεις για να έχει φραχθεί το  $P_{mpp}$  μεταξύ δύο σημείων του γονάτου. Η συνάρτηση αλλαγής της τάσης  $v_{s,t}$  (ουσιαστικά της αναφοράς της, αφού πρόκειται για αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή) διαφέρει μεταξύ των ποικίλων αλγορίθμων προσδιορισμού της μέγιστης ισχύος Φ/Β στοιχείου. Οι κυριότεροι εξ αυτών λειτουργούν κατά τις κάτωθι τεχνικές [11] αν και οι λεπτομέρειες υλοποίησης κάθε μίας μπορεί να διαφέρουν:

- Σταθερής τάσης: Όπως φάνηκε και από το Σχήμα 3.6 το εύρος τάσεων υπό το οποίο εντοπίζονται τα σημεία  $P_{mpp}$  είναι περιορισμένο. Άρα, επιλέγεται μία τάση εντός του εύρους και διατηρείται σταθερή.
- Ρεύματος βραχυκύκλωσης: Πάλι ως εκ του Σχήματος 3.6 φαίνεται να υπάρχει μία αναλογική σχέση μεταξύ του εκάστοτε ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc,t}$  και του ρεύματος σημείου βέλτιστης ισχύος  $I_{mpp}$ . Ο μετατροπέας βραχυκυκλώνει περιοδικά και παροδικά το Φ/Β στοιχείο, μετρά το αντίστοιχο ρεύμα και αναπροσαρμόζει σχετικά την τάση  $v_{s,t}$  ως εκ της θεωρούμενης  $I_{mpp}$ .
- Τάσης ανοιχτοκυκλώσεως: Όμοια με την προηγούμενη μέθοδο αξιοποιείται η αναλογική σχέση μεταξύ της τάσης ανοιχτοκυκλώσεως ( $V_{oc}$ ) και της  $V_{mpp}$ .
- Διαταραχής και παρατήρησης: Ο αλγόριθμος αξιοποιεί την αρχή της μεθόδου Newton μεταβάλλοντας την τάση αναφοράς  $v_{s,t}$  σύμφωνα με το πρόσημο της παραγώγου  $dp/dv_{s,t}$ .
- Οριακής αγωγιμότητας: Στο σημείο του  $P_{mpp}$  ισχύει η εξής σχέση:

$$\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} + \frac{I_{PV}}{V_{PV}} = 0$$

Δεξιά του  $P_{mpp}$  είναι  $(dI_{PV}/dV_{PV}) + (I_{PV}/V_{PV}) < 0$ , ενώ αριστερά του  $P_{mpp}$  γίνεται  $(dI_{PV}/dV_{PV}) + (I_{PV}/V_{PV}) > 0$ . Ως εξ αυτού, το  $v_{s,t}$  μεταβάλλεται συγκρίνοντας το  $dI_{PV}/dV_{PV}$  με το  $I_{PV}/V_{PV}$  και κατευθύνοντας το ανάλογα προς το  $V_{mpp}$ .



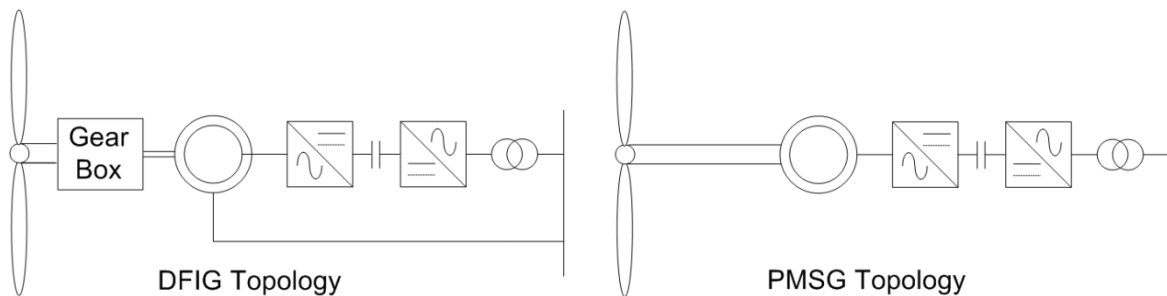
Όλες οι υλοποιήσεις των παραπάνω MPPT αλγορίθμων, εκτός της μεθόδου σταθερής τάσεως, επιτυγχάνουν ενεργειακή απόδοση κατά την εξεύρεση του  $P_{mpp}$  άνω του 90%. Για κάθε αλγόριθμο, εκτός της μεθόδου σταθερής τάσεως, υπάρχει τουλάχιστον μία υλοποίησή της με ενεργειακή απόδοση άνω του 95%, η οποία, επιπλέον, προσδιορίζει το νέο σημείο λειτουργίας σε χρόνο μικρότερο του  $0.1 s$  σε κάθε περίπτωση μεταβολής της εισόδου από το Φ/Β στοιχείο. [11]

### 3.2 Συμμετοχή ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών

#### μεταβλητού βήματος στη ρύθμιση συχνότητας κατόπιν

#### αποφόρτισης

Τα προηγούμενα χρόνια ενισχύθηκαν με ποικίλους τρόπους και για πολλούς λόγους τα κίνητρα για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας [12,13]. Η πλειοψηφία των εφαρμογών αφορούσε Α/Γ οριζόντιου άξονα με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (doubly-fed induction generator – DFIG) ή με σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών (permanent magnet synchronous generator - PMSG) [2].



Σχήμα 3.7. Οι δύο πιο κοινές τοπολογίες Α/Γ οριζόντιου άξονα.

Η τοπολογία με DFIG εμφανίζει ελαφρύ πλεονέκτημα σε σχέση με την PMSG μιας και απαιτεί ηλεκτρονικά ισχύος περί του 30% της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ [6]. Οι τοπολογίες δίνονται στο Σχήμα 3.7. Και στις δύο περιπτώσεις, η σύνδεση της γεννήτριας με τον δρομέα θεωρείται πρακτικά άκαμπτη για να είναι βάσιμη η αναπαράσταση με μοντέλο δύο μαζών [14].

Η υψηλή διείσδυση της αιολικής ενέργειας στα ΣΗΕ δημιούργησε καίρια ζητήματα αξιοπιστίας και ευστάθειας [15]. Κυριότερο εξ αυτών είναι η αυξημένη ευαισθησία και ευπάθεια των ΣΗΕ σε φαινόμενα διαταραχής συχνότητας, αφού η συνολική αδράνεια των ΣΗΕ είναι μειωμένη προς χάριν ένταξης των Α/Γ [16]. Επιπρόσθετα τονίζεται και η ανάγκη διατήρησης αυξημένων ποσών εφεδρείας από τους συμβατικούς σταθμούς για πρόληψη της στοχαστικότητας της αιολικής ισχύος. Το τελευταίο σημαίνει ότι επηρεάζεται ο προγραμματισμός και η οικονομικότητα λειτουργίας των ΣΗΕ [17,18]. Για να μειωθεί ο εκτοπισμός συμβατικής παραγωγής, εφαρμόζεται εναλλακτικά περιορισμός της αιολικής ισχύος [17].

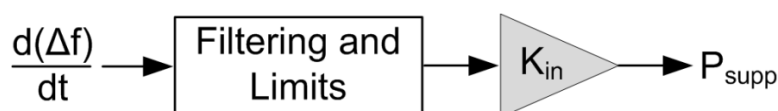
Τα παραπάνω οδήγησαν τις ρυθμιστικές αρχές και τους διαχειριστές των ΣΗΕ να αναβαθμίσουν καταλλήλως τους κώδικες δικτύων. Έτσι, αναπτύχθηκαν απαιτήσεις και προϋποθέσεις για τη σύνδεση των Α/Γ προς τα ΣΗΕ, ενώ στοιχειοθετήθηκε και πλαίσιο συμμετοχής τους στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών – ειδικότερα, μάλιστα, επί της ΡΣ [15,19-21].

### 3.2.1 Ανασκόπηση μεθόδων συμμετοχής ανεμογεννητριών στη ρύθμιση συχνότητας

Οι μελέτες που έχουν προηγηθεί στο αντικείμενο διακρίνουν την απόκριση της Α/Γ στα φαινόμενα συχνότητας σε ψευδοαδρανειακή και σε ακολουθούσα τη συχνότητα. Κατά την ψευδοαδρανειακή απόκριση συχνότητας, η Α/Γ αντιδρά στον ρυθμό μεταβολής της συχνότητας (ΡΜΣ) συμβάλλοντας παροδικά μέρος της ισχύος της – συνήθως από την κινητική του δρομέα της [22-26]. Η ακολουθούσα τη συχνότητα απόκριση της Α/Γ σχετίζεται με τη σταθερή συμβολή ισχύος εκ μέρους της Α/Γ σύμφωνα με κάποιον στατισμό. Για την τελευταία περίπτωση, η Α/Γ πρέπει να διατηρεί διαθέσιμο περιθώριο/εφεδρεία ισχύος την οποία θα αποδίδει κατά την εκδήλωση της αρνητικής απόκλισης συχνότητας. Προαπαιτείται δηλαδή αποφόρτιση της Α/Γ. Η αποφόρτιση αυτή μπορεί να εξασφαλιστεί είτε με απόρριψη αεροδυναμικής ισχύος μέσω χειρισμού της γωνίας έλικας  $\beta$ , είτε με αποθήκευση κινητικής ενέργειας στον δρομέα της μηχανής που θα υπερταχυνθεί (over-speeding κατά τη σχετική ορολογία στη βιβλιογραφία) [27-33].

#### 3.2.1.1 Μέθοδοι ψευδοαδρανειακής απόκρισης ανεμογεννήτριας σε φαινόμενα συχνότητας

Από κατασκευής, αδρανειακή απόκριση στα φαινόμενα συχνότητας των ΣΗΕ εμφανίζουν μόνο οι Α/Γ με DFIG (σε περιορισμένο βαθμό) [34] και με γεννήτρια επαγωγής σταθερών στροφών. Για ενεργότερη απόκριση κατά αδρανειακό τρόπο οι τοπολογίες DFIG και PMSG πρέπει να εγχύσουν μεταβατικά επιπλέον ισχύ πέραν της διαθέσιμης αεροδυναμικής που αποδίδουν κατά τα όσα αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 3.1.2.1. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να συζευχθεί ο ΡΜΣ του ΣΗΕ με το σήμα ελέγχου της ισχύος εξόδου της Α/Γ. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η γενικευμένη τοπολογία της μεθόδου (όπου το  $P_{supp}$  εκ της τοπολογίας ελέγχου του Σχήματος 3.4).



Σχήμα 3.8. Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου ψευδοαδρανειακής απόκρισης από Α/Γ.

Η ψευδοαδρανειακή απόκριση από πλευράς μονάδων που δεν έχουν σύγχρονη σύζευξη των ρευμάτων τους με το ΣΗΕ είναι μία απαίτηση που προστέθηκε και αναπτύχθηκε πρόσφατα σε κώδικες διαχειριστές συστημάτων, όπως του ENTSO-E [54] και του Hydro Quebec [21].

Στην [23] προτείνεται αρχικά ένα επιπρόσθετο σήμα ισχύος οδηγούμενο από τον ΡΜΣ. Ένα φίλτρο πρώτης τάξεως εφαρμόζεται για να περιορίσει τις ταχείες μεταβολές, ενώ με τον μηδενισμό του ΡΜΣ η ισχύς εξόδου της Α/Γ επανέρχεται στην αντίστοιχη αεροδυναμική τιμή της.

Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και η μέθοδος της εργασίας [22]. Διαφορά εδώ υπάρχει στο ότι το σήμα μεταβολής συχνότητας τροφοδοτείται στον έλεγχο της γωνίας  $\beta$ . Δηλαδή, για την περίπτωση μείωσης συχνότητας, η  $\beta$  θα μειωθεί για μικρό χρόνο και το σχετικό πλεόνασμα αεροδυναμικής ισχύος θα αποδοθεί προς το δίκτυο. Η τεχνική είναι συγκριτικά βραδύτερη, αφού εμπλέκει τις χρονικές σταθερές του σερβομηχανισμού της  $\beta$ . Η εφαρμογή της για συμβάντα πτώσης συχνότητας είναι περιορισμένη στην περιοχή ελέγχου των υψηλών ανέμων. Από την άλλη, δεν απορροφά μέρος της κινητικής ενέργειας του δρομέα, άρα δε διαταράζει την ισορροπία του στρεφόμενου μηχανικού συστήματος.

Η στρατηγική επιπρόσθετου σήματος ισχύος προς αυτό της μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής επανέρχεται στην [24]. Το σήμα οδηγείται τόσο από την απόλυτη μεταβολή συχνότητας όσο και από τον ΡΜΣ. Λαμβάνεται πρόνοια να περιορίζεται η διαταραχή του στρεφόμενου μηχανικού μέρους εφαρμόζοντας όρια στην είσοδο των σημάτων. Μολαταύτα, τα όρια μπορεί να ποικίλουν σημαντικά και να πρέπει να καθορίζονται σύμφωνα με τη διαταραχή και τις μονάδες που συμμετέχουν στη ΡΣ.

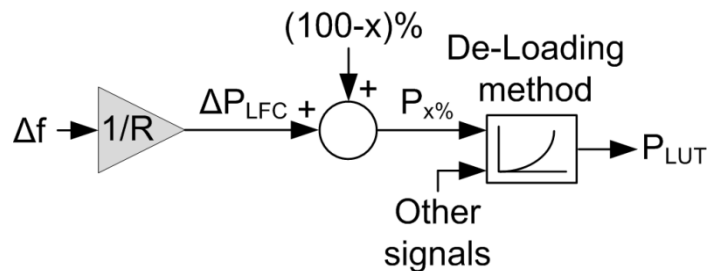
Μία λογική βηματικού επιπρόσθετου σήματος ισχύος προτείνεται στην [25]. Για το παράδειγμα της πτώσης της συχνότητας του ΣΗΕ, χρησιμοποιούνται, αρχικά, ένα θετικού βήματος σήμα ισχύος (για να υλοποιήσει την αδρανειακή απόκριση της Α/Γ), ακολουθούμενο από ένα αρνητικού βήματος (για την αποκατάσταση της κινητικής ενέργειας στον δρομέα). Όπως και ακριβώς προηγουμένως, το πλάτος και η διάρκεια των βηματικών σημάτων ενδέχεται να εξαρτώνται από το φαινόμενο συχνότητας στο οποίο καλούνται να αποκριθούν και από τις συμμετέχουσες στη ΡΣ λοιπές πηγές. Παρόμοιου τύπου εργασίες έχουν αναπτυχθεί επί της φιλοσοφίας αυτής, με στόχο να απαντήσουν ειδικά στην επιβλαβή επίδραση του σήματος αποκατάστασης της ενέργειας του δρομέα στη συχνότητα του ΣΗΕ. Αποδίδοντας όμως αμελητέα βελτίωση στο ζήτημα και στηριζόμενοι στην ίδια λογική, δεν αναφέρονται στην παρούσα εργασία.

Συμπερασματικά, η μέθοδος ως εκ της [23] επιτυγχάνει να αποδώσει ψευδοαδρανειακή απόκριση από Α/Γ με ταχύ και συνεπή τρόπο, υπό την προϋπόθεση ότι η επιρροή του επιπλέον σήματος δεν κυριαρχεί του σήματος μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος. Η αποκατάσταση της ενέργειας και της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα στις τιμές προ σφάλματος και με περιορισμένη ταλάντωση (όπως τονίζεται και στην [26]) δημιουργεί απαιτήσεις καλής επιλογής των συντελεστών/κερδών ελέγχου.

### 3.2.1.2 Μέθοδοι απόκρισης από ανεμογεννήτρια ακολουθούσες τη συχνότητα

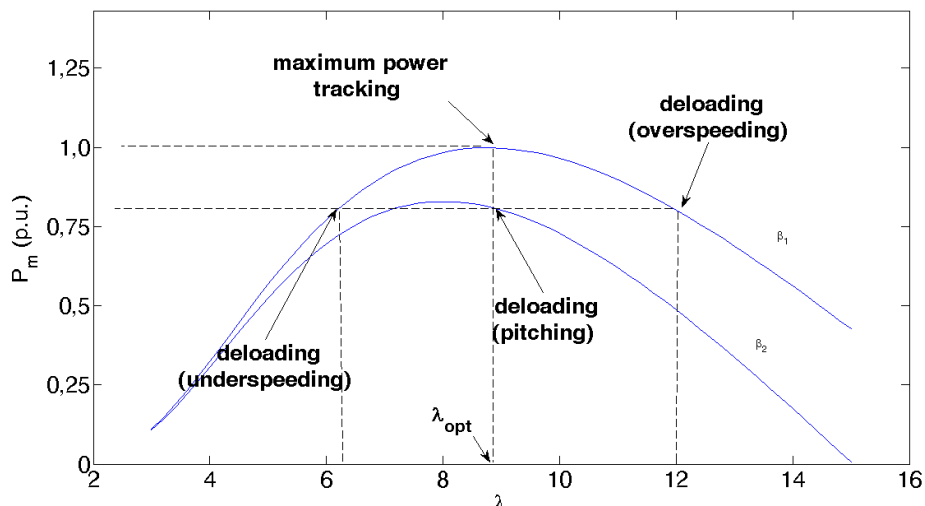
Αν η Α/Γ ζητείται να συμμετάσχει στη ΡΣ με έγχυση ενεργού ισχύος κατά αναλογία προς την απόκριση των συμβατικών πηγών, τότε πρέπει να προνοηθεί διατήρηση περιθωρίου ισχύος εκ μέρους της, δηλαδή να αποφορτιστεί από τη μέγιστη απομάστευση. Έστω ζητούμενη αποφόρτιση κατά  $x\%$  επί της μέγιστης διαθέσιμης. Άρα, ένα σήμα ισχύος  $P_{x\%}$  θα οδηγεί την εκάστοτε μέθοδο αποφόρτισης (περιγράφονται παρακάτω). Συνεπώς, η ΡΣ από Α/Γ μπορεί να πραγματοποιηθεί

μειώνοντας την αποφόρτιση  $x\%$  και επαναφέροντας, έτσι, το σήμα ισχύος σε αυτό της μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος. Η γενικευμένη τοπολογία του ελέγχου συνδυασμένη με τη ΡΣ δίνεται στο Σχήμα 3.9 και ενσωματώνεται εύκολα στο διάγραμμα ελέγχου του Σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.9. Σχηματικό διάγραμμα ελέγχου αποφόρτισης Α/Γ και συμμετοχής της στη ΡΣ.

Όπως δόθηκε και παραπάνω και στη βάση της (3.1), ο  $C_p$  μπορεί να λειτουργήσει ως η σχετική παράμετρος ελέγχου της αποφόρτισης. Παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 3.10 τα σημεία ελέγχου στα οποία μπορεί να οδηγηθεί ο  $C_p$  προς το σκοπό αυτό.



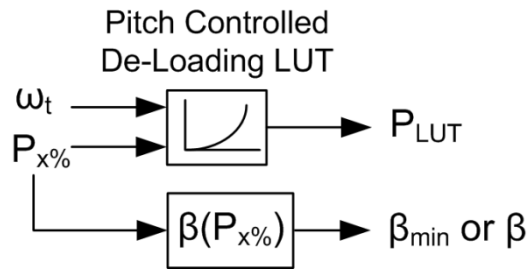
Σχήμα 3.10. Εναλλακτικά σημεία λειτουργίας Α/Γ υπό αποφόρτιση

(over/under-speeding = με υπερ/υπο-τάχυνση δρομέα, pitching = με χρήση γωνίας έλικας  $\beta$ ).

Από το Σχήμα 3.10, με την υπόθεση σταθερής  $U_w$  και χωρίς μεταβολή της γωνίας  $\beta$  (δηλ. επί της καμπύλης  $\beta_1$ ), ένα ζητούμενο ποσό αποφόρτισης μπορεί να επιτευχθεί σε δύο εναλλακτικά σημεία. Ως προς τη μέγιστη απομάστευση αεροδυναμική ισχύος, το αριστερό σημείο αντιστοιχεί σε μειωμένη και το δεξί σε αυξημένη  $\Omega$ . Στην [28] εξηγείται γιατί το αριστερό σημείο λειτουργίας υλοποιεί προβληματική αποφόρτιση, αφού αποφέρει αρνητική επίδοση της ΡΣ από την Α/Γ και επιπλέον απειλεί την ισορροπία του στρεφόμενου μηχανικού συστήματος. Η αποφόρτιση με υπερτάχυνση του δρομέα έχει τοπολογία ελέγχου παρόμοια αυτής του Σχήματος 3.9.

Αναφερόμενοι εκ νέου στο Σχήμα 3.10, για δεδομένη  $U_w$  και υποθέτοντας σταθερή  $\Omega$  (επί της καθέτου από το σημείο μέγιστης απομάστευσης), ένα ζητούμενο ποσό αποφόρτισης μπορεί να επιτευχθεί σε σημείο λειτουργίας αυξημένης γωνίας  $\beta$ . Η αποφόρτιση μέσω γωνίας βήματος έχει

γενικό διάγραμμα ελέγχου αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 3.11, το οποίο μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα στη γενική τοπολογία της Α/Γ του Σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.11. Γενικευμένο σχήμα ελέγχου αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας  $\beta$ .

α. Αποφόρτιση Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα

Στην [27] ένας πίνακας σημείων λειτουργίας υπό αποφόρτιση αντικαθιστά αυτόν της μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος. Τα σημεία λειτουργίας του αποφορτισμένου πίνακα τιμών προσεγγίστηκαν με γραμμική προσέγγιση από τον πίνακα των σημείων μέγιστης απομάστευσης, ενώ για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται ρητά η μέτρηση ανέμου. Επιπλέον, υπονοείται ότι ακόμα και για την περιοχή ελέγχου των χαμηλών ανέμων υπάρχει συμμετοχή στη μέθοδο και από τον ελεγκτή της γωνίας  $\beta$ . Η γραμμική προσέγγιση των σημείων λειτουργίας του πίνακα υπό αποφόρτιση, καθώς και η χρήση της μέτρησης της  $U_w$  σα μεταβλητή εισόδου μπορούν να αποδειχτούν σημεία ανακρίβειας και αστοχίας. Η αυξημένη φθορά του συστήματος της γωνίας  $\beta$  ίσως είναι, επίσης, ένα ζήτημα.

Και στην [28] ο πίνακας τιμών των σημείων λειτουργίας της μέγιστης απομάστευσης αιολικής ισχύος αντικαθίσταται από έναν αντίστοιχο αποφόρτισης της Α/Γ. Στην εργασία αυτή δε χρησιμοποιείται ως μεταβλητή ελέγχου η  $U_w$  και η προσέγγιση των σημείων λειτουργίας του πίνακα τιμών αποφόρτισης γίνεται με ακρίβεια. Όμως για την περιοχή ελέγχου με  $U_w$  άνω της ονομαστικής της, ακόμα και 10% αποφόρτιση μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάχυνση του δρομέα περί του 150% της  $\Omega_{w,n}$ . Εξ αιτίας του ότι η ισχύς της πλευράς δρομέα των Α/Γ με DFIG είναι συνάρτηση της ολίσθησης  $s=(\Omega_e-\Omega_m)/\Omega_e$  (όπου  $\Omega_e$  η γωνιακή ταχύτητα των ρευμάτων του ΣΗΕ και  $\Omega_m$  η εκάστοτε δρομέα), σημαίνει ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος αυτής της τοπολογίας μηχανής ενδέχεται (κατά περίπτωση) να επιβαρύνονται πέραν των προδιαγραφών τους (βλ. εισαγωγή 3.2).

Στην [29] προτείνεται σχεδόν ολοκληρωτική αποφόρτιση της Α/Γ. Τούτο επιτυγχάνεται καθοδηγώντας τον δρομέα στην  $\Omega_n$  και, κατά συνέπεια, εξαναγκάζοντας σε λειτουργία τον ελεγκτή της  $\beta$ . Τη θέση του πίνακα τιμών στο διάγραμμα ελέγχου του Σχήματος 3.9 λαμβάνει μια αναφορά σήματος μηδενικής (ή πολύ μικρής) ισχύος, ενώ η ΡΣ εκτελείται μέσω του βοηθητικού σήματος  $P_{supp}$  (βλ. Σχήμα 3.4). Η τεχνική αυτή έχει περιορισμένη εφαρμογή (αν όχι αδύνατη) στην περιοχή ελέγχου των υψηλών  $U_w$ , δεν μπορεί να αποκριθεί σε περιστατικό αύξησης της συχνότητας και δεν μπορεί να προσφέρει προκαθορισμένη εφεδρεία κατά τις επιταγές του διαχειριστή. Το τελευταίο μπορεί να αγνοηθεί στην ειδική περίπτωση που τα

ζητούμενα ποσά εφεδρείας είναι αντίστοιχα του αθροίσματος της διαθέσιμης ισχύος ακέραιου πλήθους Α/Γ ενός αιολικού πάρκου.

Η τεχνική που αναπτύσσεται στην [30] προτείνει αποφόρτιση με υπερτάχυνση μόνο πάνω από κάποια  $U_w$ . Σε όλο το πεδίο ελέγχου, απαιτείται μέτρηση της  $U_w$  και προσαρμογή της  $\Omega_{ref}$  του ελεγκτή της  $\beta$  (βλ. Σχήμα 3.4).

Αποφόρτιση μέσω υπερτάχυνσης στην περιοχή ελέγχου χαμηλών  $U_w$  και υποστήριξή της από τον ελεγκτή της  $\beta$  στην περιοχή ελέγχου των υψηλών  $U_w$  προτείνεται εναλλακτικά στην [31]. Αντί πίνακα τιμών, το σήμα ισχύος οδηγείται από μία αναφορά μικρότερη της μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος. Κατά τη μέθοδο αυτή, το ακριβές διαθέσιμο ποσό ισχύος δεν είναι γνωστό και η τεχνική προτείνει την εφαρμογή ασαφούς λογικής.

Παρακάτω, στην Υποενότητα 3.2.2.1 προτείνεται βελτιωμένη μεθοδολογία αποφόρτισης με υπερτάχυνση. Η στρατηγική ελέγχου αποφεύγει τα κυριότερα ελαττώματα των προαναφερθέντων τεχνικών, ήτοι χρήση της μέτρησης  $U_w$  ως μεταβλητής ελέγχου, λειτουργία υπό  $\Omega > \Omega_n$ , διαταραχές του μηχανικού μέρους και υπερφόρτιση των ηλεκτρονικών ισχύος της πλευράς δρομέα των Α/Γ με DFIG.

#### *β. Αποφόρτιση Α/Γ με χειρισμό της γωνίας των πτερυγίων έλικας*

Η πρώτη σχετική μέθοδος [32], πρότεινε απ' ευθείας σύνδεση του ελεγκτή της γωνίας  $\beta$  με το σήμα συχνότητας του ΣΗΕ προς αποφόρτιση της Α/Γ. Σύμφωνα με τη λογική αυτή, η ΡΣ θα εκτελούνταν μέσω μια χαρακτηριστικής στατισμού συχνότητας προς γωνίας  $\beta$ . Έτσι, το διάγραμμα ελέγχου του Σχήματος 3.11 απλοποιείται: διατηρείται ο πίνακας τιμών της μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος και ένα σήμα αυξομειώσής της προστίθεται στον ελεγκτή της γωνίας  $\beta$ . Αλλαγή υπάρχει και στον έλεγχο της ΡΣ του Σχήματος 3.9, όπου το σήμα απόκλισης συχνότητας δεν οδηγεί μόνο το σήμα μεταβολής ισχύος  $\Delta P_{LFC}$ , αλλά και τη γωνία  $\beta$ . Από όσα αναφέρθηκαν γίνεται φανερό ότι δεν μπορεί να εξασφαλιστεί οποιαδήποτε ζητούμενη εφεδρεία (ή ποσό κλήσης/δέσμευσής της από τον διαχειριστή) και η ΡΣ δεν εκδηλώνεται ομοιογενώς, αφού ένας γραμμικός στατισμός οδηγεί το μη-γραμμικό ως προς την ισχύ εξόδου της Α/Γ σήμα ελέγχου της γωνίας  $\beta$ .

Χωρίς αποφόρτιση, στην [33] προτείνεται η χρήση του ελεγκτή γωνίας  $\beta$  για απόδοση επιπρόσθετης ισχύος προς ΡΣ για την περιοχή ελέγχου των υψηλών  $U_w$ . Αυτό, προφανώς, σημαίνει απορρόφηση αεροδυναμικής ισχύος πέραν της ονομαστικής της Α/Γ. Η τεχνική υλοποιείται με το σήμα  $P_{supp}$  (βλ. Σχήμα 3.4) να οδηγείται μέσω στατισμού από το μετρούμενο σφάλμα συχνότητας. Εκτός του σαφέστατου περιορισμού εφαρμογής της μεθόδου, η υπερφόρτιση μηχανικού και ηλεκτρικού μερών της μηχανής είναι ένα επιπλέον καίριο ζήτημα.

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι είναι αργές στην εκδήλωση της ΡΣ λόγω του σερβομηχανισμού της γωνίας  $\beta$ . Στην Υποενότητα 3.2.2.2 προτείνεται βελτιωμένη μεθοδολογία αποφόρτισης

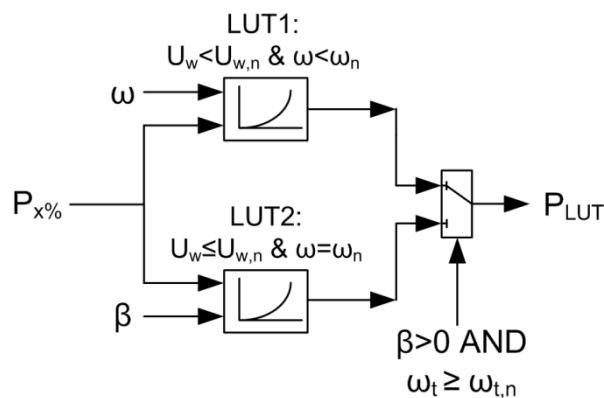
μέσω της γωνίας  $\beta$  η οποία μπορεί να εξασφαλίσει ακριβές ποσό εφεδρείας, ομοιόμορφη συμμετοχή της A/Γ στη ΡΣ για οποιαδήποτε  $U_w$  και η οποία δεν επιβαρύνει μηχανικό και ηλεκτρικό μέρη πέραν των προδιαγραφών τους. Η μεθοδολογία θα συνδυαστεί και με μία τεχνική ψευδοαδρανειακής απόκρισης για αντιμετώπιση των αργών χρόνων του σερβομηχανισμού της  $\beta$ .

### 3.2.2 Βελτιωμένες μέθοδοι αποφόρτισης και συμμετοχής ανεμογεννήτριας στη ρύθμιση συχνότητας

Βάσει της προηγηθείσας ανασκόπησης αναπτύσσονται μία μέθοδος αποφόρτισης A/Γ μέσω υπερτάχυνσης του δρομέα και μία μέθοδος αποφόρτισης A/Γ μέσω γωνίας περυγίων έλικας η οποία συμπληρώνεται από ψευδοαδρανειακή απόκριση για τη συμμετοχή στη ΡΣ.

#### 3.2.2.1 Βελτιωμένη αποφόρτιση ανεμογεννήτριας με υπερτάχυνση του δρομέα

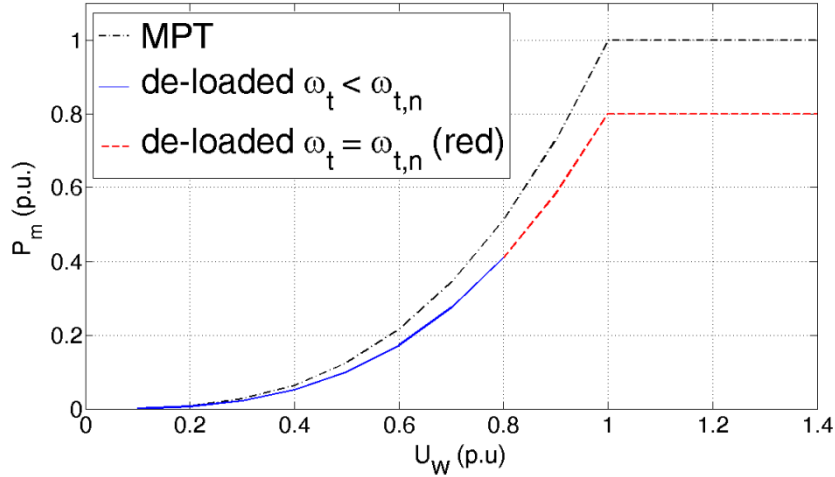
Για  $U_w$  κάτω της ονομαστικής, η αποφόρτιση με υπερτάχυνση μπορεί να γίνει χάρις τον δισδιάστατο πίνακα τιμών, όπως έχει προταθεί και στην [28]. Οι είσοδοί του είναι η γωνιακή ταχύτητα δρομέα και το επιθυμητό επίπεδο αποφόρτισης. Η βελτίωση που εισάγεται παρακάτω αφορά την αποφυγή της λειτουργίας της A/Γ σε  $\Omega > \Omega_n$  η οποία θα εμφανιστεί για ταχύτητες ανέμου πλησίον και άνω της  $U_{w,n}$ .



Σχήμα 3.12. Σχήμα ελέγχου υβριδικής αποφόρτισης A/Γ με υπερτάχυνση δρομέα.

Όποτε η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα φτάνει την τιμή  $\Omega_n$  ένας δεύτερος δισδιάστατος πίνακας τιμών αποφόρτισης ενεργοποιείται αντί αυτού της [28]. Είσοδοί του είναι η γωνία  $\beta$  και το επιθυμητό επίπεδο αποφόρτισης. Η μεταγωγή μεταξύ των πινάκων καθοδηγείται από τις τιμές της γωνίας  $\beta$  και της  $\Omega$  και το σχετικό διάγραμμα ελέγχου δίνεται στο Σχήμα 3.12.

Τα σημεία λειτουργίας του δεύτερου πίνακα τιμών είναι οι τιμές ισχύος, οι οποίες, για συγκεκριμένο επίπεδο αποφόρτισης, αντιστοιχούν στη διάστικτη κόκκινη γραμμή του Σχήματος 3.13. Τα τερματικά σημεία του πίνακα αυτού αντιπροσωπεύουν τα σημεία λειτουργίας για  $U_w > U_{w,n}$ .



Σχήμα 3.13. Χαρακτηριστική  $P-U_w$  A/Γ υπό 10% αποφόρτιση κατά τη μέθοδο υβριδικής με υπερτάχυνση δρομέα.

Ο υπολογισμός του γίνεται ως εξής: ενώ εφαρμόζεται αποφόρτιση  $x\%$  μέσω υπερτάχυνσης του δρομέα (κατά την [28]), όταν για κάποια  $U_w < U_{w,n}$  (αλλά πλησίον της) προσεγγιστεί η  $\Omega_n$ , η τιμή του  $\lambda$  είναι  $\lambda_{x\%}$ . Αφού είναι  $U_w < U_{w,n}$ , προκύπτει  $\lambda_{x\%} > \lambda_{opt}$ . Από το σημείο αυτό και μετά, για αυξανόμενη  $U_w$ , ο ελεγκτής της  $\beta$  θα συγκρατεί τη γωνιακή ταχύτητα δρομέα ίση με  $\Omega_n$  και, άρα, η τιμή του  $\lambda$  θα μειώνεται από  $\lambda_{x\%}$  προς  $\lambda_{opt}$  (αφού  $\lambda = \Omega \cdot R / U_w$ ). Ως εκ τούτου, ξεκινώντας από το  $\lambda_{x\%}$  και μειώνοντάς το έως το  $\lambda_{opt}$ , για κάθε δεδομένο επίπεδο αποφόρτισης  $x\%$ , η λύση της ακόλουθης εξίσωσης θα δώσει τα σημεία λειτουργίας του δεύτερου πίνακα τιμών. Κάθε νέο σημείο λειτουργίας  $P_{LUT2}$  που λαμβάνεται από την (3.1), δεδομένου  $\lambda \in [\lambda_{opt}, \lambda_{x\%}]$  και για γωνιακή ταχύτητα δρομέα  $\Omega_n$ , μπορεί να κανονικοποιηθεί προς τα ονομαστικά της A/Γ:

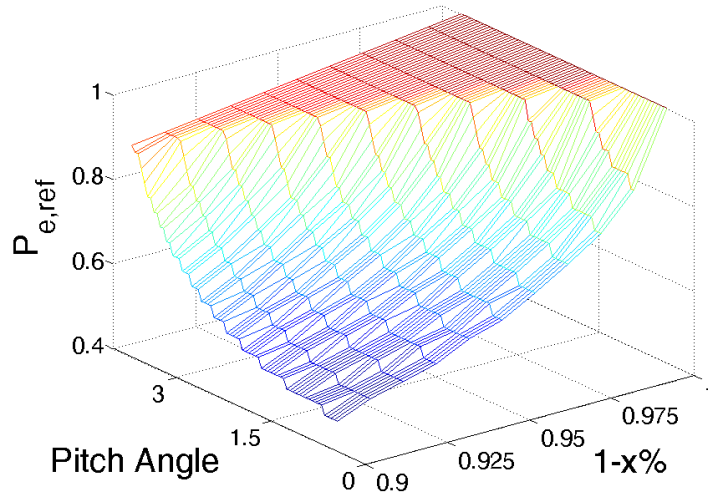
$$\left. \begin{aligned} \frac{P_{LUT2}}{P_n} &= \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_w^3 \cdot C_p(\lambda_{sp}, \beta)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_{w,n}^3 \cdot C_{p,max}} \Rightarrow \\ (1-x) &= \frac{\left(\frac{1}{\lambda_{sp}}\right)^3 \cdot C_p(\lambda_{sp}, \beta)}{\left(\frac{1}{\lambda_{opt}}\right)^3 \cdot C_{p,max}} \Rightarrow \\ (1-x) \cdot \lambda_{sp}^3 \cdot C_{p,max} &= \lambda_{opt}^3 \cdot C_p(\lambda_{sp}, \beta) \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

Από την ανωτέρω, προσεγγίζεται η εκάστοτε  $\beta$  και χάρις αυτή προσδιορίζεται με ακρίβεια η  $P_{LUT2}$ , η οποία εισάγεται στο αντίστοιχο κελί του πίνακα τιμών που ανταποκρίνεται στο ζεύγος εισόδου ( $x\%$ ,  $\beta$ ). Μολαταύτα και όπως φάνηκε και από το Σχήμα 3.10, για κάθε ζεύγος εισόδου ( $x\%$ ,  $\beta$ ) υπάρχουν δύο λύσεις και για το λόγο αυτό τίθενται περιορισμοί αυξανόμενης γωνίας  $\beta$  για μειούμενο  $\lambda_{sp}$  υπό δεδομένη αποφόρτιση  $x\%$ .

Για την αριθμητική προσέγγιση/λύση της (3.4) προτιμήθηκε η cubic spline interpolation του περιβάλλοντος MATLAB®, διότι μικρές αλλαγές της γωνίας  $\beta$  κοντά στην ελάχιστη τιμή της, αποδίδουν σχετικά μεγάλες αλλαγές στην απορροφώμενη αεροδυναμική ισχύ. Μία γραφική



αναπαράσταση του δεύτερου πίνακα τιμών της μεθόδου αποφόρτισης που προτείνεται, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14 για επίπεδο αποφόρτισης από 1% έως 10%.



Σχήμα 3.14. Δεύτερος πίνακας τιμών μεθόδου υβριδικής αποφόρτισης με υπερτάχυνση δρομέα Α/Γ.

Η προτεινόμενη μέθοδος καλείται στο εξής «υβριδική» αποφόρτιση με υπερτάχυνση δρομέα. Παρά το ότι εμπλέκει και δράση εκ μέρους του ελεγκτή της γωνίας  $\beta$  (όταν η γωνιακή ταχύτητα γίνεται  $\Omega_n$ ), συνεχίζει να ενεργεί ως μέθοδος υπερτάχυνσης. Αυτό εξηγείται από το ότι αν η  $U_w$  είναι άνω αλλά πλησίον της  $U_{w,n}$ , τότε μια πτώση της συχνότητας του ΣΗΕ θα προκαλέσει αρχικά μείωση της  $\beta$  στο ελάχιστό της και, ακολούθως, απόδοση κινητικής ενέργειας από το πλεόνασμα στον δρομέα κατά τους δύο πίνακες τιμών.

### 3.2.2.2 Βελτιωμένη αποφόρτιση ανεμογεννήτριας με χειρισμό της γωνίας πτερυγίων έλικας και υποστηριζόμενη από ψευδοαδρανειακή απόκριση συχνότητας

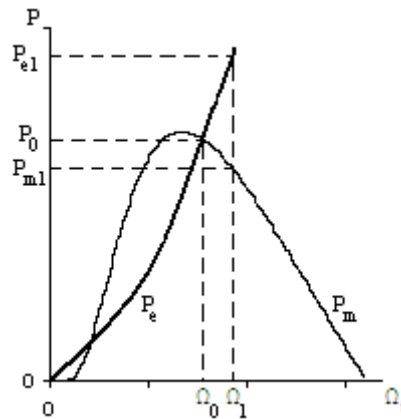
Σε αντίθεση με τις μεθόδους υπερτάχυνσης, το  $\lambda$  διατηρείται στην τιμή  $\lambda_{opt}$ , όπως φάνηκε και στο Σχήμα 3.10. Άρα, με ζητούμενη  $x\%$  αποφόρτιση επί της διαθέσιμης αεροδυναμικής ισχύος, ουσιαστικά πρέπει να επιτευχθεί  $x\%$  μείωση του  $C_{p,opt}$  για το πεδίο ελέγχου ταχυτήτων ανέμου κάτω της  $U_{w,n}$ . Δηλαδή, ζητείται επίλυση της ακόλουθης εξίσωσης ως προς  $\beta_{sp}$  για κάθε επιθυμητό  $x\%$ :

$$C_p(\lambda_{opt}, \beta_{sp}) = (1 - x) \cdot C_{p,opt} \quad (3.5)$$

Για απλούστευση της μεθόδου υλοποίησης, η  $\beta_{sp}$  που προσδιορίστηκε μπορεί να αντικαθιστά το  $\beta_{min}$  του ελεγκτή της γωνίας  $\beta$  (βλ. Σχήμα 3.4). Η επίλυση της (3.5) μπορεί να γίνεται είτε σε πραγματικό χρόνο, είτε να έχει προετοιμαστεί σε πίνακα τιμών. Η δεύτερη επιλογή προκρίνεται και στην παρούσα εργασία. Άρα, ο πίνακας τιμών, για κάθε είσοδο ζητούμενης αποφόρτισης  $P_{x\%}$  θα οδηγήσει το  $\beta_{min}$  όπως εξηγήθηκε παραπάνω.

Προφανώς, πρέπει να τροποποιηθεί ο πίνακας τιμών της απορροφώμενης ισχύος από τη γεννήτρια της μηχανής. Δεδομένου ότι σε όλο το πεδίο ελέγχου των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, ισχύει  $\lambda=\lambda_{opt}$ , για κάθε  $P_x\%$  και  $\Omega$  μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική αεροδυναμική ισχύς ως εκ της (3.1) βάσει της αντίστοιχης γωνίας  $\beta$  που υπολογίστηκε από την (3.5). Επιπλέον, αφού  $\lambda=\lambda_{opt}$ , η A/Γ θα φτάσει στην  $U_{w,n}$  υπό  $\Omega_n$ , άρα και υπό μειωμένη ζήτηση ισχύος από τη γεννήτρια (λόγω αποφόρτισης). Έτσι, ο ελεγκτής της γωνίας  $\beta$  θα ρυθμίσει σωστά τη συγκράτηση του δρομέα υπό  $\Omega_n$  με την επιφύλαξη μικρότερης μέγιστης  $U_{w,cut-out}$  λειτουργίας της A/Γ. Ο νέος πίνακας τιμών ισχύος συμπεριλαμβανομένου αποφόρτισης θα οδηγήει τη γεννήτρια της μηχανής και θα έχει ως εισόδους τα  $P_x\%$  και  $\Omega$ .

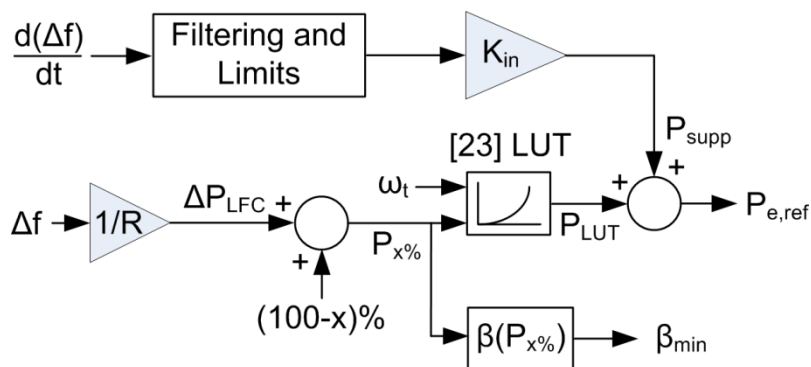
Η ευστάθεια της μεθόδου αποφόρτισης της A/Γ μέσω της γωνίας  $\beta$  δεν έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενες εργασίες. Στο Σχήμα 3.15 δίνεται το κοινό διάγραμμα  $\Omega$ - $P$  της καμπύλης σημείων απορροφώμενης ηλεκτρικής ισχύος από τον σχετικό πίνακα τιμών και μίας εκ των καμπυλών μηχανικής ισχύος της έλικας για δεδομένη γωνία  $\beta$ .



Σχήμα 3.15. Χαρακτηριστική  $P$ - $\Omega$  για εξήγηση της ισορροπίας του μηχανικού μέρους A/Γ υπό συνδυασμένη αποφόρτιση μέσω γωνίας  $\beta$ .

Αρχικά  $P_0=P_{m,0}=P_{e,0}$  υπό  $\Omega_0$ . Έστω διαταραχή επιτάχυνσης του δρομέα. Στο νέο σημείο υπό  $\Omega_1$ , η επιβραδύνουσα ηλεκτρική ροπή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της επιταχύνουσας μηχανικής, ώστε το σύστημα να επιστρέψει στην αρχική κατάσταση λειτουργίας του. Δηλαδή, για  $\Omega_1>\Omega_0$ , πρέπει  $T_{e1}>T_{m1}$ . Είναι  $T_{e1}=P_{e1}/\Omega_1$  και  $T_{m1}=P_{m1}/\Omega_1$ , όμως  $P_{e1}>P_{m1}$ , Ο.Ε.Δ..

Όπως είναι προφανές, η απόδοση ισχύος κατά τη ΡΣ από A/Γ υπό αποφόρτιση μέσω της γωνίας  $\beta$  θα υποστεί την καθυστέρηση των χρόνων του σερβομηχανισμού. Για να διορθωθεί αυτό προτείνεται η πρόσθεση σήματος ψευδοαδρανειακής απόκρισης που θα συμπληρώνει τη δράση της μεθόδου που μόλις περιγράφηκε. Η τελευταία προσθήκη δεν είναι απαραίτητη και προτείνεται στο πνεύμα μια συνολικής απόκρισης της A/Γ σε φαινόμενα συχνότητας, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα και τη μείωση της μέγιστης βύθισης ή υπερακόντισης της συχνότητας και την εκτέλεση πρωτεύουσας ΡΣ. Το συνολικό διάγραμμα ελέγχου της μεθόδου δίνεται στο Σχήμα 3.16.

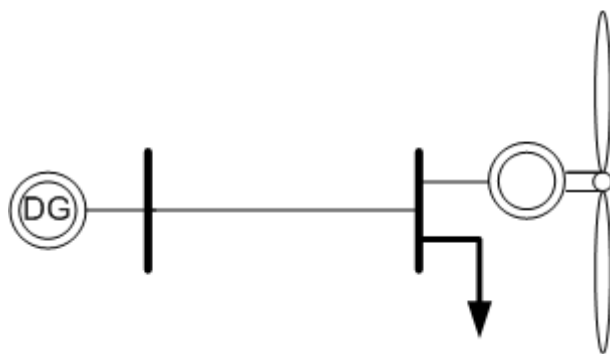


Σχήμα 3.16. Σχήμα ελέγχου συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας  $\beta$  με ψευδοαδρανειακή απόκριση.

Η τεχνική αυτή, θα καλείται ακολούθως ως «συνδυασμένη» αποφόρτιση Α/Γ μέσω γωνίας  $\beta$  με ψευδοαδρανειακή απόκριση.

### 3.2.3 Προσομοιώσεις, αποτελέσματα και σχολιασμός τους

Στην παρούσα υποενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την πραγματοποίηση πολυάριθμων προσομοιώσεων εφαρμογής των ποικίλων μεθόδων αποφόρτισης και απόκρισης συχνότητας από Α/Γ μεταβλητών στροφών μεταβλητού βήματος. Θεωρήθηκε ένα ΣΗΕ δύο ζυγών όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.17 και μοντελοποιείται στο Simulink® του περιβάλλοντος MATLAB®. Αποτελείτο από γεννήτρια diesel 5 MW και Α/Γ 2.4 MW (είτε με DFIG είτε με PMSG). Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά του ΣΗΕ δοκιμής παρατίθενται στο Παράρτημα Δ'.



Σχήμα 3.17. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ.

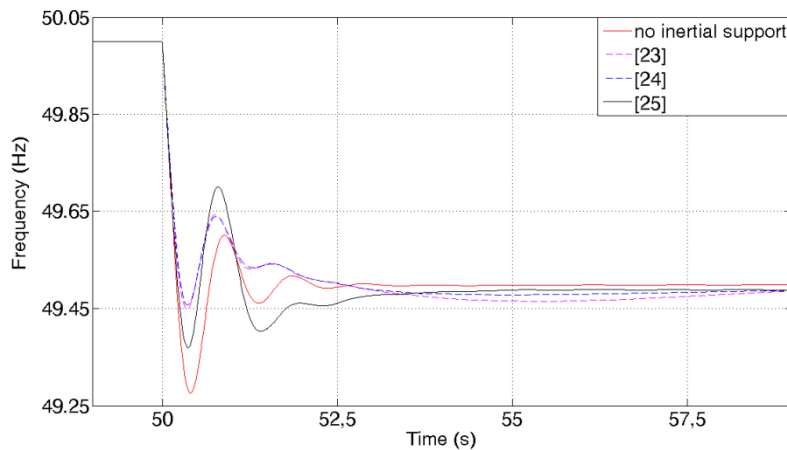
Αρχικά συνοψίζονται οι αποκρίσεις του ΣΗΕ για βηματική αύξηση της ενεργού ισχύος του φορτίου κατά 500kW (20% στη βάση ισχύος της Α/Γ) στη χρονική στιγμή  $t=50s$ . Η Α/Γ υποτίθεται πως εργάζεται υπό 10% αποφόρτιση, ήτοι στο 90% της διαθέσιμης ισχύος της (αναλόγως της  $U_w$ ). Όπου LFC εννοείται ΡΣ και όπου inertial support είναι ψευδοαδρανειακή απόκριση.

Ακολουθούν ύστερα τα διαγράμματα απόκρισης των ενεργού ισχύος, γωνιακής ταχύτητας και ενεργού ισχύος δρομέα Α/Γ για μεταβολές ανέμου υπό εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων αποφόρτισης.

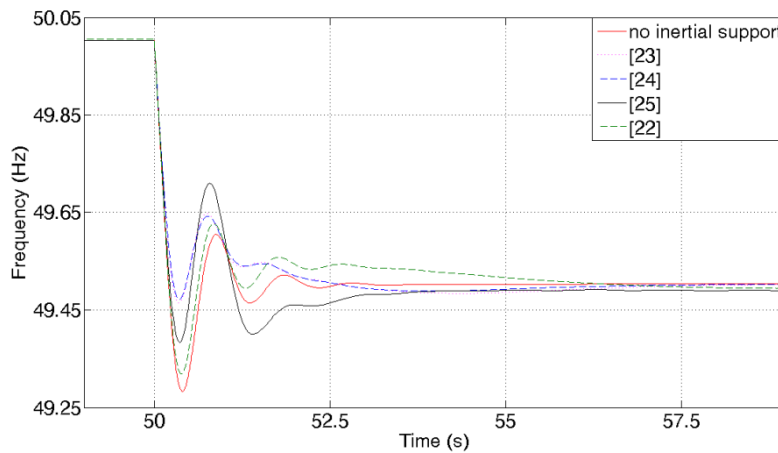
Παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα για Α/Γ με DFIG λόγω του ότι η απόκριση της PMSG σε κάθε περίπτωση προσομοίωσης ήταν ταυτόσημη παρά μια ελάχιστα εντονότερη ταλαντωτική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται από το ότι η PMSG έχει καθολική απόζευξη από το ΣΗΕ λόγω της πλήρους γέφυρας ηλεκτρονικών ισχύος που παρεμβάλλεται και, άρα, η αδράνειά της δε συνδέεται με αυτή του δικτύου.

### 3.2.3.1 Ρύθμιση συχνότητας από ανεμογεννήτρια με ψευδοαδρανειακή απόκριση

Στα Σχήματα 3.18 και 3.19 για ταχύτητα ανέμου κάτω και άνω της  $U_{w,n}$  αντίστοιχα, δίνονται οι αποκρίσεις για τις εφαρμογές των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην ανασκόπηση της Υποενότητας 3.2.1.1.



Σχήμα 3.18. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους ψευδοαδρανειακής απόκρισης Α/Γ υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

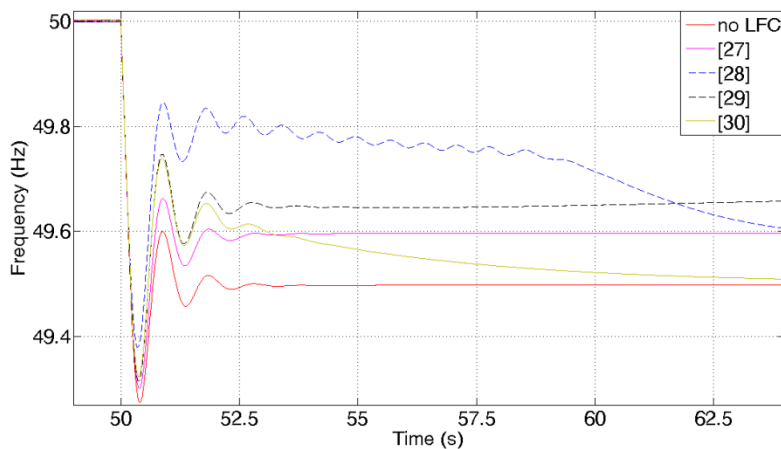


Σχήμα 3.19. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους ψευδοαδρανειακής απόκρισης Α/Γ υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

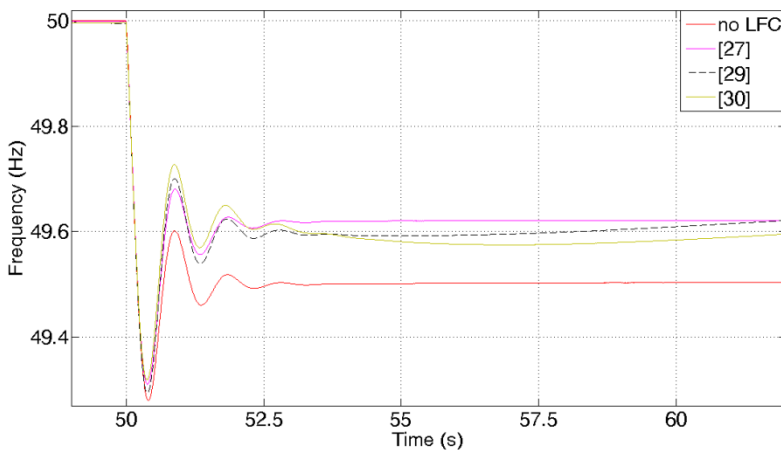
Όπως φαίνεται οι μέθοδοι των [23] και [24] αποδίδουν όμοια την ελάχιστη απόκλιση συχνότητας. Να σημειωθεί ότι η ρύθμιση των παραμέτρων της τεχνική εκ της [24], για την ικανοποιητική αποκατάσταση της κινητικής κατάστασης του δρομέα της Α/Γ, ήταν ιδιαίτερα απαιτητική. Η στρατηγική σύμφωνα με τη [25], αν και είναι ιδιαίτερα θετική προκαλεί δεύτερη βύθιση κατά την αποκατάσταση της κινητικής ενέργειας του δρομέα της Α/Γ σύμφωνα με τη βηματική λογική υλοποίησής της. Όσο αφορά τη μέθοδο εκ της [22], αποτυγχάνει συγκριτικά με τις υπόλοιπες αφού εξαρτάται από τις αργές μεταβολές του σερβοκινητήρα της γωνίας  $\beta$ .

### 3.2.3.2 Ρύθμιση συχνότητας από ανεμογεννήτρια αποφορτισμένη με υπερτάχυνση δρομέα

Οι μέθοδοι που παρουσιάστηκαν στην ανασκόπηση της Υποενότητας 3.2.1.2.a συγκρίνονται στα Σχήματα 3.20 και 3.21 για ταχύτητα ανέμου κάτω και άνω της  $U_{w,n}$  αντίστοιχα.



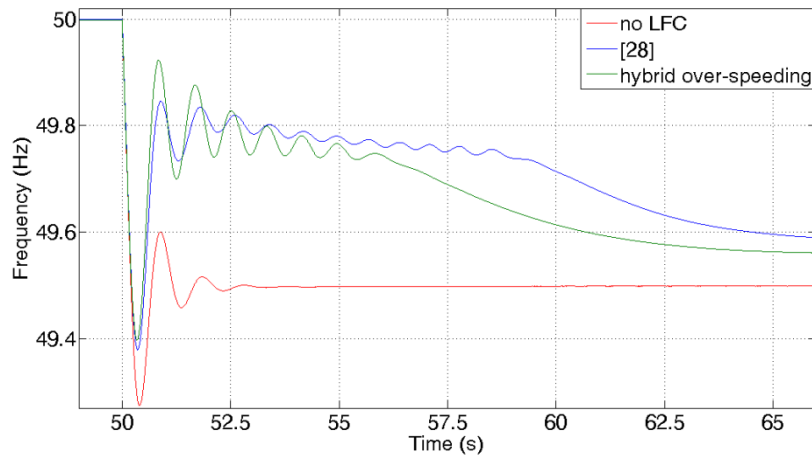
Σχήμα 3.20. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα υπό  $U_w < U_{w,n}$ .



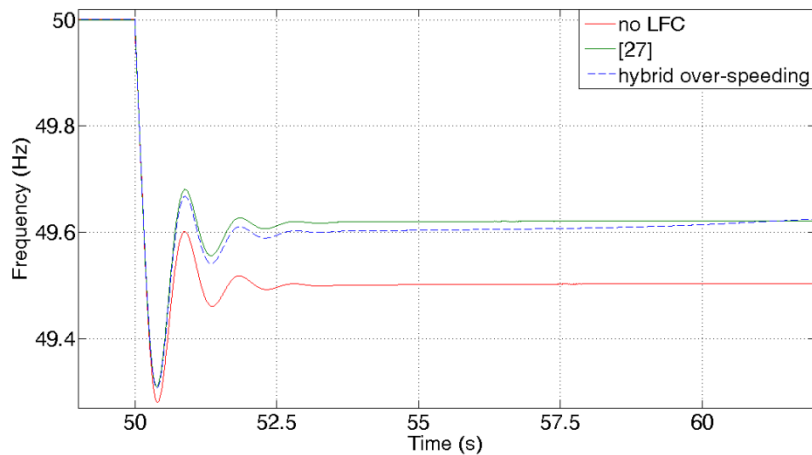
Σχήμα 3.21. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Όπως φαίνεται, η τεχνική εκ της [28] για το πεδίο ελέγχου των χαμηλών  $U_w$  και η τεχνική εκ της [27] για το πεδίο υψηλών  $U_w$  αποφέρουν την καλύτερη απόκριση συχνότητας από την Α/Γ. Όσες

στρατηγικές ελέγχου εμπλέκουν χρήση του ελεγκτή της γωνίας  $\beta$ , αποτυγχάνουν να αξιοποιήσουν την κινητική ενέργεια του δρομέα ειδικά για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της  $U_{w,n}$ . Παρά ταύτα, η συμβολή στη ΡΣ από την Α/Γ κατά τη μέθοδο της [29] κρίνεται αξιόλογη, αν και πρέπει να θεωρείται αναμενόμενη και ιδιαίτερη στη βάση της αρχικά πλήρους αποφόρτισης της μηχανής. Οι τεχνικές με τις θετικότερες αποκρίσεις συγκρίνονται προς την προτεινόμενη βελτιωμένη μέθοδο υβριδικής αποφόρτισης με υπερτάχυνση δρομέα στα Σχήματα 3.22 και 3.23 για τις δύο αντίστοιχες περιοχές ελέγχου σύμφωνα με την  $U_w$ .



Σχήμα 3.22. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης υβριδικής αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα και [28] υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

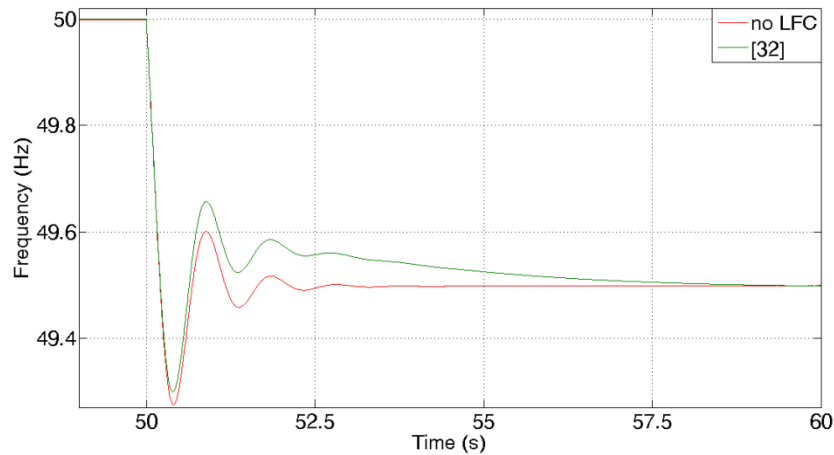


Σχήμα 3.23. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης υβριδικής αποφόρτισης Α/Γ με υπερτάχυνση δρομέα και [27] υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

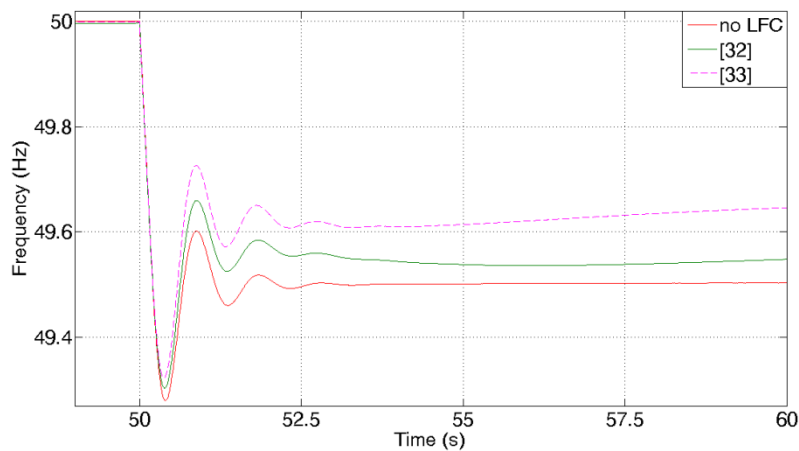
Η υβριδική μέθοδος παρουσιάζει σχεδόν όμοια συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις. Άρα, αποδίδει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο σε σχέση με τις προϋπάρχουσες, αποφεύγοντας όμως τα μειονεκτήματά τους.

### 3.2.3.3 Ρύθμιση συχνότητας από ανεμογεννήτρια αποφορτισμένη μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας

Η απόδοση της ρύθμισης συχνότητας κατά τις μεθόδους αποφόρτισης που παρουσιάστηκαν στην Υποενότητα 3.2.1.2.β δίνονται για τις δύο περιοχές ελέγχου κατά τη  $U_w$  στα Σχήματα 3.24 και 3.25 αντίστοιχα.

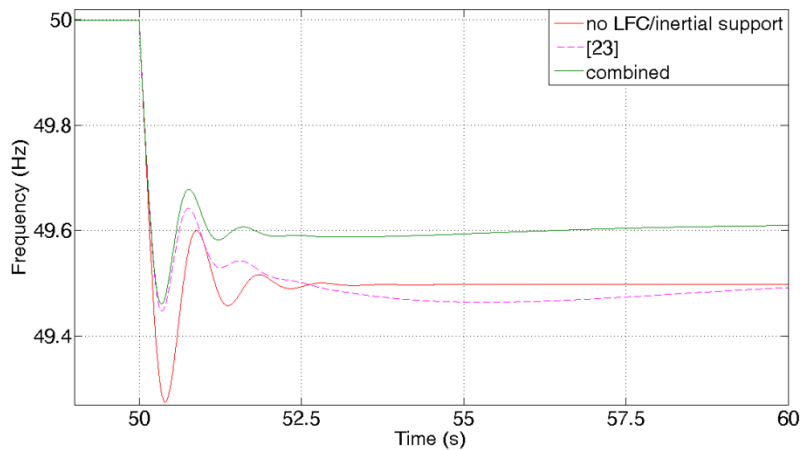


Σχήμα 3.24. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό  $U_w < U_{w,n}$ .

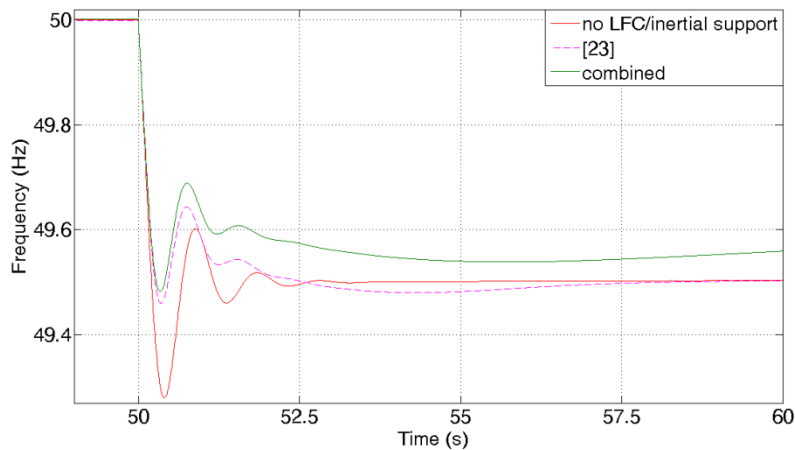


Σχήμα 3.25. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου για διαφορετικές μεθόδους αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

Όλες οι υλοποιήσεις της μεθόδου αυτής αποτυγχάνουν να περιορίσουν ικανοποιητικά τη μέγιστη βύθιση συχνότητας λόγω των αργών χρόνων του σερβομηχανισμού της γωνίας  $\beta$ . Ειδικά η τεχνική εκ της [32] εμφανίζει μέτρια απόδοση προς τη μόνιμη κατάσταση λόγω του ότι συσχετίζει γραμμικά την ισχύ εξόδου και τη γωνία  $\beta$  της Α/Γ. Στα Σχήματα 3.26 και 3.27 συγκρίνεται η επίδοση των προηγούμενων μεθόδων με τη βελτιωμένη μέθοδο συνδυασμού αποφόρτισης μέσω γωνίας  $\beta$  και ψευδοαδρανειακής απόκρισης. Συμπεριλαμβάνεται και η επίδοση της ψευδοαδρανειακής απόκρισης η οποία προστέθηκε στη συνδυασμένη.



Σχήμα 3.26. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης και της [23] υπό  $U_w < U_{w,n}$ .



Σχήμα 3.27. Σύγκριση επί της απόκρισης συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου μεταξύ της προτεινόμενης συνδυασμένης αποφόρτισης Α/Γ μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης και της [23] υπό  $U_w > U_{w,n}$ .

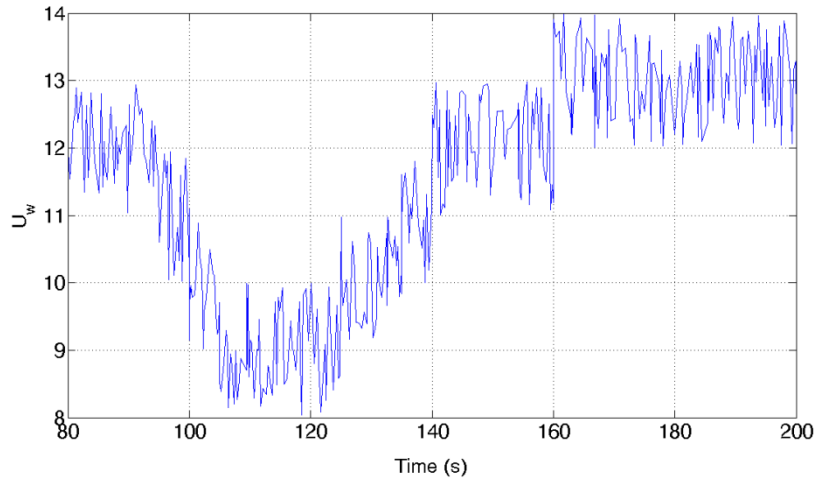
Και για τις δύο περιοχές ελέγχου, φαίνεται η θετικότερη απόδοση της προταθείσας μεθόδου η οποία επιπλέον αποφεύγει την υπερφόρτιση της Α/Γ που προκαλεί η στρατηγική εκ της [33].

#### 3.2.3.4 Απόκριση μεθόδων αποφόρτισης ανεμογεννήτριας σε μεταβολές ανέμου

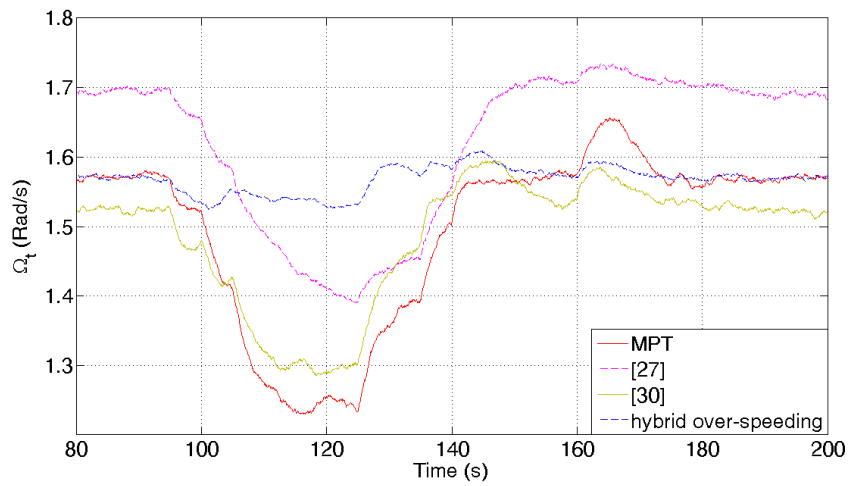
Για τις συγκεκριμένες δοκιμές, μία Α/Γ με DFIG θεωρήθηκε συνδεδεμένη προς άπειρο ζυγό και υπό 10% σταθερή αποφόρτιση. Η χρονοσειρά μεταβολής της ταχύτητας  $U_w$  επί της έλικας της Α/Γ δίνεται στο Σχήμα 3.28. Ας σημειωθεί ότι η  $U_{w,n}=11.4\text{m/s}$ .

Στα Σχήματα 3.29-31 δίνονται η συμπεριφορά της γωνιακής ταχύτητας δρομέα, της ενεργού ισχύος εξόδου και της ανταλασσόμενης από τον δρομέα ενεργού ισχύος της Α/Γ για τις μεθόδους αποφόρτισής της υπό υπερτάχυνση δρομέα.

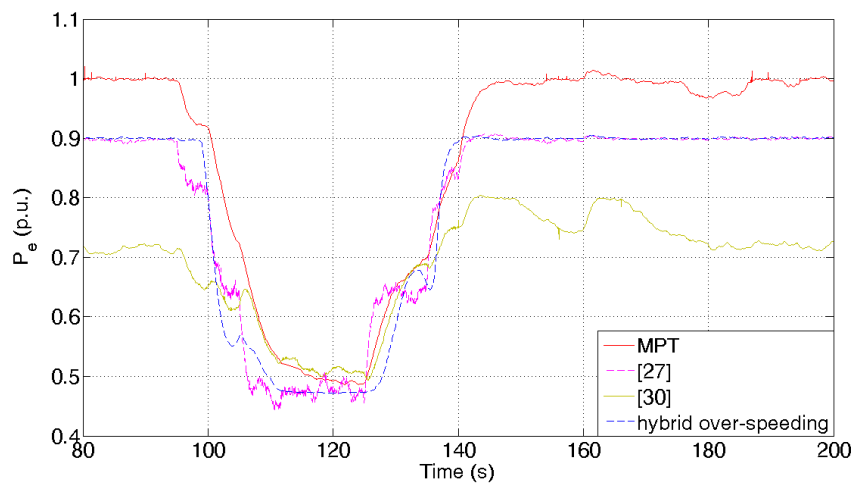




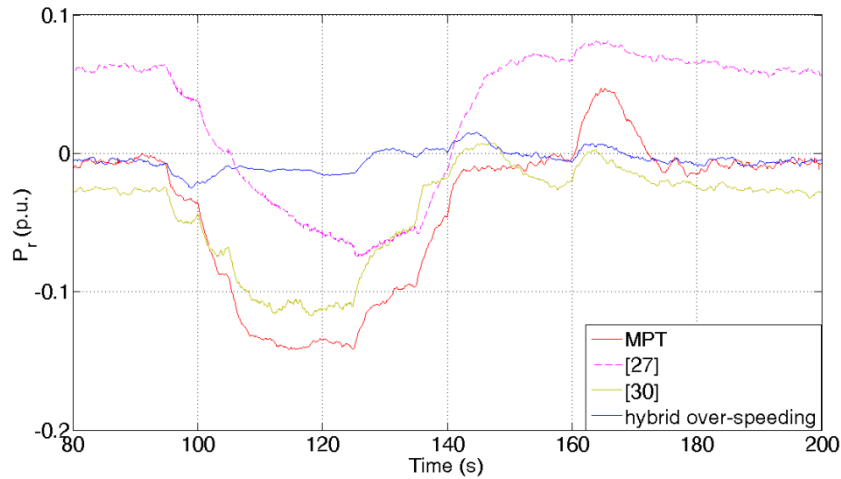
Σχήμα 3.28. Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου για την περίπτωση μελέτης της συμπεριφοράς της Α/Γ υπό μεταβολές ανέμου.



Σχήμα 3.29. Απόκριση γωνιακής ταχύτητας Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.



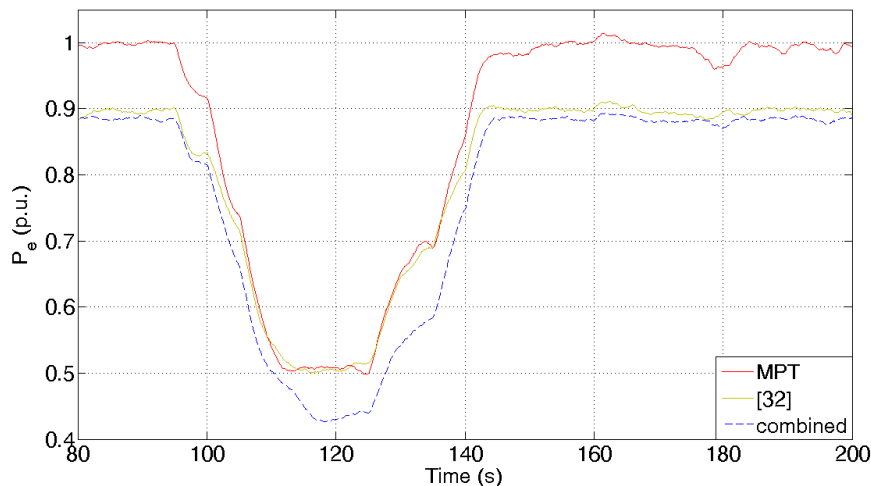
Σχήμα 3.30. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.



Σχήμα 3.31. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος ανταλλασσόμενης εκ του δρομέα της Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω υπερτάχυνσης δρομέα υπό μεταβολές ανέμου.

Αρχικά, να παρατηρηθεί ότι τόσο η τεχνική εκ της [27] όσο και η βελτιωμένη υβριδική εξασφαλίζουν το ζητούμενο περιθώριο για οποιαδήποτε  $U_w$  αν και με περιορισμένη επιτυχία για τα μεταβατικά στάδια έως αποκατάστασής της. Όπως αναμενόταν και από την ανάλυση στην Υποενότητα 3.2.1.2.α για την περιοχή των χαμηλών  $U_w$ , η μέθοδος της [30] δεν αποδίδει περιθώριο ισχύος. Επίσης, η υβριδική μέθοδος αποφόρτισης με υπερτάχυνση δρομέα επιτυγχάνει να περιορίσει τόσο τις μεταβολές της  $\Omega$  όσο και την ανταλλαγή ισχύος από μεριάς του δρομέα, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Στο Σχήμα 3.32 δίνεται η απόκριση της ισχύος εξόδου της Α/Γ στις μεταβολές ανέμου για Α/Γ αποφορτισμένη μέσω της γωνίας  $\beta$ .



Σχήμα 3.32. Απόκριση ηλεκτρικής ισχύος εξόδου Α/Γ για τις διάφορες μεθόδους αποφόρτισης μέσω γωνίας πτερυγίων έλικας υπό μεταβολές ανέμου.

Όπως φαίνεται και οι δύο μέθοδοι αποδίδουν το ίδιο ζητούμενο περιθώριο ισχύος. Όπως εξηγήθηκε όμως, η τεχνική εκ της [32] μπορεί να λειτουργεί για ένα επίπεδο αποφόρτισης κάθε

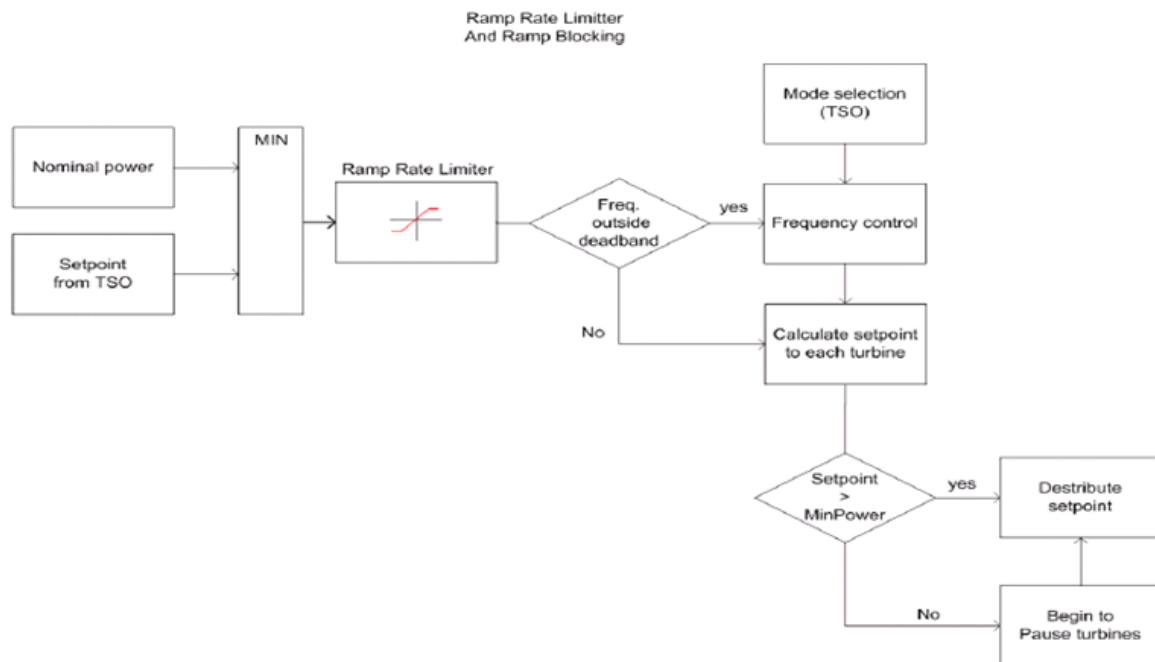
φορά, βάσει του οποίου μάλιστα αναπτύχθηκαν και οι σχετικοί στατισμοί των σημάτων ισχύος  $\Delta P_{LFC}$  και γωνίας  $\beta$ .

### **3.2.4 Σύνοψη και εφαρμογές των μεθόδων σε πραγματικές εγκαταστάσεις**

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών μεταβλητού βήματος αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των εφαρμογών και έργων αιολικής ισχύος. Λόγω της αυξημένης διείσδυσής τους στα ενεργειακά ισοζύγια και του στοχαστικού χαρακτήρα τους καλούνται να συνδράμουν στις επικουρικές υπηρεσίες και, ειδικότερα, στη ρύθμιση συχνότητας μέσω ενεργού ισχύος. Για να το πραγματοποιήσουν αυτό με τρόπο παρόμοιο κατά τη συμβατική παραγωγή, πρέπει να διαθέτουν περιθώριο (εφεδρεία), πρακτική η οποία έως πρότινος ήταν αντίθετη με τη στρατηγική μέγιστης απομάστευσης αεροδυναμικής ισχύος. Στην τρέχουσα υποενοότητα αναπτύχθηκε εκτενής ανασκόπηση των τεχνικών αποφόρτισης που είχαν προηγηθεί της μελέτης, συνοψίζονται τα μειονεκτήματά τους και προτείνονται δύο βελτιωμένες μέθοδοι που εν πολλοίς αντιμετωπίζουν τα προβλήματα, ενώ προσφέρουν και επιπλέον θετικά χαρακτηριστικά για τη συμμετοχή των Α/Γ στη ΡΣ των ΣΗΕ. Συνολικά, οι βελτιωμένες τεχνικές αποφεύγουν τη χρήση της αμφιβόλου ακρίβειας μέτρησης ταχύτητας ανέμου, μπορούν να εξασφαλίσουν οποιοδήποτε διαθέσιμο ποσό εφεδρείας κατά τις επιταγές του διαχειριστή, προσφέρουν ομοιόμορφη ΡΣ για οποιοδήποτε επίπεδο ισχύος τους και περιορίζουν τις διαταραχές που προκαλούν στην Α/Γ άλλες σχετικές στρατηγικές.

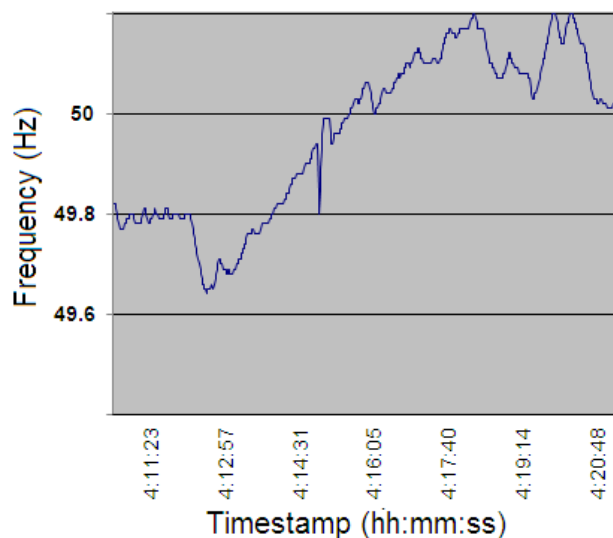
Σε πρακτικό επίπεδο, έχει ήδη ξεκινήσει η δοκιμαστική εφαρμογή μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ. Συγκεκριμένα στο αιολικό πάρκο «Πλαστικά Κρήτης ΑΕ» στην περιοχή του οικισμού Βρουχά, στο νομό Λασιθίου, στο νησί της Κρήτης, είναι εγκατεστημένη συνολική ισχύς 11.9 MW από Α/Γ της εταιρείας Vestas. Στη βάση πρωτοβουλίας της κατασκευάστριας εταιρείας, του επενδυτή και της Δ/σης Περιφέρειας Νήσων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού ΑΕ, εγκαταστάθηκε σύστημα παροχής ΡΣ [35]. Το σύστημα παρακολουθεί τη συχνότητα στο σημείο κοινής σύνδεσης και διαμοιράζει σήμα ελέγχου στις Α/Γ του αιολικού πάρκου. Στο Σχήμα 3.33 δίνεται ο σχετικός αλγόριθμος όπως έχει αναπτυχθεί από την Vestas.

Κατά την εκδήλωση διαταραχής συχνότητας, το σύστημα SCADA της εγκατάστασης μοιράζει τα κατάλληλα μηνύματα μεταβολής ισχύος στις Α/Γ. Πιο συγκεκριμένα, η εκδήλωση της ΡΣ ξεκινάει για συχνότητας ΣΗΕ άνω των 50.2Hz (με μείωση παραγόμενης ενεργού ισχύος) και κάτω των 49.8Hz (με αύξηση της ενεργού ισχύος εξόδου του πάρκου). Η μέθοδος που υλοποιεί τα ανωτέρω σε κάθε Α/Γ ομοιάζει της συνδυασμένης μεθόδου αποφόρτισης μέσω γωνία βήματος πτερυγίων έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης.

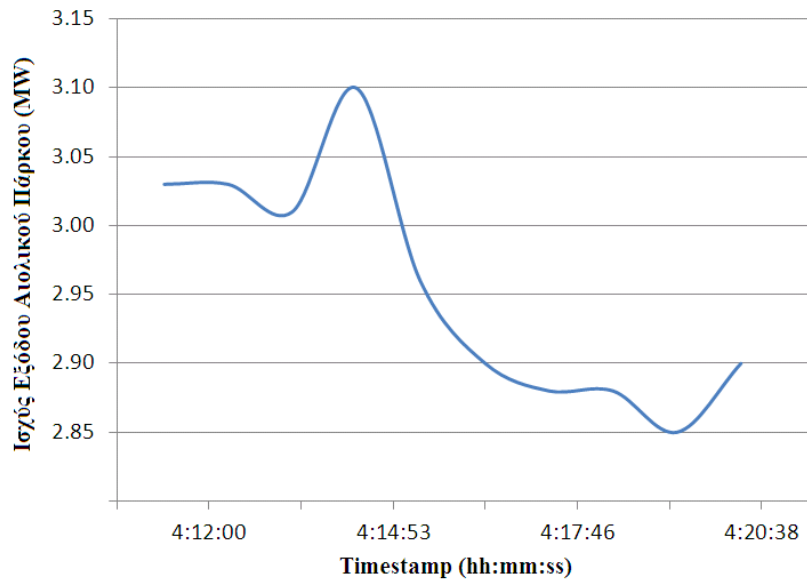


Σχήμα 3.33. Αλγόριθμος διανομής σήματος συμμετοχής στη ΡΣ για τις Α/Γ αιολικού πάρκου σύμφωνα με το σύστημα ελέγχου της Vestas κατά τη δοκιμή στο ΣΗΕ της Κρήτης.

Το σύστημα που περιγράφηκε δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες. Την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2012, στις 4:12 μμ μία σημαντική διαταραχή της συχνότητας του ΣΗΕ τη μείωσε στα 49.64Hz. Το σύστημα ΡΣ του προαναφερθέντος πάρκου έλαβε εντολή συμμετοχής του και καθοδήγησε επιτυχώς την αύξηση της ισχύος του από τα 3 MW στα 3.1 MW. Στο Σχήμα 3.34 δίνεται η διαταραχή συχνότητας όπως μετρήθηκε από το SCADA του ΣΗΕ της Κρήτης. Στο Σχήμα 3.35 καταγράφεται η μεταβολή ισχύος του αιολικού πάρκου όπως μετρήθηκε από το SCADA της εγκατάστασης.



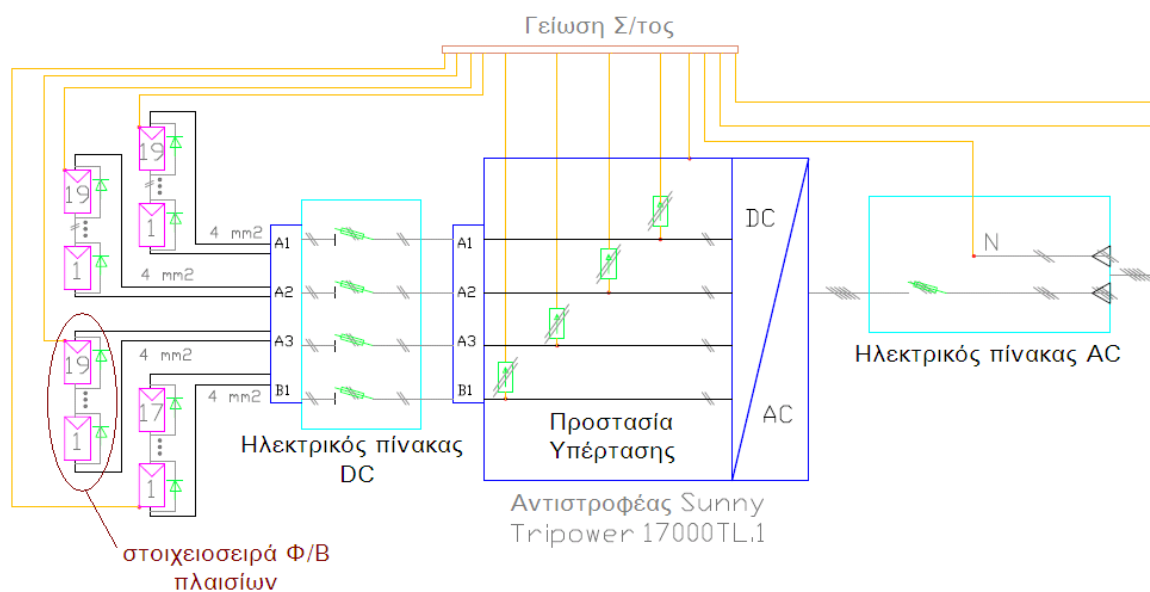
Σχήμα 3.34. Χρονοσειρά συχνότητας ΣΗΕ Κρήτης (εκ του σχετικού SCADA) κατά τη διαταραχή της 01/01/2012.



Σχήμα 3.35. Απόκριση ισχύος εξόδου αιολικού πάρκου Βρούχα στο ΣΗΕ Κρήτης (εκ του SCADA του πάρκου) κατά τη διαταραχή της 01/01/2012.

### 3.3 Συμμετοχή φωτοβολταϊκού συστήματος στη ρύθμιση συχνότητας κατόπιν αποφόρτισης

Η Φ/Β ενέργεια ενισχύθηκε από διεθνείς [12,13] και εθνικές [36,37] πολιτικές πρωτοβουλίες με απώτερο στόχο την ευρεία διείσδυσή της στα ενεργειακά ισοζύγια. Η αύξησή της υπήρξε ραγδαία και ξεπέρασε κατά πολύ τους προδιαγεγραμμένους στόχους. Ας σημειωθεί ότι μόνο στη Γερμανία, από το 2010 η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς ξεπερνά τα 15GW [38].



Σχήμα 3.36. Τυπική ηλεκτρική συνδεσμολογία Φ/Β πλαισίων προς Α/Σ σε στοιχειοσειρές.

Η τοπολογία των διασυνδεδεμένων προς τα ΣΗΕ Φ/Β συστημάτων είναι η ηλεκτρική οργάνωση των Φ/Β πλαισίων σε παράλληλες στοιχειοσειρές συνδεδεμένες προς αντιστροφέα συνεχούς-εναλλασσομένου ρεύματος. Το πλήθος των εν σειρά πλαισίων κάθε στοιχειοσειράς εξαρτάται από τις τάσεις λειτουργίας και ανοιχτοκυκλώσεώς τους σε σχέση με την ικανότητα αντιστροφής των ηλεκτρονικών ισχύος [39,40]. Τα περιγραφόμενα δίνονται στο Σχήμα 3.36.

Από τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν, γίνεται αντιληπτό ότι ο εκτοπισμός συμβατικής παραγωγής και, ως εκ τούτου, αδράνειας από το ΣΗΕ είναι αξιοσημείωτος. Επιπλέον, βάσει των κωδίκων σύνδεσης Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο, απόκλιση συχνότητας  $\pm 0.5\text{Hz}$  ή λιγότερο [41] προδιαγράφει αποσύνδεση των Φ/Β Α/Σ [42]. Το τελευταίο σημαίνει ότι φαινόμενο διαταραχής συχνότητας του αναφερόμενου εύρους, θα προκαλέσει σημαντική απώλεια ισχύος, αρκετά μεγαλύτερη του συμβάντος αναφοράς που έχει τεθεί από το συντονιστικό όργανο των Ευρωπαϊών διαχειριστών ΣΗΕ (3000MW) [43].

Στην παρούσα φάση, υπάρχουν κάποιες πρώτες ρυθμίσεις σχετικά με την αναγκαστική αποφόρτιση Φ/Β συστημάτων υπό αυξημένη συχνότητα κατόπιν εντολής του τοπικού διαχειριστή [20,42,44]. Από την άλλη, την ένταξη των Φ/Β συστημάτων στην παροχή ΡΣ θα ενισχύσει και η ενσωμάτωση στους ΕιΣΠ.

### **3.3.1 Ανασκόπηση μεθόδων συμμετοχής φωτοβολταϊκών συστημάτων στη ρύθμιση συχνότητας**

Η έρευνα επί του συγκεκριμένου ζητήματος έχει εντοπιστεί σε δύο στρατηγικές. Η μία αφορά τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης για την εκπλήρωση του ελέγχου [45-48] και η δεύτερη την απόρριψη ισχύος μέσω χειρισμού των παραμέτρων ελέγχου του Φ/Β αντιστροφέα [49-51].

Ως μέσα αποθήκευσης εννοούνται οι συστοιχίες συσσωρευτών [45,47] και οι κυψέλες υδρογόνου [46]. Τα μέσα αυτά φορτίζονται αναλόγως από περίσσεια Φ/Β ισχύος ή από το ίδιο το ΣΗΕ και αναλαμβάνουν πλήρως την εκπλήρωση των επικουρικών υπηρεσιών. Οι προτάσεις αυτές εμπλέκουν, εκτός του κεφαλαιακού κόστους εφαρμογής τους, την ανάγκη ανάπτυξης επιπλέον τηλεπικοινωνιακής υποδομής για το συντονισμό μεταξύ των Φ/Β συστημάτων και των μέσων αποθήκευσης. Κατά περιπτώσεις, μπορεί να ζητείται επίσης, η αλλαγή των αλγόριθμων λειτουργίας των Φ/Β Α/Σ και συγκεκριμένα του MPPT, ώστε η φόρτιση των συσσωρευτών να πραγματοποιείται από την πλευρά συνεχούς ρεύματος. Στη [48] τη θέση του εξωτερικού μέσου αναλαμβάνει ένας πυκνωτής ενδιάμεσης αποθήκευσης που υποκαθιστά τον τυπικό εσωτερικό πυκνωτή του Φ/Β Α/Σ. Η μικρή του ικανότητα αποθήκευσης επιτρέπει μόνο μεταβολές ράμπας της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Άρα, η μέθοδος αυτή υλοποιεί περιορισμένη συμβολή του Φ/Β συστήματος στη ΡΣ.

Η απόρριψη Φ/Β ισχύος έχει έως τώρα συζητηθεί κατά δύο εναλλακτικές μεθόδους. Η πρώτη μεταφέρει την παρακολούθηση του φορτίου στον Φ/Β Α/Σ. Αυτή υλοποιείται με έναν διπλό

ελεγκτή ασαφούς λογικής με εισόδους τη φωτεινή ένταση και τη συχνότητα του ΣΗΕ και ως έξοδο έναν πολλαπλασιαστή επί του σήματος ισχύος του MPPT [49]. Η τεχνική αυτή δεν οδηγεί σε αποφόρτιση του Φ/Β Α/Σ άνω του 20% επί της ονομαστικής του ισχύος (βάσει των αποτελεσμάτων που δίνονται), συστήνεται να συνδυάζεται με συστοιχία συσσωρευτών για καλύτερα αποτελέσματα, απαιτεί παρεμβολή στο σύστημα ελέγχου του MPPT και προϋποθέτει μέτρηση της φωτεινής ακτινοβολίας.

Εναλλακτικά, η αποφόρτιση του Φ/Β Α/Σ μπορεί να γίνει από την πλευρά του εναλλασσομένου ρεύματος αξιοποιώντας τον ελεγκτή βρόχου φάσης που είναι συγχρονισμένος με την τάση εξόδου του [50]. Πιο συγκεκριμένα, μείωση της ισχύος είτε λόγω εντολής απόρριψης ισχύος, είτε λόγω απόκρισης σε φαινόμενα αύξησης συχνότητας, υλοποιείται μειώνοντας τη γωνία μεταξύ του βρόχου φάσης και της τάσης δικτύου. Αναλόγως, η αύξηση ισχύος επιτυγχάνεται μεγάλωνοντας τη γωνία. Θεωρώντας την υπόθεση ότι οι γωνίες είναι μικρής τιμής, ο επιθυμητός στατισμός μπορεί να τεθεί ως σχέση ευθείας αναλογίας μεταξύ της συχνότητας ΣΗΕ και της διαφοράς φάσης του βρόχου ελέγχου από την τάση δικτύου κατά την:

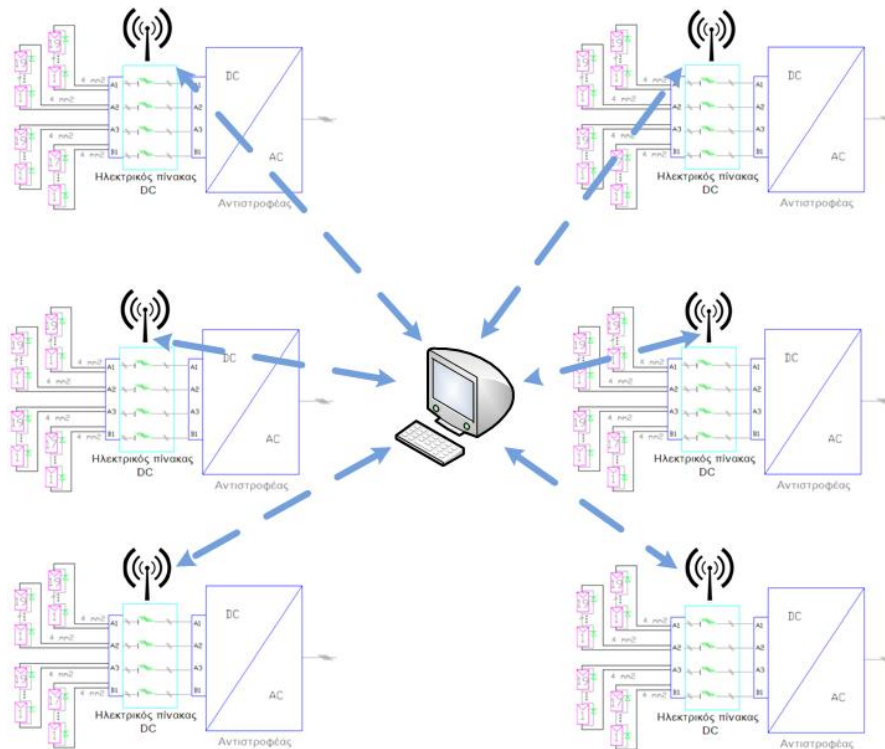
$$\frac{d\theta_{error}}{d\omega_{line}} = \frac{1}{k_s} \cdot \frac{dP_o}{d\omega_{line}}$$

Και αυτή η τεχνική προϋποθέτει παρεμβολή στον έλεγχο του Φ/Β Α/Σ. Επιπλέον, η περίπτωση να υλοποιεί υψηλή αποφόρτιση, μπορεί να σημαίνει ότι η MPPT μέθοδος θα εξαναγκάζεται – εκ του προτεινόμενου ελέγχου – να καθοδηγεί λειτουργία των Φ/Β στοιχειοσειρών προς τιμές πλησίον της  $I_{SCR}$  ή πλησίον της  $V_{oc}$ . Οι τελευταίες κατά το [39] και τις προδιαγραφές λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων, συνιστούν συνθήκες πιθανής βλάβης του εξοπλισμού.

Όπως φάνηκε, οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν, κατά περίπτωση, επιπλέον επενδύσεις σε μέσα αποθήκευσης, παρεμβολή στον έλεγχο ή/και στους αλγόριθμους των Φ/Β Α/Σ, λειτουργία υπό αμφίβολες συνθήκες για το Φ/Β σύστημα και, τέλος, δεν εξασφαλίζουν ικανότητα ευρείας και ακριβούς αποφόρτισης κατά συνεπή τρόπο.

### **3.3.2 Βελτιωμένη μέθοδος αποφόρτισης και συμμετοχής φωτοβολταϊκού συστήματος στη ρύθμιση συχνότητας**

Από το Σχήμα 3.36, μια απλή τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί με έλεγχο διακοπής ανά στοιχειοσειρά πλαισίων. Κατά αυτόν τον τρόπο, για Φ/Β Α/Σ με  $n$  στοιχειοσειρές εισόδου μπορεί να επιτυγχάνεται αποφόρτιση κατά κλάσματα του  $1/n$  επί της ισχύος. Η υποδομή που απαιτείται για ένα Φ/Β σύστημα περιλαμβάνει τηλεχειριζόμενους διακόπτες ίσου αριθμού προς τις στοιχειοσειρές Φ/Β πλαισίων και έναν μικροεπεξεργαστή που θα καθορίζει την αγωγή/διακοπή τους αναλόγως της εφεδρείας/αποφόρτισης που θα ζητείται από τον διαχειριστή. Η προτεινόμενη τοπολογία δίνεται στο Σχήμα 3.37.

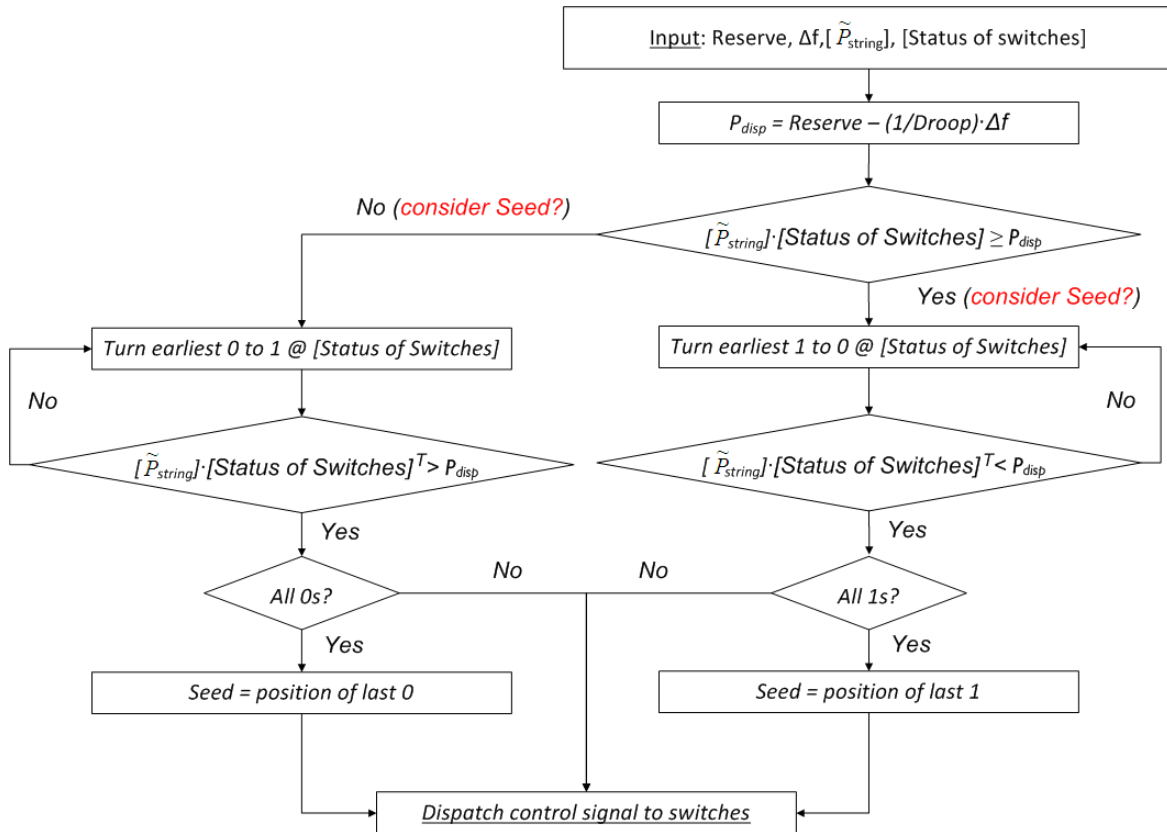


Σχήμα 3.37. Τοπολογία προτεινόμενου ελέγχου αποφόρτισης και συμμετοχής στη ΡΣ από Φ/Β σύστημα με τηλεχειριζόμενους διακόπτες συνεχούς ρεύματος επί των στοιχειοσειρών των Φ/Β Α/Σ.

Κατά την τεχνική που παρουσιάζεται, εκτός της σαφέστατης μείωσης του επενδυτικού κόστους από την αποφυγή χρήσης μέσων αποθήκευσης και μετρητικών διατάξεων φωτεινής ακτινοβολίας, δε ζητείται παρεμβολή στον έλεγχο του Φ/Β Α/Σ, ενώ η αποκοπή στοιχειοσειρών δεν αναιρεί ή επηρεάζει την κανονική λειτουργία του MPPT αλγόριθμου. Ειδικά για το τελευταίο σημείο, η ερμηνεία δίνεται εκ του Σχήματος 3.6, όπου η διακοπή μιας στοιχειοσειράς, θα ομοιάζει με μείωση της φωτεινής ακτινοβολίας.

Ο αλγόριθμος διατήρησης εφεδρείας και εκτέλεσης ΡΣ που θα ελέγχει τους τηλεχειριζόμενους διακόπτες στις στοιχειοσειρές πλαισίων ακολουθεί το διάγραμμα ροής του Σχήματος 3.38. Ο πίνακας-γραμμή  $P_{string}$  περιλαμβάνει την εκτίμηση ισχύος ανά στοιχειοσειρά και ο πίνακας-γραμμή [Status of Switches] περιλαμβάνει την κατάσταση διακοπής/αγωγής. Η αλλαγή διακοπής/αγωγής είναι σειριακή και, πιο συγκεκριμένα κλείνει ο διακόπτης που άνοιξε πριν από κάθε άλλον ανοιχτό και ανοίγει ο διακόπτης που έκλεισε πριν από κάθε άλλον κλειστό. Αν όλοι οι διακόπτες κλείσουν (ανοίξουν) διατηρείται στη μεταβλητή *Seed* ο τελευταίος που έκλεισε (άνοιξε), ώστε η πρώτη διακοπή (αγωγή) να ξεκινήσει από τον επόμενο του κατά την ανωτέρω λογική. Ο τρόπος συμπλήρωσης των πινάκων σύμφωνα με τη στρατηγική που περιγράφηκε, καθοδηγείται από την ανάγκη ισότιμης διαχείρισής τους για λόγους γήρανσης των Φ/Β πλαισίων.





Σχήμα 3.38. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και ΡΣ από Φ/Β σύστημα με εφαρμογή τηλεχειριζόμενων διακοπών στις στοιχειοσειρές των Φ/Β πλαισίων προς τους Α/Σ.

Αν υποθεθεί ότι υπάρχουν  $m$  Φ/Β Α/Σ με  $n$  εισόδους κάθε ένας, η συμπλήρωση των δύο πινάκων-γραμμών και μερικά παραδείγματα αλλαγής της κατάστασής τους παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.39.

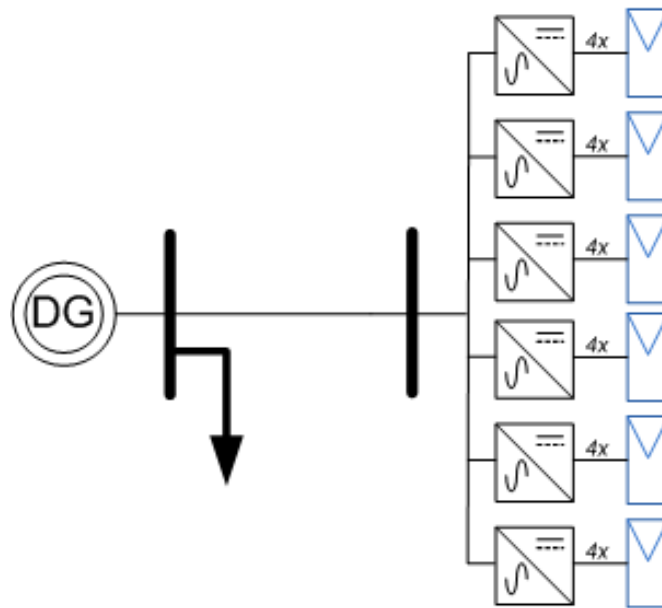
				<b>Κατάσταση διακόπτη επί του πίνακα [Status of Switches] (Inverter-String)</b>										
<b>Βήμα</b>	<b>Εφεδρεία (kW)</b>	<b>Δf·(1/R) (kW)</b>	<b>Seed</b>	<b>1-1</b>	<b>2-1</b>	<b>...</b>	<b>m-1</b>	<b>1-2</b>	<b>...</b>	<b>m-2</b>	<b>.....</b>	<b>1-n</b>	<b>...</b>	<b>m-n</b>
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	$7 \cdot (m+1)$	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	$7 \cdot (m+1)$	$7 \cdot m$	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
5	$7 \cdot (m \cdot n)$	0	$m+1$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	$7 \cdot (m \cdot n)$	7	$m+1$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

1<sup>η</sup> στοιχειοσειρά των Φ/Β Α/Σ
2<sup>η</sup> στοιχειοσειρά των Φ/Β Α/Σ
n<sup>η</sup> στοιχειοσειρά των Φ/Β Α/Σ

Σχήμα 3.39. Παράδειγμα μεταβολής καταστάσεων αγωγής/διακοπής διακοπών στον πίνακα *Status of Switches* για την προτεινόμενη μέθοδο – θεωρείται ότι κάθε στοιχειοσειρά έχει εκτιμώμενη ισχύ  $P_{string}=7kW$  και οι αλλαγές από βήμα σε βήμα είναι ακαριαίες.

### 3.3.3 Προσομοιώσεις, αποτελέσματα και σχολιασμός τους

Παρουσιάζονται αμέσως αποτελέσματα προσομοιώσεων εφαρμογής της προτεινόμενης στρατηγικής αποφόρτισης και απόκρισης συχνότητας από Φ/Β σύστημα. Θεωρήθηκε ένα ΣΗΕ δύο ζυγών όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.40 και μοντελοποιείται στο Simulink® του περιβάλλοντος MATLAB®. Αποτελείτο από γεννήτρια diesel 200 kW και Φ/Β πάρκο 100 kW. Το Φ/Β πάρκο συγκροτείται από 6 ίσες μεταξύ τους ισχύος Φ/Β Α/Σ, εισόδου 4 όμοιων στοιχειοσειρών έκαστος. Τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά του ΣΗΕ δοκιμής παρατίθενται στο Παράρτημα Ε'.



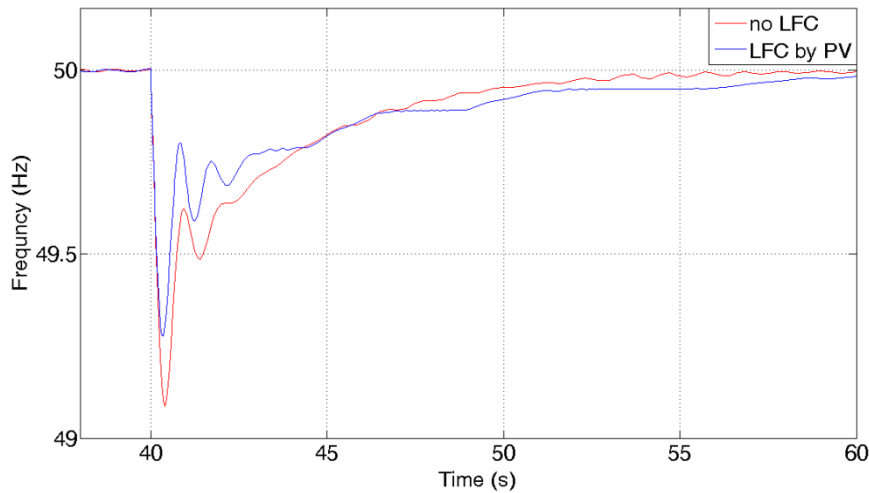
Σχήμα 3.40. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και συμμετοχής Φ/Β συστήματος στη ΡΣ.

Αρχικά συνοψίζονται οι αποκρίσεις του ΣΗΕ δοκιμής για βηματική αύξηση της ενεργού ισχύος του φορτίου. Ύστερα, δίνονται τα διαγράμματα απόκρισης της ενεργού ισχύος για μεταβολές φωτεινής ακτινοβολίας λόγω νέφωσης.

#### 3.3.3.1 Ρύθμιση συχνότητας από αποφορτισμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

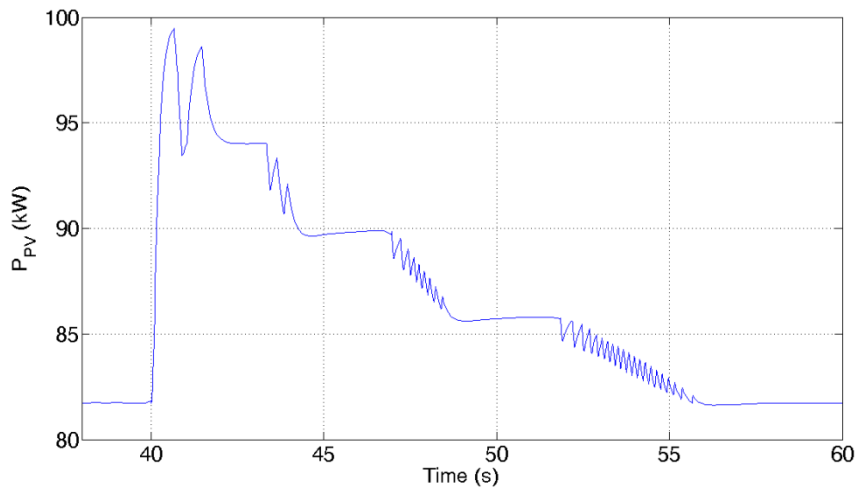
Θεωρείται βηματική μεταβολή φορτίου κατά 20kW (20% στη βάση ισχύος του Φ/Β συστήματος) στη χρονική στιγμή  $t=40s$ . Το Φ/Β σύστημα εργάζεται υπό 15 kWp αποφόρτιση. Σημειώνεται ότι κατά τη χρονική στιγμή της μεταβολής φορτίου η ισχύς κάθε στοιχειοσειράς είναι περί τα 4 kWp και, επίσης, η γεννήτρια diesel εκτελεί και δευτερεύουσα ρύθμιση προς πλήρη αποκατάσταση της συχνότητας.

Στο Σχήμα 3.41 φαίνεται η συμμετοχή του Φ/Β συστήματος στη ΡΣ. Χάρη την ταχύτητα έγχυσης ισχύος από μεριάς των Φ/Β Α/Σ, επιτυγχάνεται περιορισμός της ελάχιστης συχνότητας και ταχύτερη προσέγγιση της ονομαστικής τιμής της.



Σχήμα 3.41. Απόκριση συχνότητας ΣΗΕ σε βηματική μεταβολή φορτίου υπό την προτεινόμενη μέθοδο αποφόρτισης Φ/Β συστήματος και συμμετοχής του στη ΡΣ.

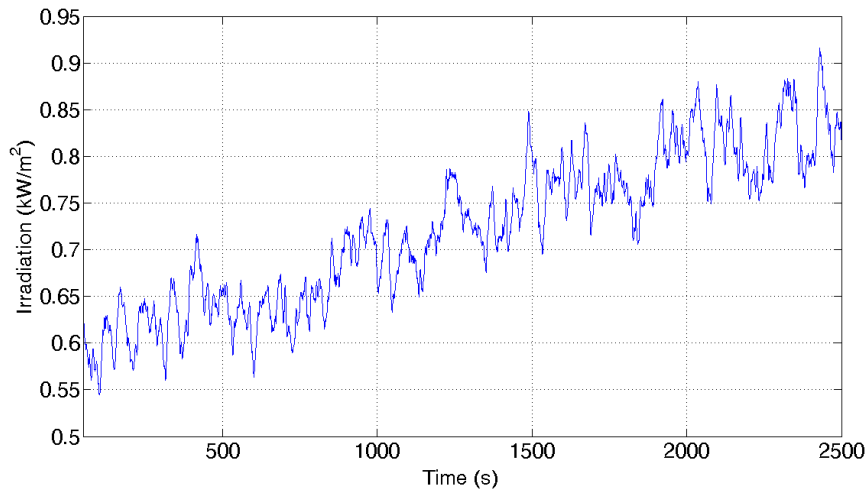
Στο Σχήμα 3.42 δίνεται η μεταβολή στην ισχύ εξόδου του Φ/Β συστήματος. Όπως παρουσιάζεται, η αλλαγή προς τη ζητούμενη ισχύ υπόκειται μόνο στους χρόνους υστέρησης (περίπου 0.5s) του RLC κυκλώματος των Φ/Β Α/Σ.



Σχήμα 3.42. Απόκριση ισχύος εξόδου Φ/Β πάρκου 100kWp σε βηματική μεταβολή φορτίου υπό την προτεινόμενη μέθοδο αποφόρτισης Φ/Β συστήματος και συμμετοχής του στη ΡΣ.

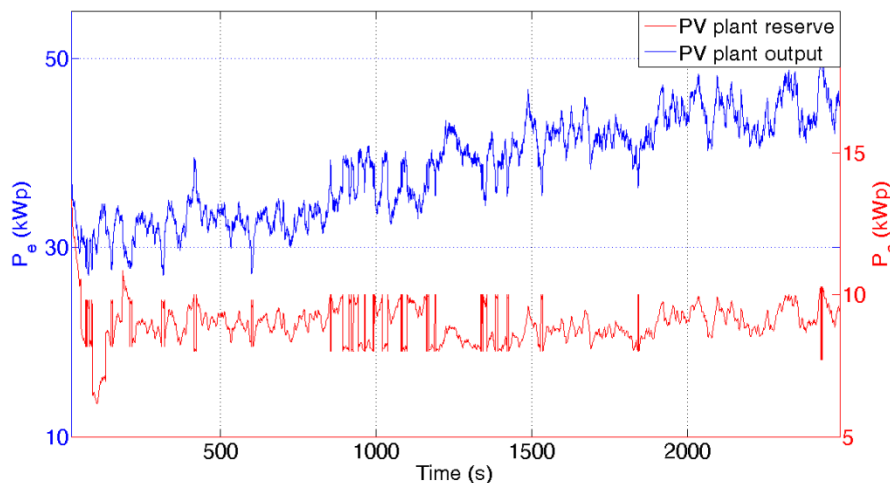
### 3.3.3.2 Απόκριση μεθόδου αποφόρτισης φωτοβολταϊκού συστήματος σε μεταβολές φωτεινής ακτινοβολίας λόγω νεφώσεων

Για τις συγκεκριμένες δοκιμές, το Φ/Β σύστημα θεωρήθηκε συνδεδεμένο προς άπειρο ζυγό και υπό 9kWp σταθερή αποφόρτιση. Υποτέθηκε ώρα έναρξης του φαινομένου μια χρονική στιγμή πλησίον του ηλιακού μεσημεριού. Η χρονοσειρά μεταβολής της φωτεινής ακτινοβολίας επί της επιφάνειάς του Φ/Β συστήματος δίνεται στο Σχήμα 3.43.



Σχήμα 3.43. Χρονοσειρά ηλιακής ακτινοβολίας επί Φ/Β συστήματος αποφορτισμένο κατά την προτεινόμενη μέθοδο.

Στο Σχήμα 3.44 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος εξόδου του Φ/Β συστήματος καθώς και της διατηρούμενης εφεδρείας (κατ' εκτίμηση) ως απόκριση στις μεταβολές της φωτεινής ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.44. Απόκριση ισχύων εξόδου και εκτιμώμενου περιθωρίου Φ/Β συστήματος, αποφορτισμένου κατά την προτεινόμενη μέθοδο, υπό μεταβολές φωτεινής ακτινοβολίας.

Παρά την έντονα μεταβαλλόμενη τιμή της φωτεινής ισχύος, η προτεινόμενη μέθοδος διατηρεί το επιθυμητό ποσό εφεδρείας, αν και μεταβατικά (για παράδειγμα γύρω από το 1000ο δευτερόλεπτο) εμφανίζει διαδοχικές εναλλαγές διακοπής/αγωγής. Οι εναλλαγές αυτές είναι αναμενόμενες και προκύπτουν από την ακρίβεια στρογγυλοποίησης στον υπολογισμό της ζητούμενης ισχύος κοντά στην τιμή που αλλάζει ο αριθμός των στοιχειοσειρών που απαιτούνται για να εξασφαλιστεί το εκάστοτε ποσό εφεδρείας. Δηλαδή, αυξανόμενης της φωτεινής ακτινοβολίας απαιτείται μικρότερος αριθμός αποκομμένων στοιχειοσειρών για την ίδια ισχύ εφεδρείας.

### 3.3.4 Σύνοψη και δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου σε πραγματικές εγκαταστάσεις

Η εξάπλωση των Φ/Β συστημάτων υπήρξε τόσο μεγάλης κλίμακας, που η πιθανότητα απώλειας έστω και μικρού μέρους της ισχύος τους (σε πραγματικό χρόνο) απειλεί την ευστάθεια του διασυνδεδεμένου ΣΗΕ της Ευρώπης. Ο σχετικός εκτοπισμός αδράνειας που επίσης προκαλούν, σε συνδυασμό με τη στοχαστικότητα τους, αποτελούν επιπλέον παραμέτρους στα ζητήματα συχνότητας και, έτσι, δημιουργείται ανάγκη συμμετοχής τους στη ΡΣ. Για να είναι εφικτό το τελευταίο θα πρέπει να εξασφαλιστεί εφεδρεία από μέρους των Φ/Β συστημάτων είτε μέσω εξ αρχής απόρριψης διαθέσιμης ισχύος, είτε μέσω προσωρινής αποθήκευσής της σε σχετικά μέσα. Η ανασκόπηση των υπαρχουσών προτάσεων/τεχνικών ανέδειξε τις αδυναμίες τους και οδήγησε στην ανάπτυξη μίας βελτιωμένης μεθόδου που τις αντιμετωπίζει με συνεπή τρόπο, επιτυγχάνει ευρεία αποφόρτιση σε οποιοδήποτε ζητούμενο επίπεδο από τον διαχειριστή, ενώ, ταυτόχρονα, μπορεί να εφαρμοστεί στα ήδη εγκατεστημένα συστήματα με μικρό κόστος και αποφεύγοντας παρεμβολή επί του εξοπλισμού και, ειδικά, των Φ/Β Α/Σ.

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου περιορίζεται μόνο από τις ελάχιστες ισχύεις λειτουργίας ή/και εκκίνησης των Φ/Β Α/Σ. Τα κατώφλια αυτά εξαρτώνται με τη σειρά τους από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στον ακόλουθο Πίνακα 3.1, παρουσιάζεται μία εκτενής λίστα Φ/Β Α/Σ. Από κάθε κατασκευάστρια εταιρεία, εντοπίστηκε ο Φ/Β Α/Σ της μικρότερης ελάχιστης ισχύος εκκίνησης (ή/και λειτουργίας) και υπολογίστηκε, από σχετικά προγράμματα διαστασιολόγησης, η μεγαλύτερη στοιχειοσειρά κρυσταλλικών πλαισίων που μπορεί να συνδεθεί προς τον κάθε έναν. Έτσι, προσδιορίστηκαν εξ αυτών, για τυπικές συνθήκες χειμερινής ημέρας, η ελάχιστη και μέγιστη αποφόρτιση (εφεδρεία) που μπορεί να πετύχει ανά στοιχειοσειρά κάθε ένας από τους Φ/Β Α/Σ που δίνονται. Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν, ο Πίνακας 3.1 συνοψίζει τα χειρότερα σενάρια εφεδρειών και συμμετοχής στη ΡΣ που μπορεί να προκύψει από εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε έναν κάθε φορά Φ/Β Α/Σ κάθε κατασκευάστριας εταιρείας. Η λίστα στοιχειοθετήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τις διαθεσιμότητες αγοράς κατά το έτος 2012.

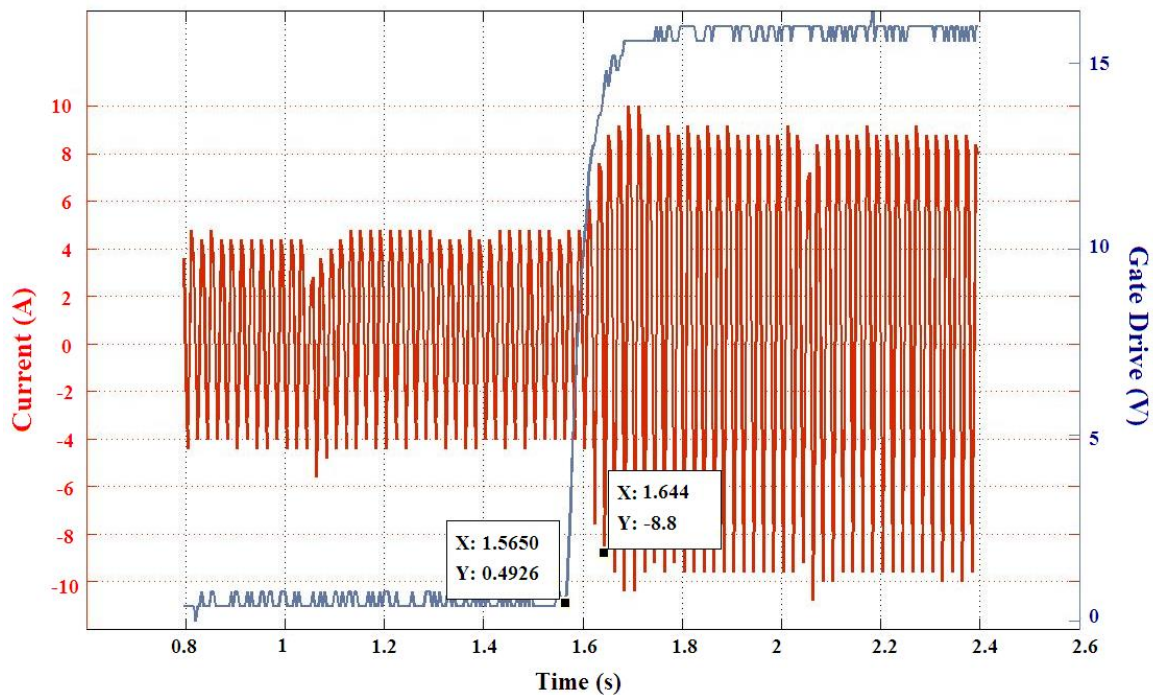
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.1 η πλειονότητα των Φ/Β Α/Σ που πληρούν τα κριτήρια επιλογής χειρότερου σεναρίου που περιγράφηκαν προηγουμένως, αδυνατούν να προσφέρουν εφεδρεία υπό συνθήκες λειτουργίας χειμερινής ημέρας. Τούτο εξηγείται από το ότι οι περισσότεροι προδιαγράφονται με είσοδο μίας και μόνο στοιχειοσειράς που αντιπροσωπεύει και την ονομαστική τους ισχύ. Τονίζεται εκ νέου εδώ, ότι θεωρήθηκε σύνδεση Φ/Β πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου – η θεώρηση σύνδεσης πλαισίων αμόρφου πυριτίου θα απέφερε σε κάθε περίπτωση πολλαπλάσιο αριθμό στοιχειοσειρών λόγω μικρότερου ρεύματος  $I_{mpp}$  ανά στοιχειοσειρά [1].

Πίνακας 3.1. Ονομαστική ισχύς, ελάχιστη και μέγιστη εφεδρεία ανά στοιχειοσειρά του μικρότερης ισχύος εκκίνησης/λειτουργίας Φ/Β Α/Σ από κάθε κατασκευάστρια εταιρεία, υπό χειμερινή φωτεινή ακτινοβολία ημέρας.

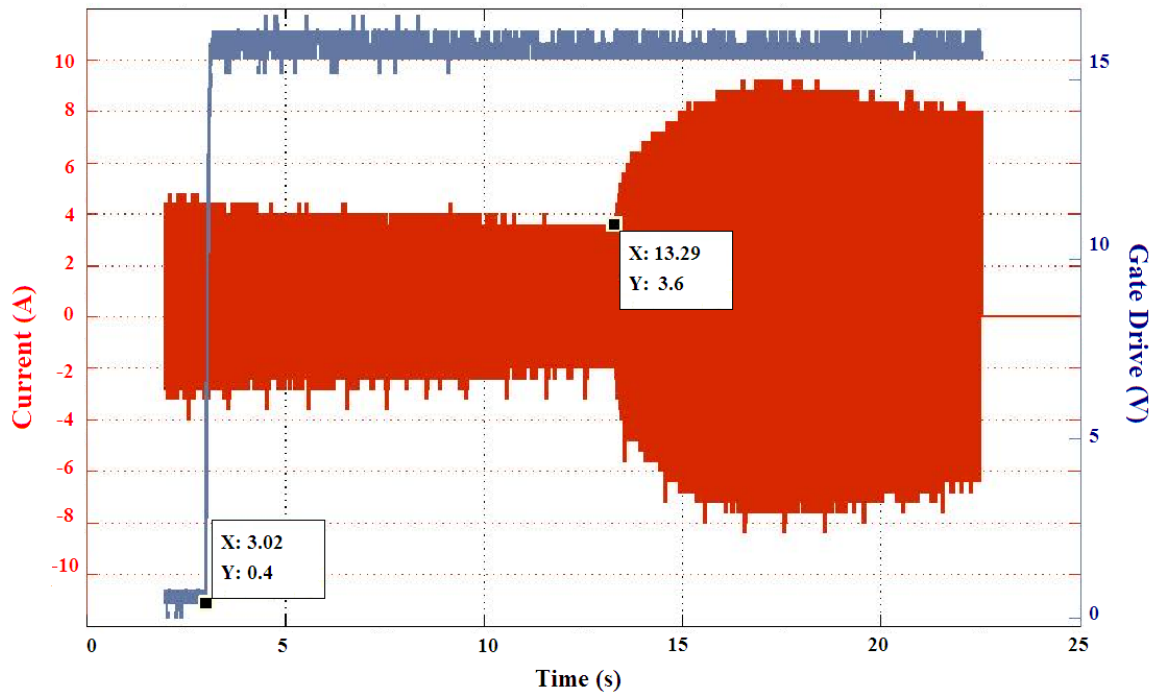
Εταιρεία	$P_n$ (kW)	Ελάχιστη Εφεδρεία (kWp)	Μέγιστη Εφεδρεία (kWp)	Εταιρεία	$P_n$ (kW)	Ελάχιστη Εφεδρεία (kWp)	Μέγιστη Εφεδρεία (kWp)
AD Ansaldo Sistemi Industriali	22	0.10	1.40	Mitsubishi	1.8	<i>Αδύνατο</i>	
Advanced Energy Industries	500	0.02	387.50	Motech	3.3	<i>Αδύνατο</i>	
Aero-Sharp	0.6	<i>Αδύνατο</i>		Omron	4	<i>Αδύνατο</i>	
Ainelec	1.4	<i>Αδύνατο</i>		Pairan	2	<i>Αδύνατο</i>	
Aixcon	1.3	<i>Αδύνατο</i>		Phoenixtec	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Aros	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Photowatt	1.6	<i>Αδύνατο</i>	
AEG Power Solutions GmbH	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Power-One	2	<i>Αδύνατο</i>	
Beghelli	0.8	<i>Αδύνατο</i>		Powercom	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Beyond Building Energy	1	<i>Αδύνατο</i>		REFU Elektronik GmbH	3.7	<i>Αδύνατο</i>	
Bonfiglioli-Vectron	27	0.10	1.20	Riello	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
BYD	3	<i>Αδύνατο</i>		Rudolf Fritz	60	0.03	3.30
Carlo Gavazzi	3.3	<i>Αδύνατο</i>		S2S	2	<i>Αδύνατο</i>	
Centrosolar	0.8	<i>Αδύνατο</i>		Sainty Solar	2	<i>Αδύνατο</i>	
Conergy	3	<i>Αδύνατο</i>		Salicru	2.8	<i>Αδύνατο</i>	
Converteam	490	0.01	210.00	Santerno	2	<i>Αδύνατο</i>	
Danfoss	1.6	<i>Αδύνατο</i>		Sanyo	2.7	<i>Αδύνατο</i>	
Delta Energy	0.2	<i>Αδύνατο</i>		Satcon	100	0.02	19.80
Diehl	1.7	<i>Αδύνατο</i>		Schneider-Electric	2.8	<i>Αδύνατο</i>	
Dorfmueller	0.1	<i>Αδύνατο</i>		Schuco	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Eaton	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Sharp	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Eltek Valere	1.7	<i>Αδύνατο</i>		Siel	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Emerson Control Techniques	146	0.03	20.57	Siemens	10	0.06	0.06
EnaSolar	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Siliken	50	0.11	9.00
Enecsys	0.2	<i>Αδύνατο</i>		SMA	1	<i>Αδύνατο</i>	
Eurener	25	0.03	0.5	Socomec	2	<i>Αδύνατο</i>	
Exendis	10	0.05	0.05	SolarEdge	3	<i>Αδύνατο</i>	
Fagor	2.5	<i>Αδύνατο</i>		Solar Fabrik	3.8	<i>Αδύνατο</i>	
Fronius	1.3	<i>Αδύνατο</i>		Solar Konzept	1	<i>Αδύνατο</i>	
GE	2	<i>Αδύνατο</i>		SolarStoc	0.8	<i>Αδύνατο</i>	
GESolar	1.8	<i>Αδύνατο</i>		SolarWorld	1.6	<i>Αδύνατο</i>	
Ginlong	2	<i>Αδύνατο</i>		Solectria	2.9	<i>Αδύνατο</i>	
Greenpower	5	<i>Αδύνατο</i>		Solon	1.3	<i>Αδύνατο</i>	
Helios Systems	3.5	<i>Αδύνατο</i>		Solutronic	2.5	<i>Αδύνατο</i>	
Hinergy	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Sputnik	1.8	<i>Αδύνατο</i>	
Hyundai	4	0.08	0.08	Steca	0.3	<i>Αδύνατο</i>	
IBC	1.6	<i>Αδύνατο</i>		Sungrow	3	<i>Αδύνατο</i>	
Ingeteam	2.5	<i>Αδύνατο</i>		SunnySwiss	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
Italcoel	3.2	<i>Αδύνατο</i>		Sunset	3.4	<i>Αδύνατο</i>	
Jema	10	0.20	0.20	Suntension	1.5	<i>Αδύνατο</i>	
KACO	1.5	<i>Αδύνατο</i>		Sunways	2.5	<i>Αδύνατο</i>	
Kostal	3.8	<i>Αδύνατο</i>		Tenesol	1.9	<i>Αδύνατο</i>	
Kyocera	1.6	<i>Αδύνατο</i>		TMEIC	250	0.03	51.25
Latronic	1	0.02	0.30	Tritec	1.6	<i>Αδύνατο</i>	
Layer	2	<i>Αδύνατο</i>		Vacon	10	0.10	0.10
Leonics	2.5	<i>Αδύνατο</i>		Voltwerk	3	<i>Αδύνατο</i>	
LTi REEnergy	33	0.05	1.80	W2PS	500	0.54	460.00
Luxra	3	<i>Αδύνατο</i>		Würth Solergy	4.8	<i>Αδύνατο</i>	
Mastervolt	0.5	<i>Αδύνατο</i>		Xantrex	2.3	<i>Αδύνατο</i>	
Meiden (SVS-Nevelin)	50	0.10	6.40	Zigor	2	<i>Αδύνατο</i>	

Γενικά πάντως, η πλειοψηφία των Φ/Β Α/Σ που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές διασύνδεσης προς τα ΣΗΕ, φέρουν ικανότητα εισόδου τουλάχιστον δύο στοιχειοσειρών και ως εκ τούτου μπορούν να εξασφαλίσουν σε κάθε περίπτωση μια κάποια εφεδρεία. Μολαταύτα, οι περιορισμοί που μόλις συνοψίστηκαν παραπάνω πρέπει να αναγνωριστούν.

Σε πειραματικό επίπεδο, δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές τοπολογίες αντιστροφών για την αξιολόγηση της μεθόδου. Η μία τοπολογία αφορούσε τον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD [55], στον οποίο το σύνολο της Φ/Β ισχύος του μοιράζεται σε δύο MPPT κυκλώματα που διαθέτουν μια είσοδο το καθένα, ενώ η δεύτερη τοπολογία αφορούσε τον αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 [40], στον οποίο το 70% της ισχύος του μοιράζεται σε τρεις εισόδους του ενός εκ των δύο MPPT που διαθέτει. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάστηκε η απόκριση του ρεύματος εξόδου του κάθε αντιστροφέα υπό τον έλεγχο επανασύνδεσης (κατόπιν αποσύνδεσης) μιας στοιχειοσειράς με χρήση κατάλληλου ρελέ συνεχούς ρεύματος οδηγούμενου από σχετικό σήμα τάσης. Η απόκριση κατά την αποσύνδεση της στοιχειοσειράς ήταν, όπως αναμενόταν, στοιχειώδης και παραλείπεται παρακάτω για λόγους απλότητας. Τα αποτελέσματα για τον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD δίνονται στα Σχήματα 3.45 και 3.46.



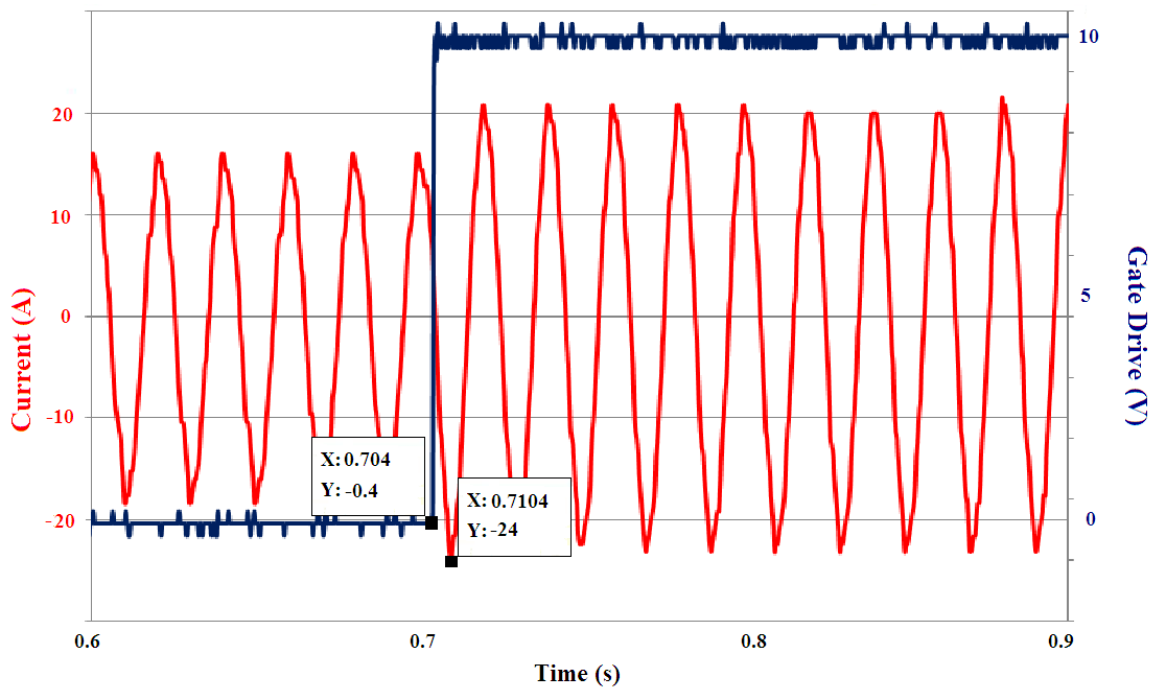
Σχήμα 3.45. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD για δοκιμή άμεσης σύνδεσης στοιχειοσειράς.



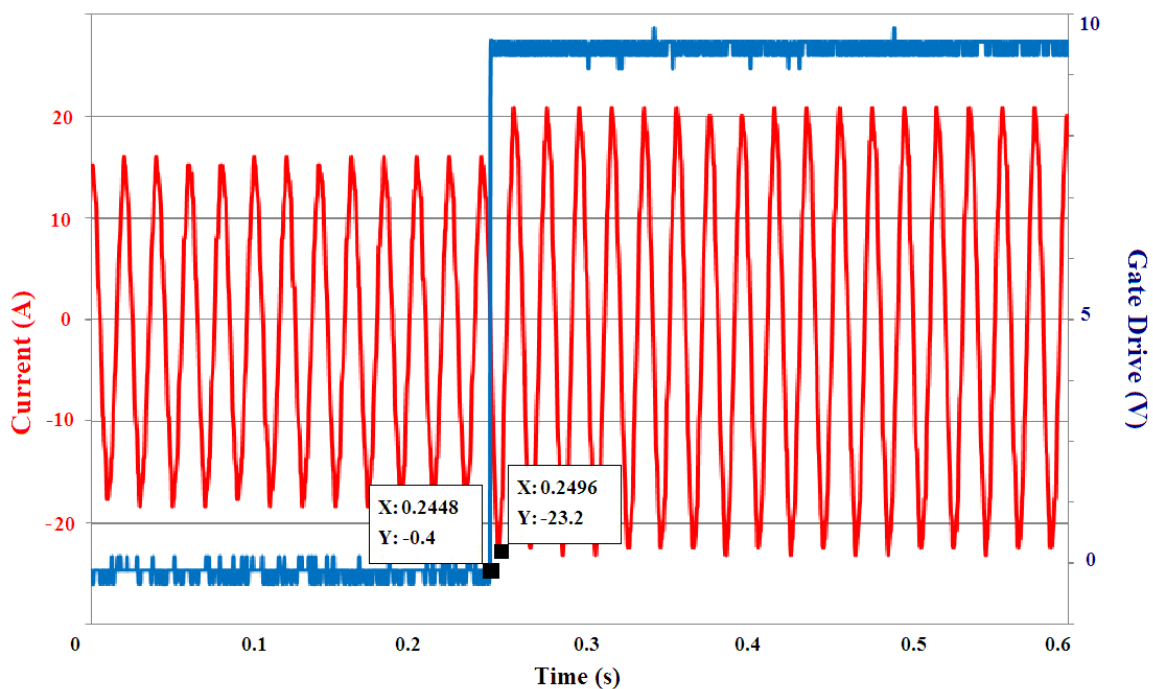
Σχήμα 3.46. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα ABB PVI-3.0-TL-OUTD για δοκιμή σύνδεσης στοιχειοσειράς από κατάσταση σβέσης του κυκλώματος MPPT.

Διευκρινίζεται εδώ ότι η λέξη «άμεσης» στο Σχήμα 3.45, χρησιμοποιείται με την έννοια ότι η στοιχειοσειρά είχε μόλις αποσυνδεθεί κατά το χρονικό σημείο μηδέν (δε φαίνεται στην καταγραφή) και το σήμα επανασύνδεσής της δόθηκε στο ρελέ λίγο πριν το 1.6 s. Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των δύο σχημάτων, αν το σημείο βέλτιστης λειτουργίας από τον MPPT αλγόριθμο δεν έχει απολεστεί (όπως συμβαίνει για το πείραμα που αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.46), ώστε να χρειάζεται επαναπροσδιορισμός του εξ αρχής, τότε η αποκατάσταση της ισχύος εξόδου πλησίον της νέας τιμής λειτουργίας μονίμου καταστάσεως γίνεται σε λιγότερους από πέντε ηλεκτρικούς κύκλους. Στην αντίθετη περίπτωση απαιτούνται περί τα 15 s. Όμοια παρατίθενται και οι αποκρίσεις τάσεων και ρευμάτων εξόδου για τον SMA Sunny Tripower 17000TL-20 στα Σχήματα 3.47 και 3.48.





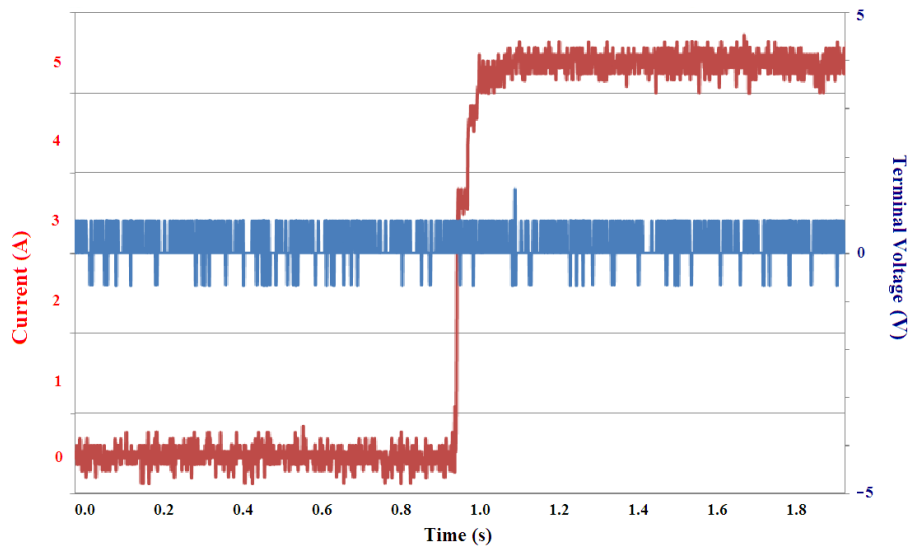
Σχήμα 3.47. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 για δοκιμή άμεσης σύνδεσης στοιχειοσειράς.



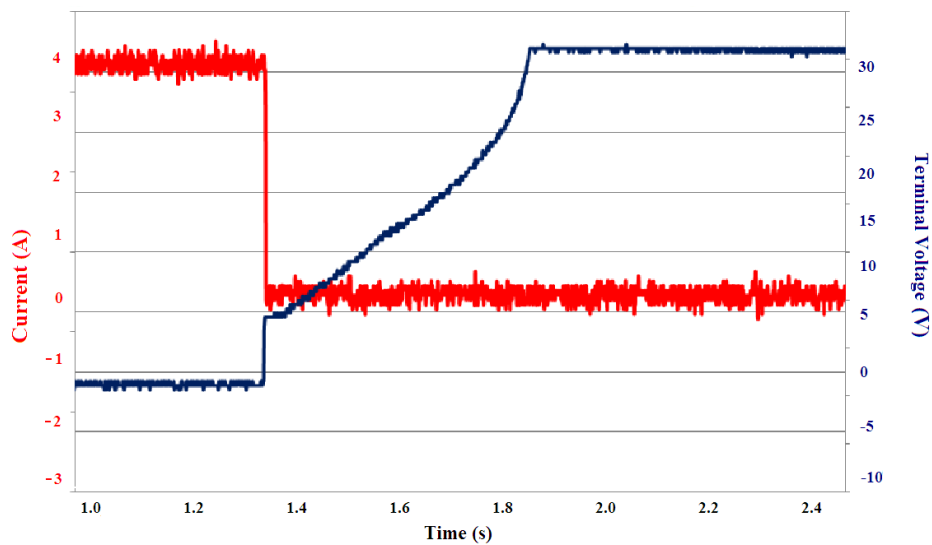
Σχήμα 3.48. Τάση οδήγησης ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και απόκριση ρεύματος εξόδου στον αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 για δοκιμή σύνδεσης στοιχειοσειράς κατόπιν μεγάλου χρόνου σε αποσύνδεση.

Στο Σχήμα 3.47 είναι όμοια η ερμηνεία της λέξης «άμεσης» όπως στο Σχήμα 3.45. Όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί, οι χρόνοι αποκατάστασης του ρεύματος για τη νέα ισχύ λειτουργίας

μονίμου καταστάσεως κατόπιν της επανασύνδεσης της στοιχειοσειράς είναι μικρότεροι του ενός ηλεκτρικού κύκλου και ανεξάρτητοι του αν η στοιχειοσειρά επανασυνδέθηκε άμεσα ή όχι μετά την αποσύνδεσή της ως εφεδρεία. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των Σχημάτων 3.46 και 3.48 επιβεβαιώνεται ότι αν το MRPT κύκλωμα πρέπει να εκτελέσει τον αλγόριθμο εξ αρχής λόγω μηδενισμού του ρεύματος εισόδου του (εφόσον αυτή είναι μόνο μία και δεν παραλληλίζεται προς άλλη που να το διατηρεί ενεργό), τότε θα υπάρχει σημαντική καθυστέρηση αποκατάστασης της ζητούμενης ισχύος για τις ανάγκες της εκτέλεσης ικανοποιητικής ΡΣ. Τέλος, εξετάστηκε και η μεταβατική μεταβολή διερχόμενου ρεύματος και τάσης ακροδεκτών επί του διακόπτη κατά τον οπλισμό και την ηρέμησή του με τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα 3.49 και 3.50.



Σχήμα 3.49. Τάση ακροδεκτών και ρεύμα διαμέσου ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς κατά τον οπλισμό του προς αγωγή ρεύματος στοιχειοσειράς Φ/Β.



Σχήμα 3.50. Τάση ακροδεκτών (x20) και ρεύμα διαμέσου ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς κατά την ηρέμησή του προς διακοπή ρεύματος στοιχειοσειράς Φ/Β.

Αν και κατά τον οπλισμό του ρελέ η συμπεριφορά ρεύματος και τάσεως είναι η αναμενόμενη, κατά την ηρέμισή του μετά τη διακοπή του διαπιστώνεται μια αναρρίχηση της τάσης στα άκρα του. Αυτή κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στη γέφυρα εισόδου συνεχούς ρεύματος του κυκλώματος MPPT του αντιστροφέα (άγνωστης ακριβούς τοπολογίας και χωρητικότητας) [55] και στην αντίδρασή της στη διακοπή του ρεύματος που τη διέρρει. Κατόπιν ικανού χρόνου, η τάση αυτή σταδιακά μειώνεται έως μηδενισμού της.

Η τοπολογία των δοκιμών επί του SMA Sunny Tripower 17000TL-20 φαίνεται στις Εικόνες 3.1 και 3.2.



Εικόνα 3.1. Γενική άποψη της τοπολογίας μετρήσεων. Αριστερά οι μετρητές εξ επαγωγής ρεύματος και το βολτόμετρο στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος. Τοποθετημένος επί του αντιστροφέα SMA Sunny Tripower 17000TL-20 ο ψηφιακός παλμογράφος καταγραφής.



Εικόνα 3.2. Ρελέ συνεχούς ρεύματος ελέγχου στοιχειοσειράς και τροφοδοτικό οδήγησής του.

Ο διακόπτης συνεχούς ρεύματος που επιλέχθηκε για τον έλεγχο αποσύνδεσης και επανασύνδεσης των στοιχειοσειρών Φ/Β πλαισίων ήταν ένας AQAD171DL της Panasonic [56], ο οποίος οδηγούνταν από τροφοδοτικό MASTECH HY3005D [57]. Για την καταγραφή του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός παλμογράφος Tektronix TDS 2004C [58], επαγωγικοί μετρητές ρεύματος Tektronix A622 [59] και κατάλληλα ψηφιακά βολτόμετρα.

### **3.4 Συμπεράσματα**

Στην ενότητα αυτή συζητήθηκαν οι μέθοδοι που μπορούν να εξασφαλίσουν τη συμμετοχή των δύο κυριότερων στοχαστικής φύσεως ΑΠΕ (την αιολική και τη Φ/Β) στη ΡΣ κατόπιν αποφόρτισής τους, σε αντίθεση με την κλασική πρακτική μέγιστης απομάστευσης ισχύος που εφαρμόζεται κατά κόρον.

Για την αποφόρτιση Α/Γ αναπτύχθηκαν δύο στρατηγικές. Κατά τη μία, αποθηκεύεται περίσσεια κινητικής ενέργειας στο δρομέα της μηχανής έως το όριο της ονομαστικής γωνιακής ταχύτητάς του και κατόπιν, η αποφόρτιση υποστηρίζεται από τον ελεγκτή της γωνίας πτερυγίων έλικας. Κατά τη δεύτερη, η Α/Γ απορρίπτει αεροδυναμική ισχύ μέσω της γωνίας πτερυγίων έλικας και υποστηρίζει τη μετέπειτα απόδοσή της προς το ΣΗΕ κατά την εκδήλωση της ΡΣ, με συνδυασμένη εφαρμογή ψευδοαδρανειακής απόκρισης.

Για την αποφόρτιση Φ/Β συστήματος παρουσιάστηκε μέθοδος τηλεχειρισμού διακοπών συνεχούς ρεύματος στις στοιχειοσειρές εισόδου των Φ/Β Α/Σ. Η εντολή αγωγής/διακοπής κάθε ενός καθοδηγείται από αλγόριθμο οργανωμένο σε επίπεδο Φ/Β συστήματος για εκπλήρωση ζήτησης εφεδρείας από τον διαχειριστή και επακόλουθη υλοποίηση ΡΣ.

Οι τεχνικές που προτάθηκαν στην παρούσα εργασία και έχουν επίσης συζητηθεί εδώ [52,53], επιτυγχάνουν βελτίωση των ήδη υπάρχουσών που έχουν προηγηθεί στη βιβλιογραφία, ενώ αποδίδουν επιπλέον θετικά στοιχεία. Η εφαρμογή αποφόρτισης Α/Γ και συμμετοχής της στη ΡΣ, με τεχνική παρόμοια προς τον συνδυασμένο έλεγχο γωνίας βήματος έλικας και ψευδοαδρανειακής απόκρισης, έχει ήδη δοκιμαστεί με επιτυχία, ενώ η αντίστοιχη εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης Φ/Β συστημάτων αν και περιορίζεται ελάχιστα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διαφόρων Φ/Β Α/Σ, είναι πειραματικά έγκυρη και μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα με την κατάλληλη υποδομή και τον σχετικά περιγραφόμενο στο παρόν κεφάλαιο έλεγχο.

Κατά τα όσα αναφέρθηκαν, συνάγεται ότι ένας ΕιΣΠ μπορεί να εκπληρώνει και μέσω των στοχαστικών ΑΠΕ που τον αποτελούν εξασφάλιση εφεδρείας, ΡΣ και εν γένει ρύθμιση ενεργού ισχύος κατά τις οδηγίες του εκάστοτε διαχειριστή.

### 3.5 Βιβλιογραφία

- [1] T. Markvart, Solar Electricity, John Wiley, Chichester, 2000.
- [2] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, John Wiley, Chichester, 2001.
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [4] P5 – Policy 5: Emergency Operations, ENTSO-E (2010).
- [5] J. Machowski, J. Bialek, J. Bumby, Power System Dynamics: Stability and Control, John Wiley, Chichester, 2008.
- [6] T. Ackermann, Wind Power in Power Systems, John Wiley, Chichester, 2005.
- [7] Z. Lubosny, Wind Turbine Operation in Electric Power Systems, Springer, 2003.
- [8] F.D. Bianchi, H. de Battista, R.J. Mantz, Wind Turbine Control Systems: Principles, Modeling and Gain Scheduling Design, Springer, 2006.
- [9] D.L. Evans , W.A. Facinelli, L.P. Koehler, Simulation and Simplified Design Studies of Photovoltaic Systems, 1980.
- [10] R.L. Steigerwald, A. Ferraro, R.E. Tompkins, Investigation of a Family of Power Conditioners Integrated into the Utility Grid. Category 1 - Residential Power Conditioner Final Report, 1981, Σελίδες 1-94.
- [11] R. Faranda, S. Leva, Energy comparison of MPPT techniques for PV systems, WSEA transactions on Power Systems, 2008, Σελίδες 446-455.
- [12] United Nations Framework Convention on Climate Change: Kyoto Protocol (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.unfccc.int>. Προσπελάστηκε 26 Νοεμβρίου 2009).
- [13] European Parliament and Council: Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://eur-lex.europa.eu/>. Προσπελάστηκε 23 Απριλίου 2009).
- [14] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley, Chichester, 2006.
- [15] M. Tsili, S. Papathanassiou, A review of grid code technical requirements for wind farms, IET Renewable Power Generation, Τόμος 3, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2009, Σελίδες 308-32.
- [16] G. Lalor, J. Ritchie, S. Rourke, D. Flynn, MJ. O'Malley, Dynamic frequency control with increasing wind generation, 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004, Σελίδες 1715-20.
- [17] P. Bousseau, F. Fesquet, R. Belhomme, S. Nguefeu, T.C. Thai, Solutions for the grid integration of wind farms - a survey, Wind Energy, Τόμος 9, Τεύχη 1-2, 2006, Σελίδες 13-25.

- [18] G. Dany, Power reserve in interconnected systems with high wind power production. 2001 IEEE Power Tech Porto, Τόμος 4, 2001, Σελίδες 6-11.
- [19] Elkraft System and Eltra Regulation, Draft version TF 3.2.5 Wind Turbines Connected to Grids With Voltages above 100 kV—Technical Regulation for the Properties and the Regulation of Wind Turbines, Δεκέμβριος 2004.
- [20] Nordel, Tech Rep., Nordic Grid Code 2007 (Nordic Collection of Rules), Ιανουάριος 2004, ανανέωση 2007.
- [21] Hydro-Québec, Tech. Rep., Technical Requirements for the Connection of Generation Facilities to the Hydro-Québec Transmission System: Supplementary Requirements for Wind Generation, Μάιος 2003, επαναδιατύπωση 2009.
- [22] J. Morren, J.T.G. Pierik, S.W.H. de Haan, J. Bozelie, Grid interaction of offshore wind farms. Part 2. Case study simulations, Wind Energy, Τόμος 8, Τεύχος 3, 2005, Σελίδες 279-293.
- [23] J. Ekanayake, N. Jenkins, Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency, IEEE Transactions on Energy Conversion, Τόμος 19, Τεύχος 4, Δεκέμβριος 2004, Σελίδες 800- 802.
- [24] J. Morren, S.W.H. de Haan, W.L. Kling, J.A. Ferreira, Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 21, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2006, Σελίδες 433- 434.
- [25] N.R. Ullah, T. Thiringer, D. Karlsson, Temporary Primary Frequency Control Support by Variable Speed Wind Turbines— Potential and Applications, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 23, Τεύχος 2, Μάιος 2008, Σελίδες 601-612.
- [26] J.M. Mauricio, A. Marano, A. Gomez-Exposito, J.L. Martinez Ramos, Frequency Regulation Contribution Through Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 24, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2009, Σελίδες 173-180.
- [27] R.G. de Almeida, E.D. Castronuovo, J.A.P. Lopes, Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 21, Τεύχος 2, Μάιος 2006, Σελίδες 718- 725.
- [28] N.A. Janssens, G. Lambin, N. Bragard, Active Power Control Strategies of DFIG Wind Turbines, 2007 IEEE Lausanne Power Tech, 1-5 Ιουλίου 2007, Σελίδες 516-521.
- [29] G. Ramtharan, J.B. Ekanayake, N. Jenkins, Support for spinning reserve from DFIG based wind turbines, 2007 International Conference on Industrial and Information Systems – ICIIS, 9-11 Αυγούστου 2007, Σελίδες 111-116.
- [30] F.D. Kanellos, N.D. Hatziargyriou, Control of Variable Speed Wind Turbines in Islanded Mode of Operation, IEEE Transactions on Energy Conversion, Τόμος 23, Τεύχος 2, Ιούνιος 2008, Σελίδες 535-543.

- [31] V. Courtecuisse, B. Robyns, B. Francois, M. Petit, J. Deuse, Variable Speed Wind Generators Participation in Primary Frequency Control, *Wind Engineering*, Τόμος 32, Τεύχος 3, 2008, Σελίδες 299-318.
- [32] L. Holdsworth, J.B. Ekanayake, N. Jenkins, Power system frequency response from fixed speed and doubly fed induction generator-based wind turbines, *Wind Energy*, Τόμος 7, Τεύχος 1, 2004, Σελίδες 21-35.
- [33] J.F. Conroy, R. Watson, Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 23, Τεύχος 2, Μάιος 2008, Σελίδες 649-656.
- [34] A. Mullane, M. O'Malley, The Inertial Response of Induction-Machine-Based Wind Turbines, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 20, Τεύχος 3, Αύγουστος 2005, Σελίδες 1496- 1503.
- [35] P. Moutis, S. Pastromas, N.D. Hatziaργyriou, Load-Frequency Control Supported by Variable Speed Variable Pitch Wind Generators - From Theory to Testing, *EWEA 2013*, Vienna, 4-7 Φεβρουαρίου 2013, Σελίδες 1-6.
- [36] Galen Barbose, Ryan Wiser, Mark Bolinger, Designing PV incentive programs to promote performance: A review of current practice in the US, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Τόμος 12, Τεύχος 4, Μάιος 2008, Σελίδες 960-998.
- [37] R.K. Varma, G. Sanderson, K. Walsh, Global PV incentive policies and recommendations for utilities, 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering – CCECE, 8-11 Μαΐου 2011, Σελίδες 1158-1163.
- [38] G. Thilo, H. Molin, N. Karsten, Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China, *Energy Policy*, Τεύχος 51, Δεκέμβριος 2012, Σελίδες 20-37.
- [39] EN 61730-1:2007/A1:2012, Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction, CENELEC (2012).
- [40] SUNNY TRIPOWER 8000TL/10000TL/12000TL/15000TL/17000TL - User Manual, SMA (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.sma.de/en/service/downloads.html>. Προσπελάστηκε 30 Αυγούστου 2013).
- [41] European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC (2010).
- [42] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Entwurf DIN VDE 0126-1-1 (VDE 0126 Teil 1-1) (2005).
- [43] P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C], ENTSO-E (2009).
- [44] VDE-AR-N 4105, Generators connected to the low-voltage distribution network -Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks, VDE (2011).

- [45] D. Kottick, M. Blau, D. Edelstein, Battery energy storage for frequency regulation in an island power system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Τόμος 8, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 1993, Σελίδες 455-459.
- [46] Xiangjun Li, Yu-Jin Song, Soo-Bin Han, Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller, *Journal of Power Sources*, Τόμος 180, Τεύχος 1, 15 Μαΐου 2008, Σελίδες 468-475.
- [47] C.A. Hill, M.C. Such, Chen Dongmei, J. Gonzalez, W.M. Grady, Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 3, Τεύχος 2, Ιούνιος 2012, Σελίδες 850-857.
- [48] Naoto Kakimoto, S. Takayama, H. Satoh, K. Nakamura, Power Modulation of Photovoltaic Generator for Frequency Control of Power System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Τόμος 24, Τεύχος 4, Δεκέμβριος 2009, Σελίδες 943-949.
- [49] M. Datta, T. Senjyu, A. Yona, T. Funabashi, Chul-Hwan Kim, A Frequency-Control Approach by Photovoltaic Generator in a PV–Diesel Hybrid Power System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Τόμος 26, Τεύχος 2, Ιούνιος 2011, Σελίδες 559-571.
- [50] H. Alatrash, A. Mensah, E. Mark, G. Haddad, J. Enslin, Generator Emulation Controls for Photovoltaic Inverters, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 3, Τεύχος 2, Ιούνιος 2012, Σελίδες 996-1011.
- [51] M. García-Gracia, N. El Halabi, H. Ajami, M. Comech, Integrated Control Technique for Compliance of Solar Photovoltaic Installation Grid Codes, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Τόμος 27, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2012, Σελίδες 792-798.
- [52] P. Moutis, E. Loukarakis, S. Papathanassiou, N.D. Hatziargyriou, Primary load-frequency control from pitch-controlled wind turbines, 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 28 Ιουνίου – 2 Ιουλίου 2009, Σελίδες 1-7.
- [53] P. Moutis, S. Papathanassiou, N.D. Hatziargyriou, Improved load-frequency control contribution of variable speed variable pitch wind generators, *Renewable Energy*, Τεύχος 48, Δεκέμβριος 2012, Σελίδες 514-523.
- [54] Network code on requirements for grid connection applicable to all generators (RfG), ENTSO-E (2011).
- [55] ABB string inverters PVI-3.0/3.6/4.2-TL-OUTD Product Manual, ABB (διαθέσιμο στον κόμβο: [http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/6d389ceb0688e230c1257d7100236d07/\\$file/PVI-3.0\\_3.6\\_4.2-TL-OUTD-Product%20manual%20EN.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/6d389ceb0688e230c1257d7100236d07/$file/PVI-3.0_3.6_4.2-TL-OUTD-Product%20manual%20EN.pdf). Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).
- [56] Panasonic AQ-A RELAYS (DC ONLY) Datasheet, Panasonic (διαθέσιμο στον κόμβο: [https://www3.panasonic.biz/ac/e\\_download/control/relay/solid-state/catalog/semi\\_eng\\_aqad.pdf?f\\_cd=401419](https://www3.panasonic.biz/ac/e_download/control/relay/solid-state/catalog/semi_eng_aqad.pdf?f_cd=401419). Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).



- [57] DC POWER SUPPLY HY3000-HY5000 double series Users Manual, Mastech (διαθέσιμο στον κόμβο:  
[http://hades.mech.northwestern.edu/images/f/f7/Mastech\\_power\\_supply\\_manual.pdf](http://hades.mech.northwestern.edu/images/f/f7/Mastech_power_supply_manual.pdf).  
Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).
- [58] TDS2000C and TDS1000C-EDU Series Digital Storage Oscilloscopes User Manual, Tektronix (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.tek.com/oscilloscope/tds2000-digital-storage-oscilloscope-manual/tds2000c-and-tds1000c-edu-series-0>. Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).
- [59] Current Probes A621 • A622 Data Sheet, Tektronix (διαθέσιμο στον κόμβο: [http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/60W\\_15081\\_2.pdf](http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/60W_15081_2.pdf).  
Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).

### 3.6 Προβληματική

Από όσα αναπτύχθηκαν στην παρούσα ενότητα προκύπτει αναπόδραστα το ερώτημα αν και κατά πόσο είναι πρακτικά αναμενόμενο να συμμετέχει μία στοχαστικού τύπου ΑΠΕ στη ΡΣ είτε ως μέρος ενός ΕιΣΠ είτε όχι.

Στην παρούσα φάση και όπως συζητήθηκε παραπάνω, τόσο οι κώδικες όσο και οι ημερήσιοι προγραμματισμοί παραγωγής ενδέχεται να ωθούν σε χαμηλότερη ισχύ εξόδου ή και σε σβέση κάποιο αριθμό γεννητριών ΑΠΕ για την προστασία και την οικονομικότητα προγραμματισμού του ΣΗΕ. Συνεπώς, η κείμενη κατάσταση, χωρίς θεώρηση ΕιΣΠ, ήδη δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την αξιοποίηση των απορριφθέντων ποσών ισχύος σε ΡΣ.

Αν οι στοχαστικού τύπου ΑΠΕ είναι μέρος ενός ΕιΣΠ, αναπτύσσεται μια περιπτώσιολογία στη βάση της σύνθεσης του κάθε ενός και στο πλαίσιο του βέλτιστου εσωτερικού προγραμματισμού του:

- Υψηλή συμμετοχή από μεγάλου μεγέθους στοχαστικού τύπου ΑΠΕ στον ΕιΣΠ

Η αναλογία αυτή ομοιάζει με την παρούσα κατάσταση, οπότε η στοχαστικότητα των Α/Γ και των Φ/Β συστημάτων θα οδηγήσει σε εξ αρχής περιορισμό της παραγωγής τους.

- Χαμηλή συμμετοχή από μεγάλου μεγέθους στοχαστικού τύπου ΑΠΕ στον ΕιΣΠ

Στην περίπτωση αυτή, οι μικρότερες πηγές εγγυημένης εξόδου θα δύνανται να αντισταθμίσουν τη στοχαστικότητα των σχετικών ΑΠΕ και, έτσι, η αποφόρτισή τους αναμένεται περιορισμένη.

- Υψηλή συμμετοχή από μικρού μεγέθους στοχαστικού τύπου ΑΠΕ στον ΕιΣΠ

Για το σενάριο αυτό, η εκκίνηση και λειτουργία θερμικού τύπου μονάδας/ων θα εξαναγκάζει για οικονομικούς λόγους σε μερική αποφόρτιση τις μονάδες με στοχαστικότητα.

- Χαμηλή συμμετοχή από μικρού μεγέθους στοχαστικού τύπου ΑΠΕ στον ΕιΣΠ

Η αποφόρτιση των Α/Γ και των Φ/Β συστημάτων αναμένεται να είναι ελάχιστη και να λειτουργούν σταθερά υπό στρατηγική μέγιστης απομάστευσης.

Εξαιρέση κοινή σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις είναι οι ώρες χαμηλού φορτίου, διότι όπως παρουσιάστηκε και στην Υποενότητα 2.7.2, ο χειριστής του ΕιΣΠ αναμένεται να προσφέρει ενέργεια μόνο εκ των φθηνότερων ΑΠΕ (Α/Γ και Φ/Β εν γένει), άρα η στοχαστικότητά τους είναι ζήτημα ανεξαρτήτως σύνθεσης του ΕιΣΠ. Επιπλέον, η ορολογία υψηλή/χαμηλή συμμετοχή και μικρού/μεγάλου μεγέθους μονάδα είναι σχετική. Όσο αφορά τη συμμετοχή, αυτή μπορεί να σχετίζεται με τη διαθέσιμη ισχύ και όχι με τα ονομαστικά μεγέθη, ενώ το μέγεθος μπορεί να λογίζεται τόσο σε απόλυτες τιμές όσο και συγκριτικά προς τις υπόλοιπες μονάδες του ΕιΣΠ.

Συμπερασματικά πάντως, φαίνεται ότι η συμμετοχή των στοχαστικής φύσης ΑΠΕ στη ΡΣ κατόπιν αποφόρτισης είναι εφικτή, αφού ακόμα και εκ του ήδη υπάρχοντος πλαισίου, υπάρχει διαθεσιμότητα εφεδρειών που μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τις μεθόδους που αναλύθηκαν.

# 4

## *Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας από εικονικό σταθμό παραγωγής με αποκοπή ενεργού ισχύος*

Στην προηγούμενη ενότητα αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι, ώστε η ΡΣ να είναι εφικτή ακόμα και από τις στοχαστικού τύπου μονάδες ΔΠ ενός ΕιΣΠ. Αν και οι τεχνικές, εν πρώτοις, απαντούν σε επίπεδο μικροσκοπικό και, κατά δεύτερον, συνιστούν το πλαίσιο για τη συμμετοχή όλων των πιθανών συντελεστών ενός ΕιΣΠ στην αγορά εφεδρειών, δεν απαντούν στη διαχείριση έκτακτων συμβάντων συχνότητας. Τα συμβάντα αυτά προκύπτουν κατόπιν της εξάντλησης των εφεδρειών (άρα αφορούν περιστατικά σχετικά ή πέραν του ημερήσιου προγραμματισμού λειτουργίας) και, συνήθως, αφορούν περιπτώσεις υπερσυχνότητας [1,2]. Ο διαχειριστής του ΣΗΕ, στην τελευταία περίπτωση, καλείται να αναπρογραμματίσει τις μονάδες αναλόγως. Για έναν ΕιΣΠ, τούτο μπορεί να είναι προετοιμασμένο για προκαθορισμένη ισχύ σαν πιθανό σενάριο κάθε επόμενης ώρας ή να ζητείται να υλοποιηθεί για οποιοδήποτε ποσό απόρριψης ισχύος (ζήτηση εκ μέρους του διαχειριστή) εντός λογικού χρονικού ορίζοντα. Είναι προφανές ότι με τα κατάλληλα κριτήρια οικονομικότητας και χωρίς να παραγνωρίζεται η ασάφεια του φορτίου, ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ μπορεί να συμμετάσχει με ικανοποιητικό τρόπο στην έκτακτου τύπου ΡΣ.

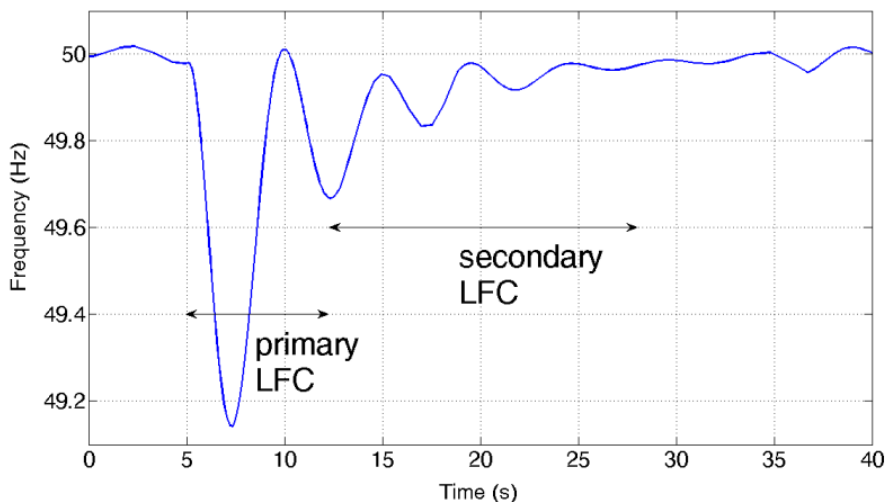
Μετά από μια αδρομερή παρουσίαση των παραμέτρων που σχετίζονται με τα διάφορα στάδια της ΡΣ και τις αντίστοιχες εφεδρείες, εξηγείται το πρόβλημα της υπερσυχνότητας. Τα δέντρα απόφασης χρησιμοποιούνται εκ νέου για την εξαγωγή προγραμματισμού αποφόρτισης του ΕιΣΠ προς απόκριση στην υπερσυχνότητα.

## 4.1 Τα στάδια ρύθμισης συχνότητας και το πρόβλημα της υπερσυχνότητας

### 4.1.1 Πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα ρυθμίσεις συχνότητας και εφεδρείες

Στην Υποενότητα 3.1.1 παρουσιάστηκε το πρόβλημα των διαταραχών συχνότητας ως αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος, εξηγήθηκε η ανάγκη να αποκαθίσταται η συχνότητα ΣΗΕ στην ονομαστική τιμή της και δόθηκε το ευρύτερο πλαίσιο του σχετικού ελέγχου στη βάση του στατισμού μονάδας. Ανάλογα με τον ορίζοντα εκδήλωσης του ελέγχου, η ΡΣ διαχωρίζεται σε πρωτεύουσα, δευτερεύουσα και τριτεύουσα [3,4].

Ενδεικτικά κατά το Σχήμα 4.1, η πρωτεύουσα ΡΣ εκδηλώνεται άμεσα και κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της διαταραχής, αποσκοπώντας στη σταθεροποίηση της συχνότητας, όχι όμως και στην επαναφορά της στην ονομαστική της τιμή. Η δευτερεύουσα ΡΣ ακολουθεί ή επικαλύπτεται μερικώς με την πρωτεύουσα, διαρκεί έως και 15 λεπτά μετά τη διαταραχή, επιτυγχάνει την αποκατάσταση της συχνότητας ΣΗΕ στην ονομαστική τιμή της και στοχεύει στο να επαναφέρει τις ανταλλασσόμενες ενεργές ισχύεις μεταξύ περιοχών του ΣΗΕ στις συμφωνημένες τιμές τους. Τέλος, η τριτεύουσα ΡΣ ακολουθεί – κατά περίπτωση – τη δευτερεύουσα και ενεργοποιείται με μη-αυτόματο τρόπο από τον εκάστοτε διαχειριστή, αποσκοπώντας στην απελευθέρωση δευτερεύουσας εφεδρείας που έχει δεσμευτεί για μεγάλο χρονικό διάστημα. Σε αρκετούς κώδικες ο συνδυασμός πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ρύθμισης συνιστούν τον αυτόματο έλεγχο γεννήτριας. Σε μη-διασυνδεδεμένα συστήματα δεν υπάρχει προδιαγραφή δευτερεύουσας ρύθμισης, αφού δεν υπάρχουν ανταλλαγές ισχύος.



Σχήμα 4.1. Φάσεις απόκρισης μονάδας ή ΣΗΕ στη ΡΣ κατόπιν αύξησης φορτίου ή απώλειας παραγωγής.

Σε απόλυτη αντιστοιχία με τις φάσεις ΡΣ που παρουσιάστηκαν, βρίσκονται οι σχετικές εφεδρείες που προετοιμάζονται από τον διαχειριστή στον προγραμματισμό επόμενης ημέρας [4]. Ονομάζονται αναλόγως του χρόνου εκδήλωσής τους ή της αιτίας εξασφάλισής τους. Σύμφωνα με την τελευταία παρατήρηση, η πρωτεύουσα εφεδρεία απαντάται ως στιγμιαία ή άμεση, ενώ η δευτερεύουσα ως ρυθμίζουσα, συμπληρωματική ή απροόπτου (contingency) [5]. Μόνη ουσιώδης διάκριση επί της εφεδρείας είναι η άνω/κάτω, δηλαδή αν αφορά αύξηση/μείωση ισχύος αντίστοιχα [4].

#### **4.1.2 Εμφάνιση υπερσυχνότητας σε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας**

Αν σε ένα ΣΗΕ έχει αποδοθεί πλήρως η κάτω δευτερεύουσα εφεδρεία μέσω ΡΣ, αλλά η παραγωγή πλεονάζει της κατανάλωσης, τότε η συχνότητα θα διατηρείται άνω της ονομαστικής τιμής της. Το φαινόμενο αυτό συνιστά την υπερσυχνότητα [3] και αντιμετωπίζεται, επί του παρόντος, με δράσεις εκτός του σχεδιασμένου ημερήσιου προγραμματισμού. Σε σχετική αναφορά του συντονιστή διαχειριστών των ευρωπαϊκών ΣΗΕ, καταγράφεται τέτοιο περιστατικό, το οποίο αντιμετωπίστηκε με αναδιανομή ισχύος κατά τη μέρα εκδήλωσης του φαινομένου, ενώ απαιτήθηκε αυξημένη κάτω εφεδρεία και για τις επόμενες μέρες [2].

Επιπλέον, από τους ήδη υπάρχοντες κώδικες δικτύων μπορούν να ανακύψουν κρίσιμες καταστάσεις για τα ΣΗΕ από σημαντική απόκλιση συχνότητας. Μόλις πρόσφατα και εν όψει της κατάστασης που αναλύθηκε στην εισαγωγή της *Υποενότητα 3.3*, αναγνωρίστηκε η ανάγκη επαναδιατύπωσης των σχετικών κανόνων που αφορούν την αποσύνδεση μονάδων ΔΠ από ΑΠΕ λόγω συχνότητας δικτύου (ζήτημα των 0.2Hz), με αύξηση των ανωφλιών αποκοπής τους.

## **4.2 Ανασκόπηση μεθόδων αντιμετώπισης υπερσυχνότητας**

Όπως γίνεται αντιληπτό από όσα συζητήθηκαν έως εδώ, η υπερσυχνότητα είναι αποτέλεσμα ελλείμματος κάτω εφεδρείας. Άρα, πρέπει να δοθούν αδρομερώς τα ρυθμιστικό και ερευνητικό πλαίσια που έχουν αναπτυχθεί γύρω από τον υπολογισμό και την εξασφάλισή της. Από αυτά θα φανεί ότι η κάτω εφεδρεία δεν είναι δυνατόν να κριθεί επαρκής σε κάθε περίπτωση. Επιπλέον, θα εξηγηθεί γιατί η υπερσυχνότητα μπορεί να αντιμετωπιστεί θετικότερα (για το ΣΗΕ) με αποκοπή ΔΠ, αντί με μείωση της συμβατικής παραγωγής.

Από τους ορισμούς που δόθηκαν στην *Υποενότητα 4.1.1*, η κάτω εφεδρεία, αν δε διευκρινίζεται διαφορετικά, θα συσχετίζεται – χωρίς να αναφέρεται ρητά – με τη δευτερεύουσα εφεδρεία. Ο λόγος είναι διότι απαιτείται μείωση ισχύος προς αποκατάσταση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή της και, άρα, αφορά γεννήτριες οι οποίες είναι εν λειτουργία και μπορούν να περιορίσουν την ενεργό ισχύ εξόδου τους με αυτόματο έλεγχο. Συχνά εξάλλου στους κώδικες δικτύων, θεωρείται ότι η κάτω δευτερεύουσα εφεδρεία είναι ίση με την άνω.

#### 4.2.1 Προδιαγραφές κωδίκων δικτύων Ευρώπης για την εξασφάλιση κάτω εφεδρείας

Στην [6] δίνεται μία σύγκριση των ορισμών, προδιαγραφών, μεθόδων διασφάλισης και υλοποίησης της απόδοσης των εφεδρειών που ζητούνται από τους κώδικες έξι ΣΗΕ της Ευρώπης και δύο των ΗΠΑ. Εδώ, σε σχέση ειδικότερα με την κάτω εφεδρεία και για την Ευρώπη, πέραν της σύνοψης των σημαντικότερων σημείων της προαναφερθείσας εργασίας, παρατίθεται ανάλυση από τις καταγραφές των δεδομένων των σχετικών διαχειριστών καθώς και στοιχεία για επιπλέον επτά ΣΗΕ.

Ο ENTSO-E, συντονιστής των Ευρωπαϊκών διαχειριστών ΣΗΕ, καταγράφει τέσσερις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της εφεδρείας [4]: (α) εμπειρική, (β) πιθανοτικής ανάλυσης, (γ) κάλυψη απώλειας μεγαλύτερης έγχυσης ή γεννήτριας και (δ) αντιμετώπιση έκτακτων συνθηκών. Οι (β) και (δ) δεν έχουν σαφές πλαίσιο και καθορίζονται λεπτομερώς από τον εκάστοτε διαχειριστή που τις εφαρμόζει. Όσο αφορά την (α) ο τύπος υπολογισμού είναι ο:

$$R = \sqrt{a \cdot L_{max} + b^2} - b \quad (4.1)$$

Όπου  $a=10\text{MW}$  και  $b=150\text{MW}$  παράμετροι που έχουν προσδιοριστεί εμπειρικά, και  $L_{max}$  η ισχύς αιχμής φορτίου του εκάστοτε ΣΗΕ. Βάσει της (4.1), η μέθοδος υπολογισμού εφεδρείας (γ) στη βάση θεώρησης των γεννητριών, μπορεί να υπερκαλύπτει την εφεδρεία εκ της (α). Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι  $L_{max}$  και η δευτερεύουσα εφεδρεία όπως υπολογίζεται από τις μεθόδους (α) και (γ) κατά ENTSO-E των πρώτων δεκατριών (ως προς την  $L_{max}$ ) ΣΗΕ της Ευρώπης.

Πίνακας 4.1. Δευτερεύουσα εφεδρεία κατά τις δύο ντετερμινιστικές μεθόδους εκ του [4]. Στοιχεία για το φορτίο ως εκ της [7] και για τις γεννήτριες ως εκ των [8-20].

	$L_{max}$ (MW)	Μέθοδος (α) από [4] (MW)	$G_{max}$ (MW)
Γαλλία	91720	819	1500
Γερμανία	83990	779	1400
Ηνωμένο Βασίλειο	57875	625	1195
Ιταλία	53668	598	1164
Ισπανία	43596	527	1080
Σουηδία	26015	382	1450
Πολωνία	22755	350	850
Νορβηγία	22129	344	1240
Ολλανδία	18049	301	860
Φινλανδία	14965	265	860
Βέλγιο	14081	254	1045
Τσεχία	10210	203	1053
Ελλάδα	9868	198	550

Όπου  $G_{max}$  η μεγαλύτερη μονάδα του εκάστοτε ΣΗΕ. Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η διατήρηση εφεδρείας ίσης προς τη μέγιστη έγχυση/γεννήτρια του εκάστοτε ΣΗΕ απαιτεί ποσό

ισχύος υψηλότερο (αν όχι τουλάχιστον διπλάσιο) από το αντίστοιχο της εμπειρικής μεθόδου. Μολαταύτα, ο ENTSO-E συστήνει ως ελάχιστη δευτερεύουσα εφεδρεία την ισχύ που υπολογίζεται κατά την εμπειρική μέθοδο μέσω της (4.1).

Βάσει του κώδικα του διαχειριστή του ΣΗΕ Γαλλίας [21], η δευτερεύουσα εφεδρεία (στη βάση του ορισμού που δόθηκε εδώ και όχι στον αναφερόμενο κανονισμό) υπολογίζεται περί τα 2000MW. Το ποσό αυτό προκύπτει ως άθροισμα 500MW ισχύος διαθέσιμης και αποδιδόμενης από τη χρονική στιγμή μηδέν του φαινομένου συχνότητας και 1500MW ισχύος με ορίζοντα απόδοσής της όχι μεγαλύτερου των 15 λεπτών από τη διαταραχή.

Σύμφωνα με μέθοδο πιθανοτικής ανάλυσης [22], η ισχύς δευτερεύουσας ρύθμισης για τους τέσσερις διαχειριστές του Γερμανικού ΣΗΕ καθορίζεται σε συνολικό ποσό περίπου 2000MW με αναπροσαρμογές και ακριβείς διορθώσεις σε εξαμηνιαία βάση [23].

Στο μη-διασυνδεδεμένο (παρά με HVDC προς την ηπειρωτική Ευρώπη) ΣΗΕ του Ηνωμένου Βασιλείου δεν υφίσταται δευτερεύουσα ρύθμιση – κατά τον αυστηρό ορισμό της – και η ρύθμιση συχνότητας ανατίθεται αποκλειστικά στους ρυθμιστές στροφών των σύγχρονων γεννητριών [5]. Παρά τούτο, ο διαχειριστής προβλέπει να διατίθεται ταχεία εφεδρεία ενεργού ισχύος για εξισορρόπηση παραγωγής-κατανάλωσης με απόδοση εντός 2 λεπτών από την εκδήλωση του φαινομένου συχνότητας [24]. Η ταχεία εφεδρεία σχεδιάζεται από τον διαχειριστή κάθε μήνα ξεχωριστά, με αναλυτική πρόβλεψη της εξασφάλισής της στη διάρκεια τυπικής ημέρας, η οποία χωρίζεται σε 48 ημίωρες περιόδους. Αν και μπορεί να ανέρχεται έως και τα 3000MW, κατά μέσο όρο συστήνεται και διατηρείται στα 300-400MW (στατιστικά δεδομένα τελευταίων 12 μηνών). Επιπλέον, λόγω της απουσίας δευτερεύουσας ρύθμισης, ο διαχειριστής του εν λόγω ΣΗΕ, προδιαγράφει και ποσότητα σταθεροποιητικής απόκρισης συχνότητας (firm frequency response) η οποία μπορεί να αποδίδεται είτε αυτόματα/δυναμικά είτε όχι [25]. Εκκαθαρίζεται κατά μέσο όρο στα 300MW για άνω εφεδρεία και στα 200MW για κάτω εφεδρεία (στατιστικά δεδομένα τελευταίων 6 μηνών).

Στο Ιταλικό ΣΗΕ ο διαχειριστής καθορίζει την ελάχιστη ισχύ δευτερεύουσας εφεδρείας ως ποσοστό επί της ονομαστικής των σταθμών σε λειτουργία [26]. Πιο συγκεκριμένα απαιτείται ισχύς 15% επί της ονομαστικής από κάθε υδροηλεκτρικό σταθμό και 6% επί της ονομαστικής κάθε μονάδας θερμικού τύπου με ελάχιστη συμμετοχή τα 10MW από κάθε μία. Κατά τα ανωτέρω, η εφεδρεία δευτερεύουσας ρύθμισης για την Ιταλία κυμαίνεται μεταξύ 1300-3200MW αναλόγως από την κοιλάδα ως την αιχμή φορτίου.

Παρόμοια, στην Ισπανία, η Γενική Γραμματεία Ενέργειας καθορίζει τη δευτερεύουσα εφεδρεία ως ποσοστό επί της μέγιστης ισχύος φορτίου ημέρας που προβλέπεται [27]. Αναλυτικότερα, αν η μεταβλητότητα του φορτίου είναι υψηλή, ζητείται ισχύς ίση με  $6\sqrt{P_{max}}$  (όπου το  $P_{max}$  αναφέρεται στον ορίζοντα προγραμματισμού μιας μέρας) και η μισή αυτής για πιο περιορισμένες μεταβολές φορτίου. Υποθέτοντας υψηλή μεταβλητότητα κατανάλωσης, μπορεί να προσεγγιστεί ένα εύρος

ισχύος δευτερεύουσας εφεδρείας 800-1300MW. Η ετήσια αναφορά του διαχειριστή του ισπανικού ΣΗΕ καταγράφει μικρότερους μέσους μηνιαίους όρους σε εύρος 690-760MW [28].

Για το σουηδικό ΣΗΕ, σύμφωνα με νομοθεσία του Υπουργείου Βιομηχανίας [29], ο διαχειριστής καλείται να εξασφαλίζει εφεδρεία ισχύος κατά μέγιστο 2000MW από γεννήτριες και διακοπτόμενο φορτίο (μέσω DSM). Υπάρχει περίπτωση η ισχύς αυτή να είναι μικρότερη της προκαθορισμένης, αν δε συγκεντρωθεί ικανό φορτίο από DSM για λόγους αγοράς ή ιδιαίτερων συνθηκών. Από τις 16 Μαρτίου 2015 η συμμετοχή των γεννητριών καλείται να μην ξεπερνάει τα 750MW και, ως εκ τούτου, αντίστοιχα να περιορίζεται και η κάτω εφεδρεία [30]. Ας σημειωθεί πάντως, ότι οι εν λόγω οδηγίες έχουν παραταθεί επανειλημμένως από την αρχική τους προθεσμία η οποία ήταν το έτος 2008. Από τα στατιστικά δεδομένα [31] η άνω εφεδρεία προσεγγίζεται κατά μέσο όρο στα 2200MW, η κάτω όμως περιορίζεται στα 1500MW.

Στην Πολωνία υπάρχει διαχωρισμός μεταξύ άνω και κάτω εφεδρείας. Η πρώτη καλείται να ισούται με 9% της ζητούμενης ισχύος, ενώ η δεύτερη να διατηρείται σταθερά ίση προς 500MW ανεξαρτήτως συνθηκών φόρτισης του δικτύου [32].

Στο νορβηγικό ΣΗΕ, ο διαχειριστής του ανέπτυξε από τα τέλη του 2000 αγορά τέτοια που να εξασφαλίζει ισχύ δευτερεύουσας εφεδρείας με κατώφλι 2000MW [33]. Στην πράξη [31] και κατά μέσο όρο το ποσό άνω εφεδρείας που διατίθεται είναι έως και τριπλάσιο της ελάχιστης προδιαγραφής που τέθηκε, ενώ της κάτω εφεδρείας προσεγγίζεται στα 1500MW.

Στην Ολλανδία η δευτερεύουσα εφεδρεία ακολουθεί τη σύσταση του ENTSO-E και ισούται με 300MW. Η κάτω εφεδρεία μπορεί να είναι, κατά περίπτωση, ελαφρώς μεγαλύτερη (περί τα 500MW κατά τα δεδομένα του διαχειριστή). [34]

Ο διαχειριστής του φινλανδικού ΣΗΕ προσδιορίζει το ποσό ισχύος της δευτερεύουσας ρύθμισης στα 1634MW, αποτελούμενο από 1229MW παραγωγής και 405MW διακοπτόμενου φορτίου [35]. Εν προκειμένω, γίνεται αντιληπτό ότι η κάτω εφεδρεία δεν μπορεί να είναι άνω των 1229MW, ενώ από τα δεδομένα [31] προσδιορίζεται στα 600-700MW.

Στο βελγικό ΣΗΕ ο διαχειριστής ήταν έως πολύ πρόσφατα απόλυτα εναρμονισμένος με τον κώδικα του ENTSO-E για τις εφεδρείες ισχύος. Μόλις για το έτος 2013 πρότεινε μία πιθανοτική μέθοδο προσδιορισμού των εφεδρειών [36], η οποία καθορίζει δευτερεύουσα εφεδρεία (με ενεργοποίηση αυτόματη και χειροκίνητη κατά τους ιδιαίτερους ορισμούς για το αναφερόμενο δίκτυο) στα 922MW. Το ποσό της δευτερεύουσας εφεδρείας που ενεργοποιείται απολύτως αυτόματα ανέρχεται στα 140MW.

Στο τσεχικό ΣΗΕ, ο κώδικας του διαχειριστή επίσης ακολουθεί τη σύσταση του ENTSO-E για δευτερεύουσα εφεδρεία που προσεγγίζεται κατά ελάχιστο στα 200MW [37]. Τα δεδομένα της αγοράς [38] επιβεβαιώνουν το όριο, αν και για την κάτω εφεδρεία το αντίστοιχο ποσό είναι μικρότερο και ίσο περίπου με 150MW.



Ο διαχειριστής του ελληνικού ΣΗΕ, εναρμονισμένος και αυτός με τον ευρωπαϊό συντονιστή, διατηρεί δευτερεύουσα εφεδρεία κατά την ελάχιστη σύσταση της εμπειρικής μεθόδου στα 200MW. [39]

Στον Πίνακα 4.2 συγκεντρώνεται η παραπάνω ανάλυση. Περιλαμβάνονται οι ισχύεις φορτίου αιχμής και κοιλάδας κάθε ΣΗΕ, η μεγαλύτερη πηγή κάθε ενός, η ισχύς κάτω εφεδρείας όπως συστήνεται κατά τον κώδικα ή όπως διατηρείται πραγματικά (αναλόγως ποια είναι μεγαλύτερη, εκτός και αν ορίζεται ειδικά) και το ποσοστό της τελευταίας επί της ισχύος κοιλάδας του ΣΗΕ.

Πίνακας 4.2. Φορτίο αιχμής, μέγιστη μονάδα, μέγιστη δευτερεύουσα κάτω εφεδρεία, φορτίο κοιλάδας και ποσοστό προτελευταίας προς τελευταίο ανά ΣΗΕ. Στοιχεία για το φορτίο ως εκ της [7] και για τις γεννήτριες ως εκ των [8-20].

	$L_{max}$ (MW)	$G_{max}$ (MW)	$P_r$ (MW)	$L_{min}$ (MW)	$P_r / L_{min}$ (%)
Γαλλία	91720	1500	2000	31268	6,4
Γερμανία	83990	1400	2000	35597	5,6
Ηνωμένο Βασίλειο	57875	1195	600	20001	3,0
Ιταλία	53668	1164	1300	20582	6,3
Ισπανία	43596	1080	800	17989	4,4
Σουηδία	26015	1450	1500	9261	16,2
Πολωνία	22755	850	500	9476	5,3
Νορβηγία	22129	1240	1500	8665	17,3
Ολλανδία	18049	860	500	8167	6,1
Φινλανδία	14965	860	1229	5219	23,5
Βέλγιο	14081	1045	922	6336	14,6
Τσεχία	10210	1053	150	4315	3,5
Ελλάδα	9868	550	200	3356	6,0

#### 4.2.2 Ερευνητική προσέγγιση της κάτω εφεδρείας

Στην πλειονότητα των κωδίκων/κανονισμών που συζητήθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, η ισχύς δευτερεύουσας εφεδρείας υπολογίζεται σχεδόν ίση με την ισχύ που προκύπτει από εφαρμογή της  $N-1$  ανάλυσης για τους σταθμούς παραγωγής κάθε ΣΗΕ. Αν λαμβάνεται ιδιαίτερη πρόνοια για την κάτω εφεδρεία, μπορεί εναλλακτικά να εφαρμόζεται  $N-1$  ανάλυση για τους ζυγούς φορτίου.

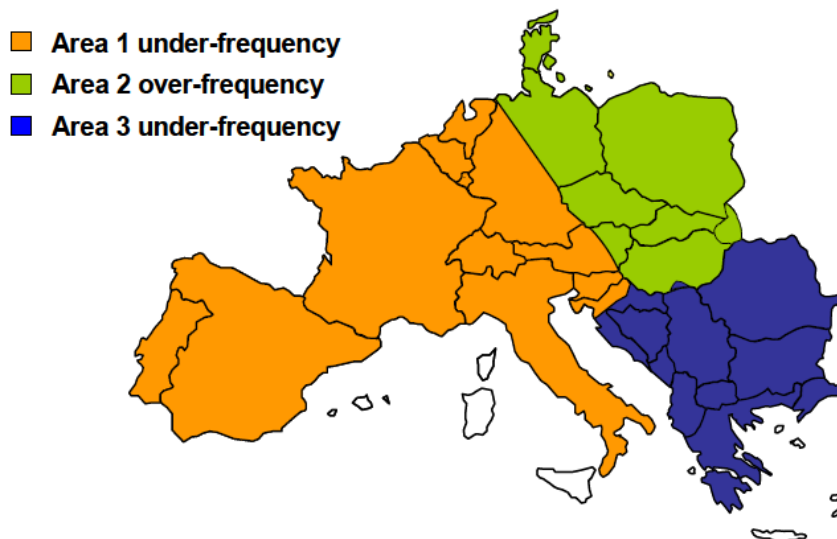
Στην [40] υποστηρίζεται ότι η άνω και η κάτω εφεδρείες μπορούν να αντιστοιχίζονται μονοσήμαντα προς τις σχετικές  $N-1$  αναλύσεις, μόνο αν αγνοούνται οι περιορισμοί λειτουργίας του ΣΗΕ. Ως χαρακτηριστικό αντιπαράδειγμα δίνεται η συμφόρηση γραμμής (και πιθανή αποσύνδεσή της), η οποία ενδέχεται να οδηγήσει μερικές γεννήτριες στην αύξηση ισχύος και, ταυτόχρονα, κάποιες άλλες σε μείωση. Για το σκοπό αυτό, προτείνεται ένας βέλτιστος προγραμματισμός που λαμβάνει υπ' όψιν  $K$  αξιόπιστα (ως προς την εκδήλωσή τους) σενάρια

διαταραχών εξετάζοντας τη συνολικά βέλτιστη λύση της ισχύος λειτουργίας και των ποσών εφεδρειών των πηγών. Ως πιθανές διαταραχές εννοούνται η απώλεια κάποιας μονάδας παραγωγής, η απώλεια κλάσματος ισχύος από μονάδες παραγωγής, μια μεταβολή φορτίου και η απώλεια κάποιας/ων γραμμής/ών του ΣΗΕ.

Το ζήτημα του πλεονάσματος παραγωγής έναντι φορτίου αναφέρεται ειδικά στην [41]. Μελετάται στη βάση παραγωγή αιολικής ισχύος μεγαλύτερης της σχετικής πρόβλεψης σε συνδυασμό με μείωση του φορτίου. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσεται αγορά προγραμματισμού βραχυπρόθεσμου ορίζοντα με στοχαστικά κριτήρια ασφάλειας. Σύμφωνα με την αναφερόμενη εργασία, η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ισχύος θα σημάνει και την αύξηση της συμμετοχής της στην κάτω εφεδρεία. Τούτο αιτιολογείται στη βάση του κοινωνικού κόστους καθώς και του κομβικού ρόλου των συμβατικών πηγών στα ΣΗΕ (στρεφόμενη αδράνεια, ρύθμιση τάσης, κτλ).

### ***4.3 Ιδέα αντιμετώπισης της υπερσυχνότητας από εικονικό σταθμό παραγωγής***

Σε πρακτικό επίπεδο, το συμβάν υπερσυχνότητας του Γερμανικού ΣΗΕ την 24<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2012 καθώς και η ανάγκη αυξημένων κάτω εφεδρειών κατά τις ημέρες που το ακολούθησαν [2], αποτελούν απόδειξη ότι παρά την πρόνοια που λαμβάνεται από τους κώδικες, ο προγραμματισμός ενδέχεται – σε εξαιρετικές περιπτώσεις – να αποτύχει. Επιπλέον, έκτακτες καταστάσεις σε ευρύτατα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ μπορούν να οδηγήσουν σε ιδιαίτερες συνθήκες, οι οποίες είναι σίγουρα εκτός προγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, την 4<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2006, μία διαταραχή στην περιοχή ελέγχου ενός εκ των τεσσάρων διαχειριστών του γερμανικού ΣΗΕ οδήγησε στο άνοιγμα διακοπών διασύνδεσης σε Γερμανία, Αυστρία, Κροατία και Ουγγαρία χωρίζοντας το διασυνδεδεμένο ΣΗΕ της Ευρώπης σε τρεις ηλεκτρικές νησίδες (νοτιοανατολική Ευρώπη, βορειοανατολική Ευρώπη και υπόλοιπο Ευρώπης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Νησιδοποίηση του ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου ΣΗΕ κατά τη διαταραχή της 4<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2006 και κατάσταση συχνότητας των νησίδων [1].

Δυο εκ των νησίδων βρέθηκαν σε κατάσταση υποσυχνότητας και η τρίτη σε υπερσυχνότητα. Μία παρατήρηση του ENTSO-E (ως UCTE τότε) που συνέταξε την αναφορά της εν λόγω διαταραχής, αφορούσε την αδυναμία των διαχειριστών της περιοχής που βρέθηκε σε υπερσυχνότητα, να χειριστούν απομακρυσμένα και αυτόματα τη μεγάλη ΔΠ, ώστε να την περικόψουν και να επαναφέρουν ταχύτερα την εν λόγω ηλεκτρική νησίδα σε ευστάθεια.

Το τελευταίο σημείο συνδέεται ευθέως και με τις διαπιστώσεις στην [41], σύμφωνα με την οποία η περικοπή αιολικής ισχύος (στη βάση της στοχαστικότητάς της) για την αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας αποδίδει χαμηλότερο κοινωνικό κόστος, ανεξάρτητα του ότι αφορά μια δωρεάν ΑΠΕ, η οποία είναι διαθέσιμη σύμφωνα με καιρικές συνθήκες. Συνάγεται δηλαδή, ότι ο χειρισμός των ΑΠΕ και εν γένει μονάδων ΔΠ είναι μία αναγκαία λύση για τη μείωση της παραγωγής κατά την εκδήλωση τέτοιων διαταραχών.

Είναι εμφανές ότι η προσέγγιση που παρουσιάστηκε από την έως εδώ ανασκόπηση δρα σε αντίθετη κατεύθυνση από την προσπάθεια ενίσχυσης της διείσδυσης της ΔΠ και ειδικά των μονάδων στοχαστικής φύσεως. Η ένταξή τους όμως, υπό την οντότητα του ΕιΣΠ, μπορεί να αποδώσει θετικά. Πρώτον, συγκροτείται μια συμπαγής δομή προς την οποία ο εκάστοτε διαχειριστής μπορεί να απευθυνθεί και ρυθμίσει συνολικά ως ισχύ και όχι πηγή προς πηγή. Δεύτερον, η επιμέρους στοχαστικότητα των μονάδων ΔΠ εξομαλύνεται από το μείγμα ισχύος. Τρίτον, στα πλαίσια του κάθε ΕιΣΠ μπορεί να αναπτυχθεί σχεδιασμός τέτοιος που να αξιοποιεί το μέγιστο δυνατό δυναμικό των ΑΠΕ, ακόμα και των στοχαστικών, ενώ ταυτόχρονα θα περιορίζει την ισχύ του ΕιΣΠ κατά τις επιταγές του διαχειριστή για φαινόμενα υπερσυχνότητας.

Για τους ίδιους λόγους όμως που αναλύθηκαν στην *Υποενότητα 2.2* σχετικά με την αναδιανομή της απώλειας μιας μονάδας του ΕιΣΠ, όμοια και εδώ ένας προγραμματισμός αποφόρτισης του ΕιΣΠ, στο περιβάλλον ενός ΣΗΕ με εγγενή ασάφεια και στοχαστικότητα, μπορεί να υλοποιηθεί με

πολύ μεγάλο αριθμό διαφορετικών, πιθανών συνδυασμών. Εκ νέου, συνεπώς, προτείνεται η χρήση των ΔΑ όπως αυτά παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στις 2.3 και 2.7.

#### **4.4 Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας μέσω αποκοπής ισχύος**

##### ***εικονικού σταθμού παραγωγής με δέντρα αποφάσεων***

Ο προγραμματισμός αποκοπής ισχύος που καλείται να υλοποιήσει ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ μπορεί να προετοιμάζεται είτε τακτικά από την ώρα  $t$  για την ώρα  $t+1$  για δεδομένο ποσοστό της ανατεθείσας ισχύος του, είτε σε λογικό χρόνο κατόπιν εντολής του εκάστοτε διαχειριστή για ποσοστό/ποσό ισχύος που θα ζητηθεί ειδικά. Οι κανόνες που θα προκύπτουν από το ΔΑ θα είναι οι προγραμματισμοί της εν λόγω αποκοπής. Παρακάτω θα οριστεί το πλαίσιο, οι αλγόριθμοι και οι παράμετροι της μεθοδολογίας.

##### **4.4.1 Αποκοπή ισχύος**

Από τον Πίνακα 4.2, φάνηκε ότι σχεδόν για όλα τα ΣΗΕ, η κάτω εφεδρεία κάθε ενός δεν αντιπροσωπεύει ποσοστό μεγαλύτερο του 20% της παραγόμενης ισχύος του – αφού ανήχθη και στην ισχύ φορτίου κοιλάδας. Ταυτόχρονα, η ΔΠ αθροιστικά δεν είναι συγκρίσιμη με τη συμβατική. Από αυτά μπορεί με ασφάλεια να υποθεθεί ότι σε περίπτωση υπερσυχνότητας, ο διαχειριστής του ΣΗΕ θα ζητήσει από τους διάφορους ΕιΣΠ αποκοπή ισχύος σαφέστατα μεγαλύτερη του 20% της εγγερόμενης από κάθε έναν. Στην πορεία της παρούσης θα εξεταστεί αποκοπή 30% και 50%.

##### **4.4.2 Μέθοδος προγραμματισμού αποκοπής ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής με δέντρα αποφάσεων**

###### **4.4.2.1 Προαπαιτούμενα της μεθοδολογίας**

Σχεδόν όμοια με τα όσα προαπαιτούνταν για την κάλυψη απώλειας ισχύος του ΕιΣΠ στην *Ενότητα 2*, για την προτεινόμενη μέθοδο αποκοπής ισχύος ζητούνται:

- Ο ωριαίος προγραμματισμός ημέρας του ΕιΣΠ [42],
- Πρόβλεψη/εκτίμηση του φορτίου για την ώρα  $t+1$  [43,44],
- Η τιμή αγοράς ενέργειας, εφεδρειών, φορτίου ΕιΣΠ, κτλ.,
- Οι συναρτήσεις κόστους όλων το μονάδων των ΕιΣΠ συμπεριλαμβανομένων και των μέσων αποθήκευσης και
- Στοιχειώδες σύστημα τηλεπικοινωνίας για ανταλλαγή μετρήσεων και οδηγιών μεταξύ του διαχειριστή του ΕιΣΠ και των συντελεστών του [45].

#### 4.4.2.2 Δημιουργία συνόλου μάθησης για την εκπαίδευση του δέντρων απόφασης

Η δημιουργία του ΣΜ εκτελείται μέσω Monte Carlo προσομοιώσεων για τις καταστάσεις προ και κατόπιν της ζητούμενης αποκοπής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα:

- Το φορτίο όλων των ζυγών του θεωρούμενου ΣΗΕ λαμβάνει τυχαία τιμή μεταξύ της τιμής του για την ώρα  $t$  και της πρόβλεψης/εκτίμησής του για την ώρα  $t+1$  ένα-προς-ένα,
- Η ανατεθείσα εφεδρεία κάθε μονάδας ΔΠ, διαιρείται σε τέταρτα και δεσμεύεται τυχαία (ενδεχομένως δηλαδή να έχει κληθεί προς ρύθμιση από τον διαχειριστή) – σημειώνεται εδώ ότι αν και για συνθήκες υπερσυχνότητας, θα ήταν λογικά αναμενόμενο να έχει κληθεί μηδενική εφεδρεία από τις πηγές, δεν μπορεί να αποκλειστεί η αντίθετη περίπτωση για λόγους ροών ρεύματος, αγοράς ή εντολές προηγούμενων ωρών ίδιου ωριαίου προγραμματισμού με την  $t+1$  και
- Η ζητούμενη ποσοστιαία αποκοπή ισχύος διανέμεται με τυχαίο τρόπο σε όλες τις πηγές της ΔΠ που βρίσκονται σε λειτουργία.

Σε κάθε περίπτωση, όλες οι μονάδες ΔΠ και τα ελεγχόμενα φορτία του ΕισΠ ρυθμίζονται εντός των τεχνικών ελαχίστων και των διαθέσιμων μεγίστων τους. Οι προγραμματισμοί διανομής της αποκοπής ισχύος αξιολογούνται ως ακολούθως.

Για όλους τους πιθανούς προγραμματισμούς διανομής της αποκοπής, υπολογίζεται το κέρδος/κόστος τους κατά την (4.2):

$$\begin{aligned} \text{Dispatch Cost} = & -\rho_{E,t+1}E_{t+1} + \rho_{R,t+1}R_{t+1} + \rho_{L,t+1}\widetilde{\text{Load}}_{t+1} - \sum_{i \in S_{DG}} [C_{DG,i,t+1}(P_{DG,i,t+1} + \\ & + R_{DG,i,t+1})I_{i,t+1} + SC_{DG,i,t+1}J_{i,t+1}] - \sum_{i \in S_{int}} C_{int,i,t+1}R_{curt,i,t+1} - \sum_{i \in S_{str}} C_{str,i,t+1}(P_{str,i,t+1}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Λεπτομέρειες των μεταβλητών και παραμέτρων της (4.2) δίνονται αναλυτικά στην Υποενότητα 2.4.2.2. Βάσει των τιμών της παραπάνω συνάρτησης για όλες τις πιθανές διανομές της ζητούμενης αποκοπής, προσδιορίζεται η τιμή εκείνη που διαχωρίζει το άνω  $X\%$  από το κάτω  $(100-X)\%$ . Κάθε προγραμματισμός διανομής κρίνεται ως Αποδεκτός (Αληθής) τόσο αν τηρούνται οι τεχνικοί περιορισμοί (τάσεως ζυγών [46], φόρτισης  $M/\Sigma$  και γραμμών [47,48]), όσο και αν η τιμή του ως εκ της (4.2) είναι μεγαλύτερη του κατωφλίου κέρδους. Για κάθε ΣΜ εξετάζεται ένας αριθμός κατωφλίων του  $X\%$  από 10-60% με βήμα 5%. Άρα, από το ίδιο ΣΜ, εκπαιδεύονται ΔΑ με διαφορετική οικονομικότητα κάθε ένα.

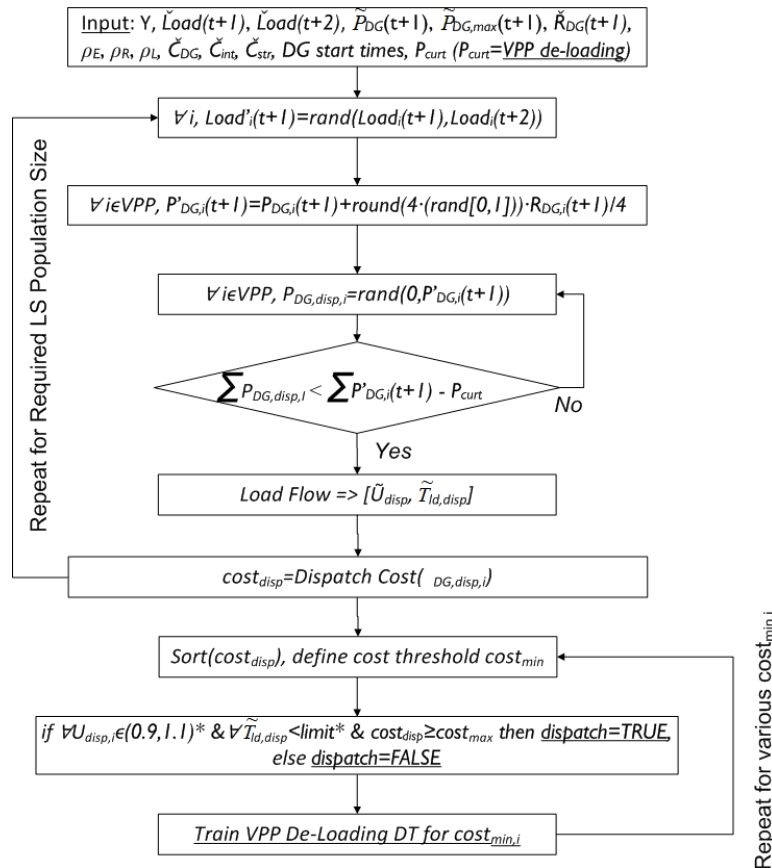
Ο αλγόριθμος για τη δημιουργία του ΣΜ αναπτύχθηκε στο περιβάλλον MATLAB® (έκδοση 7.6.0 του 2008a) και εκτελέστηκε με το Parallel Computing Toolbox™.

#### 4.4.2.3 Εκπαίδευση του δέντρου απόφασης

Η εκπαίδευση του ΔΑ (ενός για κάθε κατώφλι οικονομικότητας που εφαρμόστηκε στο ΣΜ), του οποίου οι κανόνες Αποδεκτών φύλλων που εξάγονται είναι και οι προγραμματισμοί διανομής της ζητούμενης αποκοπής ισχύος του ΕισΠ, γίνεται σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στην Υποενότητα 2.4.3.3. Εξαιρέση αποτελεί μόνο η περίπτωση που ένα ΔΑ δεν αποδίδει Αποδεκτό φύλλο, οπότε και στην παρούσα μέθοδο, ο αδιέξοδος κόμβος της υψηλότερης καθαρότητας δε θα θεωρείται κατά εξαιρέση φύλλο του ΔΑ. Ο λόγος για την αλλαγή της υπόθεσης είναι ότι για κάθε ΣΜ εξετάζονται πολλαπλά κατώφλια κέρδους, άρα σε κάθε περίπτωση θα υπάρχει τουλάχιστον ένα εξ αυτών που να παράγει προγραμματισμό αποκοπής. Αν η τελευταία πρόταση δεν ισχύει, τότε δε θα υπήρχε γνώση συστηματικών χαρακτηριστικών να εξαχθεί για το εν λόγω πρόβλημα [49].

Ο ξεχωριστός έλεγχος μηδενικής εξόδου των συντελεστών του ΕισΠ στα Αποδεκτά φύλλα των ΔΑ της μεθόδου, όπως περιγράφηκε στην Υποενότητα 2.4.3.3, εφαρμόζεται και εδώ. Οι μονάδες ΔΠ οι οποίες προσδιορίζονται ως μηδενικής εξόδου κατά τον έλεγχο αυτό σημαίνονται με υπογράμμιση.

Συνολικά, η μέθοδος παρουσιάζεται από το διάγραμμα ροής της στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου αντιμετώπισης υπερσυχνότητας από ΕισΠ, μέσω αποφόρτισης του κατά ζητούμενο ποσό ισχύος με χρήση ΔΑ.

## 4.5 Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας μέσω αποκοπής ισχύος

### εικονικού σταθμού παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής

### ενέργειας της Ικαρίας

Για τις ανάγκες δοκιμής της προτεινόμενης μεθόδου θα χρησιμοποιηθεί η διανομή R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας, όπως αυτή παρουσιάστηκε και στην Υποενότητα 2.5. Λεπτομέρειες δίνονται και στο Παράρτημα Γ'. Τα σενάρια των ΕισΠ (ξαναπαρουσιάζονται εδώ) και φορτίσεων (βλ. 2.5.1.1) που θα εξεταστούν θα είναι επίσης όμοια με αυτά του Κεφαλαίου 2. Εξαιρείται μόνο η περίπτωση της Χειμερινής Μη-Βέλτιστης φόρτισης, διότι αφορούσε τη διερεύνηση της ικανότητας των ΔΑ να εντοπίζουν ικανοποιητική λύση ακόμα και όταν η προϋπόθεση του βέλτιστου ωριαίου προγραμματισμού δεν υφίστατο.

#### 4.5.1 Δοκιμή μεθόδου με μικρό εικονικό σταθμό παραγωγής

Υπενθυμίζονται στον Πίνακα 4.3 τα χαρακτηριστικά του μικρού ΕισΠ. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει είναι 680kW. Διευκρινίζεται ότι το κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας δίνεται σε σχετική ισοτιμία και όχι απόλυτες τιμές.

Πίνακας 4.3. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μικρού ΕισΠ.

Ζυγός	Τύπος ΔΠ - Ισοδύναμος Συμβολισμός	$P_n$ (kW)	$P_{min}$ (kW)	$C(P\%)$ (eq/kWh)
5	Diesel - D@5	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
7	Diesel - D@7	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
12	Diesel - D@12a	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
12	Diesel - D@12b	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
19	Diesel - D@19	20.1	6	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
43	Wind Park - WP@43	200.1	4	0
58	Geothermal - G/T@58	50.1	12	$0.09 \cdot P^2 - 0.13 \cdot P + 0.07$
89	Biomass - B/M@89	99.9	30	$0.23 \cdot P^2 - 0.32 \cdot P + 0.07$
126	PV-Hydro Hybrid - PV+H@126	150	4	0.03
----	Διακοπτόμενο φορτίο	80	0	$C_{int}$

##### 4.5.1.1 Σενάρια φόρτισης συστήματος

Θα εξεταστούν τα σενάρια που περιγράφηκαν στην Υποενότητα 2.5.1.1 με εξαίρεση το Χειμερινό Μη-Βέλτιστο. Στο Χειμερινό Τεχνικό σενάριο δεν αναμένεται να παρατηρηθεί παραβίαση του ορίου φόρτισης του Μ/Σ που αντιστοιχεί στη μονάδα ΔΠ G/T@58 – εξ ου και θα καλείται απλά Χειμερινό. Η επιτυχία εκπλήρωσης των τεχνικών περιορισμών από την προτεινόμενη μέθοδο θα φανεί παρακάτω στη δοκιμή με τον μεγάλο ΕισΠ, υπό το θερινό σενάριο φόρτισης.

Για οικονομία χώρου και ευκολότερη προσπέλαση των αποτελεσμάτων θα παρουσιάζονται οι κανόνες των ΔΑ μεταξύ των κατωφλίων 30% και 10% οικονομικότητας.

#### 4.5.1.2 Αποτελέσματα

Οι κανόνες/προγραμματισμοί είναι εκφρασμένοι σε kW.

##### a. Χειμερινό

Ο προ αποκοπής προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{t,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	0	0
D@7	20.1	0	0
D@12a	20.1	0	0
D@12b	20.1	0	0
D@19	20.1	0	0
WP@43	200.1	70.035	0
G/T@58	50.1	30.06	10.02
B/M@89	99.9	0	0
PV+H@126	150	49.5	10.5

Οι προγραμματισμοί διανομής αποκοπής 30% και 50% της εγγεόμενης ισχύος του ΕιΣΠ για τα διάφορα κατώφλια κέρδους/κόστους δίνονται στους Πίνακες 4.5 και 4.6 αντιστοίχως.

Πίνακας 4.5. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-30% κέρδος	i. <i>if</i> (WP@43≥68) <i>then</i> TRUE ( <b>purity&gt;93%</b> )
Άνω-25% και Άνω-20% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ
Άνω 15% κέρδος	i. <i>if</i> (WP@43≥68) <i>and</i> (G/T@58=OFF) <i>and</i> (PV+H@126≥34) <i>then</i> TRUE ( <b>purity≈93%</b> )
Άνω-10% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ

Πίνακας 4.6. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-30% και Άνω-25% κέρδος	i. <i>if</i> (WP@43≥45) <i>then</i> TRUE ( <b>purity&gt;91%</b> )
Άνω-20% και Άνω-15% κέρδος	i. <i>if</i> (WP@43≥60) <i>and</i> (G/T@58=OFF) <i>then</i> TRUE ( <b>purity&gt;96%</b> )
Άνω-10% κέρδος	i. <i>if</i> (WP@43≥60) <i>and</i> (G/T@58=OFF) <i>then</i> TRUE ( <b>purity≈93%</b> )



b. Θερινό

Ο προ αποκοπής προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.7. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μικρού ΕιΣΠ υπό το Θερινό σενάριο φόρτισης προ απώλειας.

Πηγή@Ζυγό	P <sub>n</sub> (kW)	P <sub>t+1</sub> (kW)	P <sub>t,t+1</sub> (kW)
D@5	20.1	0	0
D@7	20.1	10.05	0
D@12a	20.1	10.05	0
D@12b	20.1	10.05	0
D@19	20.1	10.05	0
WP@43	200.1	110.05	0
G/T@58	50.1	35.07	0
B/M@89	99.9	59.94	19.98
PV+H@126	150	100.5	0

Οι προγραμματισμοί αποκοπής ισχύος 30% και 50% από τις πηγές της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνονται στους Πίνακες 4.8 και 4.9.

Πίνακας 4.8. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Ανω-30% κέρδος	i. <i>if (WP@43&gt;84) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈93%)</i>
	ii. <i>if (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥104) then TRUE (purity≈93%)</i>
	iii. <i>if (79≤WP@43&lt;90) and (G/T@58≥30) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126≥90) then TRUE (purity≈95%)</i>
Ανω-25% κέρδος	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥109) then TRUE (purity≈92%)</i>
	ii. <i>if (WP@43≥104) and (G/T@58≥30) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126&lt;75) then TRUE (purity≈95%)</i>
	iii. <i>if (WP@43≥104) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126≥75) then TRUE (purity≈97%)</i>
	iv. <i>if (D@19=OFF) and (89≤WP@43&lt;109) and (G/T@58&lt;35) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity&gt;96%)</i>
Ανω-20% κέρδος	i. <i>if (D@19=OFF) and (WP@43≥84) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈94%)</i>
	ii. <i>if (D@12a=OFF) and (D@12b&lt;10) and (84≤WP@43&lt;109) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity=100%)</i>
	iii. <i>if (D@7=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥99) and (B/M@89≥55) then TRUE (purity=100%)</i>
Ανω-15% κέρδος	i. <i>if (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥79) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity&gt;94%)</i>
Ανω-10% κέρδος	i. <i>if (WP@43≥104) and (G/T@58≥25) and (B/M@89=OFF) and (75≤PV+H@126&lt;85) then TRUE (purity≈93%)</i>
	ii. <i>if (WP@43≥104) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126≥85) then TRUE (purity≈99%)</i>

Στους παραπάνω προγραμματισμούς, οι μονάδες diesel, όπου εμφανίζονται, μπορεί να εναλλάσσονται μεταξύ τους (εκτός της D@5), λόγω της όμοιας προ αποκοπής λειτουργίας τους και των ταυτόσημων χαρακτηριστικών κόστους τους. Για το κατώφλι κέρδους 30% το ΔΑ μπορεί να δίνει τον κανόνα (i) ή τους κανόνες (i-iii) μαζί, για οικονομικότητα άνω του 25% το ΔΑ μπορεί να παράγει τους προγραμματισμούς (i-iii) ή τους (iii,iv), ενώ για κέρδος τουλάχιστον στο άνω 20% το σχετικό ΔΑ αποδίδει τους κανόνες (i,ii) ή τους (ii,iii).

Πίνακας 4.9. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μικρού ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-30% κέρδος	i. <i>if (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈92%)</i>
	ii. <i>if (D@7=OFF) and (D@12b=OFF) and (60≤WP@43&lt;95) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈92%)</i>
	iii. <i>if (D@19=OFF) and (WP@43≥60) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈95%)</i>
	iv. <i>if (D@12a=OFF) and (WP@43≥105) then TRUE (purity≈97%)</i>
Άνω-25% κέρδος	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (55≤WP@43&lt;85) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈97%)</i>
	ii. <i>if (D@7=OFF) and (D@19=OFF) and (55≤WP@43&lt;85) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈91%)</i>
Άνω-20% κέρδος	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (60≤WP@43&lt;85) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126&lt;85) then TRUE (purity≈96%)</i>
	ii. <i>if (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈98%)</i>
	iii. <i>if (D@12b=OFF) and (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈94%)</i>
Άνω-15% κέρδος	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈96%)</i>
Άνω-10% κέρδος	i. <i>if (D@7=OFF) and (D@12b=OFF) and (D@19=OFF) and (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) and (PV+H@126&lt;65) then TRUE (purity=100%)</i>
	ii. <i>if (D@7=OFF) and (D@12a=OFF) and (D@12b=OFF) and (WP@43≥80) and (B/M@89=OFF) then TRUE (purity≈96%)</i>

Όπως και για την αποφόρτιση του ΕιΣΠ κατά 30% της εγγεόμενης ισχύος του, έτσι και για αποφόρτιση 50%, οι μονάδες diesel στους σχετικούς προγραμματισμούς μπορούν να εναλλάσσονται (με εξαίρεση τη D@5). Το ΔΑ για κατώφλι οικονομικότητας 30% μπορεί να

παράγει τους κανόνες (i-iv) ή τον (i), ενώ για κέρδος στο άνω-20% πλαίσιο το ΔΑ μπορεί να αποδίδει τον προγραμματισμό (i) ή τους (ii,iii).

#### 4.5.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τους κανόνες των ΔΑ για τη διανομή αποκοπής ισχύος στους συντελεστές του μικρού ΕιΣΠ που μόλις παρουσιάστηκαν, συγκεντρώνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

##### Χειμερινό Σενάριο Φόρτισης

- Αποκόπεται κατά προτεραιότητα, όπως αναμενόταν, η G/T@58, ως η ακριβότερη εκ της ενεργής ΔΠ.
- Ειδικότερα, για 50% αποκοπή της εγχόμενης ισχύος του ΕιΣΠ, το υψηλότερο κατώφλι οικονομικότητας επιτυγχάνεται επιπλέον του παραπάνω, με εξ ολοκλήρου σχεδόν αποφόρτιση της PV+H@126 και λειτουργία αποκλειστικά της μηδενικού κόστους WP@43.
- Υπό χειμερινή φόρτιση, για 30% αποκοπή και στο υψηλότερο κατώφλι κέρδους, τα σχετικά ΔΑ αδυνατούν να εξάγουν κανόνες/προγραμματισμούς (ακόμα και αν το μέγεθος του ΣΜ αυξηθεί σημαντικά). Όπως φάνηκε, για ζητούμενη αποκοπή ισχύος 50%, δεν προέκυψε ανάλογη αδυναμία. Η παρατήρηση αυτή αναλύεται ως εξής. Για το αναφερόμενο σενάριο, αποφόρτιση του ΕιΣΠ κατά 30% προσεγγίζει τα 55kW, ενώ αποφόρτιση κατά 50%, τα 90kW. Συνεπώς, κατόπιν της σβέσης της G/T@58, υπολείπονται περίπου 20kW και 60kW, αντίστοιχα προς τις ζητούμενες αποκοπές. Το φορτίο που εξυπηρετεί ο ΕιΣΠ προσομοιώνεται κατά Monte Carlo από 75kW (ώρα  $t$ ) έως 60kW (πρόβλεψη ώρας  $t+1$ ) και αποδίδει έσοδα 0.04 eq/kWh, όσο δηλαδή σχεδόν το κόστος λειτουργίας του PV+H@126. Άρα, για αποκοπή 30%, ο συνδυασμός υψηλού φορτίου ΕιΣΠ με αποκοπή της υπολειπόμενης ισχύος από τη WP@43, αποδίδει οικονομικότητα σχεδόν ίση με συνδυασμό χαμηλότερου φορτίου ΕιΣΠ και αποκοπή της υπολειπόμενης ισχύος από τη PV+H@126. Αντιθέτως, το υπολειπόμενο της αποκοπής 50%, είναι μη συγκρίσιμο με το εύρος της Monte Carlo προσομοίωσης του φορτίου του ΕιΣΠ και, έτσι, δεν επηρεάζει την εξαγωγή κανόνα/προγραμματισμού.

##### Θερινό Σενάριο Φόρτισης

- Υπό τη θερινή φόρτιση, κατά προτεραιότητα περικόπεται η μονάδα B/M@89 ως η ακριβότερη και μεγάλης ισχύος ΔΠ, ακολουθούμενη από τις ακριβότερες μεν ανά kWh, αλλά μικρότερης ισχύος μονάδες diesel.
- Για 30% αποφόρτιση του ΕιΣΠ, το υψηλότερο πλαίσιο κέρδους επιτυγχάνεται με σβέση της B/M@89 και αποκοπή των υπολειπόμενων περίπου 40kW κυρίως από τις diesel και τη G/T@58 (προκύπτει επαγωγικά). Οι εναλλακτικές διανομές της αναφερόμενης αποκοπής μεταξύ των τελευταίων μονάδων αιτιολογείται από το ότι μερική αποφόρτιση της G/T@58, την οδηγεί σε κόστος λειτουργίας ανά kWh παρόμοιο με το βέλτιστο κόστος

λειτουργίας των μονάδων diesel. Άρα, για την αποκοπή των υπολειπόμενων 40kW, οι συνδυασμοί (α) μερική αποφόρτιση της G/T@58 συνοδευόμενη από σβέση κάποιας/ων μονάδας/ων diesel, (β) σβέση όλων των diesel και (γ) σβέση της G/T@58, είναι όλοι ισοδύναμοι από άποψης οικονομικότητας.

- Κατόπιν 50% αποκοπής, ο ΕισΠ θα παράγει περίπου 180kW. Ο οικονομικότερος συνδυασμός προς αυτή την ισχύ πρέπει να συμπεριλαμβάνει τη μέγιστη συμμετοχή της WP@43, τη G/T@58 πλησίον του βέλτιστου σημείου λειτουργία της και όση υπολειπόμενη ισχύ αποκοπής κυρίως από την PV+H@126. Οι προγραμματισμοί της Άνω-10% οικονομικότητας επιβεβαιώνουν τα αναμενόμενα.
- Στο σενάριο φόρτισης που μόλις αναφέρθηκε φαίνεται και η διαφορά οικονομικότητας μεταξύ των προγραμματισμών που εξάγονται από τα σχετικά ΔΑ. Πιο συγκεκριμένα, αυξανόμενου του κατωφλίου κέρδους, αυξάνεται η ζητούμενη συμμετοχή της WP@43 στο μείγμα ισχύος του ΕισΠ.

Γενικότερα τέλος, από άποψης υλοποίησης της ζητούμενης αποκοπής, προφανής στόχος του χειριστή/ιδιοκτήτη του ΕισΠ είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του (ή η ελαχιστοποίηση του κόστους του) βάσει του οικονομικότερου εφικτού κανόνα από τα ΔΑ. Όμως, κρίνοντας το ποσοστό αποδοχής/καθαρότητας του κάθε προγραμματισμού ή απαιτώντας αναλυτικότερο κανόνα ή καλούμενος να αντιμετωπίσει αδυναμία επικοινωνίας/χειρισμού κάποιας/ων μονάδας/ων ΔΠ, ο χειριστής/ιδιοκτήτης του ΕισΠ μπορεί να επιλέξει εναλλακτικό προγραμματισμό μικρότερου κατωφλίου κέρδους. Ας σημειωθεί για παράδειγμα, η περίπτωση ελλείμματος αιολικής ισχύος σε σχέση με την πρόβλεψη, οπότε και θα πρέπει να αξιοποιηθεί προγραμματισμός με μικρότερη συμμετοχή της WP@43 για τον μελετώμενο ΕισΠ.

#### 4.5.2 Δοκιμή μεθόδου με μεγάλο εικονικό σταθμό παραγωγής

Στον Πίνακα 4.10 δίνονται εκ νέου τα χαρακτηριστικά του μεγάλου ΕιΣΠ. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο ΕιΣΠ είναι 2.1MW. Διευκρινίζεται ότι το κόστος λειτουργίας δίνεται σε σχετική ισοτιμία και όχι απόλυτες τιμές.

Πίνακας 4.10. Τύπος ΔΠ, θέση επί του ΣΗΕ Ικαρίας, ονομαστική και τεχνικά ελάχιστη ισχύς και συνάρτηση κόστους για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Ζυγός	Τύπος ΔΠ - Ισοδύναμος Συμβολισμός	$P_n$ (kW)	$P_{min}$ (kW)	$C(P\%)$ (eq/kWh)
5	Diesel - D@5	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
7	Diesel - D@7	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
12	Diesel - D@12a	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
12	Diesel - D@12b	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
19	Diesel - D@19	20.1	5	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
19	Fuel Cell - FC@19	80.1	5	$0.09 \cdot P^2 - 0.01 \cdot P + 0.04$
19	PV - PV@19a	9.9	2.5	0
19	PV - PV@19b	30	4	0
32	LPG Gen. - LPG@32	80.1	20	$0.25 \cdot P^2 - 0.35 \cdot P + 0.16$
43	Wind Park - WP@43	200.1	4	0
48	Wind Park - WP@48	150	4	0
58	Geothermal - G/T@58	50.1	12	$0.09 \cdot P^2 - 0.13 \cdot P + 0.07$
62	Diesel - D@62	39.9	10	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
76	Tidal Gen. - Tdl@76	129.9	10	0
89	Biomass - B/M@89	99.9	30	$0.23 \cdot P^2 - 0.32 \cdot P + 0.07$
95	Diesel - D@95	50.1	15	$0.42 \cdot P^2 - 0.6 \cdot P + 0.27$
109	LPG Gen. - LPG@109	150	40	$0.25 \cdot P^2 - 0.35 \cdot P + 0.16$
126	PV-Hydro Hybrid - PV+H@126	150	4	0.03
128	PV - PV@128a	20.1	4	0
128	PV - PV@128b	39.9	4	0
128	PV - PV@128c	9.9	2.5	0
128	PV - PV@128d	39.9	4	0
139	Wind Park - WP@139	219.9	4	0
----	Διακοπτόμενο φορτίο	450	0	$C_{int}$

##### 4.5.2.1 Σενάρια φόρτισης συστήματος

Κατά τα όσα αναλύθηκαν στην Υποενότητα 4.5.1.1 θα εξεταστούν τα ίδια σενάρια και για την περίπτωση του μεγάλου ΕιΣΠ.

Σε αντίθεση με την περίπτωση του μικρού ΕιΣΠ, εδώ κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν και προγραμματισμοί χαμηλότερων κατωφλίων οικονομικότητας. Οι λόγοι της επιλογής εξηγούνται κατά τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

#### 4.5.2.2 Αποτελέσματα

Οι κανόνες/προγραμματισμοί είναι εκφρασμένοι σε kW.

##### a. Χειμερινό

Προ αποκοπής ο προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 4.11.

Πίνακας 4.11. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το Χειμερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πηγή@Ζυγό	$P_n$ (kW)	$P_{t+1}$ (kW)	$P_{t,t+1}$ (kW)
D@5	20.1	0	0
D@7	20.1	0	0
D@12a	20.1	0	0
D@12b	20.1	0	0
D@19	20.1	0	0
FC@19	80.1	32.04	40.05
PV@19a	9.9	0	0
PV@19b	30	0	0
LPG@32	80.1	0	0
WP@43	200.1	70.035	0
WP@48	150	52.5	0
G/T@58	50.1	30.06	10.02
D@62	39.9	0	0
Tdl@76	129.9	71.445	0
B/M@89	99.9	0	0
D@95	50.1	0	0
LPG@109	150	0	0
PV+H@126	150	49.5	10.5
PV@128a	20.1	0	0
PV@128b	39.9	0	0
PV@128c	9.9	0	0
PV@128d	39.9	0	0
WP@139	219.9	76.965	0

Οι προγραμματισμοί διανομής αποκοπής 30% και 50% της εγγεόμενης ισχύος του ΕιΣΠ δίνονται στους Πίνακες 4.12 και 4.13 αντιστοίχως.

Πίνακας 4.12. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Ανω-30% κέρδος	i. <i>if</i> (FC@19<15) and (WP@43≥15) and (Tdl@76<60) and (PV+H@126<30) then TRUE ( <b>purity≈98%</b> )
	ii. <i>if</i> (FC@19<15) and (Tdl@76≥60) and (PV+H@126<30) then TRUE ( <b>purity≈99%</b> )
Ανω-25%	i. <i>if</i> (FC@19<15) and (PV+H@126<30) then TRUE ( <b>purity≈97%</b> )

Άνω-20% κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (Tdl@76≥15) and (PV+H@126&lt;30) then TRUE (purity≈95%)</i>
Άνω 15% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ
Άνω-10% κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@43≥30) and (G/T@58=OFF) and (Tdl@76≥30) and (PV+H@126&lt;30) then TRUE (purity≈93%)</i>

Πίνακας 4.13. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγγεόμενης ισχύος του μεγάλου ΕιΣΠ υπό Χειμερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-60% κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@43≥60) and (PV+H@126&lt;45) and (WP@139&lt;60) then TRUE (purity≈95%)</i>
	ii. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@43≥60) and (WP@139≥60) then TRUE (purity=100%)</i>
	iii. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@43&lt;60) and (PV+H@126&lt;30) then TRUE (purity≈97%)</i>
Άνω-55% κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@48≥15) and (G/T@58=OFF) and (Tdl@76≥30) and (30≤PV+H@126&lt;45) then TRUE (purity≈92%)</i>
	ii. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@48≥15) and (Tdl@76≥30) and (PV+H@126&lt;30) then TRUE (purity≈98%)</i>
	iii. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@48&lt;15) and (PV+H@126&lt;30) then TRUE (purity≈96%)</i>
Άνω-50 κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (WP@43&lt;60) and (PV+H@126&lt;30) and (WP@139≥30) then TRUE (purity≈93%)</i>
	ii. <i>if (FC@19&lt;30) and (WP@43≥60) and (PV+H@126&lt;30) and (WP@139≥30) then TRUE (purity≈95%)</i>
	iii. <i>if (15≤FC@19&lt;30) and (G/T@58&lt;15) and (PV+H@126&lt;15) and (WP@139&lt;30) then TRUE (purity≈92%)</i>
Άνω-45% και Άνω-40% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ
Άνω-35% κέρδος	i. <i>if (FC@19&lt;15) and (G/T@58&lt;15) and (PV+H@126&lt;15) and (WP@139&lt;45) then TRUE (purity≈97%)</i>
Άνω-30% έως Άνω-10% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ

b. Θερινό

Ο προ αποκοπής προγραμματισμός της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνεται στον Πίνακα 4.14.

Πίνακας 4.14. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του μεγάλου ΕιΣΠ υπό το  
Θερινό σενάριο φόρτισης προ αποκοπής.

Πηγή@Ζυγό	P <sub>n</sub> (kW)	P <sub>t+1</sub> (kW)	P <sub>r,t+1</sub> (kW)
D@5	20.1	0	0
D@7	20.1	10.05	0
D@12a	20.1	10.05	0
D@12b	20.1	10.05	0
D@19	20.1	10.05	0
FC@19	80.1	32.04	40.05
PV@19a	9.9	0	0
PV@19b	30	22.5	7.5
LPG@32	80.1	56.07	8.01
WP@43	200.1	110.055	0
WP@48	150	82.5	0
G/T@58	50.1	35.07	0
D@62	39.9	31.92	1.995
Tdl@76	129.9	71.445	0
B/M@89	99.9	59.94	19.98
D@95	50.1	30.06	0
LPG@109	150	105	45
PV+H@126	150	100.5	0
PV@128a	20.1	12.06	0
PV@128b	39.9	11.97	7.98
PV@128c	9.9	0	0
PV@128d	39.9	31.92	7.98
WP@139	219.9	120.945	43.98

Οι προγραμματισμοί αποκοπής ισχύος 30% και 50% από τις πηγές της ΔΠ του ΕιΣΠ δίνονται στους Πίνακα 4.15 και 4.16.

Πίνακας 4.15. Προγραμματισμοί αποκοπής 30% επί της εγχεόμενης ισχύος του μεγάλου  
ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-30% κέρδος	i. <i>if (D@62=OFF) and (LPG@32=OFF) and (B/M@89=OFF) and (WP@139≥80) then TRUE (purity=100%)</i>
Άνω-25 έως Άνω-10% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ

Πίνακας 4.16. Προγραμματισμοί αποκοπής 50% επί της εγχεόμενης ισχύος του μεγάλου  
ΕιΣΠ υπό Θερινό σενάριο φόρτισης.

Πρόγραμμα από ΔΑ	Κανόνας
Άνω-60% έως Άνω-10% κέρδος	Δεν προκύπτει κανόνας από το ΔΑ



#### 4.5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Πέραν των όσων συνοψίστηκαν στην Υποενότητα 4.5.1.3 και επιβεβαιώνονται από τα παρόντα αποτελέσματα, προστίθενται οι εξής παρατηρήσεις από τη δοκιμή της μεθόδου στον μεγάλο ΕιΣΠ:

##### Χειμερινό Σενάριο Φόρτισης

- Κατά την αποκοπή 30% ισχύος του ΕιΣΠ για το Άνω-10% κέρδος, θα ήταν αναμενόμενο οι FC@19 και PV+H@126 να οδηγηθούν σε σβέση ως οι μόνες ενεργές πηγές με μη-μηδενικό κόστος λειτουργίας (κατόπιν της αποκοπής της G/T@58=OFF), αφού και οι ισχύεις τους καλύπτουν τη ζητούμενη αποφόρτιση. Ο περιορισμός τους σε ελάχιστη λειτουργία σχετίζεται με τη μεταβλητότητα του φορτίου που εξυπηρετεί ο ΕιΣΠ (λόγω της Monte Carlo προσομοίωσής του) και η οποία αντισταθμίζει το μικρό κόστος που επιφέρουν οι προαναφερθείσες πηγές στον υπολογισμό της (4.2).
- Για αποκοπή 50% της εγγερόμενης ισχύος του ΕιΣΠ, δεν είναι εφικτή η εξαγωγή προγραμματισμών από τα ΔΑ για αρκετά από τα κατώφλια οικονομικότητας και, ειδικά, τα υψηλότερα. Τούτο οφείλεται στο ότι, ενώ η ζητούμενη αποφόρτιση ανέρχεται στα 200kW, πρώτον, οι ενεργές, μη-μηδενικού κόστους λειτουργίας μονάδες ΔΠ αθροίζονται προς περίπου 130kW και, δεύτερον, η μεταβλητότητα του φορτίου που εξυπηρετεί ο ΕιΣΠ (στα πλαίσια της Monte Carlo προσομοίωσής του για τη δημιουργία του ΣΜ) είναι περίπου 50kW. Δηλαδή, ο προγραμματισμός αποφόρτισης της υψηλότερης οικονομικότητας επηρεάζεται έντονα από την ασάφεια του φορτίου σε συνάρτηση και με τους, κυριολεκτικά, άπειρους συνδυασμούς αποφόρτισης των μηδενικού κόστους μονάδων ΔΠ. Η διαπίστωση αυτή – υπήρξε αντίστοιχη και για τον μικρό ΕιΣΠ – επιβεβαιώνεται, αν το φορτίο που εξυπηρετεί ο ΕιΣΠ από την  $t$  στην ώρα  $t+1$  παραμένει σχεδόν σταθερό και ανεξάρτητο της πρόβλεψης μεταβολής του φορτίου του υπόλοιπου ΣΗΕ. Στην περίπτωση αυτή, τα ΔΑ αποδίδουν κανόνα/προγραμματισμό για κάθε κατώφλι κέρδους.

##### Θερινό Σενάριο Φόρτισης

- Και για τις δύο στάθμες αποκοπής ισχύος του ΕιΣΠ, η περιορισμένη δυνατότητα προγραμματισμού δεν οφείλεται σε οικονομικά κριτήρια όπως έως τώρα, αλλά σε τεχνικά. Πιο συγκεκριμένα, παραβιάζονται τα όρια ελάχιστης τάσης. Αυτό ήταν αναμενόμενο, αφού για θερινή φόρτιση του ΣΗΕ, οι πτώσεις τάσης είναι σημαντικές και η επιρροή του μεγάλου ΕιΣΠ σε αυτές έντονη. Προ αποκοπής, υποτίθεται ότι η τάση αναχώρησης της παροχής είναι τέτοιας τιμής, ώστε οι τάσεις άφιξης σε όλους τους ζυγούς του δικτύου να είναι εντός των ορίων. Άρα, μεγάλη αποφόρτιση του ΕιΣΠ, θα εξαναγκάσει σε αύξηση της ροή ρεύματος από το υπερκείμενο ΣΗΕ για την εξυπηρέτηση του φορτίου. Αν η ζητούμενη αποκοπή διανεμηθεί στους συντελεστές του ΕιΣΠ κατά συνεπή προς τις

πτώσεις τάσεως τρόπο, η υπηρεσία εκτελείται κανονικά, ενώ αν υποθεθεί υψηλότερη τάση παροχής, τότε ο ΕισΠ θα μπορέσει να εξυπηρετήσει την αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας για οποιοδήποτε κατώφλι οικονομικότητας. Δίνονται και αναλυτικότερες παρατηρήσεις.

- Οι προγραμματισμοί των υψηλότερων κατωφλίων κέρδους για αποκοπή 30%, αναμένεται να συμπεριλαμβάνουν τουλάχιστον 200kW από τις B/M@89, D@95, LPG@109 και PV+H@126 (λόγω του κόστους λειτουργίας τους) οι οποίες συνδέονται προς τον δυτικό κλάδο της παροχής R-22. Ο κλάδος αυτός όμως, συγκεντρώνει σχεδόν το 50% του φορτίου του εν λόγω δικτύου διανομής. Άρα, οι τάσεις των ζυγών του θα βρεθούν εκτός ορίων και οι παραπάνω προγραμματισμοί θα κρίνονται ακατάλληλοι παρά την οικονομικότητά τους.
- Για αποκοπή 50% της εγγεόμενης ισχύος του ΕισΠ, δεν εμφανίζεται κανένα Αληθές στοιχείο στα σχετικά ΣΜ – όλα απορρίπτονται λόγω πτώσης τάσεως. Απαιτείται υπόθεση υψηλότερης τάσης αναχώρησης από την παροχή ή ενημέρωση από τον διαχειριστή σχετικά με την τιμή ρύθμισής της.

#### **4.6 Απαιτούμενα μεγέθη συνόλων μάθησης και χρόνοι εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου**

Ο επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας Intel® Core™2 Duo @2GHz με λειτουργικό Microsoft Windows XP Professional, Service Pack 3. Με ελάχιστη διαφορά από όσα συζητήθηκαν στην Υποενότητα 2.6, τα μεγέθη των ΣΜ αυξάνονταν μέσω της τακτικής δοκιμής-και-λάθους (trial and error) έως ότου τα ΔΑ εκπαιδευμένα από μεγαλύτερο ΣΜ να παράγουν ίδιους κανόνες (κατά περιεχόμενο και βαθμό αποδοχής/purity) με ΔΑ από αμέσως μικρότερο ΣΜ. Τελικά, προσδιορίστηκαν τα κάτωθι απαιτούμενα μεγέθη ΣΜ και οι χρόνοι παραγωγής τους.

- Μικρός ΕισΠ 10 συντελεστών (9 μονάδες ΔΠ και διακοπτόμενο φορτίο)  
απαιτούμενο  $|\Sigma M| = 1500$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 260 s.
- Μεγάλος ΕισΠ 24 συντελεστών (23 μονάδες ΔΠ και διακοπτόμενο φορτίο)  
απαιτούμενο  $|\Sigma M| = 3500$  εγγραφές, χρόνος δημιουργίας = 630 s.

Το μέγεθος του ΣΜ τείνει να έχει αναλογική σχέση με το πλήθος των χαρακτηριστικών (attributes) που περιγράφουν το πρόβλημα μέσω του ΔΑ, ενώ επηρεάζεται και από το μέγεθος του θεωρούμενου ΣΗΕ εφόσον εφαρμόζεται ροή φορτίου για κάθε εγγραφή στο ΣΜ. Ο χρόνος εκπαίδευσης κάθε ΔΑ δεν ξεπερνά τα 2 δευτερόλεπτα. Συμπεραίνεται ότι ο επεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, μπορεί εντός μίας ώρας να εξάγει προγραμματισμούς

διανομής αποκοπής ισχύος για ΕισΠ κατά μέγιστο 82 συντελεστών. Παράλληλη λειτουργία όμοιων επεξεργαστών πολλαπλασιάζει ανάλογα τη δυνατότητα ως προς το μέγεθος του ΕισΠ.

## **4.7 Σχολιασμός της μεθοδολογίας αναδιανομής απώλειας ισχύος**

### **σε εικονικό σταθμό παραγωγής μέσω δέντρων απόφασης**

Η ικανότητα γενίκευσης της μεθοδολογίας θα εξεταστεί μέσω του ποσοστού/σφάλματος αποτυχημένων ταξινομήσεων (misclassification rate/error) [50] καθώς και μέσω του ποσοστού/σφάλματος δεκαπλής διασταύρωσης επί του ΣΜ (10-fold cross validation) [51]. Ο λόγος που σε αντίθεση με το Κεφάλαιο 2, η αξιολόγηση της μεθόδου επεκτείνεται και σε επιπλέον δείκτη, είναι διότι αναπροσαρμόστηκε από την αρχική της υλοποίηση, έτσι ώστε το ίδιο ΣΜ να χρησιμοποιείται καταλλήλως για όλα τα διαφορετικά επίπεδα οικονομικότητας, εξαρτώντας έτσι την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης τεχνικής από την αντιπροσωπευτικότητα του ΣΜ καθ' εαυτού.

#### **4.7.1 Αξιολόγηση μεθοδολογίας μέσω σφάλματος αποτυχημένων ταξινομήσεων**

Υπενθυμίζεται εδώ ότι ο υπολογισμός του  $mr$  προκύπτει ως εκ της:

$$mr = \frac{\text{προγραμματισμοί διαφορετικά ταξινομημένοι από } \Delta A \text{ κ' αλγόριθμο } \Sigma M}{|TS|} \quad (4.3)$$

Όπου  $|TS|$  το μέγεθος του Συνόλου Δοκιμής ( $\Sigma\Delta$ ).

Τα  $\Delta A$  που εκπαιδεύτηκαν κατά τη μεθοδολογία που περιγράφηκε ήταν γενικά όμοιων – αν όχι ταυτόσημων – κανόνων. Άρα, δεν τίθεται θέμα ποιο  $\Delta A$  εκπροσωπεί καλύτερα τη λύση του προβλήματος. Αμέσως παρακάτω παρατίθεται πίνακας με το μέσο  $mr$  των  $\Delta A$  για κάθε οικονομικότητα, σενάριο φόρτισης και ποσοστό αποκοπής για τους δύο ΕισΠ που μελετήθηκαν. Το μέσο  $mr$  υπολογίστηκε από αντιπροσωπευτικά έγκυρο πληθυσμό διανομών αποκοπής ισχύος. Αφού ο πραγματικός πληθυσμός των διανομών είναι άπειρος, η αντιπροσωπευτικότητα σύμφωνα με το [52] εξασφαλίζεται με ελάχιστο πλήθος 16641 διανομών,. Με αυτό το μέγεθος πλήθους τα στατιστικά του στοιχεία βρίσκονται εντός του 99% διαστήματος εμπιστοσύνης με σφάλμα  $\pm 1\%$ . Αφού επιπλέον γενικά πρέπει να ισχύει  $|\Sigma\Delta| = |\Sigma M|/3$ , το μέσο  $mr$  κάθε επιπέδου οικονομικότητας, κάθε ζητούμενης αποκοπής ενεργού ισχύος και κάθε φόρτισης θα υπολογίζεται από 34 διαφορετικά  $\Sigma\Delta$  για τον μικρό ΕισΠ και από 15 διαφορετικά  $\Sigma\Delta$  για τον μεγάλο ΕισΠ. Στους Πίνακες 4.17 και 4.18 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών τα οποία εξετάστηκαν για οικονομικότητα τόσο χαμηλή έως το Άνω-60% κατώφλι κέρδους.

Πίνακας 4.17. Ποσοστά αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μικρού ΕιΣΠ.

**Ποσοστό αποτυχημένων ταξινομήσεων ( $\widehat{\pi}_{avg} \% \pm 1\%$ )**

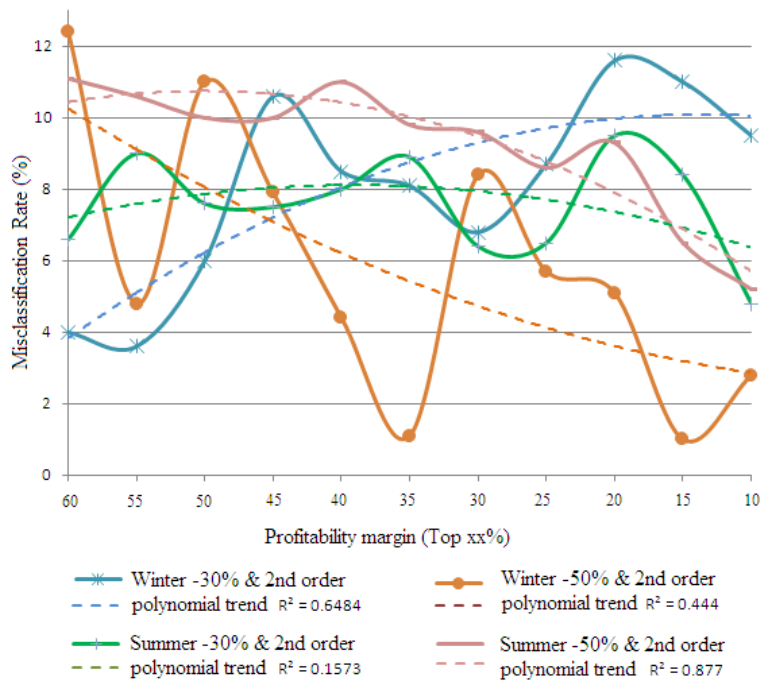
Σενάριο		Χειμερινό		Θερινό	
Αποκοπή (%)		30	50	30	50
Κατώφλι κέρδους (%)	60	<b>4</b>	<b>12.4</b>	<b>6.6</b>	<b>11.1</b>
	55	<b>3.6</b>	<b>4.8</b>	<b>9</b>	<b>10.6</b>
	50	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>7.6</b>	<b>10</b>
	45	<b>10.6</b>	<b>7.9</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>
	40	<b>8.5</b>	<b>4.4</b>	<b>8</b>	<b>11</b>
	35	<b>8.1</b>	<b>1.1</b>	<b>8.9</b>	<b>9.8</b>
	30	<b>6.8</b>	<b>8.4</b>	<b>6.4</b>	<b>9.6</b>
	25	<b>8.7</b>	<b>5.7</b>	<b>6.5</b>	<b>8.6</b>
	20	<b>11.6</b>	<b>5.1</b>	<b>9.5</b>	<b>9.3</b>
	15	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>8.4</b>	<b>6.5</b>
	10	<b>9.5</b>	<b>2.8</b>	<b>4.8</b>	<b>5.2</b>

Πίνακας 4.18. Ποσοστά αποτυχημένων ταξινομήσεων όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μεγάλου ΕιΣΠ.

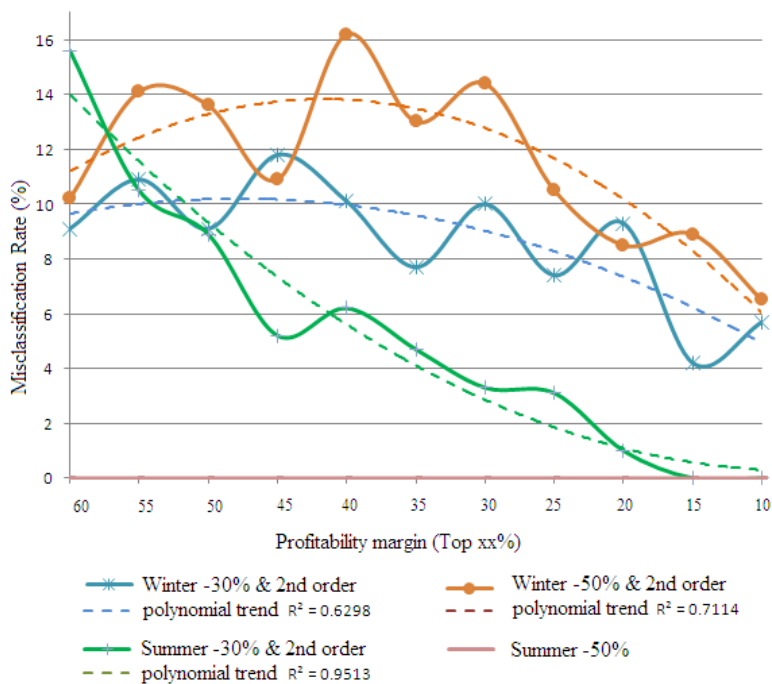
**Ποσοστό αποτυχημένων ταξινομήσεων ( $\widehat{\pi}_{avg} \% \pm 1\%$ )**

Σενάριο		Χειμερινό		Θερινό	
Αποκοπή (%)		30	50	30	50
Κατώφλι κέρδους (%)	60	<b>9.1</b>	<b>10.2</b>	<b>15.6</b>	<b>0</b>
	55	<b>10.9</b>	<b>14.1</b>	<b>10.5</b>	
	50	<b>9.1</b>	<b>13.6</b>	<b>8.9</b>	
	45	<b>11.8</b>	<b>10.9</b>	<b>5.2</b>	
	40	<b>10.1</b>	<b>16.2</b>	<b>6.2</b>	
	35	<b>7.7</b>	<b>13</b>	<b>4.7</b>	
	30	<b>10</b>	<b>14.4</b>	<b>3.3</b>	
	25	<b>7.4</b>	<b>10.5</b>	<b>3.1</b>	
	20	<b>9.3</b>	<b>8.5</b>	<b>1</b>	
	15	<b>4.2</b>	<b>8.9</b>	<b>0</b>	
	10	<b>5.7</b>	<b>6.5</b>	<b>0</b>	

Οι Πίνακες που μόλις παρατέθηκαν δεν μπορούν να προσφέρουν σημαντική πληροφορία πέραν της παρατήρησης για τις γενικά μικρές τιμές του  $mr$ . Ως εκ τούτου, στα Σχήματα 4.4 και 4.5 γίνεται προσπάθεια συσχετισμού μεταξύ του  $mr$  και των επιπέδων οικονομικότητας που εξετάστηκαν για κάθε αποκοπή και μέγεθος ΕιΣΠ. Εφαρμόστηκαν, επίσης, δευτεροβάθμιες καμπύλες τάσεως επί των δεδομένων, ώστε αυτά να αξιολογηθούν καλύτερα.



Σχήμα 4.4. Υπολογισμένα  $mr$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μικρό ΕιΣΠ.



Σχήμα 4.5. Υπολογισμένα  $mr$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μεγάλο ΕιΣΠ.

Από το σύνολο των παραπάνω πληροφοριών και αξιολογώντας κυρίως τις τάσεις της συγκριτικά μεγαλύτερης προσαρμογής ( $R^2$ ) προς τα  $mr$ , μπορούν να παρατηρηθούν τα κάτωθι:

- Αυξανόμενου του κατωφλίου οικονομικότητας, μειώνεται το  $mr$ . Αυτό είχε διαφανεί και από τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στην Υποενότητα 2.7.1, όμως η εξέταση περισσότερων επιπέδων ελάχιστου ζητούμενου κέρδους εδώ, το κατέστησε εμφανέστερο. Η τάση αυτή του

$mr$  κρίνεται αναμενόμενη, αφού αυξανόμενης της ζητούμενης οικονομικότητας, μειώνονται αντίστοιχα και οι πιθανοί συνδυασμοί που την επιτυγχάνουν και, άρα, οι σχετικοί κανόνες που δεν εξάγονται από τα ΔΑ και οδηγούν σε αποτυχημένες ταξινομήσεις.

- Για τον μεγάλο ΕιΣΠ, υπό χειμερινή φόρτιση και για 50% αποκοπή της εγγεόμενης ισχύος του, τείνουν να εκπαιδεύονται τα δέντρα του υψηλότερου  $mr$ , σχεδόν από κάθε άλλη περίπτωση. Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται και με τα όσα συζητήθηκαν και στην Υποενότητα 4.5.2.3. Το  $mr$  ως δείκτης αντιπροσωπευτικότητας του προβλήματος που περιγράφει ένα ΔΑ, είναι τόσο μικρότερο, όσο γενικότερο είναι το ΔΑ. Όμως, ως εκ της Monte Carlo προσομοίωσής του, η τιμή του φορτίου του ΕιΣΠ, καθιστά την προτεινόμενη μέθοδο ευάλωτη. Αυτό συμβαίνει διότι αναπτύσσονται μονοπάτια εντός του ΔΑ που περιγράφουν πολύ παρόμοιες διανομές της αποκοπής, οι οποίες μπορεί να είναι ταυτόχρονα και Αποδεκτές (για υψηλό φορτίο ΕιΣΠ) και Μη Αποδεκτές (για χαμηλό φορτίο ΕιΣΠ). Προφανώς, η αντιμετώπιση της συγκεκριμένης ευαισθησίας της μεθόδου, γίνεται προσθέτοντας την τιμή φορτίου ΕιΣΠ ως χαρακτηριστικό (attribute) των ΣΜ που θα εκπαιδεύουν τα ΔΑ. Στη μελέτη που προηγήθηκε, κάτι τέτοιο δεν κρίθηκε αναγκαίο, αφού το πρόβλημα εμφανίστηκε για ένα μόνο επίπεδο αποκοπής και υπό ένα σενάριο φόρτισης για τον μεγάλο ΕιΣΠ.
- Τα μικρά  $mr$  για τον μεγάλο ΕιΣΠ υπό θερινή φόρτιση, αιτιολογούνται από την έντονη επιρροή του τεχνικού περιορισμού των ορίων τάσης, ως ενός απόλυτα ξεκάθαρα (crisp) κριτηρίου αξιολόγησης των διανομών της ζητούμενης αποκοπής.
- Εξαιρώντας τις παρατηρήσεις για τις τάσεις των δεδομένων που αναφέρθηκαν ειδικά παραπάνω, οι υπόλοιπες εξ αυτών δείχνουν γενικά να εμφανίζουν μέγιστο για οικονομικότητες περί του Άνω-45% με Άνω-50% κέρδους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί εύκολα από το ότι αν δεν υπάρχουν άλλοι περιορισμοί ή ειδικές συνθήκες που να επηρεάζουν την αξιολόγηση των σεναρίων, το  $mr$  παρακολουθεί απλά την εντροπία της πληροφορίας [51].

#### 4.7.2 Αξιολόγηση μεθοδολογίας μέσω σφάλματος δεκαπλής διασταύρωσης επί του συνόλου μάθησης

Για τον έλεγχο αυτό, το εκάστοτε ΣΜ χωρίζεται σε δέκα ισόποσα υποσύνολα. Κάθε ένα εξ αυτών των υποσυνόλων χρησιμοποιείται ως το ΣΔ για το ΔΑ που εκπαιδεύουν τα υπόλοιπα εννέα υποσύνολα (ως ένα, φυσικά, ΣΜ). Ως εκ τούτου, το σφάλμα δεκαπλής διασταύρωσης επί του ΣΜ είναι το μέσο  $mr$  αυτών των δοκιμών:

$$10fCV = \frac{\sum_{fold=1}^{10} mr_{fold}}{10} \quad (4.4)$$

Στους Πίνακες 4.19 και 4.20 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών τα οποία εξετάστηκαν για οικονομικότητα τόσο χαμηλή έως το Άνω-60% κατώφλι κέρδους.

Πίνακας 4.19. Ποσοστά δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μικρού ΕιΣΠ.

**Σφάλμα δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ ( $10f\widehat{CV}_{avg}$  %)**

Σενάριο		Χειμερινό		Θερινό	
Αποκοπή (%)		30	50	30	50
Κατώφλι κέρδους (%)	60	<b>3.1</b>	<b>12.1</b>	<b>5.7</b>	<b>10.4</b>
	55	<b>3.6</b>	<b>4.2</b>	<b>9.2</b>	<b>10</b>
	50	<b>5.5</b>	<b>10.7</b>	<b>9.2</b>	<b>10.1</b>
	45	<b>10.9</b>	<b>7.5</b>	<b>8.6</b>	<b>11</b>
	40	<b>11.4</b>	<b>3.7</b>	<b>6.9</b>	<b>12.6</b>
	35	<b>6.9</b>	<b>0.9</b>	<b>7</b>	<b>8.5</b>
	30	<b>3.1</b>	<b>6.9</b>	<b>7</b>	<b>8.5</b>
	25	<b>7.7</b>	<b>4.7</b>	<b>7.5</b>	<b>7.8</b>
	20	<b>11.3</b>	<b>5.1</b>	<b>7</b>	<b>6.8</b>
	15	<b>8.8</b>	<b>0.7</b>	<b>6.4</b>	<b>5.9</b>
	10	<b>7.7</b>	<b>10.1</b>	<b>4.9</b>	<b>3.7</b>

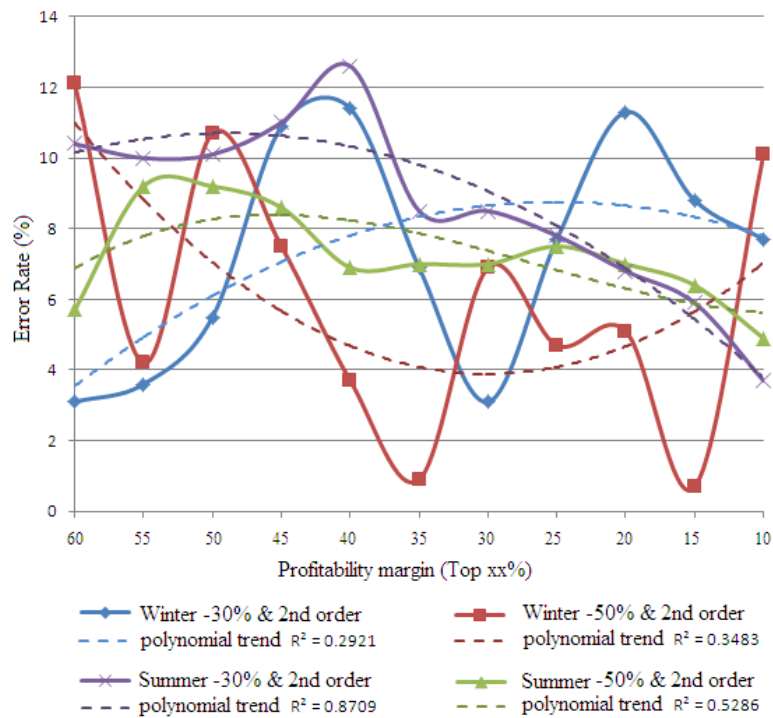
Πίνακας 4.20. Ποσοστά δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ όλων των σεναρίων και επιπέδων κέρδους για την προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετώπισης υπερσυχνότητας επί του μεγάλου ΕιΣΠ.

**Σφάλμα δεκαπλής διασταύρωσης επί ΣΜ ( $10f\widehat{CV}_{avg}$  %)**

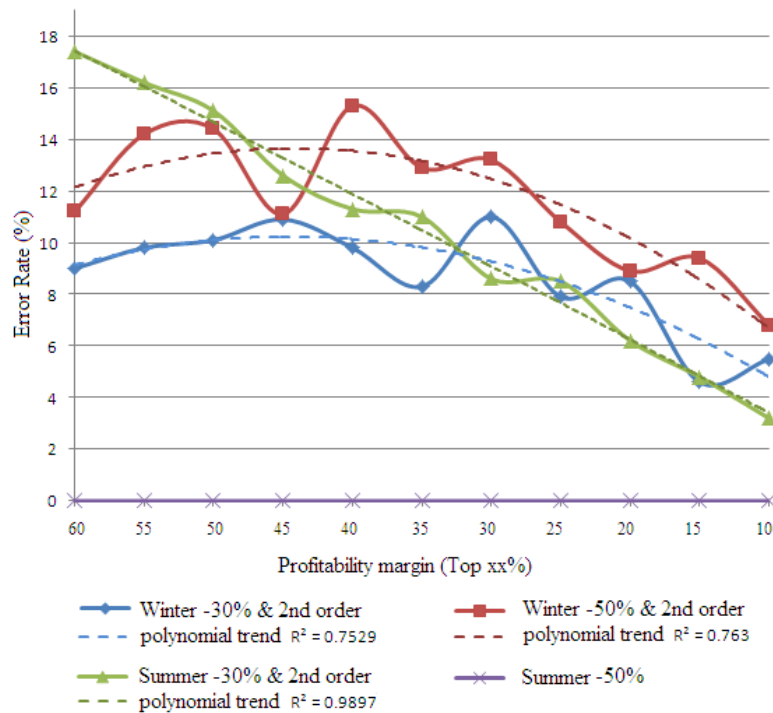
Σενάριο		Χειμερινό		Θερινό	
Αποκοπή (%)		30	50	30	50
Κατώφλι κέρδους (%)	60	<b>9</b>	<b>10.2</b>	<b>15.6</b>	<b>0</b>
	55	<b>9.8</b>	<b>14.1</b>	<b>10.5</b>	
	50	<b>10.1</b>	<b>13.6</b>	<b>8.9</b>	
	45	<b>10.9</b>	<b>10.9</b>	<b>5.2</b>	
	40	<b>9.8</b>	<b>16.2</b>	<b>6.2</b>	
	35	<b>8.3</b>	<b>13</b>	<b>4.7</b>	
	30	<b>11</b>	<b>14.4</b>	<b>3.3</b>	
	25	<b>7.9</b>	<b>10.5</b>	<b>3.1</b>	
	20	<b>8.5</b>	<b>8.5</b>	<b>1</b>	
	15	<b>4.6</b>	<b>8.9</b>	<b>0</b>	
	10	<b>5.5</b>	<b>6.5</b>	<b>0</b>	

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, υπάρχει αξιοσημείωτη ομοιότητα στις τιμές μεταξύ του  $m_r$  και του  $10f\widehat{CV}$  για κάθε επίπεδο οικονομικότητας, απώλειας και μέγεθος ΕιΣΠ. Ως εκ τούτου, συνάγεται ότι ο σχολιασμός που αναπτύχθηκε στην αμέσως προηγούμενη υποενοότητα είναι έγκυρος και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του σφάλματος δεκαπλής διασταύρωσης επί του ΣΜ. Παρατίθενται επίσης στα Σχήματα 4.6 και 4.7 οι καμπύλες του  $10f\widehat{CV}$  ως προς τα επίπεδα

οικονομικότητας (και οι προσεγγίσεις με δευτεροβάθμιες τάσεις τους) που εξετάστηκαν για κάθε αποκοπή και μέγεθος ΕιΣΠ.



Σχήμα 4.6. Υπολογισμένα  $10fCV$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μικρό ΕιΣΠ.



Σχήμα 4.7. Υπολογισμένα  $10fCV$  και δευτέρου βαθμού τάση τους ως προς τα επίπεδα οικονομικότητας προγραμματισμού αποκοπής για τον μεγάλο ΕιΣΠ.



## 4.8 Συμπεράσματα

Η αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας σε ένα ΣΗΕ κατά το υπάρχον ρυθμιστικό και ερευνητικό πλαίσιο, στηρίζεται σε πιθανοτικά μοντέλα και παραδοχές επί των περιορισμών λειτουργίας των συντελεστών του ΣΗΕ, ενώ δε μεριμνά για απόκριση προς έκτακτα, αλλά υπαρκτά φαινόμενα. Στο κεφάλαιο αυτό, προτάθηκε αναλυτική μέθοδος για την αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας, μέσω σημαντικής αποφόρτισης ενός ΕιΣΠ. Η μέθοδος αξιοποιεί αρχές μηχανικής μάθησης μέσω ΔΑ. Σε έναν χρονικό ορίζοντα μιας ώρας εμπρός, τα ΔΑ προετοιμάζουν προγραμματισμό διανομής της ζητούμενης αποκοπής επί της ΔΠ του ΕιΣΠ, για διάφορα κατώφλια οικονομικότητας/κέρδους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της μεθόδου έδειξαν ότι, σε αντίθεση με παρατηρήσεις προηγούμενης έρευνας, δεν απαιτείται ειδικά περικοπή της παραγωγής στοχαστικών πηγών ΔΠ, όπως οι ΑΠΕ. Επιπλέον, με τα διαφορετικά ανώφλια οικονομικότητας, καλείται διαφορετικό ποσό ισχύος από ΑΠΕ (αυξανόμενο, αυξανομένου του κατωφλίου κέρδους) – εξασφαλίζεται δηλαδή πρόνοια αντιμετώπισης απρόβλεπτου ελλείμματος στοχαστικής ισχύος. Τέλος, η ανάλυση των ποσοστών αποτυχημένων ταξινομήσεων και των ποσοστών σφάλματος δεκαπλής διασταύρωσης επί του ΣΜ της μεθόδου, θεμελίωσε την ανάγκη για συνυπολογισμό του φορτίου του ΕιΣΠ στους προγραμματισμούς διανομής της αποκοπής (ειδικά αν πρόκειται για αστικό φορτίο ισχύος συγκρίσιμης προς την ισχύ της ΔΠ του ΕιΣΠ), παρά του ότι αυτό δε συμμετέχει ουσιαστικά στην εν λόγω υπηρεσία.

## 4.9 Βιβλιογραφία

- [1] Interim Report – System Disturbance on 4 November 2006, UCTE (30 Νοεμβρίου 2006).
- [2] An Overview of System Adequacy: Summer outlook report 2013 and winter review 2012/2013, ENTSO-E (Μάιος 2013).
- [3] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [4] P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance [C], ENTSO-E (2009).
- [5] The Grid Code, Τεύχος 5, Αναθεώρηση 4, National Grid Electricity Transmission (19 Αυγούστου 2013).
- [6] Y. Rebours, D. Kirschen, A Survey of Definitions and Specifications of Reserve Services, University of Manchester (19th of September 2005).
- [7] Statistical Yearbook 2011, ENTSO-E (2011) (διαθέσιμο στον κόμβο: <https://www.entsoe.eu/publications/statistics/statistical-yearbooks/>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [8] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Γαλλίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, [http://clients.rte-france.com/lang/an/visiteurs/vie/prod/parc\\_reference.jsp](http://clients.rte-france.com/lang/an/visiteurs/vie/prod/parc_reference.jsp) (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [9] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Γερμανίας από τον κόμβο της σχετικής Ομοσπονδιακής Υπηρεσίας Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας, φυσικού αερίου, τηλεπικοινωνιών, ταχυδρομείων και σιδηροδρόμων της γερμανικής κυβέρνησης, [http://www.bundesnetzagentur.de/cln\\_1912/EN/Areas/Energy/Companies/SpecialTopics/PowerPlantList/PubliPowerPlantList\\_node.html](http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1912/EN/Areas/Energy/Companies/SpecialTopics/PowerPlantList/PubliPowerPlantList_node.html) (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [10] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ηνωμένου Βασιλείου από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/GettingConnected/ContractedGenerationInformation/TransmissionEntryCapacityRegister/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [11] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ιταλίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, [http://www.terna.it/default/home\\_en/electric\\_system/statistical\\_data.aspx](http://www.terna.it/default/home_en/electric_system/statistical_data.aspx) (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [12] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ισπανίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.esios.ree.es/web-publica/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [13] Κόμβος πυρηνικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Oskarshamn Σουηδίας, <http://www.okg.se/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [14] Κόμβος λιγνιτικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Belchatów Πολωνίας, <http://www.elbelchatow.pgegielk.pl/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).

- [15] Κόμβος διαχειριστή νορβηγικού ΣΗΕ, <http://www.statnett.no/en/News/News-archives/News-archive-2011/Statnett-plans-to-connect-interconnector-between-Norway-and-England-at-Kvilldal/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [16] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ολλανδίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, [http://www.tennet.org/english/operational\\_management/system\\_data\\_preparation/Reported\\_production\\_capacity/Installed\\_capacity.aspx](http://www.tennet.org/english/operational_management/system_data_preparation/Reported_production_capacity/Installed_capacity.aspx) (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [17] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Φινλανδίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.fingrid.fi/en/electricity-market/load-and-generation/Pages/generation-capacity.aspx> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [18] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Βελγίου από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.elia.be/en/grid-data/power-generation/generating-facilities> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [19] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Τσεχίας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.ceps.cz/ENG/Data/Vsechna-data/Pages/Instalovany-vykon.aspx> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [20] Λίστα σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Ελλάδας από τον κόμβο του σχετικού διαχειριστή, <http://www.admie.gr/leitoyrgia-dedomena/mitroa/mitroo-monadon/monades-sto-mitroo-monadon/> (Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [21] Mémento de la sûreté du système électrique, RTE-Γαλλία (2004).
- [22] CONSENTEC, Gutachten zur Dimensionierung des Regelleistungsbedarfs unter dem NRV – Studie im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA) (17 Δεκεμβρίου 2010).
- [23] Tender overview, Διαχειριστές γερμανικού ΣΗΕ (διαθέσιμο στον κόμβο: <https://www.regelleistung.net/ip/action/ausschreibung/public>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [24] Fast Reserve, National Grid (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/Balancing/services/reserveservices/fastreserve/>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [25] Firm Frequency Response, National Grid (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/Balancing/services/frequencyresponse/ffr/>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [26] Codice di trasmissione dispacciamento, sviluppo e sicurezza della rete, Terna Ιταλίας (8 Ιουλίου 2013).
- [27] Resolución por la que se aprueba un conjunto de procedimientos de carácter técnico e instrumental necesarios para realizar la adecuada gestión técnica del sistema electric,

- Secretaría de Estado de Energía y Recursos Minerales Ισπανίας, Referencia: BOE-A-1998-20053 (30 Ιουλίου 1998).
- [28] The Spanish Electricity System in 2012, Red Eléctrica Ισπανίας (Ιούνιος 2013).
- [29] Lag (2003:436) om effektreserv, Näringsdepartementet Σουηδίας (1 Ιουλίου 2003).
- [30] Förordning (2010:2004) om effektreserv, Näringsdepartementet Σουηδίας (22 Δεκεμβρίου 2010).
- [31] Volume of regulating bids, Nord Pool Spot (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Regulating-Power1/Volume-of-Regulating-Power-Bids/ALL/Hourly/>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [32] Development plan for purposes of meeting current and future electricity demand in the period 2010-2025 – Excerpt, Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator SA, Konstancin – Jeziorna (Μάρτιος 2010).
- [33] Vilkår for Regulerkraftmarkedet, gjeldende fra 26.05.2003, Statnett Νορβηγίας.
- [34] Ladder size  $\leq$  15 minutes, Tennet Ολλανδίας (διαθέσιμο στον κόμβο: [http://www.tennet.org/english/operational\\_management/system\\_data\\_preparation/offering\\_regulating\\_reserve\\_capacity/Ladder\\_size\\_15.aspx#PanelTabChartTime](http://www.tennet.org/english/operational_management/system_data_preparation/offering_regulating_reserve_capacity/Ladder_size_15.aspx#PanelTabChartTime). Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [35] System reserves, FinGrid Φινλανδίας (διαθέσιμο στον κόμβο: <http://www.fingrid.fi/en/powersystem/reserves/system%20reserves/Pages/default.aspx>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [36] DECISION(B)120621-CDC-1162 sur la demande d'approbation de la méthode d'évaluation et de la détermination de la puissance de réserve primaire, secondaire et tertiaire pour 2013, Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz Βελγίου (21 Ιουνίου 2012).
- [37] Rules for transmission system operation – Extract from The Grid Code, ČEPS Τσεχίας (11 Ιανουαρίου 2011).
- [38] Balancing energy bid prices, (διαθέσιμο στον κόμβο: <https://dae.ceps.cz/default.aspx>. Προσπελάστηκε 16 Οκτωβρίου 2013).
- [39] Εγχειρίδιο Μηχανισμού Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος, ΑΔΜΗΕ Ελλάδα, Έκδοση 3 (Νοέμβριος 2012).
- [40] J.M. Arroyo, F.D. Galiana, Energy and reserve pricing in security and network-constrained electricity markets, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 20, Τεύχος 2, Μάιος 2005, Σελίδες 634-643.
- [41] F. Bouffard, F.D. Galiana, Stochastic Security for Operations Planning With Significant Wind Power Generation, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 23, Τεύχος 2, Μάιος 2008, Σελίδες 306-316.

- [42] E. Mashhour, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part I: Problem Formulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 26, Τεύχος 2, Μάιος 2011, Σελίδες 949-956.
- [43] G. Sideratos, N.D. Hatziaargyriou, Probabilistic Wind Power Forecasting Using Radial Basis Function Neural Networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 27, Τεύχος 4, Νοέμβριος 2012, Σελίδες 1788-1796.
- [44] Mak, S.T., A synergistic approach to implement demand response, asset management and service reliability using smart metering, AMI and MDM systems, *Power & Energy Society General Meeting, 2009, PES '09, IEEE*, 26-30 Ιουλίου 2009, Σελίδες 1-4.
- [45] IEC 61850, Communication networks and systems for power utility automation, IEC, Ελβετία.
- [46] IEC 60076-8, Power transformers – Application guide, IEC, Ελβετία (1997).
- [47] IEC 60905, Loading guide for dry-type power transformers, IEC, Ελβετία (1987).
- [48] European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC (2010).
- [49] J.R. Quinlan, Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, Τόμος 1, Τεύχος Μάρτιος 1986, Σελίδες 81-106.
- [50] S.R. Safavian, D. Landgrebe, A survey of decision tree classifier methodology, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Τόμος 21, Τεύχος 3, Μάιος/Ιούνιος 1991, Σελίδες 660-674.
- [51] T. Hastie, R. Tibshirani και J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction In The Elements of Statistical Learning*, Springer, Καναδάς, 2003.
- [52] W.A. Fuller, *Sampling Statistics*, John Wiley, UK, 2009.

## 4.10 Προβληματική

Όπως αναπτύχθηκε στην παρούσα ενότητα, το ίδιο ΣΜ μπορεί να αξιολογηθεί με διαφορετικά κριτήρια (κατώφλια) οικονομικότητας. Κατά τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η προετοιμασία εναλλακτικών προγραμματισμών αποκοπής ισχύος για την αντιμετώπιση υπερσυχνότητας εκ μέρους του ΕιΣΠ. Η ίδια λογική θα μπορούσε να εφαρμοστεί στην αξιολόγηση του ΣΜ του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού κάλυψης απώλειας του ΕιΣΠ που παρουσιάστηκε στο *Κεφάλαιο 2*. Αφ' ης στιγμής δηλαδή, φάνηκε η ανάγκη για υπολογισμό πολλαπλών κατωφλίων οικονομικότητας (για διαφορετικούς λόγους σε κάθε περίπτωση), είναι δυνατόν στον ίδιο υπολογιστικό χρόνο να εκπαιδεύεται καταλλήλως το ίδιο ΣΜ.

Είναι προφανές επίσης, ότι η φιλοσοφία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο αυτό προδιαγράφει δύο εναλλακτικές υποθέσεις. Πρώτον, υποτίθεται ότι υφίσταται ανάλογη οργάνωση πηγών και φορτίων (δηλ. κατά ΕιΣΠ) σε ευρεία κλίμακα εντός του εκάστοτε ΣΗΕ. Δεύτερον, στην πλειοψηφία της ΔΠ εφαρμόζεται αποφόρτιση κατά τα όσα περιγράφηκαν στη μέθοδο παραπάνω ή παρόμοια, με αποκοπή ποσοστού τουλάχιστον 30% της εγχεόμενης. Η διπλή αυτή υπόθεση σχετίζεται με τη διαπίστωση που αναφέρθηκε ήδη, δηλαδή ότι η ΔΠ δεν προσεγγίζει – επί του παρόντος – μεγέθη ισχύος συγκρίσιμα προς τη συμβατική παραγωγή, άρα πρέπει να συμμετέχει μαζικά και με αυξημένη αναλογία στην αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας.

Κλείνοντας την προβληματική αυτής της ενότητας, αξίζει να τονιστεί ότι η αποκοπή ισχύος του ΕιΣΠ σύμφωνα με κριτήρια οικονομικότητας, προκρίνει μονάδες στοχαστικού τύπου έναντι πηγών απόλυτα ελεγχόμενης ισχύος (ντετερμινιστικού τύπου). Η ιδιαιτερότητα αυτή δεν αποτελεί πρόβλημα, αφού εφαρμόζοντας τη μέθοδο κάλυψης απώλειας που αναπτύχθηκε στο *Κεφάλαιο 2*, ο ιδιοκτήτης/χειριστής του ΕιΣΠ μπορεί να ανταπεξέλθει καταλλήλως.

# 5

## *Υποστήριξη της ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας*

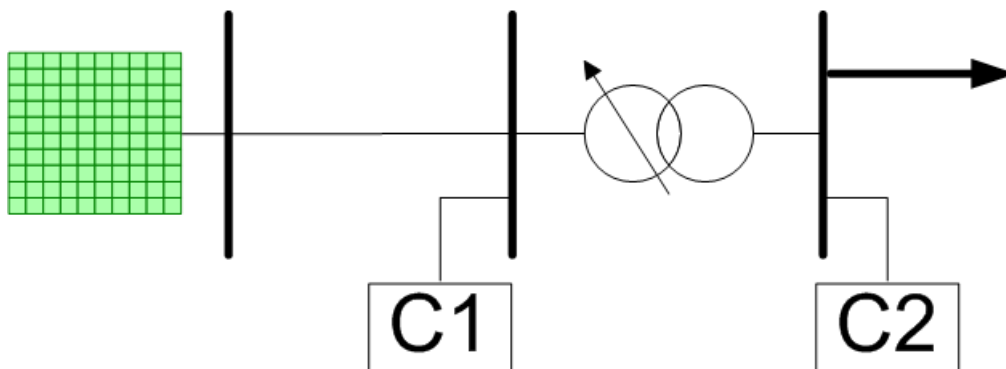
Η εξυπηρέτηση των φορτίων, αλλά και η ορθή λειτουργία των εξοπλισμών μεταφοράς και διανομής ισχύος εξαρτάται σημαντικά από την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα τους [1-5]. Στα πλαίσια της αναγκαίας αυτής συνθήκης, οι ρυθμιστικές αρχές και οι διαχειριστές των ΣΗΕ (σε κάθε επίπεδο ισχύος) έχουν συμπεριλάβει στους κώδικες λειτουργίας σχετικά άρθρα που προδιαγράφουν την τάση που μετράται σε προκαθορισμένα σημεία, εντός συγκεκριμένων ορίων [5-8]. Τα αναφερόμενα όρια όμως, επιβάλλονται (αυστηρά στις περισσότερες περιπτώσεις) και στις μονάδες ΔΠ [9-11]. Η εν λόγω παρατήρηση, με τη σειρά της, σημαίνει ότι η ΔΠ ελέγχεται κατά τρόπο που ενδέχεται να δυσχεράνει περαιτέρω μια προβληματική κατάσταση τάσης. Για παράδειγμα, υπό γενικά μειωμένη τάση ΣΗΕ, σε κάποιους ζυγούς ενδέχεται αυτή να έχει ήδη βρεθεί εκτός των ορίων και εκ τούτου να οδηγήσει στην αυτόματη αποκοπή μονάδων ΔΠ. Αφ' ης στιγμής οι τελευταίες εξυπηρετούσαν τοπικά φορτία, αυτά θα τροφοδοτούνται πλέον από το υπερκείμενο δίκτυο, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τις ροές ρεύματος και άρα τις πτώσεις τάσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί μια μέθοδος ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ, η οποία στηρίζεται στην αναδιανομή της προγραμματισμένης ισχύος του κατά μήκος μιας γραμμής διανομής, έτσι που να περιορίζει τις ροές ρεύματος κατά μήκος της γραμμής.

## 5.1 Το πρόβλημα της τάσης στην παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

### 5.1.1 Ρύθμιση τάσης κατά τις κλασικές μεθόδους

Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού ρυθμίζονται να παράγουν ισχύ σε τάση τέτοια που να εξυπηρετεί τις προδιαγραφές λειτουργίας στα σημεία όπου διανέμεται [7]. Λόγω της ανάπτυξης των ΣΗΕ με την παρεμβολή των δικτύων μεταφοράς (τα οποία έχουν έντονα επαγωγικό χαρακτήρα), η διατήρηση της τάσης σε επίπεδα ικανά να εξυπηρετήσουν τα φορτία εντός των καθορισμένων ορίων εξασφαλίζεται από την έγχυση αέργου ισχύος από τις ίδιες τις γεννήτριες [12]. Ο έλεγχος αυτός αν και αποτελεί τη συνηθέστερη πρακτική ρύθμισης τάσης, επιφορτίζει το ΣΗΕ με άεργο ρεύμα, ενώ υπόκειται και στους τεχνικούς περιορισμούς των γεννητριών που τον υλοποιούν. Επίσης, στην κλασική του υλοποίηση λειτουργεί μόνο με την τοπική πληροφορία από την τιμή τάσης του ζυγού στον οποίο συνδέεται και αποδίδει θετικά μόνο σε περιορισμένη απόσταση (ηλεκτρικά). Συνεπώς, για να εξασφαλιστεί ρύθμιση σε απομακρυσμένο σημείο του ΣΗΕ απαιτείται εντολή διαχειριστή μέσω κατάλληλης τηλεπικοινωνιακής υποδομής και σημαντική ποσότητα αέργου ισχύος (αντιστάθμιση πτώσης τάσης γραμμής).

Ο τελευταίος ειδικά περιορισμός καθιστά απαραίτητη την ικανότητα ρύθμισης της τάσης τοπικά σε οποιοδήποτε ζητούμενο σημείο του ΣΗΕ - με κύριο μέλημα, βεβαίως, να εντοπίζεται στα σημεία που εξυπηρετούν φορτίο. Ως συνήθης τοπολογία που απαντά στην περιγραφή, είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

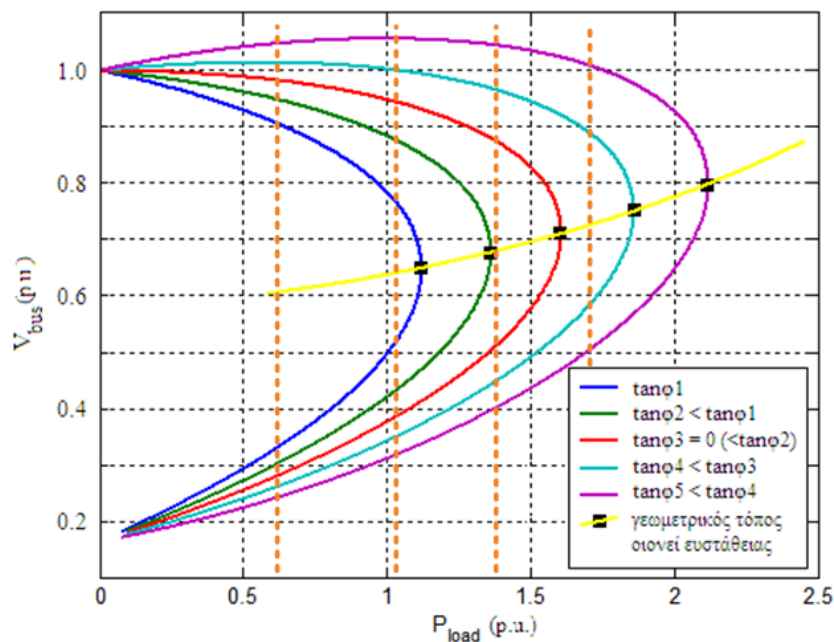


Σχήμα 5.1. Παράδειγμα γραμμής διανομής συνδεόμενη στο δίκτυο μεταφοράς μέσω γραμμής και Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και δύο πιθανές θέσεις τοπικής αντιστάθμισης πτώσης τάσης C1 και C2.

Πρώτη τοπικού επιπέδου πρακτική για το σκοπό αυτό είναι η αντιστάθμιση αέργου ισχύος με παθητικά ή ενεργά μέσα [13]. Ως παθητικά μέσα περιγράφονται οι συστοιχίες πυκνωτών και τα συστήματα πηνίων τα οποία συνδέονται εν σειρά ή εν παραλλήλω (αναλόγως της ζητούμενης ρύθμισης) προς τις γραμμές μεταφοράς πλησίον των ζυγών φορτίου. Τα μέσα αυτά εγχέουν ή απορροφούν συγκεκριμένη άεργο ισχύ σύμφωνα με μη αυτόματη ρύθμιση. Σε αντίθεση προς τα



παθητικά, τα ενεργά μέσα προσαρμόζουν αυτόματα την άεργο ισχύ που συμβάλλουν στο δίκτυο, ώστε να βελτιστοποιούν τη συμμετοχή τους. Χαρακτηριστικότερα παραδείγματα της προσέγγισης αυτής είναι τα ευέλικτα μέσα μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems, FACTS) με κυριότερο εκπρόσωπο τα συστήματα Static VAR Compensators (SVC) [14], τα οποία όντας εξοπλισμένα με ηλεκτρονικά ισχύος, αποφέρουν ευρεία ικανότητα ρύθμισης και υπό φορτίο. Η επενέργειά τους στο προφίλ της σχέσης ικανότητας μεταφερόμενης ενεργού ισχύος γραμμής προς τάση ζυγού άφιξης φαίνεται στο Σχήμα 5.2, όπου αυξανόμενης της αντισταθμίζουσας άεργου ισχύος μειώνεται το  $\tan(\varphi)$ , όπου  $\varphi$  η γωνία συντελεστή ισχύος φορτίου του ζυγού άφιξης. Πέραν του επενδυτικού τους κόστους, οι παραπάνω εφαρμογές για πολύ μικρές τιμές του  $\tan(\varphi)$  μετατοπίζουν το σημείο ιονεί ευστάθειας προς τις τιμές τάσης της συνιστώμενης λειτουργίας του δικτύου διανομής [15].



Σχήμα 5.2. Καμπύλη ικανότητας μεταφοράς ενεργού ισχύος γραμμής προς τάση ζυγού άφιξης της με παράμετρο την αντισταθμίζουσα άεργο ισχύ στον ζυγό άφιξης.

Η δεύτερη προσέγγιση για τον έλεγχο της τάσης σε τοπικό επίπεδο πλησίον των φορτίων αφορά τη λειτουργία των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό (ΣΑΤΥΦ) ή εκτός φορτίου που φέρουν οι μετασχηματιστές διανομής. Οι Μ/Σ διανομής αναπροσαρμόζουν αυτόματα εν λειτουργία ή με χειρισμό εκτός λειτουργίας τη λήψη επί των σπειρών του πρωτεύοντος ή του δευτερεύοντος τυλίγμάτος τους, έτσι ώστε η τάση προς την πλευρά του ελέγχου να αποκαθίσταται σε αποδεκτές τιμές [1]. Η ρύθμιση γίνεται επιτηρώντας είτε την τάση πλευράς, είτε κάποιον μέσο όρο τάσεων κατά μήκος του ελεγχόμενου δικτύου, όπως π.χ. κατά μήκος γραμμής/ών διανομής που οργανώνονται υπό κοινή παροχή. Η τεχνική είναι περιορισμένη ως προς το εύρος και τη συνέχεια υλοποίησής της, αφού συνήθως πραγματοποιείται βηματικά και ανά διακριτά χρονικά διαστήματα [16], ενώ ενδέχεται (υπό ποικίλες, μάλιστα, συνθήκες [15]) να οδηγήσει και σε αστάθεια τάσης. Επιπλέον, έχει εγερθεί και η πρόνοια φθοράς του εν λόγω εξοπλισμού από τον συχνό χειρισμό

του, ο οποίος γίνεται συχνότερος για ρύθμιση κατά μήκος δικτύων διανομής που χαρακτηρίζονται από σημαντική διείσδυση ΑΠΕ. Οι μεταβολές των τελευταίων σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες, ενδέχεται να επηρεάζουν τη μετρική τάσης που παρακολουθεί το ΣΑΤΥΦ και ως εκ τούτου τη θέση ρύθμισής του.

Και οι δύο παραπάνω έλεγχοι συνιστούν απόκριση προς την αποκατάσταση της μεταβατικής ευστάθειας της τάσης και δεν εξασφαλίζουν αποφυγή μιας γενικευμένης κατάρρευσης του συστήματος [1,12,15]. Πρόνοια για τέτοια συμβάντα επιτυγχάνεται με τη διασφάλιση ευστάθειας μονίμου καταστάσεως, δηλαδή με την καμπύλη φορτίου (ενδεικτικά, οι κάθετες γραμμές επί του άξονα  $P_{load}$  στο Σχήμα 5.2) να βρίσκεται σε κάθε περίπτωση αριστερότερα του σημείου οιονεί ευστάθειας για την εκάστοτε ικανότητα μεταφερόμενης ισχύος γραμμής. Συνεπώς, μία τρίτη πρακτική ρύθμισης τάσης είναι η κατάρτιση σχεδιασμών αποκοπής φορτίου κατάλληλων μεγέθους, θέσης και τύπου. Όσο αφορά την έκφραση «κατάλληλου μεγέθους», ερμηνεύεται ως την όσο το δυνατόν αριστερότερη μετακίνηση της καμπύλης φορτίου μονίμου καταστάσεως. Όσο αφορά την επιλογή αποκοπής από φορτία «κατάλληλων θέσης και τύπου», εννοείται φορτίων τα οποία αποδίδουν αρνητικότερα κατά τη μεταβατική περίοδο των φαινομένων συχνότητας (οπότε προτιμάται να αποκόπτονται) και βρίσκονται όσο εγγύτερα του σημείου του ΣΗΕ που έχει εκδηλωθεί το πρόβλημα τάσης (λόγω εντοπιότητας του φαινομένου).

### 5.1.2 Ρύθμιση τάσης στα εξυπνότερα δίκτυα

Εναλλακτικά των προαναφερθέντων κλασικών μεθόδων, η ανάπτυξη των Εξυπνότερων Δικτύων προσέφερε προσεγγίσεις για τη ρύθμιση της τάσης οι οποίες στηρίζονται είτε σε βελτιστοποίηση σχετικού δείκτη, είτε σε ανάλυση ευαισθησίας της τάσης από τις μεταβολές των εμπλεκόμενων συντελεστών, είτε σε κατάρωση στρατηγικών ελέγχου με βάση τις παρατηρούμενες μεταβολές.

#### 5.1.2.1 Ρύθμιση τάσης με βελτιστοποιημένη διαχείριση συντελεστών του έξυπνου δικτύου

Κατά την πρακτική αυτή, η ενεργός ή/και η άεργος ισχύεις των ελεγχόμενων συντελεστών ρυθμίζονται για τη βελτιστοποίηση είτε της ροής φορτίου (ελαχιστοποίηση απωλειών δικτύου) είτε του προφίλ τάσης στο ΣΗΕ (αθροιστική ελαχιστοποίηση διακύμανση τάσης από την ονομαστική τιμή της).

Στις [17,18] αξιοποιείται η βέλτιστη ροή φορτίου (ΒΡΦ), η οποία αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα η αντικειμενική συνάρτηση έχει τη γενική μορφή:

$$\begin{aligned} \min : f(\tilde{x}) &= \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{m=1 \\ (m \neq k)}}^{n-1} P_{km}(\tilde{x}) \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{\substack{m=1 \\ (m \neq k)}}^{n-1} V_k^2(\tilde{x}) \cdot (g_{skm} + g_{km}) - V_k(\tilde{x}) \cdot V_m(\tilde{x}) \cdot [g_{km} \cdot \cos(\delta_k(\tilde{x}) - \delta_m(\tilde{x})) + b_{km} \cdot \sin(\delta_k(\tilde{x}) - \delta_m(\tilde{x}))] \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου,  $\tilde{x}$  το διάνυσμα των μεταβλητών ελέγχου. Η αντικειμενική συνάρτηση συμπληρώνεται από τους περιορισμούς εξισώσεων της ροής φορτίου, ανισοτήτων των ορίων τάσεων, των φορτίσεων εξοπλισμού και των διαθέσιμων περιθωρίων ελέγχου των συντελεστών. Στην [17] η ΒΡΦ συμπληρώνεται από χειρισμό του ΣΑΤΥΦ στον Μ/Σ, ενώ στην [18] τα όρια της τάσης στους ανισοτικούς περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης επιτρέπεται να διευρύνονται μέχρι εντοπισμού λύσης που να εξυπηρετεί την (5.1). Και οι δύο εργασίες αναγνωρίζουν, ουσιαστικά, πιθανή αδυναμία της ΒΡΦ να επιτύχει έλεγχο των μεταβλητών εντός των προδιαγραφών και, άρα, πραγματική ελαχιστοποίηση των απωλειών του εξεταζόμενου ΣΗΕ μες στο εύρος ρύθμισης. Αν στα παραπάνω συνυπολογιστεί ότι κατά μήκος μιας γραμμής διανομής δεν μπορεί να υποτεθεί σημαντικός αριθμός ελεγχόμενων συντελεστών ΔΠ καθώς και ελεύθερος χειρισμός τους, γίνεται αντιληπτό ότι το πρόβλημα είναι υπαρκτό και μάλλον δυσκολότερο.

Για τη βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης η σχετική αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\min : f(\tilde{x}) = \sum_{k=1}^n (V_k - V_{sp})^2 \quad (5.2)$$

όπου,  $V_{sp}$  μια προκαθορισμένη τιμή από την οποία επιθυμείται η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης όλων των ζυγών και η οποία είναι συνήθως ίση με 1 ανά μονάδα στη βάση της κατά τόπους ονομαστικής τάσης. Στη [19] η παραπάνω πρακτική εφαρμόζεται με διεσπαρμένο τρόπο, αλλά όχι στο σύνολο των διαθέσιμων συντελεστών, παρά μόνο σε έναν συντελεστή ανά γραμμή διανομής ή σε ομάδα ελεγχόμενων συντελεστών υπό κοινό Σημείο Κοινής Σύνδεσης με το ΣΗΕ. Η αιτιολόγηση της περιορισμένης εφαρμογής στηρίχτηκε στην αλληλεπίδραση μεταξύ των συντελεστών και το «κυνήγι» [21] που θα προκαλεί ανάμεσά τους μια ευρύτερη υλοποίησή της. Με κεντρικό έλεγχο στην [20] η (5.2) δε συμπληρώνεται από περιορισμό της τάσης των ζυγών εντός των προκαθορισμένων ορίων, αλλά εναλλακτικά, ενσωματώνεται στην εν λόγω συνάρτηση και βαρύνεται με συντελεστή ποινής όταν και όπου η τάση αποκλίνει εκτός αυτών. Είναι δηλαδή εμφανές, ότι ούτε κατά αυτή την τεχνική εξασφαλίζεται καθολικός έλεγχος σύμφωνα με τα πρότυπα.

#### 5.1.2.2 Ρύθμιση τάσης με ανάλυση ευαισθησίας της τάσης στον έλεγχο συντελεστών του

##### έξυπνου δικτύου

Ως εκ της επίλυσης ροής φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson συμπληρώνεται η Ιακωβιανή μήτρα του ΣΗΕ σύμφωνα με τις κάτωθι:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(n)} \\ \Delta Q^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(n+1)} \\ \Delta V^{(n+1)} / V^{(n)} \end{bmatrix}$$

όπου,

$$\left. \begin{aligned} H_{kk} &= \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \Delta \theta_k}, N_{km} = \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \Delta V_m} \\ J_{km} &= \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \Delta \theta_m}, L_{km} = \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \Delta V_m} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Η αντίστροφη της Ιακωβιανής μήτρας εκφράζει την επιρροή στοιχειωδών μεταβολών της ενεργού και της αέργου ισχύος κάθε ζυγού στην τάση και τη γωνία ισχύος του ίδιου και των υπόλοιπων ζυγών του μελετώμενου ΣΗΕ. Ως εκ τούτου, κάθε στοιχείο της σειράς  $i$  των υποπινάκων  $N$  και  $L$  της αντίστροφης Ιακωβιανής μήτρας είναι η ευαισθησία της τάσης του ζυγού  $i$  στις μεταβολές ενεργού/αέργου ισχύος των συντελεστών που βρίσκονται σε κάθε ζυγό  $j$  (στήλης). Οι [22-25] χρησιμοποιούν την προσέγγιση αυτή με κατάλληλες προσαρμογές ως προς το εκάστοτε πρόβλημα. Στην [22] το προς ρύθμιση ΣΗΕ οργανώνεται αρχικά σε περιοχές όπου αλληλεπιδρούν χαλαρά μεταξύ τους (όσο αφορά το πρόβλημα της τάσης) και κατόπιν ο έλεγχος προσπαθεί να μεταβάλλει τις ενεργές και άεργες ισχύεις των συντελεστών κατά τρόπο που να περιορίσει τη μέγιστη ευαισθησία σε κάθε περιοχή. Κάθε ζυγός με προβληματική τάση αντιμετωπίζεται κατά την [23] ξεχωριστά, σύμφωνα με τη γραμμή του στην αντίστροφη Ιακωβιανή μήτρα, ενώ δε δίνονται πληροφορίες για το πώς θα εκτελούνταν η μέθοδος με πολλαπλούς προβληματικούς ζυγούς. Η [24] προτείνει μια αναλυτικότερη προσέγγιση οργανώνοντας το ΣΗΕ από το επίπεδο μεταφοράς ως το επίπεδο διανομής και χρησιμοποιώντας μετά την ευαισθησία των ζυγών για ιεραρχική εκτέλεση ρύθμισης τάσης. Στην [25] επιχειρείται βελτιστοποίηση της επίδρασης της ευαισθησίας μεταβολών ισχύος σε όλους τους ζυγούς ταυτόχρονα με βελτιστοποίηση (κοινή αντικειμενική συνάρτηση) του προφίλ τάσης και του χειρισμού του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ της γραμμής διανομής. Σε κάθε περίπτωση εφαρμογής ανάλυσης ευαισθησίας των τάσεων, η οποιαδήποτε πραγματοποιούμενη μεταβολή, θα μεταβάλλει και τις τιμές της Ιακωβιανής μήτρας, η οποία – θεωρητικά – πρέπει να υπολογίζεται και να αντιστρέφεται εκ νέου (δε γίνεται στα παραπάνω εκτός του [22], ενώ η [23] αναγνωρίζει την ανακρίβεια). Ακόμη, δεν μπορεί να θεωρείται ελέγξιμος ο οποιοσδήποτε συντελεστής του ΣΗΕ, ενώ επιπλέον μπορεί να τεθεί και το ερώτημα με ποια προτεραιότητα πρέπει να σειραθετηθούν οι προβληματικές τάσεις που θα διορθωθούν και αξιοποιηθούν οι συντελεστές ευαισθησίας τους, αφού δεν υπάρχει σαφής ποσοτικοποίηση της μεταξύ τους σχέσης.

### 5.1.2.3 Ρύθμιση τάσης με στρατηγικές έλεγχου των συντελεστών του έξυπνου δικτύου

Στην [26] εντοπίζονται και καταγράφονται, μέσω κατάλληλης εκπαίδευσης ΔΑ, καταστάσεις που συνιστούν κίνδυνο αστάθειας τάσης. Αν, εν λειτουργία του ΣΗΕ, κάποια από τις καταστάσεις αυτές διαγνωστεί, μπορεί να εφαρμοστεί κατάλληλος έλεγχος για μεταγωγή του ΣΗΕ σε ασφαλή κατάσταση. Ως μέθοδος, απευθύνεται στο διαχειριστή του συστήματος και, επιπλέον, με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας επιβάλλει την εκτέλεση/υλοποίηση του προγράμματος

αποκοπής από τους διαχειριστές διανομής κατά τόπους. Ως πρακτική σε επίπεδο περιοχής προσφέρει ευελιξία υλοποίησης, προαπαιτεί όμως κατάλληλη προετοιμασία των διαχειριστών διανομής και δυνατότητα/διαθεσιμότητα για τις κατά τόπους αποκοπές.

Οι σχέσεις  $P \propto f$  και  $V \propto Q$  αξιοποιούνται στην [27] για την κατάστρωση ενός γενικευμένου ελεγκτή ενεργού και αέργου ισχύος για τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης από μονάδες ΔΠ σε αδύναμα δίκτυα. Όπως είχε παρατηρηθεί και παλαιότερα στην [28], ο λόγος  $R/X$  της γραμμής επί της οποίας εφαρμόζεται ο έλεγχος είναι σπουδαίος όσο αφορά την εγκυρότητα των δύο παραπάνω αναλογιών. Πιο συγκεκριμένα αν  $R/X \gg 1$  (αντί του τυπικού  $R/X \ll 1$  που ισχύει κατά κόρον για το δίκτυο μεταφοράς), τότε οι σχέσεις γίνονται πλέον  $\{P \propto V, Q \propto f\}$  και ανάλογα προσαρμόζεται και η τοπολογία του ρυθμιστή.

Στην [29] έχει σχεδιαστεί στρατηγική συντονισμού των συντελεστών της ρύθμισης τάσης αναλόγως της χρονικής σταθεράς του φαινομένου τάσης που επιδιώκεται να ελεγχθεί. Υπό αυτό το πρίσμα, στη ρύθμιση εμπλέκεται ο Μ/Σ εξοπλισμένος με ΣΑΤΥΦ και οι μονάδες ΔΠ με διαχείριση της αέργου ισχύος τους. Παρόμοιος τοπικός έλεγχος, αλλά με χαρακτηριστικά διασποράς επιχειρείται και στην [30], όπου τα ποικίλα θερμοστατικά φορτία ελέγχονται, ώστε να αποκρίνονται στις διακυμάνσεις τάσεις που προκαλούν μονάδες ΔΠ και έτσι να επιτρέπουν μεγαλύτερη διείσδυσή τους. Και σε αυτή τη μέθοδο, συστήνεται ο συντονισμός των ελεγκτών με το ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ διανομής.

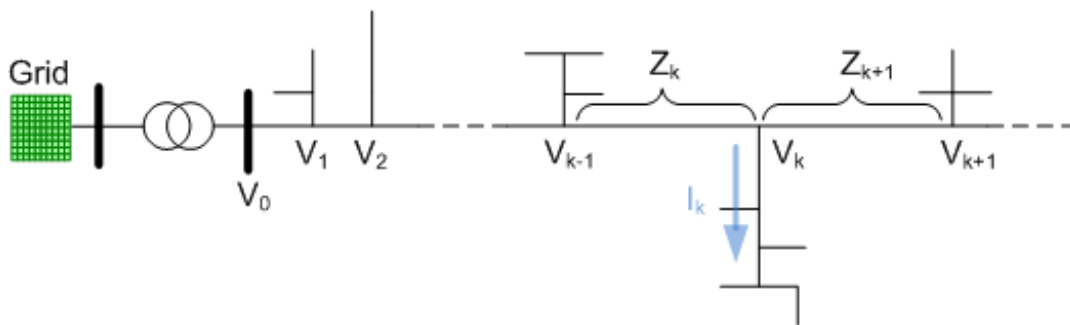
### **5.1.3 Σχολιασμός υπαρχουσών μεθόδων ρύθμιση τάσης**

Από τις κλασικές προσεγγίσεις ελέγχου που εκτέθηκαν στην Υποενότητα 5.1.1 αυτές που εμπλέκουν αντιστάθμιση αέργου ισχύος συσχετίζονται με ενίσχυση της υποδομής του δικτύου και, άρα, επενδύσεις, ενώ κατά τη λειτουργία τους πρέπει να περιορίζονται, ώστε να μην απειλούν τη δυναμική ευστάθεια του συστήματος (όπως πρέπει να συμβαίνει και με τα ΣΑΤΥΦ των σχετικά εξοπλισμένων Μ/Σ). Από την άλλη, η αποκοπή φορτίου συσχετίζεται με συμβατική υποχρέωση που ανατίθεται σε συντελεστές του ΣΗΕ και οι οποίοι ως πελάτες ενέργειας σε μία απελευθερωμένη αγορά ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμοι να εντάσσονται σε τέτοια πλάνα προληπτικής προστασίας. Επιπλέον, άλλες ομάδες φορτίων διάσπαρτες και μικρού μεγέθους, με σπουδαία όμως επιρροή σε φαινόμενα τάσης (π.χ. κλιματισμός) είναι εκ των πραγμάτων μη ελέγξιμες με τα όσα περιγράφηκαν.

Από τις μεθοδολογίες των Εξυπνότερων Δικτύων, όσες αφορούν τεχνικές βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας τείνουν να απαιτούν πλήρη γνώση των δεδομένων του ελεγχόμενου ΣΗΕ σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Ειδικά οι μέθοδοι βελτιστοποίησης αδυνατούν να εγγυηθούν ρύθμιση με αξιοποίηση μόνο των ενεργών και άεργων ισχύων των μονάδων ΔΠ ή/και των φορτίων και απαιτούν μεταχείριση του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ ή/και χαλάρωση των προδιαγεγραμμένων περιορισμών. Περαιτέρω, τόσο η βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης όσο και

η ελαχιστοποίηση των απωλειών με ΒΡΦ συνιστούν υπερβολή αν το πρόβλημα τάσης είναι περιορισμένο σε μικρή περιοχή ή σε ελάχιστους ζυγούς, ενώ επιπλέον ενδέχεται να διαταράσσουν σημαντικά την οικονομικότητα και τη συνολική ισχύ έγχυσης που μπορεί να έχει εξαχθεί από τον προγραμματισμό ημέρας για τους συγκεκριμένους συντελεστές [30]. Σε σχέση με την ανάπτυξη μεθόδων λειτουργίας ελεγκτών των μονάδων ΔΠ, πρέπει να αναφερθεί το πρόβλημα της παρεμβολής στους εξοπλισμούς, καθώς και το ότι η πολύ μικρή ηλεκτρική εμβέλεια ελέγχου τους ίσως στερεί έναν ευρύτερο και αποτελεσματικότερο συντονισμό τους.

## 5.2 Τα ρεύματα ζυγών ως βάρη κατά μήκος γραμμής διανομής

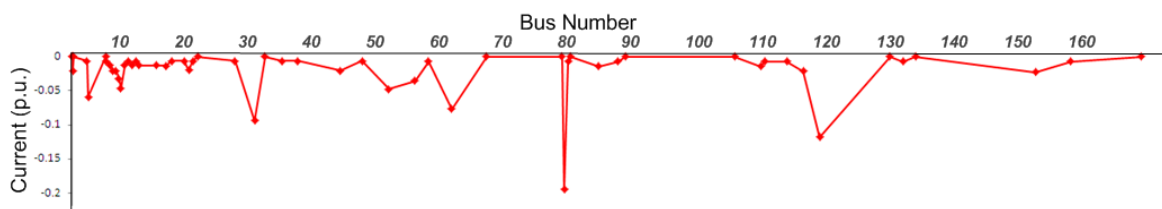


Σχήμα 5.3. Υπολογισμός ρεύματος ζυγού  $k$  από τις τάσεις του ίδιου και των γειτονικών του ζυγών.

Για τρεις διαδοχικούς ζυγούς κατά μήκος γραμμής διανομής χωρίς βρόχους (ενδεικτικά στο Σχήμα 5.3) μπορεί να υπολογιστεί το εγχέομενο/απορροφώμενο ρεύμα σύμφωνα με την κάτωθι:

$$\tilde{I}_k = \frac{\tilde{V}_k - \tilde{V}_{k-1}}{\tilde{Z}_k} - \frac{\tilde{V}_{k+1} - \tilde{V}_k}{\tilde{Z}_{k+1}} \quad (5.4)$$

Ως εκ τούτου, μια αναπαράσταση τμήματος του βασικού κορμού μιας ακτινικής γραμμής με τα απορροφώμενα ρεύματα μπορεί να είναι όπως φαίνεται ενδεικτικά για γραμμής διανομής 175 ζυγών στο Σχ. 5.4.



Σχήμα 5.4. Αναπαράσταση απορροφώμενων ρευμάτων ζυγών κατά μήκος γραμμής διανομής 175 ζυγών.

Αντίστοιχη αναπαράσταση μπορεί να εξαχθεί και για τα εγχέομενα ρεύματα.

Κατά τις παραπάνω παρατηρήσεις, μια γραμμή διανομής μπορεί να ειπωθεί ως σώμα με σημειακές μάζες τα ρεύματα που εγχέονται ή απορροφώνται κατά μήκος του. Με αυτή την οπτική και χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρικό μήκος της γραμμής την αθροιστική σύνθετη αντίσταση από τον ζυγό της παροχής, είναι εφικτό να προσεγγιστεί το σημείο το οποίο αντιστοιχεί στο κέντρο

βάρους των απορροφώμενων και στο κέντρο βάρους των εγχεόμενων ρευμάτων ως ο σταθμισμένος μέσος του μέτρου της αθροιστικής σύνθετης αντίστασης των ζυγών της γραμμής διανομής που απορροφούν και εγχέουν ρεύμα, αντίστοιχα, με βάρη το ρεύμα κάθε ζυγού. Η σχετική μαθηματική έκφραση είναι:

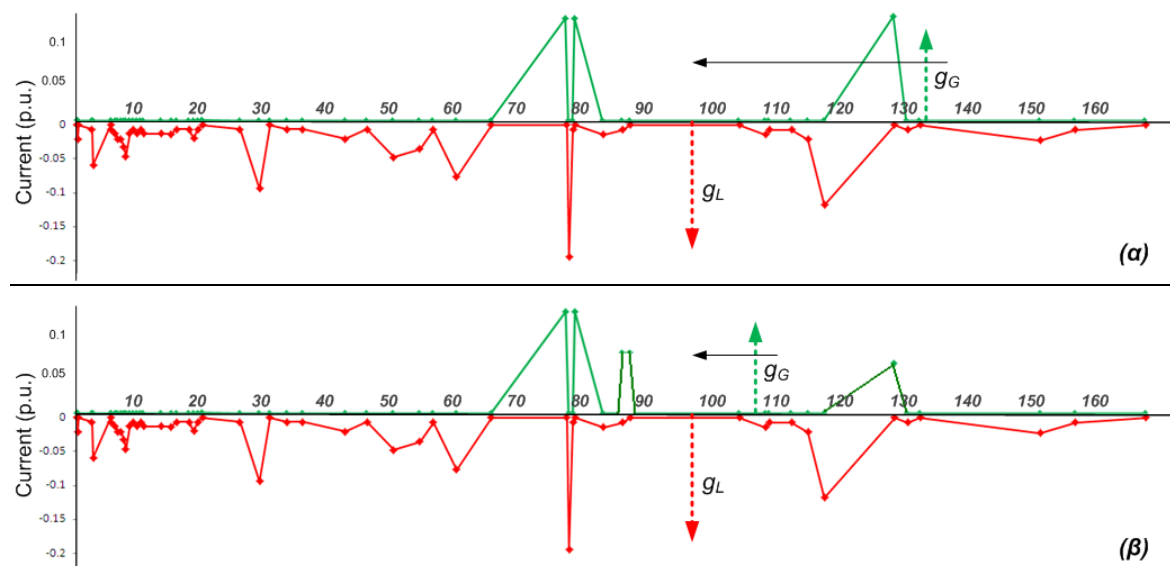
$$g = \frac{\sum_{k=1}^n (\tilde{I}_k \cdot \sum_{m=1}^k |\tilde{Z}_m|)}{\sum_{k=1}^n \tilde{I}_k} \quad (5.5)$$

Το βαρύκεντρο των απορροφώμενων ρευμάτων ας καλείται στο εξής  $g_L$ , ενώ των εγχεόμενων  $g_G$ . Μεταξύ τους επίσης, θα καλούνται ως **συμμετρικά**.

### 5.3 Μέθοδος υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας σε γραμμή διανομής με αντιστάθμιση βαρύκεντρων ρευμάτων

#### 5.3.1 Ιδέα της μεθόδου

Η ρύθμιση της τάσης εδώ στηρίζεται στη διανομή ή αναδιανομή της προγραμματισμένης ισχύος του ΕιΣΠ κατά τρόπο που να μεταφέρεται η παραγωγή του πλησίον του βαρύκεντρου των απορροφώμενων ρευμάτων, μετατοπίζοντας έτσι προς την ίδια κατεύθυνση και το βαρύκεντρο των εγχεόμενων ρευμάτων, τόσο για περιπτώσεις υπότασης όσο και για συμβάντα υπέρτασης. Η περιγραφή αυτή αποτυπώνεται καλύτερα στο Σχ. 5.5.



Σχήμα 5.5. Αναπαράσταση ιδέας αντιστάθμισης βαρύκεντρων εγχεόμενων/απορροφώμενων ρευμάτων (α) αρχική κατανομή ισχύος, (β) μείωση ισχύος πηγής ζυγού 128 και φόρτιση πηγών στους ζυγούς 88 και 89.

### 5.3.2 Καθορισμός βασικού κορμού γραμμής διανομής προς ρύθμιση τάσης

Ως γνωστόν, οι γραμμές διανομής είναι εν γένει ακτινικές με διακλαδώσεις. Άρα, αν εξεταστεί ο προσδιορισμός βαρύκεντρου σε όλο το μήκος τους είτε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια δεύτερη διάσταση είτε θα πρέπει να απλοποιηθεί προς έναν ακτινικό κορμό, στα σημεία διακλάδωσης του οποίου θα αναπαρίσταται συγκεντρωμένη η ισχύς που παράγεται/καταναλώνεται παρακάτω. Αφ' ης στιγμής στις περισσότερες περιπτώσεις οι διακλαδώσεις εκπροσωπούν ελάχιστο ηλεκτρικό μήκος και μόνο μικρό κλάσμα της συνολικής ισχύος της γραμμής, επιλέγεται η δεύτερη προσέγγιση. Συγκεκριμένα, προπαρασκευαστικά της μεθόδου, καθορίζεται με αναζήτησης προτεραιότητας βάθους (Depth First Search – DFS) [32] το μονοπάτι της γραμμής διανομής με αφετηρία τον ζυγό του Μ/Σ Μεταφοράς-Διανομής το οποίο αντιστοιχεί προς το μεγαλύτερο ηλεκτρικό μήκος που ενυπάρχει στη γραμμή διανομής. Για κάθε ζυγό στο μονοπάτι συμπληρώνεται διάλυμα των ζυγών της διακλάδωσής του (αν έχει).

### 5.3.3 Αναλυτική υλοποίηση μεθόδου υποστήριξης ρύθμισης τάσης

Η τεχνική ακολούθως θα περιγραφεί για χάρη απλότητας μόνο για την αντιμετώπιση της υπότασης (για την περίπτωση υπέρτασης η μέθοδος είναι αναλογικά όμοια). Αρχικά, υπολογίζεται το ρεύμα κάθε ζυγού κατά την (5.4). Εν συνεχεία, υπολογίζονται το κέντρο βάρους των εγγεόμενων ρευμάτων  $g_G$ , το κέντρο βάρους των απορροφώμενων ρευμάτων  $g_L$  καθώς και το συνδυασμένο κέντρο βάρους τους (στο εξής  $g_{GL}$ ).

Για τα βαρύκεντρα των απορροφώμενων και εγγεόμενων ρευμάτων, θα υπολογιστεί επίσης και το εύρος κάθε ενός από τη σταθμισμένη απόκλιση της ηλεκτρικής απόστασης κάθε ζυγού από το σχετικό του βαρύκεντρο με βάρος το ρεύμα του ζυγού. Το εύρος συνεπώς δίνεται ως εκ της σχέσεως:

$$\Delta g^2 = \frac{\sum_{k=1}^n (\tilde{I}_k \cdot (\sum_{m=1}^k |\tilde{Z}_m| - g))^2}{\sum_{k=1}^n \tilde{I}_k} \quad (5.6)$$

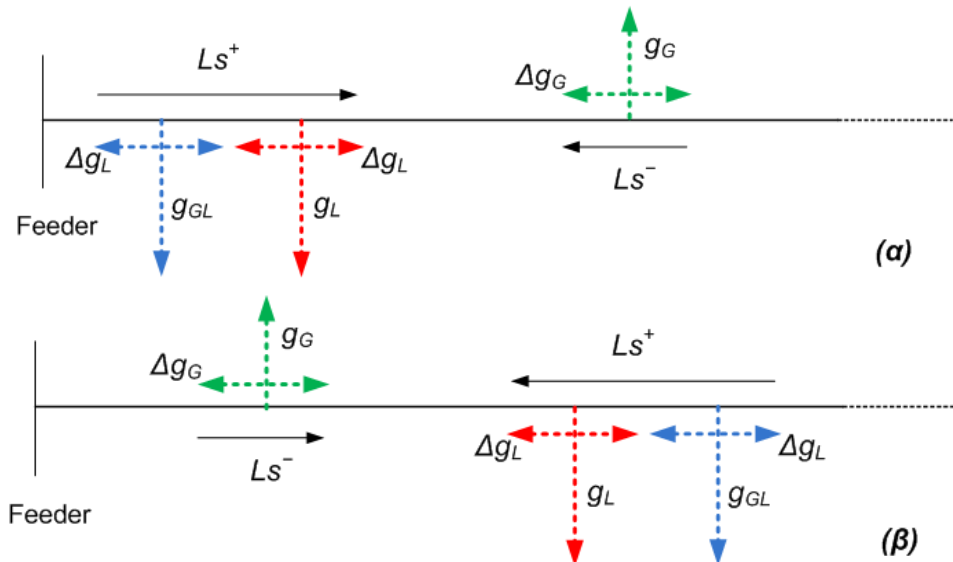
Ως εκ τούτου κάθε βαρύκεντρο πλέον θα αναπαρίσταται ως  $g \pm \Delta g$ .

Στη συνέχεια δημιουργούνται δύο λίστες προτεραιότητας. Στην πρώτη λίστα, έστω λίστα μείωσης  $Ls^-$ , καταγράφονται σε σειρά οι πηγές του ΕιΣΠ που καλούνται να περικόψουν την ισχύ τους (αν πρόκειται για αναδιανομή προγραμματισμένης ισχύος του ΕιΣΠ) ή και τα ελεγχόμενα φορτία που μπορούν να αυξήσουν την κατανάλωσή τους (συστήματα αποθήκευσης, αντλίες, κτλ), ενώ στη δεύτερη, έστω λίστα αύξησης  $Ls^+$ , σειραθετούνται οι πηγές του ΕιΣΠ που πρέπει να αυξήσουν την ισχύ τους ή και τα φορτία που μπορούν να περικόψουν/αποκόψουν την ισχύ τους. Οι δύο προαναφερθείσες λίστες συμπληρώνονται σύμφωνα με τους κάτωθι κανόνες προτεραιότητας και εξηγούνται λεπτομερέστερα με τα σχετικά διαγράμματα.



Κανόνες καθορισμού προτεραιότητας αναδιανομής ισχύος του ΕΙΣΠ

- α. Για την περίπτωση μειωμένης τάσης λειτουργίας κατά μήκος μιας γραμμής διανομής, το  $g_L$  θα ελκύει περισσότερο προς τις συντεταγμένες του το συνδυασμένο  $g_{GL}$  και, συνήθως, θα εντοπίζεται από την αντίθετη πλευρά από αυτή του συμμετρικού του  $g_G$ . Συνεπώς, οι δύο πιθανές τοπολογίες των βαρύκεντρων θα είναι κατά το Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6. Οι δύο πιθανές τοπολογίες (α) και (β) των βαρύκεντρων ρευμάτων για περίπτωση μειωμένης τάσης γραμμής διανομής και οι διευθύνσεις προτεραιότητας των  $Ls^-$  και  $Ls^+$ .

- β. Η παραγόμενη ισχύς που βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από το  $g_L$ , αλλά εντός του εύρους του  $g_G$  πρέπει να υποκατασταθεί από ισχύ ίσης ποσότητας πλησιέστερα του  $g_L$  και κατά προτεραιότητα εντός του εύρους του  $g_{GL}$ .
- γ. Οι υποκαταστάσεις που αναδιανέμουν ισχύ από τους πλησιέστερους μεταξύ των βαρύκεντρων ζυγούς έχουν τη χαμηλότερη προτεραιότητα.
- δ. Ισχύεις από μονάδες τους ΕΙΣΠ εκτός του εύρους των προαναφερθέντων βαρύκεντρων αμελούνται.
- ε. Ισχύεις σε περιοχή επικάλυψης των ευρών των βαρύκεντρων αμελούνται.

Οι περιγραφόμενες προτεραιότητες στους κανόνες αναδιανομής στηρίζονται στις εξής δύο υποθέσεις. Πρώτον, όσο μεγαλύτερη η απόσταση ενός συντελεστή από το συμμετρικό βαρύκεντρό του τόσο υψηλότερη η προτεραιότητά του στη  $Ls^-$ . Η υπόθεση αυτή ισχύει επαρκώς, αφού σύμφωνα με τις θέσεις των  $g_L$  και  $g_G$ , οι συντελεστές με το προαναφερθέν χαρακτηριστικό, με την αναδιανομή τους, θα μετακινήσουν λιγότερο προς την αντίθετη από την επιθυμητή κατεύθυνση το σχετικό τους βαρύκεντρο και περισσότερο προς την επιθυμητή κατεύθυνση το συμμετρικό τους. Δεύτερον, υποτίθεται ότι το  $g_{GL}$  (διευρυμένο κατά το εύρος  $\Delta g_L$ ) οριοθετεί με το  $g_L$  το "παράθυρο" εντός του οποίου πρέπει να διανεμηθεί παραγόμενη ισχύς ή και αποκοπή φορτίου του ΕΙΣΠ. Η υπόθεση αυτή στέκει, διότι για την περίπτωση υπότασης, το  $g_{GL}$  έχει τόσο

μεγαλύτερη απόσταση από το  $g_L$ , όσο λιγότερο αντισταθμίζεται/επηρεάζεται το δεύτερο από την εγγεόμενη στη γραμμή διανομής ισχύ.

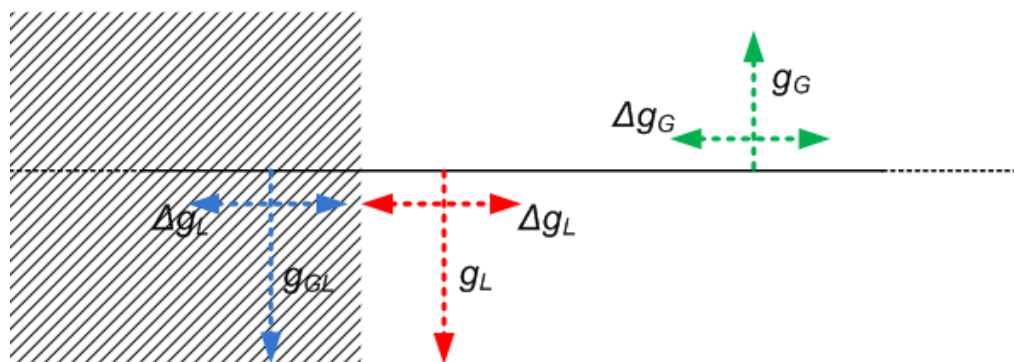
Είναι προφανές ότι η αντιστάθμιση του κάθε βαρύκεντρου με αναδιανομή της ισχύος των πηγών και των φορτίων του ΕΙΣΠΠ θα προκαλεί μετακίνηση τους σε κάθε εκτελούμενη αναδιανομή. Άρα, πρέπει να καθορίζεται αρκούντως μικρό **βήμα ισχύος διανομής/αναδιανομής**, ώστε να αποφευχθεί παλινδρόμηση μεταξύ των μετακινήσεων/αντιστάθμισης των βαρύκεντρων. Φυσικά, αυτό το βήμα μπορεί να αναπροσαρμόζεται σε κάθε γύρο αναδιανομής αξιολογώντας την αντιστάθμιση. Ακολουθώντας, για παράδειγμα, την προσέγγιση της δυαδικής αναζήτησης, αν η αντιστάθμιση είναι αμελητέα, τότε το βήμα ισχύος θα διπλασιάζεται, ενώ αν είναι υπερβολική, το βήμα θα υποδιπλασιάζεται. Ακόμη, λόγω του μικρού υπολογιστικού φόρτου της μεθοδολογίας, το βήμα μπορεί να είναι σταθερά το μικρότερο δυνατό.

Αν επιχειρείται αναδιανομή της ήδη προγραμματισμένης ισχύος του ΕΙΣΠΠ, τότε σε κάθε βήμα αναδιανομής, ενδέχεται μία εκ των  $Ls^-$  και  $Ls^+$  να είναι κενή ή να μην εκπροσωπεί διαθέσιμη ισχύ προς αναδιανομή που να καλύπτει το προαναφερθέν βήμα. Η ισχύς αυτή σημειώνεται και θα αναδιανεμηθεί στην επόμενη ευκαιρία. Ας καλείται παρακάτω **υπόλοιπο**.

Αν τα δυο συμμετρικά βαρύκεντρα  $g_G$  και  $g_L$  προσεγγίσουν επαρκώς (π.χ. διαφορά μήκους μικρότερη του 10%) ή αν το συνδυασμένο βαρύκεντρο  $g_{GL}$  βρεθεί μεταξύ των δύο ή αν η τελευταία αναδιανομή δε βελτιώνει την τάση (λόγω του  $\epsilon$ ) από τους *Κανόνες καθορισμού προτεραιότητας αναδιανομής ισχύος του ΕΙΣΠΠ*, τότε δεν μπορεί να επιτευχθεί περαιτέρω αντιστάθμιση επί του κορμού της γραμμής διανομής ως έχει. Εκτελούνται στο σημείο αυτό κατάλληλες αναπροσαρμογές στο θεωρούμενο μήκος/δομή της αντισταθμιζόμενης γραμμής διανομής.

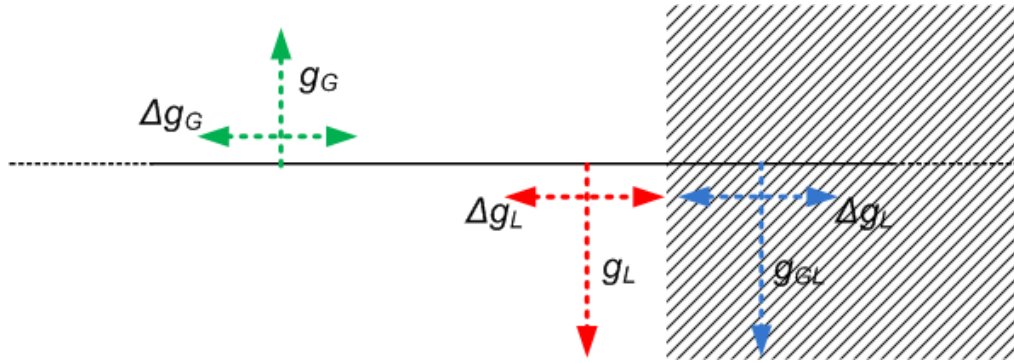
Κανόνες αναπροσαρμογής γραμμής διανομής προς αντιστάθμιση

- Για  $g_G > g_L$  αναπροσαρμογή από  $g_L - \Delta g_L$  έως τερματισμό θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής. (βλ. Σχήμα 5.7)



Σχήμα 5.7. Αναπροσαρμογή θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής για  $g_G > g_L$ .

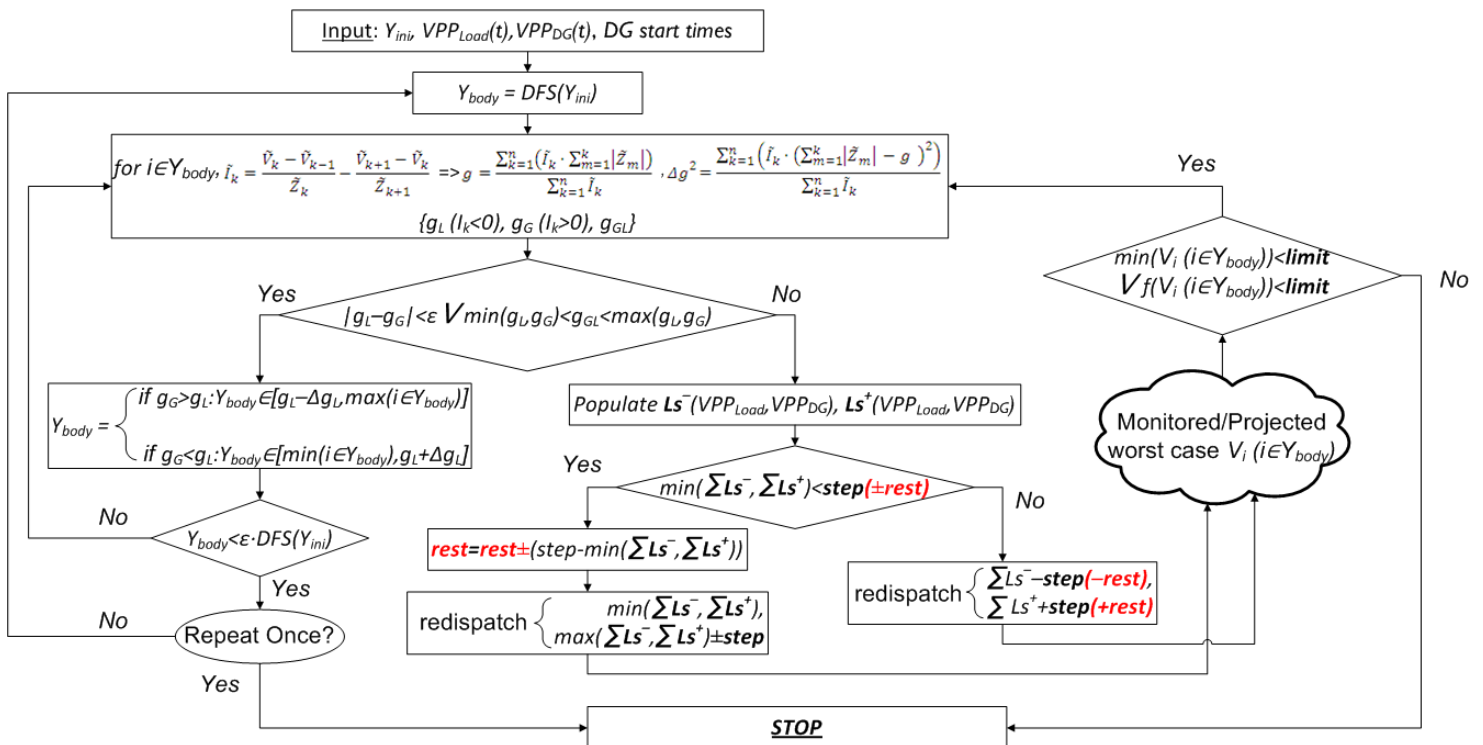
- Για  $g_G < g_L$  αναπροσαρμογή από αφετηρία θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής έως  $g_L + \Delta g_L$ . (βλ. Σχήμα 5.8)



Σχήμα 5.8. Αναπροσαρμογή θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής για  $g_G < g_L$ .

Σύμφωνα με τις περιγραφόμενες αναπροσαρμογές, εκτελείται λεπτομερής διανομή/αναδιανομή της ισχύος κατά τρόπο που να αντισταθμίζεται η γραμμή τόσο συνολικά, όσο και επιμέρους. Εξ ου στους παραπάνω κανόνες γίνεται αναφορά σε «θεωρούμενο αντισταθμιζόμενο κορμό γραμμής διανομής» και όχι σε «κορμό γραμμής διανομής».

Η αντιστάθμιση εκτελείται επαναληπτικά έως οι αναπροσαρμογές του θεωρούμενου αντισταθμιζόμενου κορμού γραμμής διανομής να οδηγούν σε κορμό μικρότερο κάποιου ελάχιστου μήκους της μελετώμενης γραμμής διανομής και επαναλαμβάνεται πλήρως ακόμα μία φορά από τον αρχικό κορμό της γραμμής διανομής και διακόπτεται σε οποιοδήποτε στάδιο κάποια διανομή/αναδιανομή επαναφέρει όλες τις τάσεις ή κάποιον προεπιλεγμένο μέσο τους εντός προδιαγεγραμμένων ορίων. Η συνολική ροή της μεθόδου δίνεται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 5.9. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθόδου υποστήριξης ρύθμισης τάσης από ΕισΠ, με αντιστάθμιση βαρύνεων ρεύματος μέσω αναδιανομής/διανομής ισχύος του.

Για το Σχήμα 5.9 η κόκκινη σήμανση του υπολοίπου βήματος που δεν αποδόθηκε καθώς έπρεπε σε κάθε βήμα διανομής/αναδιανομής υπονοεί ότι το υπόλοιπο μπορεί να αφορά μόνο το  $Ls^-$  ή μόνο το  $Ls^+$  αναλόγως της περίπτωσης.

### **5.3.4 Χαρακτηριστικά της μεθόδου**

Η προτεινόμενη τεχνική δεν είναι ολικά βέλτιστη ως προς κανένα κριτήριο ή αντικειμενική συνάρτηση, διότι (α) επηρεάζεται από τον αρχικό προγραμματισμό ισχύος του ΕιΣΠ αλλά και του φορτίου της γραμμής διανομής, (β) λόγω αποκλειστικού χειρισμού μόνο των συντελεστών του ΕιΣΠ δεν μπορεί να ελέγξει άλλες πηγές ή φορτία εκτός ΕιΣΠ και (γ) δεν ενσωματώνει οικονομικά κριτήρια αφού οδηγείται από την προτεραιότητα αντιστάθμισης των βαρύκεντρων που περιγράφηκε. Επίσης, έχει ως μέθοδος περιορισμένη ικανότητα, σε σχέση με το μέγεθος ισχύος του ΕιΣΠ συγκριτικά με το φορτίο της γραμμής διανομής.

Μολαταύτα, δεν απαιτεί έγχυση αέργου ισχύος που επιφορτίζει τις γραμμές και τους Μ/Σ διανομής, δεν απαιτεί χειρισμό του ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ, μπορεί να εκτελεστεί από τον ΕιΣΠ ως υπηρεσία προς τον διαχειριστή με ελάχιστη πληροφορία, περιορίζει τις απώλειες από την κάλυψη της ισχύος από το υπερκείμενο δίκτυο, συμβάλλει, έτσι, στην ευστάθεια μονίμου καταστάσεως χωρίς να εμπλέκει εξ αρχής αποκοπή φορτίου, δεν υπερβάλλει στην υλοποίηση της ρύθμισης τάσης αποσκοπώντας σε βελτιστοποίηση του προφίλ τάσης ή σε ελαχιστοποίηση των απωλειών (ΒΡΦ), ενώ στην περίπτωση που αναδιανέμει την αρχικά προγραμματισμένη ισχύ του ΕιΣΠ (και «μεταφέροντας», επίσης, σε κάθε επόμενο στάδιο και το αδιανέμητο υπόλοιπο) δε διαταράσσει την οικονομικότητα του δικτύου και όχι σημαντικά αυτή του ΕιΣΠ.

## **5.4 Υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό**

### ***παραγωγής ενέργειας σε γραμμής διανομής της Ρόδου***

Για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου θα εξεταστεί η υποστήριξη ρύθμισης τάσης στη γραμμή διανομής R-26 Γενναδίου του ΣΗΕ της Ρόδου. Η εν λόγω γραμμή αποτελείται από 234 ζυγούς, 119 εκ των οποίων είναι εξοπλισμένοι με Μ/Σ διανομής μέσης προς χαμηλή τάση συνολικής ισχύος 8.1MW. Το κύριο μέρος της διανομής αυτής αποτελείται από γραμμές CU-95 και οι κλάδοι της είναι αναλόγως τύπου ACSR-35, ACSR-16, AAAC-35, CU-35 και CU-16. Στο *Παράρτημα ΣΤ'* δίνονται τα στοιχεία των Μ/Σ διανομής, αναλυτικά οι οδεύσεις των γραμμών μεταξύ των ζυγών και γραφική απεικόνιση του θεωρούμενου ΣΗΕ. Σημειώνεται εδώ ότι η αρίθμηση των ζυγών είναι 200-433.

Υποτέθηκε ότι στην R-26 λειτουργεί ΕιΣΠ με τα χαρακτηριστικά που δίνονται στον Πίνακα 5.1. Ο εν λόγω ΕιΣΠ έχει μέγιστη συνολική ισχύ 3.4MW εκ των οποίων 2.1MW είναι η ΔΠ και 1.3MW το μέγιστο διακοπτόμενο φορτίο.

Πίνακας 5.1. Τύπος ΔΠ ή φορτίου, θέση επί της γραμμής διανομής R-26 της Ρόδου και ονομαστική ισχύς για τους συντελεστές του μεγάλου ΕιΣΠ.

Ζυγός	Τύπος ΔΠ	$P_n$ (kW)	Ζυγός	Τύπος ΔΠ	$P_n$ (kW)
213	Wind Park	200	227	Διακοπτόμενο φορτίο	150
224	Photovoltaic-Hydro	150	204	Διακοπτόμενο φορτίο	120
316	Wind Park	220	358	Διακοπτόμενο φορτίο	120
324	Wind Park	150	369	Διακοπτόμενο φορτίο	120
324	Biomass	250	291	Διακοπτόμενο φορτίο	120
324	LPG Gen.	150	220	Διακοπτόμενο φορτίο	120
380	Photovoltaic-Hydro	300	222	Διακοπτόμενο φορτίο	120
414	Geothermal	200	237	Διακοπτόμενο φορτίο	80
376	LPG Gen.	150	239	Διακοπτόμενο φορτίο	80
381	Diesel	150	249	Διακοπτόμενο φορτίο	80
384	Diesel	200	259	Διακοπτόμενο φορτίο	80
			328	Διακοπτόμενο φορτίο	80

Για το μελετώμενο ΣΗΕ δοκιμής της μεθόδου και για τον θεωρούμενο ΕιΣΠ εξετάστηκε πλήθος τυχαίων σεναρίων αρχικής φόρτισης τους και μετέπειτα εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας προς αξιολόγησή της. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά προσεγγίστηκε ποσοστό φόρτισης των Μ/Σ διανομής της R-26 της Ρόδου (θεωρήθηκαν ως ισοδύναμα φορτία) που να προκαλεί ελάχιστη τάση κάτω του 0.9 ανά μονάδα (εκτός, δηλαδή, προδιαγραφών [7]) – ως καλείται η φόρτιση αυτή **κρίσιμη φόρτιση**. Ύστερα, αναπτύχθηκε με Monte Carlo προσομοίωση μεγάλο πλήθος φορτίσεων γύρω από την κρίσιμη. Για κάθε τέτοια φόρτιση θεωρήθηκε αρχικά μηδενική, αλλά επίσης και τυχαία αρχική φόρτιση του ΕιΣΠ. Για κάθε μία από τις δύο, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία υποστήριξης τάσης και αξιολογήθηκε καταλλήλως. Ως παράμετρος προς εξέταση θεωρήθηκε το βήμα αναδιανομής ισχύος.

Το σημείο φόρτισης του ΣΗΕ που απέδωσε τάσεις κάτω της προδιαγραφής ήταν περί τα 4MW, το οποίο αντιστοιχεί σε μέση φόρτιση των Μ/Σ διανομής του συστήματος κατά 80%. Ανεξαρτήτως της αρχικής φόρτισης του ΕιΣΠ και μετά από κάποιες αρχικές δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι η ρύθμιση τάσης που μπορεί να αποδώσει ο ΕιΣΠ διανέμοντας ή αναδιανέμοντας κατάλληλα την ισχύ του κατά μήκος της εν λόγω γραμμής διανομής, είναι αμελητέα για βήμα διανομής/αναδιανομής λιγότερο των 350kW. Ως εκ τούτου εξετάστηκαν και παρουσιάζονται βήματα ισχύος 300kW, 350kW, 400kW, 450kW, 500kW και 550kW.

## 5.4.1 Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 300kW

### 5.4.1.1 Εφαρμογή αναδιανομής ισχύος αρχικού προγράμματος

Στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.2. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4004	1070	131	120	2.34
Τυπική Απόκλιση	122	185	238	182	1.52
Μέγιστη τιμή	4390	1620	1086	800	7.00
Ελάχιστη Τιμή	3563	552	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών εκτός μη απαιτητών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	20.50	27.66
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	53.60	72.33
Ρύθμιση τάση μη απαιτητή ( $V_{\min} > 0.9p.u.$ εξ αρχής)	25.90	

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.4. Σε επιλεγμένα κελιά, δίνεται εντός παρένθεσης το ποσοστό των περιπτώσεων που εκπροσωπούν για ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 5.4. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4021	1056	343	333	3.59
Τυπική Απόκλιση	101	190	278	169	1.25
Μέγιστη τιμή	4341	1595	1052	800	7.00
Ελάχιστη Τιμή	3763	609	0 (18%)	42	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4055	1031	113	96	3.34
Τυπική Απόκλιση	102	173	225	161	0.98
Μέγιστη τιμή	4390	1613	1086	693	7.00
Ελάχιστη Τιμή	3744	552	0	0	1.00

#### 5.4.1.2 Εφαρμογή διανομής ισχύος

Στον Πίνακα 5.6 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.6. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4004	0	1080	402	7.26
Τυπική Απόκλιση	122	0	277	108	1.87
Μέγιστη τιμή	4390	0	1916	896	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3563	0	507	201	3.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7.

Πίνακας 5.7. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	39.20
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	60.80

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.8.

Πίνακας 5.8. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	3972	0	1191	444	7.65
Τυπική Απόκλιση	126	0	262	109	1.61
Μέγιστη τιμή	4275	0	1916	896	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3563	0	507	216	3.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.9. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 300kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4024	0	1008	376	6.65
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	115	0	263	100	2.07
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4390	0	1838	718	12.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3702	0	517	201	4.00

#### 5.4.1.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα στοιχεία τα οποία συγκεντρώθηκαν από τις δοκιμές που συνοψίστηκαν στους προηγούμενους πίνακες παρατηρούνται τα εξής σημεία:

- Από τον Πίνακα 5.4, σε κάθε περίπτωση αναδιανομής ισχύος απαιτούνται τουλάχιστον 3 βήματα, άρα αναδιανομή συνολικά 900kW. Όμως, κατά μέσο όρο η απαιτούμενη πρόσθετη ισχύς (μεταβολή) που απαιτείται από τον ΕιΣΠ είναι περί τα 350kW και ειδικά από διακοπτόμενο φορτίο περί τα 330kW. Άρα, εν πολλοίς η ρύθμιση τάσης επιτυγχάνεται με αναδιανομή της ισχύος ΔΠ του ΕιΣΠ.
- Από τον ίδιο πίνακα, για μικρό, αλλά υπολογίσιμο, ποσοστό περιπτώσεων ο ΕιΣΠ δεν απαιτείται να μεταβάλλει τη συνολική ισχύ λειτουργίας του για να αποκαταστήσει την ελάχιστη τάση εντός προδιαγραφών, αλλά μόνο να την αναδιανείμει.
- Συγκρίνοντας τους Πίνακες 5.4 και 5.5 φαίνεται ότι η επιτυχής ή μη ρύθμιση της τάσης με αναδιανομή είναι ανεξάρτητη τόσο της τιμής αρχικής ισχύος της γραμμής διανομής όσο και της τιμής αρχικής φόρτισης του ΕιΣΠ. Ως εκ τούτου, επιβεβαιώνεται ότι η απόδοση της μεθόδου εξαρτάται ειδικότερα από τη διανομή της ισχύος παρά από την τιμή της.
- Για έλεγχο της τάσης εντός προδιαγραφών, η αναδιανομή ισχύος είναι ανεπιτυχής σε περισσότερες περιπτώσεις σε σχέση με το να είναι επιτυχής. Όμοια προκύπτει και για εξ αρχής διανομή της ισχύος του ΕιΣΠ.
- Κατά μέσο όρο, η ζητούμενη εκ του ΕιΣΠ ισχύς διανομής για επίτευξη ρύθμισης τάσης είναι λιγότερη από αυτήν που απαιτείται στην περίπτωση της αναδιανομής αθροίζοντας την αρχική φόρτιση του ΕιΣΠ και τη μεταβολή ισχύος του.



## 5.4.2 Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 350kW

### 5.4.2.1 Εφαρμογή αναδιανομής ισχύος αρχικού προγράμματος

Στον Πίνακα 5.10 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.10. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	3997	1066	208	163	2.59
Τυπική Απόκλιση	114	185	301	205	1.64
Μέγιστη τιμή	4394	1586	1482	965	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3533	449	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11.

Πίνακας 5.11. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών εκτός μη απαιτητών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	34.80	47.48
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	38.50	52.52
Ρύθμιση τάση μη απαιτητή ( $V_{\min} > 0.9p.u.$ εξ αρχής)	26.70	

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.12. Σε επιλεγμένα κελιά, δίνεται εντός παρένθεσης το ποσοστό των περιπτώσεων που εκπροσωπούν για ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 5.12. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4001	1021	405	340	3.57
Τυπική Απόκλιση	102	183	308	186	1.47
Μέγιστη τιμή	4268	1559	1482	965	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3739	505	0 (17%)	42	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.13.

Πίνακας 5.13. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4061	1039	173	115	3.38
Τυπική Απόκλιση	93	174	290	170	1.00
Μέγιστη τιμή	4394	1555	1144	715	6.00
Ελάχιστη Τιμή	3816	449	0	0	1.00

#### 5.4.2.2 Εφαρμογή διανομής ισχύος

Στον Πίνακα 5.14 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.14. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	3997	0	1244	484	7.49
Τυπική Απόκλιση	114	0	296	122	1.64
Μέγιστη τιμή	4394	0	2626	1027	13.00
Ελάχιστη Τιμή	3533	0	566	93	3.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.15.

Πίνακας 5.15. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	87.80
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	12.20

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.16. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	3991	0	1250	492	7.57
Τυπική Απόκλιση	113	0	303	123	1.60
Μέγιστη τιμή	4310	0	2626	1027	13.00
Ελάχιστη Τιμή	3533	0	566	246	3.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.17. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 350kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4040	0	1199	422	6.80
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	118	0	231	90	1.82
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4394	0	1968	675	11.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3787	0	700	93	3.00

#### 5.4.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Πέραν των όσων συμπερασμάτων αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 5.4.1.3 και συνεχίζουν να ισχύουν για τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν και για μελετώμενο βήμα διανομής/αναδιανομής ισχύος των 350kW, επιπλέον παρατηρείται ότι:

- Για έλεγχο της τάσης εντός προδιαγραφών, η αναδιανομή ισχύος είναι επιτυχής σε σχεδόν ίσο πλήθος περιπτώσεων σε σχέση με το να είναι ανεπιτυχής.
- Από την άλλη, η εξ αρχής διανομή της ισχύος του ΕιΣΠ αποδίδει συντριπτικά υψηλότερα ποσοστά επιτυχίας από αποτυχίας.

#### 5.4.3 Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 400kW

##### 5.4.3.1 Εφαρμογή αναδιανομής ισχύος αρχικού προγράμματος

Στον Πίνακα 5.18 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.18. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4004	1059	266	201	2.66
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	120	193	328	215	1.47
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4422	1719	1598	836	9.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3669	462	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.19.

Πίνακας 5.19. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών εκτός μη απαιτητών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	45.00	59.28
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	30.91	40.72
Ρύθμιση τάση μη απαιτητή ( $V_{\min} > 0.9 p.u.$ εξ αρχής)	24.09	

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.20. Σε επιλεγμένα κελιά, δίνεται εντός παρένθεσης το ποσοστό των περιπτώσεων που εκπροσωπούν για ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 5.20. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4023	1024	410	328	3.35
Τυπική Απόκλιση	96	194	309	189	1.24
Μέγιστη τιμή	4304	1719	1598	836	9.00
Ελάχιστη Τιμή	3720	462	0 (17%)	0 (~0%)	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.21.

Πίνακας 5.21. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4073	1044	264	173	3.38
Τυπική Απόκλιση	101	179	353	205	1.03
Μέγιστη τιμή	4422	1452	1234	764	7.00
Ελάχιστη Τιμή	3827	571	0	0	1.00

#### 5.4.3.2 Εφαρμογή διανομής ισχύος

Στον Πίνακα 5.22 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.22. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4004	0	1230	441	5.90
Τυπική Απόκλιση	120	0	279	117	1.26
Μέγιστη τιμή	4422	0	2188	886	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3669	0	400	173	2.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.23.

Πίνακας 5.23. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	88.73
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	11.27

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.24. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4005	0	1248	456	6.00
Τυπική Απόκλιση	115	0	261	107	1.14
Μέγιστη τιμή	4349	0	2176	886	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3669	0	400	227	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.25.

Πίνακας 5.25. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 400kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4003	0	1090	328	5.02
Τυπική Απόκλιση	154	0	362	128	1.77
Μέγιστη τιμή	4422	0	2188	702	11.00
Ελάχιστη Τιμή	3699	0	800	173	3.00

### 5.4.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Πέραν των όσων συμπερασμάτων αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 5.4.1.3, επιτάθηκαν στην Υποενότητα 5.4.2.3 και συνεχίζουν να ισχύουν για τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν και για μελετώμενο βήμα διανομής/αναδιανομής ισχύος των 400kW, επιπλέον παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις αναδιανομής ισχύος με επιτυχές αποτέλεσμα ρύθμισης της τάσης ήταν περισσότερες των αποτυχημένων.

### 5.4.4 Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 450kW

#### 5.4.4.1 Εφαρμογή αναδιανομής ισχύος αρχικού προγράμματος

Στον Πίνακα 5.26 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.26. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4000	1067	291	212	2.56
Τυπική Απόκλιση	120	192	333	213	1.36
Μέγιστη τιμή	4355	1663	1482	916	8.00
Ελάχιστη Τιμή	3613	519	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.27.

Πίνακας 5.27. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών εκτός μη απαιτητών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	52.33	70.11
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	22.30	29.89
Ρύθμιση τάση μη απαιτητή ( $V_{\min} > 0.9p.u.$ εξ αρχής)	25.37	

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.28. Σε επιλεγμένα κελιά, δίνεται εντός παρένθεσης το ποσοστό των περιπτώσεων που εκπροσωπούν για ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 5.28. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4016	1037	401	316	3.16
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	99	187	306	197	1.12
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4302	1644	1482	916	8.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3768	519	0 (11%)	42	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.29.

Πίνακας 5.29. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4087	1023	364	213	3.30
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	100	183	382	192	1.01
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4355	1409	1335	654	7.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3790	525	0	0	1.00

#### 5.4.4.2 Εφαρμογή διανομής ισχύος

Στον Πίνακα 5.30 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.30. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4000	0	1214	451	5.21
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	120	0	248	105	1.13
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4355	0	2395	942	12.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3613	0	656	184	3.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.31.

Πίνακας 5.31. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)
<b>Επιτυχής ρύθμιση τάσης</b>	90.40
<b>Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης</b>	9.60

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.32.

Πίνακας 5.32. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4003	0	1230	467	5.34
Τυπική Απόκλιση	120	0	221	93	0.86
Μέγιστη τιμή	4355	0	2183	942	10.00
Ελάχιστη Τιμή	3613	0	656	211	3.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.33.

Πίνακας 5.33. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 450kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	3966	0	1067	308	4.05
Τυπική Απόκλιση	107	0	396	104	2.22
Μέγιστη τιμή	4191	0	2395	765	12.00
Ελάχιστη Τιμή	3757	0	900	184	3.00

#### 5.4.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Πέραν των όσων συμπερασμάτων αναφέρθηκαν στις Υποενότητες 5.4.1.3 και 5.4.2.3 και συνεχίζουν να ισχύουν για τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν και για μελετώμενο βήμα διανομής/αναδιανομής ισχύος των 450kW, επιπλέον παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις αναδιανομής ισχύος με επιτυχές αποτέλεσμα ρύθμισης της τάσης ήταν διπλάσιες των αποτυχημένων.

#### 5.4.5 Αξιολόγηση ρύθμισης τάσης για βήμα ισχύος 500kW

##### 5.4.5.1 Εφαρμογή αναδιανομής ισχύος αρχικού προγράμματος

Στον Πίνακα 5.34 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.



Πίνακας 5.34. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4003	1051	299	204	2.48
Τυπική Απόκλιση	121	188	327	207	1.28
Μέγιστη τιμή	4362	1635	1733	938	8.00
Ελάχιστη Τιμή	3553	443	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.35.

Πίνακας 5.35. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών εκτός μη απαιτητών (%)
Επιτυχής ρύθμιση τάσης	62.09	82.69
Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης	13.00	17.31
Ρύθμιση τάση μη απαιτητή ( $V_{\min} > 0.9p.u.$ εξ αρχής)	24.91	

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.36. Σε επιλεγμένα κελιά, δίνεται εντός παρένθεσης το ποσοστό των περιπτώσεων που εκπροσωπούν για ανάλυση παρακάτω.

Πίνακας 5.36. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4025	1025	382	272	2.97
Τυπική Απόκλιση	103	177	306	197	1.05
Μέγιστη τιμή	4352	1534	1733	938	8.00
Ελάχιστη Τιμή	3737	443	0 (10%)	42	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.37.

Πίνακας 5.37. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος αναδιανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
Μέση τιμή	4113	1024	473	273	3.35
Τυπική Απόκλιση	104	193	375	199	1.19
Μέγιστη τιμή	4362	1395	1388	736	8.00
Ελάχιστη Τιμή	3837	468	0	0	1.00

#### 5.4.5.2 Εφαρμογή διανομής ισχύος

Στον Πίνακα 5.38 συνοψίζονται για το σύνολο των αποτελεσμάτων δοκιμής της μεθόδου τα στατιστικά στοιχεία τους για την αρχική και την τελική κατάσταση κάθε δοκιμής εφαρμογής.

Πίνακας 5.38. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4003	0	1295	469	5.03
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	121	0	251	100	0.93
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4362	0	2360	857	9.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3553	0	0	0	1.00

Από το σύνολο δοκιμών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.39.

Πίνακας 5.39. Ποσοστά επιτυχούς και αποτυχημένης ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

	Ποσοστό επί του συνόλου δοκιμών (%)
<b>Επιτυχής ρύθμιση τάσης</b>	96.09
<b>Ανεπιτυχής ρύθμιση τάσης</b>	3.81

Για το σύνολο των δοκιμών που απέφεραν επιτυχή ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.40.

Πίνακας 5.40. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών επιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4002	0	1296	473	5.05
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	120	0	240	96	0.83
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4362	0	2186	857	9.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3678	0	500	216	2.00

Για το σύνολο των δοκιμών που απέτυχαν στη ρύθμιση τάσης, τα στατιστικά τους στοιχεία παρατίθενται στον Πίνακα 5.41.

Πίνακας 5.41. Στατιστικά στοιχεία δοκιμών ανεπιτυχούς ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ για βήμα ισχύος διανομής 500kW.

	Φόρτιση (kW)				Βήματα αναδιανομής
	Αρχική R-26	Αρχική ΕιΣΠ	Μεταβολή ΕιΣΠ	Συμβολή DSM	
<b>Μέση τιμή</b>	4029	0	1301	394	4.78
<b>Τυπική Απόκλιση</b>	142	0	412	134	2.20
<b>Μέγιστη τιμή</b>	4338	0	2360	661	9.00
<b>Ελάχιστη Τιμή</b>	3773	0	1000	207	3.00

#### 5.4.5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Πέραν των όσων συμπερασμάτων αναφέρθηκαν στην Υποενότητα 5.4.1.3 και 5.4.2.3 και είναι έγκυρα και για βήμα διανομής/αναδιανομής ισχύος 500kW, επιπλέον παρατηρείται ότι οι περιπτώσεις επιτυχούς (ως προς την αποκατάσταση της ελάχιστης τάσης εντός προδιαγραφών) αναδιανομής είναι πενταπλάσιες των περιπτώσεων ανεπιτυχούς. Ακόμη, για εξ αρχής διανομή της ισχύος του ΕιΣΠ η ικανότητα ελέγχου της τάσης εντός ορίων είναι σχεδόν καθολική.

#### 5.4.6 Σχολιασμός επιρροής του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής στην υποστήριξη ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό παραγωγής

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα για τη ρύθμιση της τάσης από ΕιΣΠ στη βάση των διαφορετικών βημάτων ισχύος διανομής/αναδιανομής διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Τα ποσά της απαιτούμενης ισχύος του ΕιΣΠ καθώς και του διακοπτόμενου φορτίου για την επίτευξη ρύθμισης τάσης, είναι ανεξάρτητα του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε περίπτωση αναδιανομής ισχύος απαιτούνταν κατά μέσο όρο συνολική έγχυση ισχύος από τον ΕιΣΠ περίπου 1400kW (εκ των οποίων 300kW από διακοπτόμενο φορτίο) όπως φαίνεται στον συγκεντρωτικό Πίνακα 5.42, ενώ για εξ αρχής διανομή της ισχύος του προς ρύθμιση τάσης ζητούνταν 1250kW (με 450kW διακοπτόμενου φορτίου) όπως δίνεται στον συγκεντρωτικό Πίνακα 5.43.

Πίνακας 5.42. Συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι ισχύος του ΕιΣΠ και η συμβολή εκ μέρους του διακοπτόμενου φορτίου του σε σχέση με το βήμα αναδιανομής για τη ρύθμιση τάσης.

	Βήμα αναδιανομής ισχύος (kW)				
	300	350	400	450	500
<b>Συνολική ισχύς ΕιΣΠ (kW)</b>	1056(±190)+ +343(±278)	1021(±183)+ +405(±308)	1024(±194)+ +410(±309)	1037(±187)+ +401(±306)	1025(±177)+ +382(±306)
<b>Συμβολή DSM (kW)</b>	333(±169)	340(±186)	328(±189)	316(±197)	272(±197)

Πίνακας 5.43. Συγκεντρωτικά οι μέσοι όροι ισχύος του ΕιΣΠ και η συμβολή εκ μέρους του διακοπτόμενου φορτίου του σε σχέση με το βήμα διανομής για τη ρύθμιση τάσης.

	Βήμα διανομής ισχύος (kW)				
	300	350	400	450	500
<b>Συνολική ισχύς ΕιΣΠ(kW)</b>	1191(±262)	1250(±303)	1248(±261)	1230(±221)	1296(±240)
<b>Συμβολή DSM (kW)</b>	444(±109)	492(±123)	456(±107)	467(±93)	473(±96)

- Αυξανόμενου του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής, μεγαλώνει το ποσοστό επιτυχούς ρύθμισης τάσης από τον ΕιΣΠ, αλλά μειώνεται το ποσοστό των αναδιανομών που επιτυγχάνονται με μηδενική μεταβολή της συνολικής ισχύος του ΕιΣΠ (Πίνακας 5.44).

Πίνακας 5.44. Ποσοστά επιτυχημένων αναδιανομών ισχύος, μηδενικών μεταβολών ισχύος και διανομών ισχύος ΕιΣΠ σε σχέση με το βήμα διανομής για τη ρύθμιση τάσης.

	Βήμα διανομής/αναδιανομής ισχύος (kW)				
	300	350	400	450	500
<b>Επιτυχείς αναδιανομές (%)</b>	27.66	47.48	59.28	70.11	82.69
<b>Μηδενική μεταβολή ισχύος ΕιΣΠ (%)</b>	18.00	17.00	17.00	11.00	10.00
<b>Επιτυχείς διανομές (%)</b>	39.20	87.80	88.73	90.40	96.09

- Επίσης, αυξανόμενου του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής, παρατηρείται μείωση του μέσου αριθμού βημάτων που εκτελείται από τη μεθοδολογία.
- Συνυπολογίζοντας προηγούμενο σχόλιο ότι η ικανότητα ρύθμισης της τάσης από ΕιΣΠ κατά μήκος γραμμής διανομής με αναδιανομή της ισχύος του, είναι ανεξάρτητη των τιμών αρχικής φόρτισης τόσο του ΕιΣΠ όσο και της γραμμής αναδιανομής, το αυξανόμενο ποσοστό επιτυχούς ρύθμισης με την αύξηση του βήματος ισχύος διανομής/αναδιανομής μπορεί να ερμηνευθεί ως εξής. Ο λόγος που ένας αριθμός διανομών/αναδιανομών αδυνατεί να επιτύχει επαναφορά της τάσης εντός ορίων, είναι ότι τα βαρύκεντρα της γραμμής τόσο καθολικά όσο και επιμέρους έχουν αντισταθμιστεί επαρκώς ή ότι δεν είναι δυνατόν να συμπληρωθούν κατάλληλα οι λίστες αύξησης/μείωσης ισχύος  $Ls^+$  και  $Ls^-$ . Ως εκ τούτου, αν στα πρώτα βήματα αναδιανομής το βήμα ισχύος διανομής/αναδιανομής είναι μεγαλύτερο, η επιπλέον έγχυση ενεργού ισχύος θα περιορίσει τις ροές ρεύματος από το υπερκείμενο ΣΗΕ και θα συμβάλει, έτσι, σε βελτιωμένο προφίλ τάσης.

## 5.5 Προϋποθέσεις και περιορισμοί εφαρμογής της μεθόδου

### υποστήριξης ρύθμισης τάσης από εικονικό σταθμό

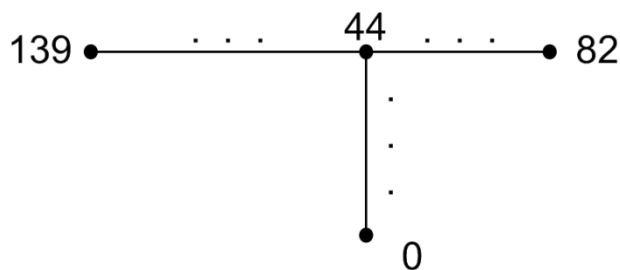
#### παραγωγής

Κατά τα όσα περιγράφηκαν για τη μέθοδο, δημιουργούνται αυτονόητα κάποια προαπαιτούμενα για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες.

Πρώτο και κυριότερο ζήτημα είναι η ανάγκη να έχει πρόσβαση η μεθοδολογία σε μετρήσεις τάσης επί των ζυγών της γραμμής διανομής – τουλάχιστον αυτών που αφορούν τον κορμό της γραμμής διανομής που προκύπτει από την προπαρασκευαστική DFS που αναλύθηκε στην *Υποενότητα 5.3.2*. Τούτο είναι απαραίτητο τόσο για την παρακολούθηση της ελάχιστης τάσης ή ενός σταθμισμένου μέσου της, ώστε να ενεργοποιείται η διαδικασία, όσο και για την εκτέλεση του αλγόριθμου καθ' εαυτού. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να προταθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις:

- Αν η τεχνική εκτελείται από τον ιδιοκτήτη/χειριστή του ΕιΣΠ, τότε μπορεί να χρησιμοποιεί τις εσωτερικές του ΕιΣΠ μετρήσεις από τους Μ/Σ διανομής στους οποίους είναι συνδεδεμένες οι πηγές και τα φορτία του και να τις προβάλλει επί του κορμού της γραμμής διανομής, αφού αυτές συνιστούν worst case scenario σε σχέση με την τάση επί της γραμμής διανομής. Προφανώς, τούτο στηρίζεται στο ότι σε κανέναν εκ των συντελεστών του ΕιΣΠ δεν πραγματοποιείται ρύθμιση τάσης (θεωρούνται όλοι δηλαδή ζυγοί φορτίου – PQ).
- Αν η υποστήριξη της ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ εκτελείται μέσω του διαχειριστή διανομής υπό τον οποίο υπάγεται ο ΕιΣΠ, τότε το πρόβλημα απλοποιείται. Ο διαχειριστής έχοντας πλήρη πρόσβαση στις μετρήσεις της γραμμής διανομής, θα απαιτείται απλά να βρίσκεται σε συνεννόηση με τον ιδιοκτήτη/χειριστή του ΕιΣΠ για τον έλεγχο των πηγών και του διακοπτόμενου φορτίου του, στο πλαίσιο – κατά πάσα πιθανότητα – ενός διμερούς μεταξύ των συμβολαίου.

Δεύτερο σημείο που χρήζει συζήτησης είναι η υπόθεση που έγινε στην *Υποενότητα 5.3.2*, ότι οι γραμμές διανομής είναι γενικά ακτινικές με περιορισμένου μήκους διακλαδώσεις. Η υπόθεση αυτή, όπως φάνηκε ενδεικτικά και για τη γραμμή διανομής R-22 της Ικαρίας (βλ. *Παράρτημα Γ'*), δεν ισχύει γενικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται να εφαρμόζεται η μέθοδος πρώτα σε κάθε κύριο κλάδο που δεν ενσωματώνεται στον κορμό της γραμμής διανομής που εξάγεται από την DFS και στη συνέχεια στον κορμό της γραμμής της διανομής που αποδίδει η DFS. Ειδικότερα, για το παράδειγμα της R-22 γραμμής διανομής της Ικαρίας που δίνεται εκ νέου στο Σχήμα 5.10, η DFS εξάγει ως κορμό της τμήμα της μεταξύ των ζυγών 0-44-82, αφήνοντας εκτός του κορμού την υπολογίσιμου μήκους διακλάδωση 44-139. Άρα, προτείνεται αρχικά να αντισταθμιστούν τα βαρύτερα στο σκέλος 44-139 και, ακολούθως, στο σκέλος 0-44-82.



Σχήμα 5.10. Μονογραμμική ισοδύναμη αναπαράσταση του κύριου μέρους της γραμμής διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας.

Τρίτο σημείο το οποίο δεν απασχόλησε ειδικά στη μέθοδο που παρουσιάστηκε είναι οι περιορισμοί που προκύπτουν από τους χρόνους εκκίνησης και απόκρισης των διαφόρων συντελεστών του ΕιΣΠ. Αν εξαιρέσουμε τύπους μονάδων με σημαντικά υψηλούς χρόνους εκκίνησης, όπως βιομάζα/βιοαερίου και ατμοηλεκτρικούς, το πρόβλημα είναι από περιορισμένο έως αδιάφορο. Επιπλέον και λαμβάνοντας υπόψη ότι η προτεινόμενη μέθοδος συνδράμει στη βελτίωση της ευστάθειας τάσης μονίμου καταστάσεως, ακόμα και οι αργής ενσωμάτωσης μονάδες μπορούν να συνυπολογιστούν στη μέθοδο, αρκεί να υπάρχει πρόνοια από τον διαχειριστή με κάποια αξιόπιστη πρόβλεψη φορτίου που θα προετοιμάζει κατάλληλα την αντιμετώπιση της μειωμένης τάσης από τον εκάστοτε ΕιΣΠ.

## 5.6 Συμπεράσματα

Το πρόβλημα της ρύθμισης της τάσης πλησίον των ζυγών φορτίου, λόγω του τοπικού χαρακτήρα του φαινομένου, έχει έως τώρα αντιμετωπιστεί με εφαρμογές που απαιτούν υψηλό επενδυτικό κόστος και ενέργειες ελέγχου από πλευράς του εκάστοτε διαχειριστή. Οι κλασικού τύπου αυτές τεχνικές, απαντούν μάλιστα περισσότερο στο πρόβλημα της ευστάθειας τάσης μεταβατικής καταστάσεως και όχι της μονίμου, η οποία αντιμετωπίζεται ως επί το πλείστον με αποκοπή φορτίου. Από τη σκοπιά των Εξυπνότερων Δικτύων, έχουν εν τω μεταξύ προταθεί μέθοδοι οι οποίες μπορούν (α) να κριθούν υπερβολικές για την εμπλοκή των συντελεστών που ελέγχουν και (β) μη μετρήσιμης αποδοτικότητας όσο αφορά τη ρύθμιση τάσης εντός των ορίων των προδιαγραφών. Αρκετές εξ αυτών, καταλήγουν στην αξιοποίηση και κλασικών μεθόδων, ενώ, τελικά, μπορεί να αποτυγχάνουν στη ρύθμιση.

Απαντώντας σε όλα τα παραπάνω σημεία, αναπτύχθηκε μέθοδος υποστήριξης της ρύθμισης τάσης με διανομή ή αναδιανομή της προγραμματισμένης ισχύος από ΕιΣΠ. Η τεχνική επιτυγχάνει – υπό προϋποθέσεις – την αποκατάσταση της τάσης της γραμμής εντός των ορίων των προδιαγραφών σε πολύ υψηλό ποσοστό περιπτώσεων για πλήθος διαφορετικών φορτίσεων της γραμμής διανομής γύρω από μια αρχικά προσδιορισμένη ως κρίσιμη φόρτιση. Η μέθοδος διαχειρίζεται μόνο την ενεργό ισχύ του ΕιΣΠ, δεν απαιτεί αποκλειστική συμμετοχή από διακοπτόμενο φορτίο, εξαρτάται όμως από την αρχική διανομή ισχύος κατά μήκος γραμμής διανομής, αλλά και του ΕιΣΠ. Προέκταση που θα πρέπει να εξεταστεί σε επόμενο στάδιο αξιολόγησης της μεθόδου, είναι η ικανότητα υποστήριξης της ευστάθειας τάσης κατόπιν εκδήλωσης διαταραχών (contingency analysis) είτε στο υπερκείμενο ΣΗΕ είτε κατά μήκος της μελετώμενης γραμμής διανομής.

## 5.7 Βιβλιογραφία

- [1] T. Van Cutsem, C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer, 1998.
- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 19, Τεύχος 3, Αύγουστος 2004, Σελίδες 1387-1401.
- [3] American National Standard For Electric Power Systems and Equipment— Voltage Ratings (60 Hertz), ANSI C84.1 (2011).
- [4] E. Babaei, M.F. Kangarlu, Sensitive load voltage compensation against voltage sags/swells and harmonics in the grid voltage and limit downstream fault currents using DVR, Electric Power Systems Research, Τόμος 83, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2012, Σελίδες 80-90.
- [5] A3 – Appendix 3: Operational Security, ENTSO-E (2009).
- [6] P3 – Policy 3: Operational Security, ENTSO-E (2009).
- [7] European Standard EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC (2010).
- [8] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," IEEE Std 1159-2009 (Αναθεώρηση το IEEE Std 1159-1995), 26 Ιουνίου 2009, Σελίδες 1-81.
- [9] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Entwurf DIN VDE 0126-1-1 (VDE 0126 Teil 1-1) (2005).
- [10] M. Tsili, S. Papathanassiou, A review of grid code technical requirements for wind farms. IET Renewable Power Generation, Τόμος 3, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2009, Σελίδες 308-332.
- [11] Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΑΔΜΗΕ, Έκδοση 2<sup>η</sup> (Οκτώβριος 2012).
- [12] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [13] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric Power Systems, Wiley, New York, 1982.
- [14] A.E. Hammad, M.Z. El-Zadek, Prevention of transient voltage instabilities due to induction motor loads by Static VAr Compensators, IEEE Transactions on Power Systems, Τεύχος 4, 1989, Σελίδες 1182-1190.
- [15] T. Van Cutsem, Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods, Proceedings of the IEEE, Τόμος 88, Τεύχος 2, Φεβρουάριος 2000, Σελίδες 208-227.
- [16] On-load tap-changers, type UC, Technical guide, ABB (διαθέσιμο στον κόμβο: [http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/7e6dc10c2735673bc1257a61002cfb9b/\\$file/1zsc000562-aaw%20\(tg%20uc\)%20en\\_low%20resolution.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/7e6dc10c2735673bc1257a61002cfb9b/$file/1zsc000562-aaw%20(tg%20uc)%20en_low%20resolution.pdf). Προσπελάστηκε 31 Οκτωβρίου 2014).



- [17] Z. Ziadi, S. Taira, M. Oshiro, T. Funabashi, Optimal Power Scheduling for Smart Grids Considering Controllable Loads and High Penetration of Photovoltaic Generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 5, Τεύχος 5, Σεπτέμβριος 2014, Σελίδες 2350-2359.
- [18] G. Qinglai, S. Hongbin, Z. Mingye, T. Jianzhong, Z. Boming, W. Bin, Optimal Voltage Control of PJM Smart Transmission Grid: Study, Implementation, and Evaluation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 4, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2013, Σελίδες 1665-1674.
- [19] A.R. Di Fazio, G. Fusco, M. Russo, Decentralized Control of Distributed Generation for Voltage Profile Optimization in Smart Feeders, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 4, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2013, Σελίδες 1586-1596.
- [20] A.A. Aquino-Lugo, R. Klump, T.J. Overbye, A Control Framework for the Smart Grid for Voltage Support Using Agent-Based Technologies, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 2, Τεύχος 1, Μάρτιος 2011, Σελίδες 173-180.
- [21] P.N. Vovos, A.E. Kiprakis, A.R. Wallace, G.P. Harrison, Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 22, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2007, Σελίδες 476-483.
- [22] Yu Li, D. Czarkowski, F. de Leon, Optimal Distributed Voltage Regulation for Secondary Networks With DGs, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 3, Τεύχος 2, Ιούνιος 2012, Σελίδες 959-967.
- [23] M. Brenna, E. De Berardinis, L. Delli Carpini, F. Foiadelli, P. Paulon, P. Petroni, G. Sapienza, G. Scrosati, D. Zaninelli, Automatic Distributed Voltage Control Algorithm in Smart Grids Applications, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 4, Τεύχος 2, Ιούνιος 2013, Σελίδες 877-885.
- [24] K.M. Rogers, R. Klump, H. Khurana, A.A. Aquino-Lugo, T.J. Overbye, An Authenticated Control Framework for Distributed Voltage Support on the Smart Grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 1, Τεύχος 1, Ιούνιος 2010, Σελίδες 40-47.
- [25] K. Christakou, D.-C. Tomozei, J.-Y. Le Boudec, M. Paolone, GECN: Primary Voltage Control for Active Distribution Networks via Real-Time Demand-Response, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 5, Τεύχος 2, Μάρτιος 2014, Σελίδες 622-631.
- [26] E.M. Voumvoulakis, N.D. Hatziaargyriou, Decision Trees-Aided Self-Organized Maps for Corrective Dynamic Security, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 23, Τεύχος 2, Μάιος 2008, Σελίδες 622-630.
- [27] H. Bevrani, S. Shokoohi, An Intelligent Droop Control for Simultaneous Voltage and Frequency Regulation in Islanded Microgrids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Τόμος 4, Τεύχος 3, Σεπτέμβριος 2013, Σελίδες 1505-1513.
- [28] A. Engler, Applicability of droops in LV-Grids, *International Journal of Distributed Energy Resources*, Τόμος 1, Τεύχος 1, 2005, Technology and Science Publisher, Kassel-Germany.

- [29] M.S. El Moursi, H.H. Zeineldin, J.L. Kirtley, K. Alobeidli, A Dynamic Master/Slave Reactive Power-Management Scheme for Smart Grids With Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Τόμος 29, Τεύχος 3, Ιούνιος 2014, Σελίδες 1157-1167.
- [30] E. Mashhour, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets—Part I: Problem Formulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τόμος 26, Τεύχος 2, Μάιος 2011, Σελίδες 949-956.
- [31] R. Tarjan, Depth-First Search and Linear Graph Algorithms, *SIAM Journal on Computing*, Τόμος 1, Τεύχος 2, 1972, Σελίδες 146–160.

# 6

## *Επίλογος*

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν τεχνικές και μέθοδοι για τη συμμετοχή ΕιΣΠ στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς ΣΗΕ.

Ως ΕιΣΠ θεωρήθηκε η οντότητα που περιλαμβάνει μονάδες ΔΠ και φορτίο (ευέλικτο και μη). Η οργάνωση υπό την οντότητα αυτή αποτελεί ικανή προϋπόθεση για την περαιτέρω εξέλιξη και ανάπτυξη της ΔΠ στα σύγχρονα δίκτυα. Ο ΕιΣΠ ενσωματώνει διαφορετικούς τύπους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας οι οποίοι συνδυάζονται θετικά προς τον παραπάνω σκοπό. Ένα ευρύτερης οπτικής μοντέλο του ΕιΣΠ, θα μπορούσε να ενσωματώνει ή να αφορά ειδικά και τις μονάδες συμβατικής παραγωγής.

Αρχικά, παρουσιάστηκε μέθοδος εξασφάλισης εγγυημένης ισχύος από ΕιΣΠ, ώστε περιστατικά απώλειας σημαντικής ισχύος να μπορούν να καλυφθούν εσωτερικά σε μικρό χρόνο και κατά τον οικονομικότερο τρόπο. Αξιοποιήθηκαν οι δυνατότητες των ΔΑ, τα οποία από τους πιθανούς συνδυασμούς κάλυψης της εκάστοτε μελετώμενης απώλειας, αναδεικνύουν εκείνον με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Εν συνεχεία, συζητήθηκε το ζήτημα της συμμετοχής στη ΡΣ από πηγές στοχαστικού τύπου όπως οι Α/Γ και τα Φ/Β. Και στις δύο περιπτώσεις μελετήθηκαν και βελτιώθηκαν τεχνικές αποφόρτισης οι οποίες αποδίδουν ταχεία συμμετοχή στη ΡΣ και δεν απαιτούν επιπλέον επενδύσεις προς αποθήκευση (αντί απόρριψης) της ισχύος που διατηρείται ως εφεδρεία.

Το πρόβλημα της υπερσυχνότητας αντιμετωπίστηκε ξεχωριστά ακολούθως. Αναφορές και εργασίες οι οποίες προκρίνουν την αποκοπή ΔΠ και δη μονάδων στοχαστικού τύπου, μπορούν να αναθεωρηθούν αξιοποιώντας την ετερομορφία των συντελεστών του κάθε ΕιΣΠ. Βάσει

οικονομικότητας και στηριζόμενοι εκ νέου στις δυνατότητες των ΔΑ, εξάγονται σενάρια σημαντικής αποφόρτισης του ΕιΣΠ προς συμμετοχή του στον περιορισμό της υπερσυχνότητας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν, οι μονάδες ΔΠ στοχαστικού τύπου διατηρούνται ενεργές σε αντίθεση με τις έως τώρα μελέτες που πρότειναν το αντίθετο.

Η ρύθμιση τάσης χάρις την αναδιανομή της προγραμματισμένης ισχύος του ΕιΣΠ ή την εξ αρχής διανομή του αναπτύχθηκε ως μία εναλλακτική των κλασσικών μεθόδων που απαιτούν υψηλά επενδυτικά κόστη ή που είναι υπερβολικές ως προς την αντιμετώπιση του ζητήματος.

Τέλος, οι μέθοδοι σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων εφαρμόζονται σε δεδομένα που απαντούν προς ερωτήματα που αφορούν εμπορικά και τεχνικά ζητήματα του ΣΗΕ και του ΕιΣΠ και επιτυγχάνουν στον περιορισμό του όγκου των δεδομένων που απαιτείται να καταγραφούν, μεταφερθούν ή και αποθηκευτούν σε κάθε περίπτωση.

## **6.1 Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια**

### ***σχετικές των προτεινόμενων μεθόδων στην παρούσα διατριβή***

Στην κάτωθι λίστα και με αντιστοίχιση προς κάθε σχετικό κεφάλαιο, δίνονται οι δημοσιεύσεις που προέκυψαν από το έργο που αναπτύχθηκε στην πορεία της παρούσας διδακτορικής διατριβής και στις οποίες ο συγγραφέας της ήταν ο πρωτεύων συνεισφέρων.

- Κεφάλαιο 2 – Παροχή εγγυημένης ενεργού ισχύος από εικονικό σταθμό παραγωγής ενέργειας:
  1. *P. Moutis, N.D. Hatziaargyriou, Decision trees aided scheduling for firm power capacity provision by virtual power plants, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Τεύχος 63, Ιανουάριος 2015, Σελίδες 730-739.*
- Κεφάλαιο 3 – Εξασφάλιση εφεδρείας και ρύθμιση συχνότητας από μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας:
  1. *P. Moutis, S. Pastromas, N.D. Hatziaargyriou, Load-Frequency Control Supported by Variable Speed Variable Pitch Wind Generators - From Theory to Testing, EWEA 2013, Vienna, 4-7 Φεβρουαρίου 2013, Σελίδες 1-6.*
  2. *P. Moutis, S. Papathanassiou, N.D. Hatziaargyriou, Improved load-frequency control contribution of variable speed variable pitch wind generators, Renewable Energy, Τεύχος 48, Δεκέμβριος 2012, Σελίδες 514-523.*
  3. *P. Moutis, E. Loukarakis, S. Papathanasiou, N.D. Hatziaargyriou, Primary load-frequency control from pitch-controlled wind turbines, 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 28 Ιουνίου-2 Ιουλίου 2009, Σελίδες 1-7.*

- Κεφάλαιο 4 – Αντιμετώπιση υπερσυχνότητας από εικονικό σταθμό παραγωγής με αποκοπή ενεργού ισχύος:
  1. *P. Moutis, N.D. Hatzigargyriou, Decision Trees Aided Active Power Reduction of a Virtual Power Plant for Power System Over-Frequency Mitigation," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Special Section on New Trends in Intelligent Energy Systems, Υπό έκδοση 2015, doi: 10.1109/TII.2014.2371631.*
- Παράρτημα Α – Χρήση τεχνικών σύνοψης χρονοσειράς σε μετρήσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας:
  1. *P. Moutis, N.D. Hatzigargyriou, Using wavelet synopsis techniques on electric power system measurements, 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 5-7 Δεκεμβρίου 2011, Σελίδες 1-7.*
  2. *P. Moutis, An introduction to wavelet synopses of electric power system measurements, 2010 IET Conference Proceedings, 2010, Σελίδες 197-202.*

## 6.2 Συμβολή της εργασίας

Η συμβολή της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

1. Αντιμετώπιση της στοχαστικότητας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο πλαίσιο της θεώρησής τους ως συντελεστών ενός Εικονικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Υπό τη θεώρηση αυτή, μπορεί να εφαρμόζεται ταχεία και οικονομική κάλυψη κάποιας απώλειας τους με αναδιανομή της διαθέσιμης ισχύος του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής, δίχως να απαιτείται ειδική πρόνοια από τον διαχειριστή του Συστήματος για αυξημένες εφεδρείες, χωρίς προληπτική περικοπή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και δίχως να προαπαιτείται συντονισμός των στοχαστικών πηγών με μέσα αποθήκευσης ή διακοπτόμενο φορτίο. Η πρωτότυπη συμβολή της διατριβής σε αυτό το σημείο έγκειται στην εφαρμογή των Δένδρων Απόφασης για την παροχή εγγυημένης ισχύος μέσω αναδιανομή της ισχύος του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής προς αντιμετώπιση της στοχαστικότητας των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειάς του.
2. Βελτίωση της συμμετοχής των Φωτοβολταϊκών και Αιολικών Συστημάτων στη Ρύθμιση Συχνότητας (και εν γένει στη διαχείριση της ενεργού ισχύος εξόδου τους) με μεθόδους αποφόρτισης και επαναφόρτισής τους που εξασφαλίζουν ευρύτητα ρύθμισης, ακρίβεια ελέγχου και αποφυγή υπερφόρτισης των επί μέρους στοιχείων τους. Για τη διατήρηση εφεδρείας συγκεκριμένα, προτάθηκαν για πρώτη φορά, για την Ανεμογεννήτρια, προσέγγιση που ποσοτικοποιεί με ακρίβεια τη διαθέσιμη ισχύ προς ρύθμιση συχνότητας και δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές ταχύτητας ανέμου ενώ, για τα Φωτοβολταϊκά, μέθοδος που

δεν απαιτεί επένδυση σε μέσα αποθήκευσης, δεν εξαναγκάζει τα Φωτοβολταϊκά πλαίσια και τον αντιστροφέα στα λειτουργικά τους όρια και δεν περιπλέκει τους αλγόριθμους ελέγχου τους.

3. Εξασφάλιση της συντονισμένης συμμετοχής των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής που οργανώνονται υπό Εικονικό Σταθμό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στην αντιμετώπιση φαινομένων υπερσυχνότητας, χωρίς να προαπαιτείται η συλλήβδην περικοπή ισχύος των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας που συστήνονταν έως τώρα. Η πρωτότυπη συμβολή της προτεινόμενης στρατηγικής έγκειται στην ικανότητα εκτέλεσης της υπηρεσίας σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα, απαντώντας σε έκτακτα συμβάντα, ενώ με τη συγκεκριμένη προσέγγιση της χρήσης των Δέντρων Απόφασης εξασφαλίζει στον Εικονικό Σταθμό Παραγωγής την οικονομικότερη συμμετοχή στην υπηρεσία, αλλά και την αντιμετώπιση της στοχαστικότητας των πηγών του στον ορίζοντα υλοποίησης.
4. Υποστήριξη της ρύθμισης τάσης εντός των προδιαγεγραμμένων λειτουργικών ορίων κατά μήκος γραμμής διανομής με διανομή/αναδιανομή της ισχύος Εικονικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, χωρίς έγχυση αέργου ισχύος και δίχως προαπαιτούμενη την περικοπή φορτίου.
5. Δυνατότητα υλοποίησης όλων των ανωτέρω με ελάχιστη πληροφορία για την ανά πάσα στιγμή πραγματική κατάσταση του δικτύου και των μετρήσεων επί αυτού.
6. Δυνατότητα υλοποίησης όλων των ανωτέρω χωρίς προαπαιτούμενα για αλλαγές στους κώδικες των δικτύων, αλλά αντιθέτως δρώντας σαφώς εντός των ορίων τους.
7. Για πρώτη φορά, οι χρονοσειρές ηλεκτρικών δεδομένων αντιμετωπίστηκαν ως προς τον όγκο τους, εξετάζοντας μεθόδους σύνοψης.

Βάσει των παραπάνω αναπτύχθηκε θεώρηση του Εικονικού Σταθμού Παραγωγής ως μίας προσέγγισης και μεθόδου διαχείρισης και ελέγχου των μονάδων Διεσπαρμένης Παραγωγής και Διακοπτόμενου Φορτίου που υποστηρίζει την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με τον συντονισμένο σχεδιασμό της παροχής βασικών επικουρικών υπηρεσιών.

Αξιολογώντας όλα τα παραπάνω από μια περισσότερη μακροσκοπική ματιά:

- Καθορίστηκε περιγραφή του ΕιΣΠ αρκετά γενική, ώστε να ενσωματώνει ευρύτερους συνδυασμούς πηγών με φορτία, ανεξαρτήτως εμπορικού μοντέλου ή απαιτήσεων και τεχνικών προδιαγραφών ή περιορισμών.
- Εξασφαλίζεται η δυνατότητα αύξησης της διείσδυσης της ΔΠ στα ΣΗΕ, ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών και της τεχνολογίας τους, υπό την προϋπόθεση ότι ενσωματώνονται στην οντότητα του ΕιΣΠ. Η εγγυημένη ισχύς εξόδου του ΕιΣΠ και η δυνατότητα συμμετοχής όλων των μονάδων ΔΠ στις επικουρικές υπηρεσίες συμβάλλουν στην κατεύθυνση αυτή.

- Δεν προκύπτουν σύνθετες προϋποθέσεις ή απαιτήσεις αναθεώρησης των υαρχόντων τεχνικών κωδίκων δικτύων για την ενσωμάτωση των ΕιΣΠ στα ΣΗΕ και, ειδικότερα, στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών.
- Ο έλεγχος του ΕιΣΠ επιτυγχάνεται με περιορισμένη πρόσβαση στις πληροφορίες που αφορούν τα ηλεκτρικά μεγέθη του ΣΗΕ προς το οποίο συνδέεται, ενώ στηρίζεται κυρίως σε εσωτερικές μετρήσεις και δεδομένα.
- Αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι και η φιλοσοφία συμμετοχής ενός ΕιΣΠ σε υπηρεσίες που δημιουργούν τις προϋποθέσεις για τη θεώρηση του ΕιΣΠ ως ικανού συμμετέχοντα στις σχετικές αγορές.

### **6.3 Μελλοντικές προεκτάσεις**

Τόσο για την κάλυψη απώλειας ισχύος του ΕιΣΠ, όσο και για συμμετοχή του στην αντιμετώπιση της υπερσυχνότητας μέσω αποφόρτισης των πηγών του, χρησιμοποιήθηκαν ΔΑ. Κυριότεροι λόγοι επιλογής του εν λόγω εργαλείου είναι η ασάφεια των συνθηκών λειτουργίας των φορτίων του ΣΗΕ καθώς και ποιο ποσό των εφεδρειών των πηγών του ΕιΣΠ έχουν κατά περίπτωση κληθεί. Ως εκ τούτων, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που συγκεντρώθηκαν εδώ, με μεθόδους στοχαστικής βελτιστοποίησης/προγραμματισμού.

Αναφορικά με τη συμμετοχή πηγών ΔΠ στοχαστικού τύπου στη ΡΣ, οι μέθοδοι αποφόρτισης των Α/Γ, έχουν εξαντληθεί κατά τα τελευταία χρόνια με πολυάριθμες μελέτες, οι οποίες όμως δεν αποδίδουν θετικότερα αποτελέσματα από τις εδώ προτεινόμενες. Ιδιαίτερο βάρος έχει δοθεί στην ψευδοαδρανειακή απόκριση, η οποία όμως δε σημαίνει ουσιαστική συμμετοχή στη ρύθμιση, παρά μόνο μεταβατική. Όσο αφορά τα Φ/Β συστήματα, το επίκεντρο της μελέτης εντοπίζεται στην αποθήκευση της εφεδρείας ισχύος τους, ενώ οι τεχνικές αποφόρτισης περιορίζονται στην πλευρά του ελεγκτή βρόγχου φάσης με τις αδυναμίες που αναλύθηκαν και στη σχετική ενότητα.

Σχετικά με την υποστήριξη ρύθμισης τάσης από ΕιΣΠ, κύριο μέλημα του ερευνητή που θα επιλέξει να αξιολογήσει περαιτέρω τη μέθοδο που παρουσιάστηκε εδώ, θα πρέπει να είναι η απόδοσή της κατόπιν διαταραχών στο ΣΗΕ. Επιπλέον, η προσέγγιση με τα βαρύκεντρα εγγεόμενων και απορροφώμενων ρευμάτων, μπορεί να αναβαθμιστεί χρησιμοποιώντας τεχνικές αναγνώρισης ή εκτίμησης της διανομής τους κατά μήκος της γραμμής διανομής.

Τέλος, όσο αφορά την περίληψη χρονοσειρών δεδομένων ηλεκτρικής ενέργειας, το ερευνητικό πεδίο είναι ανοιχτό και απαιτεί τη βαθύτερη εξέταση των όσων εδώ προτείνονται κατά την εφαρμογή των μεθόδων σύνοψης. Ειδικά, για ερωτήματα που απαιτούν ταχύτερη επεξεργασία και αφορούν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες δεδομένων, πρέπει να εξεταστούν και αναπτυχθούν βέλτιστοι αλγόριθμοι σύνοψης με μικρότερες χρονικές πολυπλοκότητες, έτσι ώστε και ο όγκος της πληροφορίας, αλλά και ο χρόνος περίληψής τους να μειώνονται.





# *Παράρτημα*

## *A Χρήση τεχνικών σύνοψης χρονοσειράς σε μετρήσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας*

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες, οδηγώντας αναπόδραστα στην ευρεία διασύνδεση των ΣΗΕ μεταξύ τους. Η συνεπής και αδιάκοπη λειτουργία του προκύπτοντος δικτύου σχετίζεται με θέματα προγραμματισμού, ευστάθειας συχνότητας, ρύθμισης τάσεως, αξιοπιστίας και διαχείρισης απωλειών ισχύος. Για να εξασφαλιστεί το σύνολο των απαιτήσεων αυτών κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία της πληροφορίας που προσφέρουν τα ιστορικά δεδομένα των ποικίλων ηλεκτρικών μετρήσεων. [1-4]

Μετρήσεις συχνότητας, τάσεων, ρευμάτων, κατάστασης διακοπών και στάθμης μετασχηματιστών με αλλαγές λήψης είναι μερικές μόνο από τις μετρήσεις που απαιτούνται για να απαντηθούν τα ερωτήματα που απευθύνονται προς τις σχετικές βάσεις δεδομένων από τους διαχειριστές των δικτύων ή/και τους πελάτες/χρήστες τους. Τόσο οι ΑΠΕ όσο και, εν γένει, η ΔΠ, με την υψηλή και ταχύρρυθμη διεύθυνσή τους στα ενεργειακά ισοζύγια, έθεσαν ανάγκες για την καταγραφή επιπλέον παραμέτρων [5]. Ακόμα και στα μη-διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, η συσσώρευση καταγραφών δεν αποκλείεται να δημιουργήσει ζητήματα όγκου και διαχείρισής τους. Τέλος, ακόμα και κατά την κεντρική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων από τον εκάστοτε διαχειριστή, η συγκέντρωση της πληροφορίας από διεσπαρμένες βάσεις δεδομένων θα απαιτήσει υψηλές χωρητικότητες και ταχείς ρυθμούς μετάδοσης από μεριάς της τηλεπικοινωνιακής υποδομής.

Οι τεχνικές σύνοψης χρονοσειρών διακριτών τιμών μπορούν να υποστηρίξουν τόσο τους διαχειριστές βάσεων δεδομένων όσο και τους τελικούς χρήστες, ώστε να αντιμετωπίσουν τα παραπάνω ζητήματα μέσω συντεταγμένης, αλλά συνεπούς συλλογής της πληροφορίας από και αποθήκευσής της σε διεσπαρμένες βάσεις δεδομένων. Η βασική ιδέα είναι η αρχική επεξεργασία

των χρονοσειρών μέσω του μετασχηματισμού Haar (Haar Transformation – HT) και την ακόλουθη παραγωγή εξ αυτών των αντίστοιχων συντελεστών χρονοσειράς. Από αυτό το βήμα και συνυπολογίζοντας κατάλληλα επιλεγμένες μετρικές σφάλματος, διατηρείται μόνο ένα υποσύνολο των αναφερόμενων συντελεστών – το οποίο καλείται σύνοψη των αρχικών δεδομένων – ενώ οι υπόλοιποι θεωρούνται μηδενικοί. Οι μετρικές σφάλματος καθορίζονται από τον τύπο του ερωτήματος που τίθεται προς τα δεδομένα και τη σχετική ανοχή που κρίνεται αποδεκτή από τα πρότυπα του ΣΗΕ ή από τις επιλογές του διαχειριστή. [6]

Να σημειωθεί εδώ ότι στον τομέα των βάσεων δεδομένων των ΣΗΕ δεν υπάρχει σχετικό ερευνητικό έργο έως τώρα. Τούτο ίσως οφείλεται από τη μια στη σχετικά πρόσφατη προτυποποίηση που αφορά τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές αυτοματισμού και από την άλλη στην περιορισμένη ως τώρα χρήση βάσεων δεδομένων που να σχετίζονται με τη ΔΠ.

## ***A.1 Ερωτήματα σχετιζόμενα με δεδομένα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας***

### *A.1.1 Ερωτήματα αγοράς ενέργειας*

Με δεδομένα την καμπύλη ισχύος ενός ΣΗΕ (ή μιας περιοχής του) και τις καμπύλες κόστους λειτουργίας των γεννητριών, σε συνδυασμό με στοιχεία τιμών προσφοράς-ζήτησης, ο διαχειριστής του ΣΗΕ ή ένας οποιοσδήποτε συμμετέχων στην αγορά ενέργειας μπορεί να θέσει μεγάλο πλήθος ερωτημάτων [7,8], π.χ. ποιο είναι το κόστος της ημερήσιας ενέργειας για μια εταιρεία ηλεκτρισμού, πώς διαμορφώνεται το προφίλ φορτίου ζυγού ή περιοχής και πόση είναι η μηνιαία ζήτηση ισχύος/ενέργειας από βιομηχανικούς πελάτες.

### *A.1.2 Ερωτήματα ευστάθειας συχνότητας και τάσεως*

Ο διαχειριστής του εκάστοτε ΣΗΕ, για την ετήσια αιχμή φορτίου, καλείται να εξασφαλίσει διαθεσιμότητα από τις τοπικές πηγές και από τις διασυνδέσεις, ώστε να επιτύχει την πλήρη εξυπηρέτηση της κατανάλωσης και, ως εξ αυτού, τη διατήρηση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή της [9]. Λαμβάνοντας επίσης υπ' όψιν, ότι αυτό στηρίζεται κυρίως στον ακριβή υπολογισμό της στρεφόμενης εφεδρείας των μονάδων, τα ερωτήματα που συνδράμουν στην αποφυγή εκδήλωσης φαινομένων συχνότητας είναι: ποια η αιχμή φορτίου ημέρας/εβδομάδας/μήνα/έτους; ποια η ελάχιστη τιμή αιολικής ή/και Φ/Β ισχύος για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα; ποια η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς και των Μ/Σ μεταφοράς προς διανομή;

Παρόμοια με το παραπάνω, ερωτήματα σχετικά με τις θέσεις λήψης των Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ είναι εξαιρετικής σημασίας για τις απαιτήσεις παρακολούθησης της ευστάθειας τάσεως [2]. Μολαταύτα, η θέση λήψης μπορεί να μην καταγράφεται και να υπολογίζεται εναλλακτικά από την αντίδραση σειράς του Μ/Σ που εξάγεται από τις μετρήσεις τάσεως και ρεύματος επί των ακροδεκτών του.

### A.1.3 Ερωτήματα τοπολογίας δικτύου

Η διαχείριση της υπερφόρτισης των συντελεστών των ΣΗΕ – και ειδικότερα των γραμμών μεταφοράς – έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον [10,11]. Επί της παρούσης, αντιμετωπίζεται κατά κόρον με ανασχεδιασμό της δρομολόγησης των ροών ισχύος/ρεύματος εντός του ΣΗΕ. Οι περιγραφόμενες αλλαγές τοπολογίας του δικτύου υλοποιούνται με χειρισμό διακοπών ισχύος και έτσι το ερώτημα περί της κατάστασής τους (ON/OFF) είναι αυτό που ενδιαφέρει εν προκειμένω.

## A.2 Τεχνικές σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων

Η ιδέα της προσεγγιστικής αναπαράστασης σήματος με χρήση υπερτιθέμενων συναρτήσεων ξεκίνησε όταν ο Joseph Fourier παρατήρησε ότι με την υπέρθεση ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων διαφόρων συχνοτήτων μπορούσε να παραστήσει άλλες συναρτήσεις. Η βάση του μετασχηματισμού Fourier – οι ημιτονοειδείς και συνημιτονοειδείς συναρτήσεις – είναι άπειρες συναρτήσεις οι οποίες αποτυγχάνουν να αποτυπώσουν τοπικά αλλά έντονα φαινόμενα υψηλής διακύμανσης (spikes). Ως εκ τούτου, επιλέγονται συναρτήσεις χρονοσειράς (ή κυματίου) οι οποίες είναι κατάλληλες για προσέγγιση σημάτων με μεγάλες ασυνέχειες μιας και εκτείνονται σε πεπερασμένο χρόνο. Η πρώτη καταγεγραμμένη αναφορά σε αυτό που καλείται σήμερα κυμάτιο βρίσκεται σε εργασία του Alfred Haar το 1909.

### A.2.1 Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματίου Haar [6]

Σε σήμα μεγέθους  $N$  (όπου  $N$  είναι αριθμός δύναμη του 2) μπορεί να εφαρμοστεί ο ΗΤ, ο οποίος αποδίδει σήμα ίδιου μεγέθους και με την αυτή ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται  $N$  συναρτήσεις βάσης του Haar. Η πρώτη καλείται  $\psi_0$ , ορίζεται σταθερή, ίση με  $+1/\sqrt{N}$  στο διακριτό διάστημα  $[0, N-1]$  και μηδενική εκτός αυτού. Στη συνέχεια για κάθε ακέραιο  $j$  και  $k$  με  $0 \leq j < \log(N)$  και  $0 \leq k < 2^j$ , ορίζονται οι υπόλοιπες  $N-1$  συναρτήσεις ως εξής:

$$\phi(x)[j, k] = +\sqrt{\frac{2^j}{N}}, x \in [kN/2^j, kN/2^j + N/2^{j+1} - 1]$$

$$\phi(x)[j, k] = -\sqrt{\frac{2^j}{N}}, x \in [kN/2^j + N/2^{j+1}, (k+1)N/2^j - 1]$$

$$\phi(x)[j, k] = 0, x \notin [kN/2^j, (k+1)N/2^j - 1]$$

Οι συναρτήσεις αυτές δεικτοδοτούνται κατά σειρά αυξανόμενων  $j$  και  $k$  ως  $\psi_1, \dots, \psi_{N-1}$ . Ορίζεται ως *support* μιας συνάρτησης βάσης το διάστημα του πεδίου ορισμού της στο οποίο δεν είναι μηδενική. Έτσι το *support* μιας συνάρτησης βάσης μπορεί να είναι το διάστημα  $[0, N-1]$  είτε αναδρομικά το αριστερό ή δεξιό μισό του *support* μιας άλλης συνάρτησης.

Ένα σήμα  $A[0 \dots N-1]$  μετασχηματίζεται σε σήμα  $C[0 \dots N-1]$  με το  $i$ -οστό του στοιχείο να ισούται με το εσωτερικό γινόμενο του αρχικού σήματος  $A$  με την  $i$ -οστή συνάρτηση βάσης.

$$C[i] = \langle A, \psi_i \rangle$$

Τα στοιχεία του σήματος  $C$  ονομάζονται συντελεστές του ΗΤ. Με δεδομένη τη βάση Haar και το σήμα  $C$  είναι δυνατή η ανάκτηση του αρχικού σήματος:

$$A = \sum_{i \in \{0, N-1\}} C[i] \cdot \psi_i$$

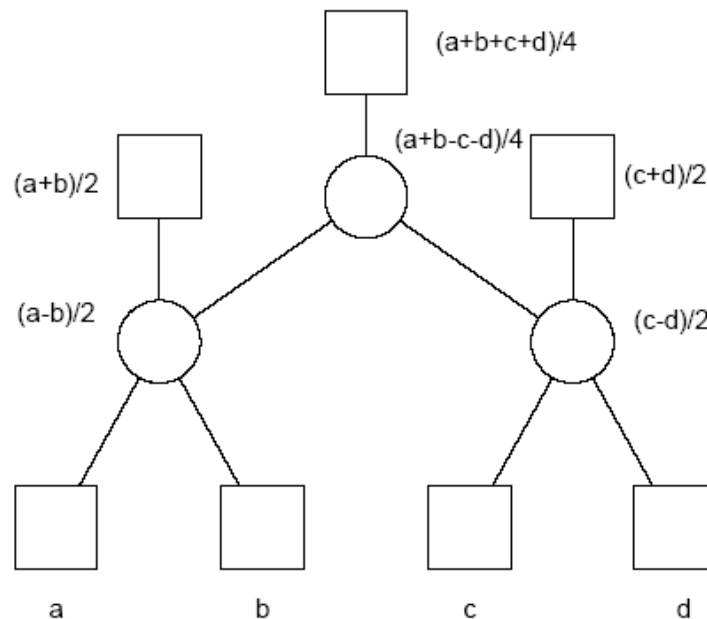
Ο μετασχηματισμός Haar είναι ορθοκανονικός. Αυτό εξ αιτίας ενός θεωρήματος του Parseval συνεπάγεται ότι το μετασχηματισμένο σήμα διατηρεί την ενέργεια του αρχικού:

$$\sum_{i \in \{0, N-1\}} A[i]^2 = \sum_{i \in \{0, N-1\}} C[i]^2$$

Προς απλοποίηση του τυπικού ορισμού του ΗΤ, παρατηρείται ότι οι συντελεστές προκύπτουν ως αθροίσματα ή διαφορές δυαδικού πλήθους αρχικών στοιχείων του σήματος. Η ιδέα στην οποία βασίστηκε ο μετασχηματισμός ήταν εξάλλου αυτή ακριβώς. Δηλαδή ένα ζεύγος τιμών να μπορεί να αναπαρασταθεί και ταυτόχρονα να ανακατασκευαστεί από το ημίαθροισμα και την ημιδιαφορά τους.

Πράγματι για το ζεύγος τιμών  $(a, b)$  με ημίαθροισμα  $\frac{a+b}{2}$  και ημιδιαφορά  $\frac{a-b}{2}$

ανακατασκευάζεται ως  $a = \frac{a-b}{2} + \frac{a+b}{2}$  και  $b = \frac{a+b}{2} - \frac{a-b}{2}$ .



Σχήμα Π.Α.1. Σχηματικό Παράδειγμα του Μετασχηματισμού Haar.

Ως εκ τούτου, η διαδικασία ΗΤ εκτελείται ως εξής. Από το αρχικό σήμα μεγέθους  $N$  σχηματίζονται ανά ζεύγη οι ημιδιαφορές του πρώτου επιπέδου του μετασχηματισμού δημιουργώντας μια ακολουθία  $N/2$  συντελεστών. Αντίστοιχα, δημιουργείται και η ίδιου μεγέθους ακολουθία ημιαθροισμάτων. Η ανωτέρω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ακολουθίας ημιδιαφορών μεγέθους 1 και χρησιμοποιώντας σε κάθε επίπεδο μετασχηματισμού ως σήμα την

ακολουθία ημιαθροισμάτων του προηγούμενο επιπέδου. Ως παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα Π.Α.1 το σήμα {a,b,c,d} και ο μετασχηματισμός του.

Όσο αφορά την ανακατασκευή του αρχικού σήματος και απλοποιώντας και σε αυτό το σημείο την τυπική διαδικασία, ισχύει ο ακόλουθος κανόνας. Για κάθε φύλλο (τερματικό κόμβο) του δέντρου που σχηματίζεται από τον ΗΤ, η ανακατασκευή προκύπτει ως άθροισμα των συντελεστών του μονοπατιού από τον κόμβο-πατέρα του στοιχείου έως τη ρίζα του δέντρου. Στο άθροισμα, με θετικό πρόσημο προστίθενται οι κόμβοι-πρόγονοι των οποίων το στοιχείο του σήματος είναι αριστερός απόγονος και με αρνητικό πρόσημο οι κόμβοι-πρόγονοι των οποίων το στοιχείο είναι δεξιός απόγονος. Η ρίζα και μόνο του δέντρου προστίθεται πάντα με θετικό πρόσημο. Συνεπώς, για το σήμα του Σχήματος Π.Α.1, το τρίτο στοιχείο του ανακατασκευάζεται ως:

$$\frac{c-d}{2} - \frac{a+b-c-d}{4} + \frac{a+b+c+d}{4} = c$$

#### A.2.2 Μετρικές σφάλματος συντεταγμένης χρονοσειράς δεδομένων

Μία σύντμηση (ή περίληψη)  $B$  όρων  $\hat{C}$  από ένα αρχικό σήμα  $A$  ορίζεται επιλέγοντας ένα σύνολο  $A \subset C$  συντελεστών, με  $B = |A| \ll N$ , ενώ οι υπόλοιποι  $N-B$  όροι θεωρούνται ίσοι με μηδέν. Το σφάλμα που εισάγεται στα δεδομένα από την επεξεργασία περίληψης υπολογίζεται από συναρτήσεις που ονομάζονται μετρικές σφάλματος. Συνεπώς αν  $A$  το αρχικό σήμα και  $\hat{A}$  το ανακατασκευασμένο, τότε η μετρική σφάλματος που παρέχει ένα μέτρο του διανύσματος  $A - \hat{A}$  είναι η:

$$error = f_{metric}(A - \hat{A}) = \|A - \hat{A}\|_{f_{metric}}$$

Δύο είναι οι μετρικές σφάλματος που χρησιμοποιούνται κυρίως. Η πρώτη είναι η μετρική μέγιστου απόλυτου σφάλματος  $L_\infty$ :

$$L_\infty = \max AbsErr(A - \hat{A}) = \max_{0 \leq i < N} |\hat{A}[i] - A[i]|$$

Η δεύτερη είναι η αθροιστική μετρική με βάρη  $L_p$ :

$$weighted\_L_p = \sum_i w_i (|A[i] - \hat{A}[i]|)^p$$

Συνηθέστερη περίπτωση είναι αυτή για την οποία  $p=2$  και  $w_i=1$  για κάθε  $i$ , και συμβολίζεται  $L_2$ .

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η  $L_\infty$  χρησιμοποιείται για ερωτήματα που αφορούν μοναδική τιμή, ενώ η  $L_p$  για ερωτήματα που αφορούν εύρος τιμών.

#### A.2.3 Αλγόριθμοι σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων

Στην εργασία εξετάστηκαν τρεις αλγόριθμοι σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων: ο άπληστος, ο Garofalakis-Kumar και ο αλγόριθμος επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ. Παρουσιάζονται αμέσως.

- 1) Απληστος αλγόριθμος επιλογής συντελεστών του HT [6]: Πρόκειται για την απλούστερη τεχνική, η οποία επιλέγει τους πρώτους  $B$  συντελεστές του HT της μεγαλύτερης απόλυτης τιμής. Σύμφωνα με την περιγραφή, ο αλγόριθμος είναι άπληστος φιλοσοφίας και καταφέρνει να ελαχιστοποιήσει τη μετρική  $L_2$  (βέλτιστος). Η τεχνική είναι χρονικής πολυπλοκότητας  $O(N+B\log N)$ . Ο αλγόριθμος μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

**Βήμα 1:** Δημιούργησε το μέγιστο δέντρο σωρού (ένα δυαδικό δέντρο όπου κάθε κόμβος έχει αξία μεγαλύτερη από τα παιδιά του) των απόλυτων τιμών των συντελεστών του HT. Το άθροισμα των τετραγώνων όλων των συντελεστών υπολογίζεται και αποθηκεύεται ως *Σφάλμα*. [Χρονική πολυπλοκότητα:  $O(N)$ ]

**Βήμα 2:** Από το μέγιστο δέντρο σωρού επέλεξε τη ρίζα. Αφαίρεσε το τετράγωνο της τιμής από το *Σφάλμα*. Επαναπροσδιόρισε το μέγιστο δέντρο σωρού. [Χρονική πολυπλοκότητα:  $O(\log N)$ ]

**Βήμα 3:** Επανάλαβε το 'Βήμα 2'  $B-1$  φορές. [Χρονική πολυπλοκότητα:  $O((B-1)\log N)$ ]

Το *Σφάλμα* κατά την ολοκλήρωση της εκτέλεσης είναι η μετρική  $L_2$  της μεθόδου.

- 2) Garofalakis-Kumar [12]: Πριν την περιγραφή του αλγορίθμου απαιτούνται μερικοί ορισμοί. Με  $B$  συμβολίζεται το σύνολο των συντελεστών που θα περιλαμβάνει, τελικά, η σύνοψη. Ως αρχικό δέντρο σφάλματος καλείται το δέντρο των συντελεστών του HT, όπως δόθηκε και στο Σχήμα Π.Α.1. Με  $T_j$  συμβολίζεται το υποδέντρο σφάλματος που έχει ρίζα τον κόμβο  $c_j$ . Ως  $coeff(T_j)$  και  $data(T_j)$  ορίζονται τα σύνολα των συντελεστών HT (εσωτερικοί κόμβοι) και των δεδομένων της χρονοσειράς (φύλλα) αντίστοιχα, που ανήκουν στο  $T_j$ . Με  $path(c_j)$  συμβολίζεται το μονοπάτι συντελεστών HT από τη ρίζα του δέντρου σφαλμάτων ( $c_0$ ) έως τον κόμβο  $c_j$  (χωρίς αυτόν). Τέλος, με  $M[j, b, S]$  συμβολίζεται η ελάχιστη τιμή του μέγιστου σημειακού σφάλματος που εισέρχεται στην περίληψη επιλέγοντας  $b$  συντελεστές του  $T_j$  με την υπόθεση ότι έχει ήδη επιλεγεί ένα σύνολο  $S \subseteq path(c_j)$  μεγέθους το πολύ  $\min\{B-b, \log N+1\}$ .

Η ιδέα του αλγορίθμου είναι να ξεκινά από τη ρίζα του δέντρου σφάλματος και να ελέγχει αν θα τη διατηρήσει ή όχι στην περίληψη, συνυπολογίζοντας το σφάλμα που εισάγει στη μετρική όταν θεωρείται με τα πιθανά υποδέντρα των κόμβων-απογόνων του. Άρα, για κάθε κόμβο (κατά την αναδρομική εκτέλεση του αλγορίθμου) υπάρχουν δύο σενάρια:

- Αν ο κόμβος-ρίζα απορριφθεί, τότε το ελάχιστο σφάλμα για το  $T_j$  είναι το προκύπτον από ένα από τα υποδέντρα των απογόνων του, δηλαδή τα  $T_{2j}$  και  $T_{2j+1}$ . Αν αναπαρασταθεί ως  $F$  η συνάρτηση της μετρικής σφάλματος:

$$M_{drop}[j, b, S] = \min_{0 \leq b \leq b} F(M[2j, \dot{b}, S], M[2j+1, b - \dot{b}, S]) \quad (II.A.1)$$

- Αν ο κόμβος-ρίζα διατηρηθεί, τότε προστίθεται στο  $S$ , το πλήθος των  $b$  συντελεστών μειώνεται κατά 1 και αναλόγως η μετρική σφάλματος στο τρέχον βήμα θα δίνεται από:

$$M_{keep}[j, b, S] = \min_{o \leq \dot{b} \leq b-1} F(M[2j, \dot{b}, S \cup \{c_j\}], M[2j+1, b - \dot{b} - 1, S \cup \{c_j\}]) \quad (II.A.2)$$

Κατόπιν του υπολογισμού των παραπάνω στα δύο σενάρια, ο αλγόριθμος επιλέγει εκείνο της ελάχιστης τιμής. Η διαδικασία εκτελείται αναδρομικά ως το επίπεδο της αρχικής χρονοσειράς (χωρίς αυτό).

Για τη μετρική  $L_\infty$ , οι (II.A.1) και (II.A.2) διαμορφώνονται ως:

$$M_{drop}[j, b, S] = \min_{o \leq \dot{b} \leq b} \max(M[2j, \dot{b}, S], M[2j+1, b - \dot{b}, S])$$

$$M_{keep}[j, b, S] = \min_{o \leq \dot{b} \leq b-1} \max(M[2j, \dot{b}, S \cup \{c_j\}], M[2j+1, b - \dot{b} - 1, S \cup \{c_j\}])$$

Ενώ το σφάλμα που υπολογίζεται στο αρχικό σήμα με τη  $L_\infty$ , προκύπτει ως εκ της:

$$M[j, 0, S] = \left| A[j - N + 1] - \sum_{ck \in S} \text{sign}_{j-N, k} \cdot c_k \right| \quad (II.A.3)$$

Για τη μετρική  $L_2$ , οι (II.A.1) και (II.A.2) υπολογίζονται ως:

$$M_{drop}[j, b, S] = \min_{o \leq \dot{b} \leq b} (M[2j, \dot{b}, S] + M[2j+1, b - \dot{b}, S])$$

$$M_{keep}[j, b, S] = \min_{o \leq \dot{b} \leq b-1} (M[2j, \dot{b}, S \cup \{c_j\}] + M[2j+1, b - \dot{b} - 1, S \cup \{c_j\}])$$

Στην αρχική χρονοσειρά η  $L_2$  δίνεται από την:

$$M[j, 0, S] = \left| A[j - N + 1] - \sum_{ck \in S} \text{sign}_{j-N, k} \cdot c_k \right|^2$$

Ο αλγόριθμος δημιουργίας σύνοψης χρονοσειράς των Garofalakis-Kumar είναι βέλτιστος. Η χρονική του πολυπλοκότητά του εξαρτάται από την επιλεχθείσα μετρική σφάλματος. Για την  $L_2$  ισούται με  $O(N^2 B^2)$ , ενώ η πολυπλοκότητα με την φράσσεται στην  $O(N^2 B \log B)$ .

- 3) Επιλογή των  $\text{Anw-}k$  συντελεστών του HT: Ο αλγόριθμος των Garofalakis-Kumar αν και βέλτιστος, διακρίνεται από υψηλή χρονική πολυπλοκότητα, ειδικά για τον υπολογισμό της  $L_\infty$  – ακόμα και όπως αυτή περιορίστηκε περαιτέρω από τον Guha [13] σε  $O(N^2)$ . Ειδικά η online αποτίμηση ερωτημάτων επί ηλεκτρικών δεδομένων, ωθεί στην εξέταση και ενός μη-βέλτιστου, αλλά ταχύτερου αλγορίθμου.

Σε αυτόν, ξεκινώντας από τη ρίζα του αντίστοιχου δέντρου που προκύπτει από τον HT, επιλέγονται τα πρώτα  $k=N/2$  στοιχεία. Αναλόγως αν το σφάλμα είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο του επιλεγμένου ανωφλίου της μετρικής, θα αφαιρεθούν τα τελευταία  $N/4$  στοιχεία από το σύνολο των  $k$  ή θα του προστεθούν τα επόμενα  $N/4$  από τον HT αντίστοιχα. Η διαδικασία συνεχίζεται αναδρομικά με προσθαφαιρέσεις συντελεστών (πλήθους μειούμενων δυαδικών κλασμάτων του  $N$ , δηλαδή  $N/8, N/16, \dots$ ) στο σύνολο των  $k$  μέχρι να προσεγγιστεί ικανοποιητικά η τιμή της μετρικής. Πρόκειται δηλαδή, για αλγόριθμο τύπου δυαδικής αναζήτησης ταξινομημένου πίνακα.

Λόγω μη-βελτιστότητας του παρόντος, για κοινό ανώφλι  $L_\infty$ , το πλήθος  $k$  είναι τουλάχιστον ίσο με το πλήθος  $B$  στοιχείων του αλγορίθμου Garofalakis-Kumar. Η μετρική σφάλματος του

αλγόριθμοι ταυτίζονται με την (II.A.3). Η χρονική πολυπλοκότητα εκτέλεσής του αν και φράσσεται στο  $O(\log N)$ , είναι συνήθως μικρότερη.

Όλοι οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν πλήρως σε C++ και με την εξής κοινή λεπτομέρεια: αντί να ελαχιστοποιούν τη μετρική σφάλματος για δεδομένο πλήθος συντελεστών, επιστρέφουν την πρώτη σύνοψη που επιτυγχάνει σφάλμα μικρότερο του εκάστοτε επιλεγμένου ανωφλίου. Η λεπτομέρεια αυτή ενδέχεται, κατά περίπτωση, να επηρεάζει τη βελτιστότητα του αλγόριθμου των Garofalakis-Kumar (όχι ως προς το πλήθος των συντελεστών, αλλά ως προς την ακριβή τιμή της μετρικής), αφού η μέθοδος αποφασίζει κόμβο προς κόμβο και από τη ρίζα προς τα φύλλα του δέντρου σφάλματος, αν θα διατηρήσει στη σύνοψη των μελετώμενο κόμβο ή όχι.

### **A.3 Παραδείγματα σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων για ερωτήματα προς**

#### **συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας**

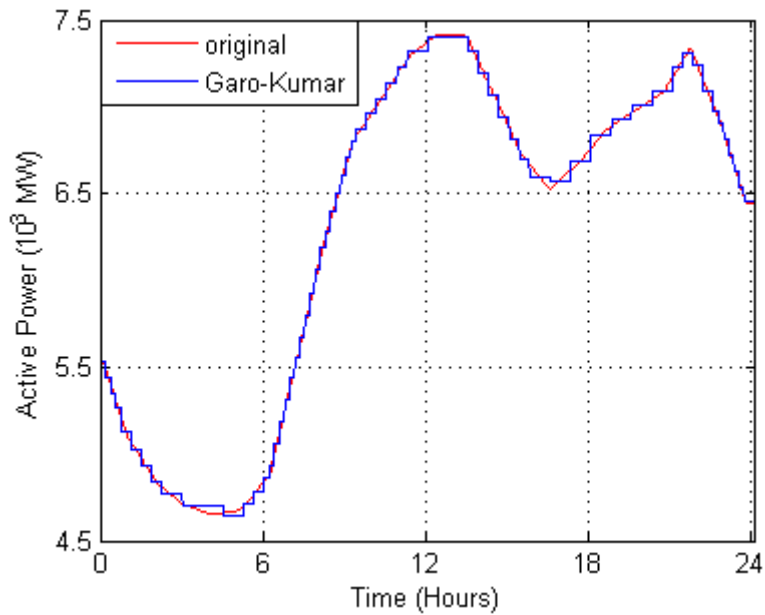
Οι τεχνικές εξαγωγής σύνοψης χρονοσειράς δεδομένων που παρουσιάστηκαν, θα εξεταστούν επί τεσσάρων ενδεικτικών ερωτημάτων προς δεδομένα από ΣΗΕ, κατά τα όσα περιγράφηκαν και στην II.A.2. Για κάθε ερώτημα θα τίθεται ένα ανώφλι για τη μετρική σφάλματος που προκύπτει μεταξύ της αρχικής και της ανακατασκευασμένης από τη σύνοψη χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα εξετάζονται περαιτέρω αναλόγως τη φύση του ερωτήματος.

#### **A.3.1 Αιχμή φορτίου**

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, για να εξασφαλίσει ο διαχειριστής του εκάστοτε ΣΗΕ τον περιορισμό των διαταραχών συχνότητας που προκαλούνται από την ανισορροπία παραγωγής-φορτίου, πρέπει να εξασφαλίσει την κατάλληλη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ισχύος από ίδιες πηγές και από τις διασυνδέσεις προς γειτονικά ΣΗΕ. Ως εξ αυτού, το ερώτημα περί της αιχμής φορτίου πρέπει να αξιολογείται σε σχέση με τη δράση της ΡΣ.

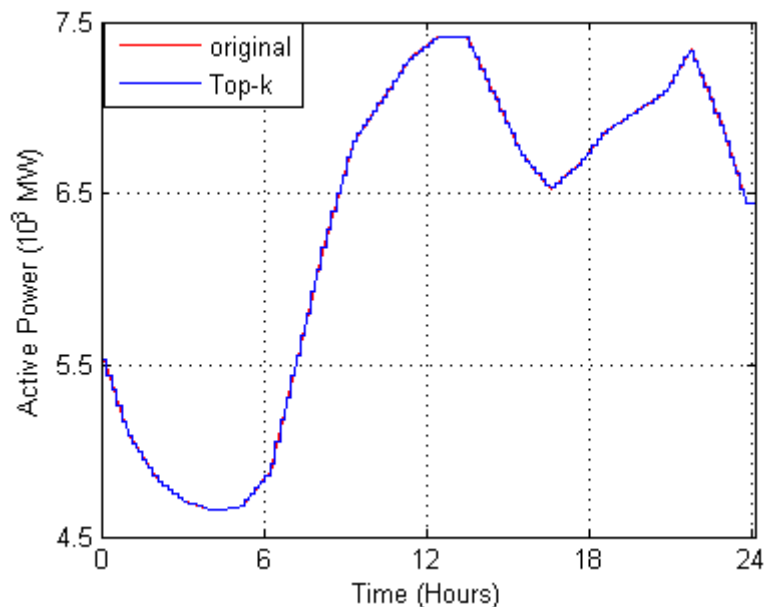
Χρησιμοποιείται η καμπύλη ισχύος της 30<sup>ης</sup> Ιουνίου 2011 από τον διαχειριστή του ελληνικού ΣΗΕ [14]. Η χρονοσειρά θα θεωρηθεί ως η πρόβλεψη φορτίου επόμενης μέρα και εξομαλύνεται με γραμμική παλινδρόμηση προς τα 1024 στοιχεία. Λόγω του τύπου του ερωτήματος επιλέγεται η μετρική  $L_\infty$ . Η τιμή της θα περιοριστεί προς την ισχύ πρωτεύουσας ρύθμισης που, βάσει προτυποποίησης από τον ENTSO-E, ισούται με 80MW.





Σχήμα Π.Α.2. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της αιχμής φορτίου ημέρας σε ΣΗΕ.

Ο αλγόριθμος εξαγωγής σύνοψης των Garofalakis-Kumar για την  $L_\infty$ , καταλήγει σε σύνολο 60 συντελεστών. Το Σχήμα Π.Α.2 αποδίδει μια εποπτική αναπαράσταση της αρχικής χρονοσειράς και της ανακατασκευασμένης από τη σχετική σύνοψη. Η αιχμή φορτίου κατά την αρχική χρονοσειρά είναι 7415MW ενώ από την ανακατασκευασμένη 7392MW (δηλαδή, απόλυτο σφάλμα 23MW). Επίσης, το μέγιστο απόλυτο σφάλμα μεταξύ των δύο χρονοσειρών είναι 79MW.



Σχήμα Π.Α.3. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης επιλογής των Άνω-k συντελεστών του HT υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της αιχμής φορτίου ημέρας σε ΣΗΕ.

Μέσω του αλγόριθμου επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ για τη μετρική  $L_\infty$ , απαιτήθηκαν 128 συντελεστές για την κατασκευή της σύνοψης. Το Σχήμα Π.Α.3 δείχνει τις αρχική και ανακατασκευασμένη από τη σχετική σύνοψη χρονοσειρές. Η αιχμή φορτίου κατά την ανακατασκευασμένη χρονοσειρά είναι 7414MW (δηλαδή, απόλυτο σφάλμα 1MW). Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα μεταξύ της αρχικής χρονοσειράς και της ανακατασκευασμένης από τη σύνοψη που παρήγαγε ο αλγόριθμος επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ είναι 56MW.

### A.3.2 Ημερήσιο κόστος ενέργειας

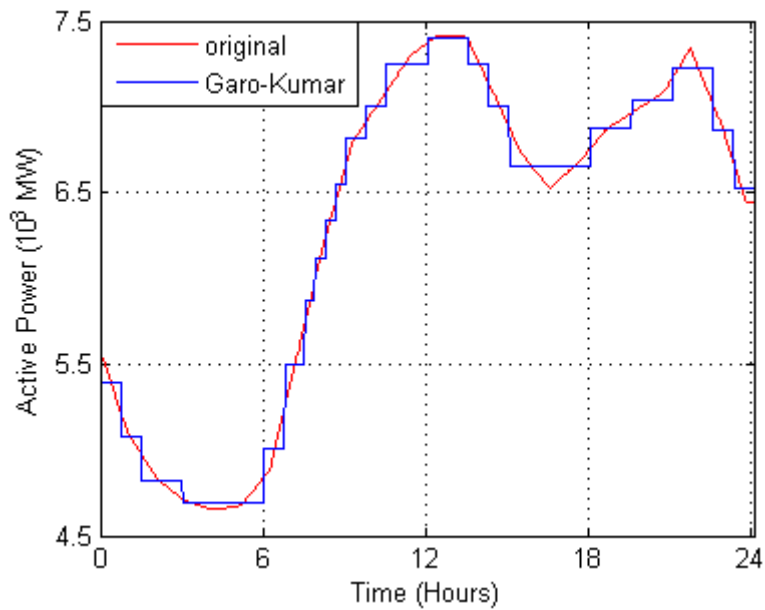
Από την ημερήσια καμπύλη φορτίου μπορεί να προσδιοριστεί και το αντίστοιχο κόστος ενέργειας που παράγεται από τις γεννήτριες του ΣΗΕ. Για τις ανάγκες αυτού του ερωτήματος, ο αλγόριθμος της δημιουργίας της σύνοψης πρέπει να ελαχιστοποιεί το σφάλμα σε όλο – κατά το δυνατόν – το εύρος της χρονοσειράς. Ως εκ τούτου, επιλέγεται η μετρική  $L_2$ . Επειδή όμως, δεν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για να φραχθεί το σφάλμα, θα χρησιμοποιηθούν, επί της  $L_2$ , βάρη στη βάση της οριακής τιμής συστήματος (ΟΤΣ). Η τελευταία λαμβάνεται από τον διαχειριστή σε βήματα ώρας και κανονικοποιείται ως προς τη μέγιστη τιμή ημέρας. Έτσι, για ώρες υψηλότερου κόστους ενέργειας, ο αλγόριθμος κατασκευής της σύνοψης θα επιδιώκει μικρότερο σφάλμα. Όσο αφορά το ίδιο το σημειακό σφάλμα, αυτό θα υποτεθεί ότι περιορίζεται ως σφάλμα μέτρησης. Για τις μετρήσεις τάσεως και ρεύματος θεωρείται σφάλμα μέτρησης 1%, ενώ για τις μετρήσεις της γωνίας συντελεστή ισχύος μηδενικό. Το μεταδιδόμενο στην ενεργό ισχύ σφάλμα είναι:

$$\delta P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial V} \delta V\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \delta \theta\right)^2} \Rightarrow (\delta \theta = 0) \Rightarrow$$

$$\delta P = \bar{P} \sqrt{\left(\frac{1}{V} \delta V\right)^2 + \left(\frac{1}{I} \delta I\right)^2}$$

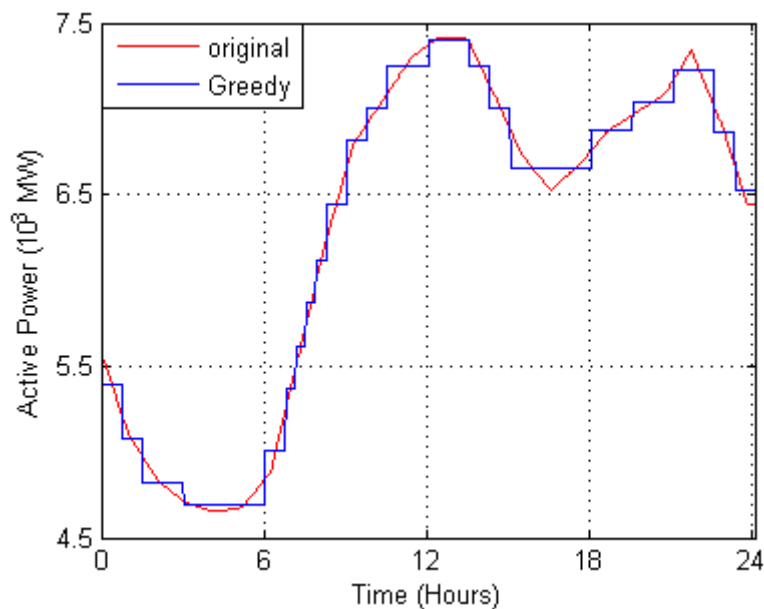
Όπου  $P$  η ενεργός ισχύς,  $V$  η τάση,  $I$  το ρεύμα,  $\cos\theta$  ο συντελεστής ισχύος και με μπάρα σημαίνονται οι τιμές βάσης. Για να επιτευχθεί το ελάχιστο σημειακό σφάλμα, ορίζεται τιμή βάσης ισχύος η ελάχιστη ισχύς ημέρας.

Ο αλγόριθμος εξαγωγής σύνοψης των Garofalakis-Kumar για την  $L_2$ , απαιτεί 20 συντελεστές. Στο Σχήμα Π.Α.4 αποτυπώνονται η αρχική χρονοσειρά και η ανακατασκευασμένη από τη σχετική σύνοψη. Το κόστος της ενέργειας για την 30<sup>η</sup> Ιουνίου 2011 κατά την αρχική χρονοσειρά είναι 10814143€ ενώ από την ανακατασκευασμένη 576€ λιγότερο. Αυτό μπορεί να αποδοθεί και ως σχετικό σφάλμα 0.05%.



Σχήμα Π.Α.4. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_2$  χρονοσειρών για το ερώτημα του ημερήσιου κόστους ενέργειας σε ΣΗΕ.

Μέσω του άπληστου αλγόριθμου, προέκυψαν επίσης 20 συντελεστές για την κατασκευή της σύνοψης. Το Σχήμα Π.Α.5 δείχνει τις αρχική και ανακατασκευασμένη από τη σχετική σύνοψη χρονοσειρές. Το κόστος της ενέργειας κατά την ανακατασκευασμένη χρονοσειρά είναι 507€ λιγότερο. Όμοια δηλαδή το σχετικό σφάλμα ισούται με 0.05%.



Σχήμα Π.Α.5. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της άπληστης τεχνικής σύνοψης υπό τη μετρική  $L_2$  χρονοσειρών για το ερώτημα του ημερήσιου κόστους ενέργειας σε ΣΗΕ.

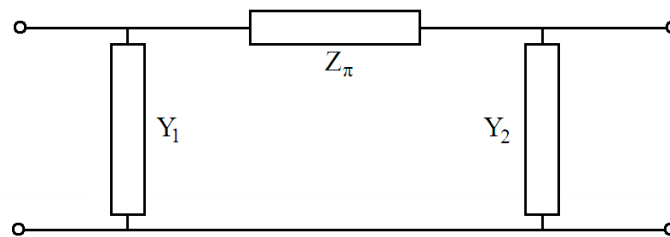
### Α.3.3 Θέση λήψης σε μετασχηματιστή ισχύος με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Βασιζόμενοι στο  $\pi$ -ισοδύναμο κύκλωμα ενός Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ όπως δίνεται στο Σχήμα Π.Α.6, ισχύει το κάτωθι σύνολο εξισώσεων:

$$Z_{\pi} = \alpha \cdot Z_L$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_L} \cdot \frac{1-\alpha}{\alpha^2}$$

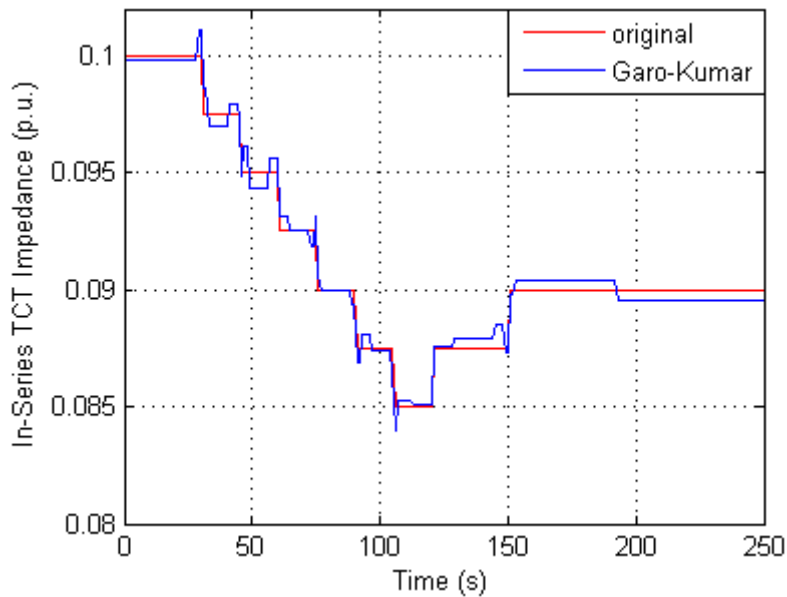
$$Y_2 = \frac{1}{Z_L} \cdot \frac{\alpha-1}{\alpha}$$



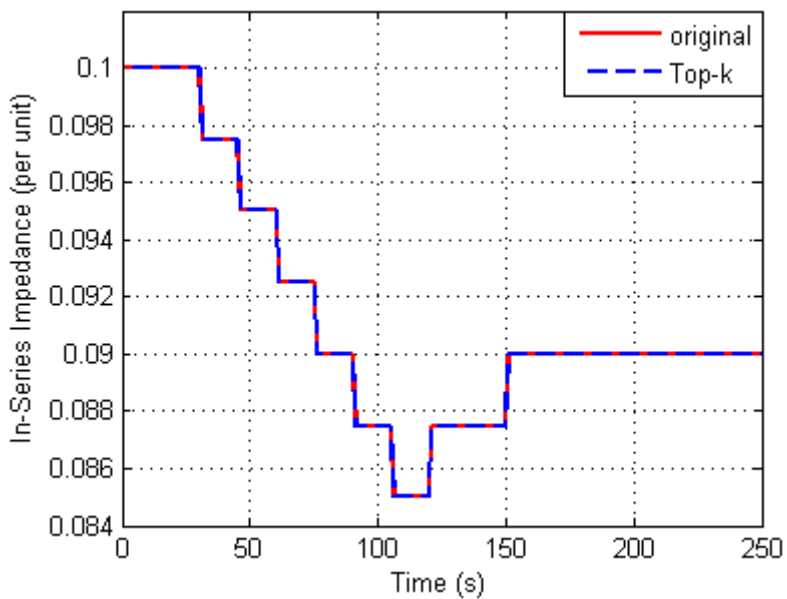
Σχήμα Π.Α.6. Κύκλωμα Μ/Σ ισχύος κατά το  $\pi$ -ισοδύναμο.

Όπου  $\alpha$  η θέση της λήψης του ΣΑΤΥΦ,  $Z_L$  η εν σειρά αντίδραση του Μ/Σ για  $\alpha=1$  και  $Y$  η εγκάρσια αγωγιμότητα προς γη. Όπως είναι προφανές, χρησιμοποιώντας μετρήσεις τάσεως και ρεύματος για τον προσδιορισμό της  $Z_{\pi}$ , μπορεί να προσδιοριστεί η θέση λήψης του ΣΑΤΥΦ. Αφού για κάθε στάθμη του  $\alpha$  (ας ονομαστεί αυτή  $\pm\beta\eta\mu\alpha$ ), η μετρούμενη  $Z_{\pi}$  μεταβάλλεται αναλογικά κατά  $\pm\beta\eta\mu\alpha \cdot Z_{\pi}$ , μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μετρική  $L_{\infty}$  περιορισμένη κατά το ήμισυ του  $\pm\beta\eta\mu\alpha \cdot Z_{\pi}$ .

Ένα στοιχειώδες ΣΗΕ μοντελοποιείται στο Simulink® του περιβάλλοντος MATLAB®. Αποτελείται από πηγή χωρίς ρύθμιση τάσης, Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ και μεταβαλλόμενο φορτίο. Τη χρονική στιγμή  $t=0$  αυξάνεται η τιμή του φορτίου και καταγράφεται η επακόλουθη μεταβολή του ΣΑΤΥΦ μέσω της  $Z_{\pi}$ . Μία χρονοσειρά 256 στοιχείων της  $Z_{\pi}$  σε ανά μονάδα σύστημα θα συνοψιστεί από τους σχετικούς αλγορίθμους.



Σχήμα Π.Α.7. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης Garofalakis-Kumar υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της θέσης λήψης σε Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.



Σχήμα Π.Α.8. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής της τεχνικής σύνοψης επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της θέσης λήψης σε Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ.

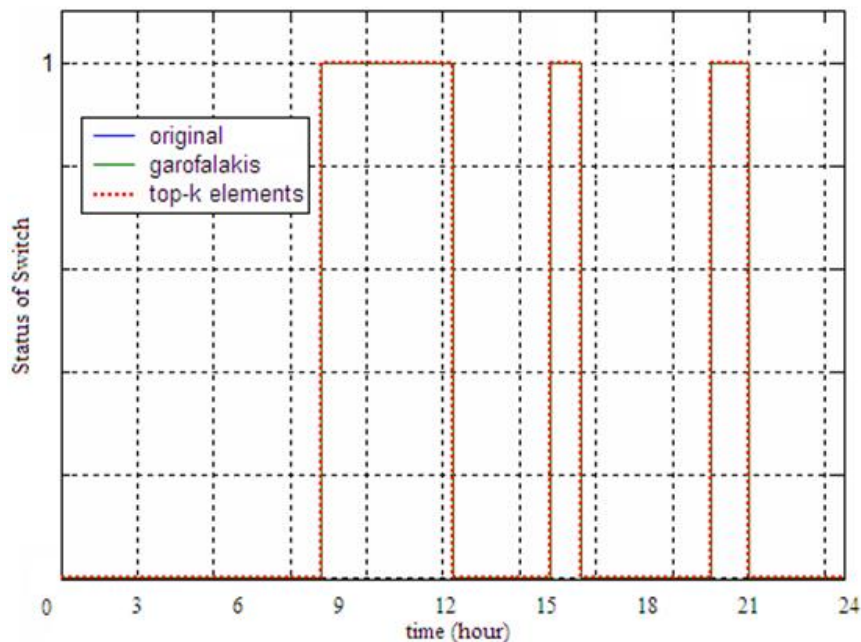
Ο αλγόριθμος εξαγωγής σύνοψης των Garofalakis-Kumar για την  $L_\infty$ , καταλήγει σε σύνολο 23 συντελεστών. Το Σχήμα Π.Α.7 αποδίδει μια εποπτική αναπαράσταση της αρχικής χρονοσειράς και της ανακατασκευασμένης από τη σχετική σύνοψη. Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα μεταξύ των δύο χρονοσειρών είναι 0.011 ανά μονάδα.

Από τον αλγόριθμο επιλογής των Άνω-k συντελεστών του ΗΤ, απαιτήθηκαν 181 συντελεστές για την κατασκευή της σύνοψης. Στο Σχήμα Π.Α.8 παρουσιάζονται οι αρχική και

ανακατασκευασμένη από τη σχετική σύνοψη χρονοσειρές. Το μέγιστο απόλυτο σφάλμα μεταξύ τους είναι μηδέν.

#### A.3.4 Ανασχεδιασμός ροής ισχύος μέσω τηλεχειριζόμενων διακοπών

Η κατάσταση ενός διακόπτη ισχύος που συμμετέχει στον ανασχεδιασμό της ροής σε ένας ΣΗΕ μπορεί να περιγραφεί ως δυαδικός αριθμός με τιμή 1 για κατάσταση αγωγής και τιμή 0 κατάσταση διακοπής. Σε μία προσπάθεια για μηδενική ανοχή σφάλματος κατά τη μετρική  $L_\infty$ , ο αλγόριθμος Garofalakis-Kumar συνοψίζει την αρχική χρονοσειρά 1024 στοιχείων (υπόθεση δειγματοληψίας ανά περίπου ενάμιση λεπτό σε διάρκεια μιας μέρας) και 6 χειρισμών με 27 συντελεστές, ενώ ο αλγόριθμος επιλογής των Άνω-k συντελεστών HT με 472 συντελεστές. Η αρχική χρονοσειρά, καθώς και οι δύο ανακατασκευασμένες από τις σχετικές συνόψεις δίνονται στο Σχήμα Π.Α.9.



Σχήμα Π.Α.9. Σύγκριση μεταξύ των αρχικής και ανακατασκευασμένης κατόπιν εφαρμογής των τεχνικών σύνοψης Garofalakis-Kumar και επιλογής των Άνω-k συντελεστών του HT υπό τη μετρική  $L_\infty$  χρονοσειρών για το ερώτημα της κατάστασης αγωγής διακόπτη ισχύος.

#### ***A.4 Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων και της μεθοδολογίας***

Οι τεχνικές κατασκευής συνόψεων από χρονοσειρές μπορούν να βοηθήσουν τους διαχειριστές και τελικούς χρήστες των βάσεων δεδομένων των ΣΗΕ στην αποθήκευση, στη μετάδοση και στην επεξεργασία τους με συνεπή τρόπο παρά τη μείωση της αρχικής πληροφορίας. Για τη διασφάλιση ικανής αναπαράστασης των αρχικών δεδομένων επιλέγεται η κατάλληλη κάθε φορά μετρική σφάλματος.

Για τη μετρική  $L_2$  τόσο ο άπληστος αλγόριθμος όσο και εκείνος των Garofalakis-Kumar επιτυγχάνουν μείωση του όγκου κατά 50 φορές στο χαρακτηριστικό παράδειγμα που εξετάστηκε. Πρέπει βέβαια να παρατηρηθεί, ότι δεν απέδωσαν την ίδια τιμή για τη μετρική σφάλματος, αν και κατέληξαν στον ίδιο αριθμό συντελεστών. Αυτό προέκυψε διότι, όπως αναφέρθηκε, οι αλγόριθμοι δεν εκτελέστηκαν κατά τρόπο που να ελαχιστοποιεί τη μετρική για δεδομένο πλήθος συντελεστών, αλλά έως ότου η μετρική σφάλματος της σύνοψης να υπολογιστεί μικρότερη του τιθέμενου ανωφλίου.

Για τη μετρική  $L_\infty$  ο αλγόριθμος των Garofalakis-Kumar μειώνει το μέγεθος της αρχικής χρονοσειράς κατά μέσο όρο 20 φορές. Από την άλλη, αν και ταχύτερη ως μέθοδος, η επιλογή των Άνω-k συντελεστών HT περιορίζει κατά μέσο όρο τον όγκο της αρχικής χρονοσειράς μόλις στο ένα τρίτο της.

Παρά τη γενικά επιτυχή εφαρμογή των τεχνικών σύνοψης στα παραδείγματα των ηλεκτρικών δεδομένων που συζητήθηκαν, ενδέχεται η χρησιμοποίησή τους να φανεί, κατά περιπτώσεις, υπερβολική. Τα αποτελέσματα ειδικά του ερωτήματος για τον ανασχεδιασμό ροής ισχύος μέσω τηλεχειριζόμενων διακοπών το αποδεικνύουν, αφού για έξι αλλαγές στην κατάσταση του διακόπτη, ακόμα και η βέλτιστη τεχνική των Garofalakis-Kumar απαιτεί τετραπλάσιο αριθμό συντελεστών. Εναλλακτικά, η καταγραφή μόνο των αλλαγών κατάστασης του διακόπτη με τη χρονική σήμανσή τους και παραλείποντας τα ενδιάμεσα διαστήματα, αποδίδει την ίδια πληροφορία με οικονομικότερο και απλούστερο τρόπο.

## ***A.5 Συμπεράσματα***

Η προετοιμασία και εκτέλεση πολλών και διαφορετικού τύπου επικουρικών υπηρεσιών από τους συντελεστές ενός ΕιΣΠ, οι οποίοι είναι εξάλλου εξ ορισμού ετερόμορφοι, απαιτεί τη συγκέντρωση και διαχείριση μεγάλου όγκου και διαφορετικών περιεχομένων πληροφορίας. Επίσης, δημιουργείται και ανάγκη καθορισμού προτεραιότητας μεταξύ των επικουρικών υπηρεσιών.

Στην παρούσα ενότητα τέθηκε – κατ' αρχήν – το πλαίσιο, πρώτον, μιας αφαιρετικής και δυναμικής μεθοδολογίας η οποία θα καθορίζει την προτεραιότητα υλοποίησης των επικουρικών υπηρεσιών από μεριάς του ΕιΣΠ και, δεύτερον, της διαμόρφωσης των επιπέδων πρόσβασης στην πληροφορία ώστε να προετοιμάζεται και εκτελείται με τη μικρότερη, αλλά συνεπή ανταλλαγή δεδομένων η κάθε υπηρεσία.

Στη συνέχεια παρουσιάστηκε μέθοδος σύνοψης χρονοσειρών δεδομένων ηλεκτρικών μετρήσεων με σκοπό τη μείωση του όγκου της πληροφορίας που συγκεντρώνεται, μεταδίδεται και αποθηκεύεται μεταξύ των συντελεστών του ΕιΣΠ, του χειριστή/ιδιοκτήτη του και του ΣΗΕ προς το οποίο ο ΕιΣΠ συνδέεται. Η μέθοδος η οποία έχει συζητηθεί και εδώ [15,16] αποδίδει θετικά σχεδόν σε κάθε περίπτωση ερωτήματος που εξετάστηκε, αν και σε πολύ ειδικές περιπτώσεις με περιορισμένη μεταβλητότητα χρονοσειράς, η χρήση της μπορεί να είναι υπερβολική.



## **A.6 Βιβλιογραφία**

- [1] B. E. Zunser, C. D. Meier, H. J. Warner, K. Hemmaplardh, S. A. Sackett, D. Williamson, D. Vartuli, An Historical Information Spreadsheet for Power System Operation, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 1, Τεύχος 4, Νοέμβριος 1986, Σελίδες 238-242.
- [2] Dalton, J.G., D.L. Garrison, C.M. Fallon, Value-based reliability transmission planning, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 11, Τεύχος 3, Αύγουστος 1996, Σελίδες 1400-1408.
- [3] C.D. Puckett, T.P. Hennessy, G.C. Heffner, C.A. Goldman, Regional Approaches to Measurement and Verification of Load Management Programs, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 23, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2008, Σελίδες 204-212.
- [4] Jie Chen, Shi-Jie Deng, Xiaoming Huo, Electricity Price Curve Modeling and Forecasting by Manifold Learning, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 23, Τεύχος 3, Αύγουστος 2008, Σελίδες 877-888.
- [5] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, John Wiley, Chichester, 2001.
- [6] Amara Graps, An Introduction to Wavelets, Computing in Science and Engineering, Τόμος 2, Τεύχος 2, Ιούνιος 1995, Σελίδες 50-61.
- [7] H.L. Willis, H.N. Tram, G.B. Rackliffe, Short-range load forecasting for distribution system planning-an improved method for extrapolating feeder load growth, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 7, Τεύχος 3, Αύγουστος 1992, Σελίδες 1306-1312.
- [8] M. Hanmandlu, B. K. Chauhan, Load Forecasting Using Hybrid Models, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 26, Τεύχος 1, Φεβρουάριος 2011, Σελίδες 20-29.
- [9] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1993.
- [10] M.A. Kashem, V. Ganapathy, G.B. Jasmon, Network reconfiguration for load balancing in distribution networks, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Τόμος 146, Τεύχος 6, Νοέμβριος 1999, Σελίδες 563-567.
- [11] T. Asakura, T. Genji, T. Yura, N. Hayashi, Y. Fukuyama, Long-term distribution network expansion planning by network reconfiguration and generation of construction plans, IEEE Transactions on Power Systems, Τόμος 18, Τεύχος 3, Αύγουστος 2003, Σελίδες 1196- 1204.
- [12] M. Garofalakis, A. Kumar, Deterministic wavelet thresholding for maximum-error metrics, 23rd ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART 2004 symposium on Principles of database systems, Σελίδες 166-176.
- [13] S. Guha, Space efficiency in synopsis construction algorithms, 31st international conference on Very large data bases, Trondheim, Νορβηγία, 2005, Σελίδες 409-420.
- [14] [www.admie.gr](http://www.admie.gr)

- [15] P. Moutis, An introduction to wavelet synopses of electric power system measurements, 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010) , 7-10 Νοεμβρίου 2010, Σελίδες 1-6.
- [16] P. Moutis, N.D. Hatziaargyriou, Using wavelet synopsis techniques on electric power system measurements, 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 5-7 Δεκεμβρίου 2011, Σελίδες 1-7.

## ***B Παράλληλη και καταναμημένη παραγωγή συνόλου μάθησης***

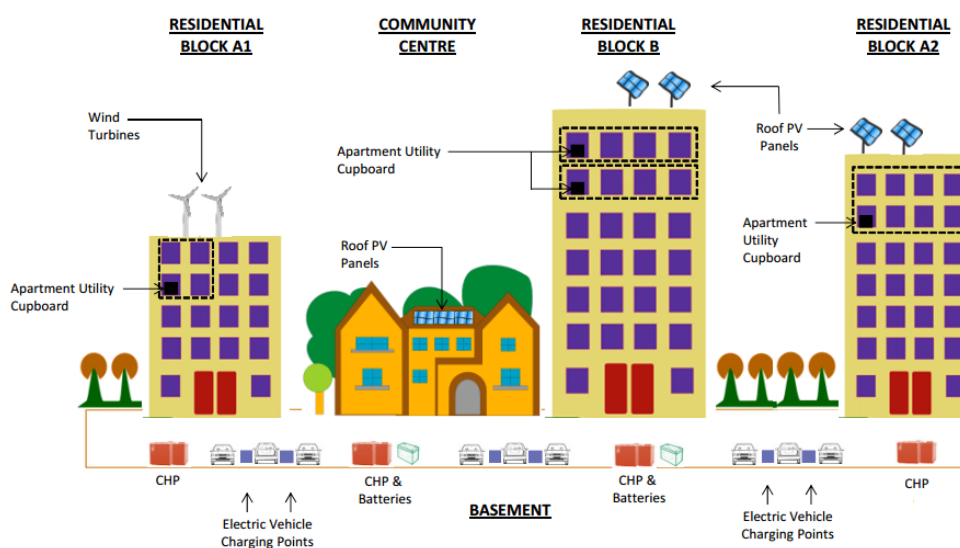
### ***δέντρου απόφασης***

Από όσα παρατηρήθηκαν στην Υποενότητα 2.6, η κεντρική δημιουργία του ΣΜ για την εκπαίδευση ενός ΔΑ από έναν επεξεργαστή, εκπροσωπεί μια υπολογιστικά κοπιώδη αρχιτεκτονική επιλογή και ενδέχεται να περιορίζει τους διαθέσιμους πόρους επεξεργασίας. Ως εκ τούτου, κρίνεται αυτονόητη η ανάγκη για την επαναπροσέγγιση της αρχιτεκτονικής αυτής με λογική διεσπαρμένης και παράλληλης επεξεργασίας η οποία θα συνάδει εν γένει και με την προσέγγιση της ΔΠ. Παρατίθενται παρακάτω τα ευρήματα ερευνητικού έργου που αφορούσε τη χρήση της μεθοδολογίας εξαγωγής προγραμμάτων εξισορρόπησης παραγωγής-κατανάλωσης στηριγμένη σε ΔΑ για Μικροδίκτυο (Μ/Δ) Ηλεκτρικής ενέργειας εγκατεστημένο σε Προσχεδιασμένη Κοινότητα (ΠΚ, στα αγγλικά Planned Community). Αρχικά θα παρατεθεί σύντομη ανασκόπηση των όρων Μ/Δ και ΠΚ και στη συνέχεια θα διατυπωθεί το πρόβλημα διαχείρισης εξισορρόπησης ισχύος μίας ενδεικτικής και ρεαλιστικής ΠΚ διαχειριζόμενης ως Μ/Δ.

### ***B.1 Οι προσχεδιασμένες κοινότητες ως ηλεκτρική οντότητα εφαρμογής***

#### ***προσεγγίσεων διαχείρισης κατά το πρότυπο του μικροδικτύου***

Ο υπερπληθυσμός των αστικών κέντρων ανά τον κόσμο εγείρει ερωτήματα για την ικανότητα των δεύτερων να συνεχίζουν να εξυπηρετούν τις ανάγκες στέγασης και διαβίωσης διαρκώς αυξανόμενου αριθμού κατοίκων [1]. Στον επιστημονικό τομέα της Αστικής Ανάπτυξης έχει προταθεί πληθώρα εναλλακτικών σχεδίων πληθυσμιακής κάλυψης και διανομής που να απαντά σε αυτό το πρόβλημα.



Σχήμα Π.Β.1. Ενδεικτική τοπολογία ΠΚ.

Μία εξ αυτών των εναλλακτικών είναι οι ΠΚ [2,3]. Η σύνθεσή τους περιλαμβάνει πολυκατοικίες διαμερισμάτων και κοινοτικό κέντρο, ήτοι κτήριο που εξυπηρετεί τους κατοίκους με δημόσιες υπηρεσίες, εμπορικά καταστήματα, ιατρικές υπηρεσίες, κτλ. όπως για παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα Π.Β.1. Κατά την προσέγγιση αυτή και εξαιρώντας το τυπικό ωράριο εργασίας, οι κάτοικοι μιας ΠΚ μπορούν να αποτείνονται για τις ανάγκες και την εξυπηρέτησή τους στο κοινοτικό κέντρο, αποφεύγοντας την παραμονή στα αστικά κέντρα και περιορίζοντας έτσι τη χρήση των τελευταίων προς χάριν της αποσυμφόρησής τους.

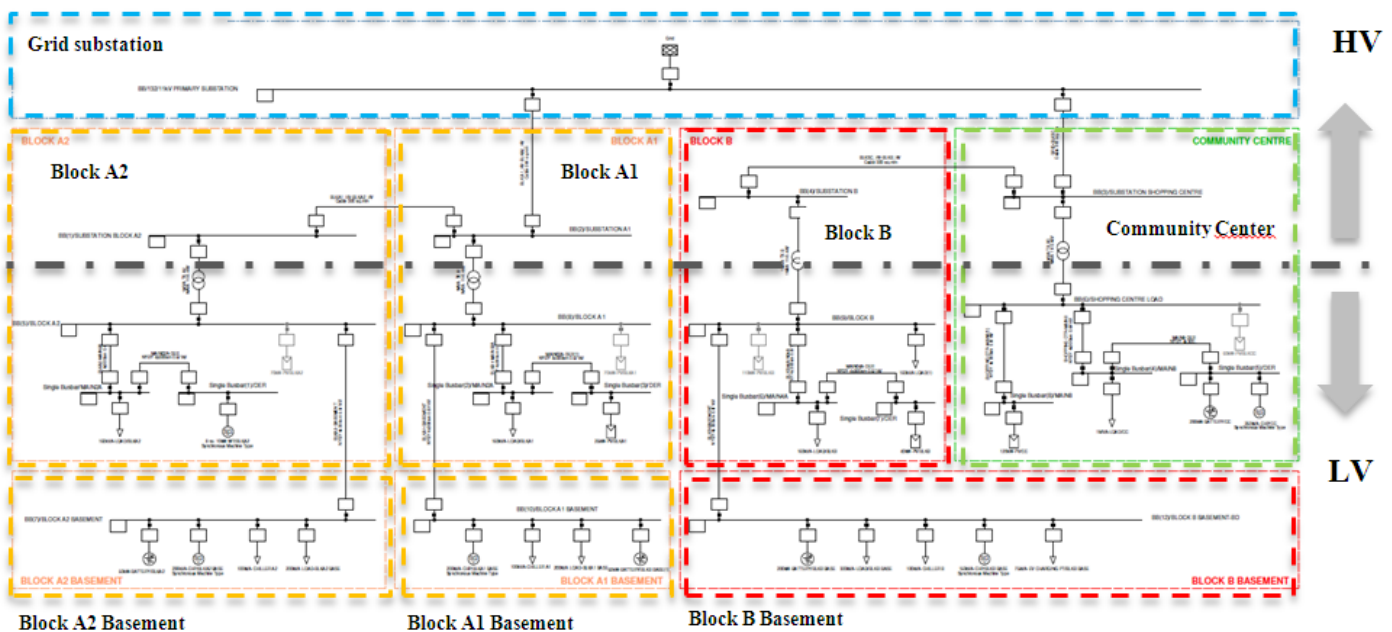
Η περιγραφείσα σύνθεση των ΠΚ σημαίνει ότι θα συγκεντρώνουν μεγάλη ποσότητα κατοικητικού φορτίου και ένα υπολογίσιμο εμπορικό, τα οποία αθροιζόμενα αναμένεται να κυμαίνονται σε ποσά ισχύος από 1MW και άνω. Κατά την εκτίμηση αυτή, οι ΠΚ θα συνδέονται τουλάχιστον στη μέση, αν όχι και στην υψηλή τάση αναλόγως του φορτίου τους, αλλά και της απόστασής τους από τον δίκτυο μεταφοράς του ΣΗΕ. Επιπλέον, ακριβώς επειδή οι ΠΚ είναι μέρος πλάνων ευρύτερης Αστικής Ανάπτυξης, αναμένεται να διατίθεται κοινόχρηστος χώρος επί του οποίου μπορεί να εγκατασταθεί και να γίνεται εκμετάλλευση ΔΠ. Μάλιστα, το τελευταίο εξυπηρετεί κατασκευές τέτοιων έργων για χώρες οι οποίες είτε προσφέρουν επενδυτικά κίνητρα [4] είτε επιβάλλουν εκπλήρωση υποχρεώσεων κάλυψης ισχύος από ΑΠΕ [5]. Το ηλεκτρικό ενεργειακό προφίλ που μόλις περιγράφηκε, καθώς και η δυνατότητα ιδιοκτησίας, παρακολούθησης και πλήρους ελέγχου της ηλεκτρικής εγκατάστασης μιας ΠΚ, συνιστά ευκαιρία εφαρμογής τεχνικών και αλγορίθμων διαχείρισης Μ/Δ [6].

Η τελευταία τοποθέτηση επιβεβαιώθηκε και από δοκιμαστικές ροές φορτίου για πληθώρα σεναρίων φόρτισης μιας δοκιμαστικής ρεαλιστικής ΠΚ. Η θεωρούμενη ΠΚ, αποτελείται από τρεις πολυκατοικίες, τις Α1, Α2 και Β, και το κοινοτικό κέντρο. Τα ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά δίνονται ως εξής.

- Η πολυκατοικία Α1 περιλαμβάνει
  - a. 160kVA κατοικητικό φορτίο
  - b. 100kVA κλιματισμό
  - c. 200kVA διάφορα διαχειριστικά φορτία
  - d. 200kVA μονάδα συμπαραγωγής
  - e. 25kWp εγκατάσταση Φ/Β συστήματος επί της οροφής
  - f. 70kWp ενσωματωμένα επί του façade Φ/Β
  - g. 50kW μετατροπέα μπαταρίας
- Η πολυκατοικία Α2 περιλαμβάνει
  - a. 160kVA κατοικητικό φορτίο
  - b. 100kVA κλιματισμό
  - c. 200kVA διάφορα διαχειριστικά φορτία
  - d. 200kVA μονάδα συμπαραγωγής
  - e. 80kWp Α/Γ κατακόρυφου άξονα επί της οροφής

- f. 70kWp ενσωματωμένα επί του facade Φ/B
- g. 50kW μετατροπέα μπαταρίας
- Η πολυκατοικία B περιλαμβάνει
  - a. 320kVA κατοικητικό φορτίο
  - b. 100kVA κλιματισμό
  - c. 300kVA διάφορα διαχειριστικά φορτία
  - d. 75kW σταθμό φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων
  - e. 150kVA μονάδα συμπαραγωγής
  - f. 40kWp εγκατάσταση Φ/B συστήματος επί της οροφής
  - g. 110kWp ενσωματωμένα επί του facade Φ/B
  - h. 200kW μετατροπέα μπαταρίας
- Το κοινοτικό κέντρο περιλαμβάνει
  - a. 1MVA εμπορικού τύπου φορτίο
  - b. 250kVA μονάδα συμπαραγωγής
  - c. 120kWp εγκατάσταση Φ/B συστήματος επί της οροφής
  - d. 60kWp ενσωματωμένα επί του facade Φ/B
  - e. 200kW μετατροπέα μπαταρίας

Το ηλεκτρικό διάγραμμα της εγκατάστασης δίνεται στο Σχήμα Π.Β.2.



Σχήμα Π.Β.2. Μονογραμμικό ηλεκτρικό διάγραμμα της εγκατάστασης ΠΚ που εξετάστηκε όσο αφορά τα ηλεκτρικά της μεγέθη σε παρόντα και προβλεπόμενα σενάρια φόρτισης και ανάπτυξης.

Το σύνολο του φορτίου ανέρχεται σε περίπου 2.5MW ενώ της ΔΠ με την αποθήκευση περί τα 2MW. Όπως φάνηκε για τα σενάρια του 2030 και του 2050 που εξετάστηκαν για την εν λόγω ΠΚ με την κλασική προσέγγιση διαστασιολόγησης, φάνηκε να είναι σχεδόν αδύνατη η υποστήριξη

νησιδοποιημένης λειτουργίας κατόπιν διακοπής της παροχής στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης. Επιπλέον, η συμμετοχή της ΠΚ σε μία μελλοντική αγορά ενέργειας θα υποφέρει από την υψηλή στοχαστικότητα, ασάφεια και μεταβλητότητα των φορτίων των κατοίκων της. [7]

Είναι χαρακτηριστικό ότι για μικρό αριθμό κατοικητικών φορτίων σαν αυτών που μελετώνται στην παρούσα, η μεταβλητότητα μπορεί να αποκλίνει έως και κατά 15% της ονομαστικής τιμής της, εν σχέσει με την πρόβλεψη [8]. Αν αυτό συνδυαστεί και με τη στοχαστικότητα της ΔΠ που στηρίζεται σε ΑΠΕ, γίνεται αντιληπτό ότι το πρόβλημα γίνεται δυσκολότερο.

## ***B.2 Αντιμετώπιση διαταραχών ενεργού ισχύος σε προσχεδιασμένες κοινότητες με προετοιμασία προγραμμάτων κάλυψής τους από δέντρα απόφασης***

Το σύνολο των παραπάνω παρατηρήσεων καθοδηγεί την ανάγκη εφαρμογής τεχνικών και μεθοδολογιών διαχείρισης της ισχύος και ενέργειας της ΠΚ με εφαρμογές Μ/Δ. Υπό αυτό το πρίσμα, μπορεί να δικαιολογηθεί η ανάπτυξη και χρήση ενός εργαλείου στηριγμένου στα ΔΑ, ως μεθοδολογίας για την εξαγωγή προγραμματισμών κάλυψης απώλειας ΔΠ (ή αύξησης φορτίου) και προγραμματισμών περιορισμού αυξημένης ισχύος ΔΠ (ή μειωμένης κατανάλωσης). Κατά τα όσα περιγράφηκαν στα Κεφάλαια 2 και 4, η μεθοδολογία θα στηρίζεται στη Monte Carlo προσομοίωση μεγάλου αριθμού αναδιανομών αύξησης ή μείωσης της συνολικής ισχύος του Μ/Δ της ΠΚ και εκπαίδευση εκ του συνόλου αυτού του αντίστοιχου ΔΑ που θα εξάγει τους κανόνες που αποδίδουν την υψηλότερη επιθυμητή οικονομικότητα.

Ουσιώδης διαφορά στην υλοποίηση της μεθοδολογίας σε αυτό το πρόβλημα είναι η διανομή της ανάπτυξης του ΣΜ σε αριθμό μικροεπεξεργαστών ίσο με το πλήθος των ελεγχόμενων μονάδων ΔΠ και φορτίων που συνθέτουν το Μ/Δ της ΠΚ. Εν προκειμένω, η ανάπτυξη του πληθυσμού του ΣΜ έγινε από Raspberry Pi [9] μικροεπεξεργαστές οι οποίοι αναλάμβαναν να εκτελούν:

- α. Monte Carlo προσομοίωση της προ διαταραχής κατάστασης,
- β. Monte Carlo προσομοίωση για την κάλυψη της διαταραχής από τους διαθέσιμους πόρους του Μ/Δ της ΠΚ,
- γ. Ροή φορτίου για το (β), ώστε να εξεταστεί η εκπλήρωση ορίων τάσεως και φόρτισης γραμμών και μετασχηματιστών εντός του Μ/Δ της ΠΚ και
- δ. Υπολογισμό κόστους για κάθε προσομοιωμένη κάλυψη της διαταραχής.

Το υποσύνολο του ΣΜ που έχει προετοιμάσει κάθε επεξεργαστής κατά (α)-(δ), αποστέλλεται σε έναν κεντρικό επεξεργαστή για τη συγκριτική αξιολόγηση του κόστους μεταξύ τους και την εκπαίδευση του ΔΑ που θα αποδώσει τους σχετικούς κανόνες/προγραμματισμούς κάλυψης της διαταραχής.

### B.3 Δοκιμή μεθόδου για συμβάν νησιδοποίησης προσχεδιασμένης κοινότητας

Ενδεικτικά, δίνεται η θερινή φόρτιση της παραπάνω παρουσιαζόμενης ΠΚ στον Πίνακα Π.Β.1.

Πίνακας Π.Β.1. Ωριαίος προγραμματισμός ισχύος των πηγών του Μ/Δ της ΠΚ υπό  
Θερινή φόρτισης προ διακοπής νησιδοποίησης.

DG@Bus	P <sub>n</sub> (kW)	P <sub>t+1</sub> (kW)	P <sub>r,t+1</sub> (kW)	P <sub>av,t+1</sub> (kW)		
BIPV@2	70	42	0	0		
PV@4	25	22.5	0	0		
CHP@5	200	180	20	0		
BB@5	50	0	0	29.4	-4.2	SOC=90%
BIPV@7	70	42	0	0		
WG@9	80	56	0	0		
CHP@10	200	180	20	0		
BB@10	50	0	0	29.4	-4.2	SOC=90%
BIPV@12	60	36	0	0		
PV@13	120	108	0	0		
CHP@15	250	225	25	0		
BB@15	200	0	0	117.6	-12.6	SOC=90%
BIPV@17	110	66	0	0		
PV@19	40	36	0	0		
CHP@20	150	135	15	0		
BB@20	200	0	0	117.6	-12.6	SOC=90%

Τα ΔΑ που εκπαιδεύτηκαν κατά τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη υποενότητα αποδίδουν τους εξής κανόνες/προγραμματισμούς εξισορρόπησης παραγωγής-κατανάλωσης για την νησιδοποιημένη λειτουργία του Μ/Δ της ΠΚ, όπως δίνονται στον Πίνακα Π.Β.2.

Πίνακας Π.Β.2. Προγραμματισμοί εξισορρόπησης παραγωγής-κατανάλωσης του Μ/Δ της ΠΚ για νησιδοποιημένη λειτουργία υπό θερινή φόρτιση.

DT Schedule	Rule
Long-term @Top-30% profit	i. <i>if (L/I_B@21&lt;190) and (Dom_A1@4≥20) and (Dom_B@19≥72) and (Dom_B@18≥56) and (CC@15&lt;248) then TRUE (purity≈98%)</i>
Long-term @Top-25% profit	i. <i>if (Dom_A2@9≥96) and (Dom_A1@4≥88) and (Dom_B@19≥92) and (Dom_B@18≥76) and (92≤CC@15&lt;300) then TRUE (purity≈94%)</i>
Long-term @Top-20% profit	i. <i>if (Dom_A2@9≥60) and (Dom_A1@4≥48) and (Dom_B@19≥92) and (40≤Dom_B@18&lt;130) and (CC@15&lt;28) then TRUE (purity≈100%)</i>
Long-term @Top-15% profit	i. <i>if (BB@11&lt;24) and (Dom_A2@9≥88) and (Dom_A1@4≥120) and (Dom_B@19&lt;116) and (Dom_B@18≥128) then TRUE (purity≈100%)</i>
Long-term @Top-10% profit	No rule could be extracted

Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα είναι τα αναμενόμενα και αυξανόμενης της ζητούμενης οικονομικότητας τα προγράμματα της εξισορρόπησης καθοδηγούν σε μεγαλύτερη αποκοπή το φορτίου του κοινοτικού κέντρου μιας και ως μικρότερου κοινωνικού κόστους είχε διατιμηθεί φθηνότερα και άρα με μικρότερη σημασία στη συνάρτηση κόστους, σε αντίθεση με τα φορτία κατοικητικού τύπου. Δε δίνονται περισσότερες λεπτομέρειες ή σχολιασμός στην παρούσα φάση μιας και το ενδιαφέρον δεν αφορά τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου προβλήματος, αλλά την τοπολογία υλοποίησης του και την απόδοση της τελευταίας.

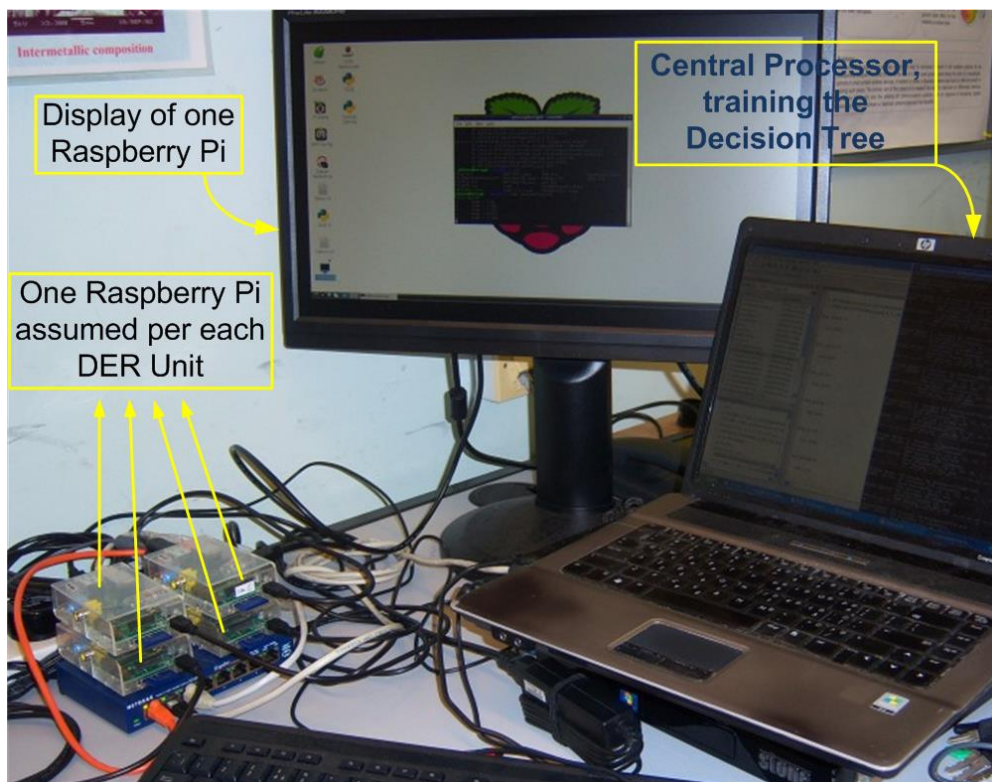
#### ***B.4 Τοπολογία υλοποίησης μεθόδου αντιμετώπισης διαταραχών ενεργού ισχύος σε προσχεδιασμένες κοινότητες με δέντρα απόφασης και απόδοση της μεθόδου***

Όπως φάνηκε από τον Πίνακα Π.Β.1, οι εμπλεκόμενοι συντελεστές του Μ/Δ της ΠΚ είναι δεκαέξι, αλλά διευκρινίζεται ότι τα φορτία σε κάθε κτήριο είχαν δύο επιμέρους σημεία συγκέντρωσης κάθε ένα, άρα πρακτικά οι ελεγχόμενοι συντελεστές είναι είκοσι. Ως εκ τούτου, υποτίθεται ότι είκοσι μικροεπεξεργαστές και ελεγκτές τύπου Raspberry Pi εγκαθίστανται στο Μ/Δ, ένας σε κάθε ελεγχόμενο συντελεστή. Δείγμα της αναφερόμενης τοπολογίας δίνεται στην Εικόνα Π.Β.1 με τέσσερις μικροεπεξεργαστές και τον κεντρικό επεξεργαστή που συλλέγει το σύνολο του ΣΜ.



Μέσω δοκιμής και σφάλματος διαπιστώθηκε ότι απαιτείται για το συγκεκριμένο πρόβλημα  $|\Sigma M|=1000$  στοιχείων, άρα κάθε ένας από τους μικροεπεξεργαστές θα δημιουργεί ένα κλάσμα 50 διανομών εξισορρόπησης ισχύος παραγωγής-κατανάλωσης. Στην προκειμένη περίπτωση ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε σε Java κατάλληλης έκδοσης για Raspberry Pi και ο χρόνος προετοιμασίας και συγκέντρωσης του ΣΜ από τους μικροεπεξεργαστές ανήλθε στα 10 s.

Για το ίδιο πρόβλημα δοκιμάστηκε η μέθοδος όπως αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Ο αντίστοιχος χρόνος εκτέλεσης ανήλθε στα 30 δευτερόλεπτα. Είναι προφανές ότι πέραν της βελτίωσης του χρόνου επεξεργασίας και της αποφόρτισης του κεντρικού επεξεργαστή από τον υπολογιστικό φόρτο δημιουργίας του ΣΜ, διαφαίνεται και δυνατότητα περαιτέρω οργάνωσης σχετικών προληπτικών εργασιών αξιοπιστίας και διαχείρισης του ΣΜ στη διανεμημένη αρχιτεκτονική που προτάθηκε και δοκιμάστηκε εδώ.



Εικόνα Π.Β.1. Γενική άποψη της διανεμημένης αρχιτεκτονικής της μεθόδου εξισορρόπησης ισχύος παραγωγής-κατανάλωσης για το Μ/Δ της μελετώμενης ΠΚ. Αριστερά φαίνονται τέσσερις μικροεπεξεργαστές Raspberry Pi και δεξιά ο κεντρικός επεξεργαστής που συλλέγει τα κλάσματα του ΣΜ και εκπαιδεύει το αντίστοιχο ΔΑ.

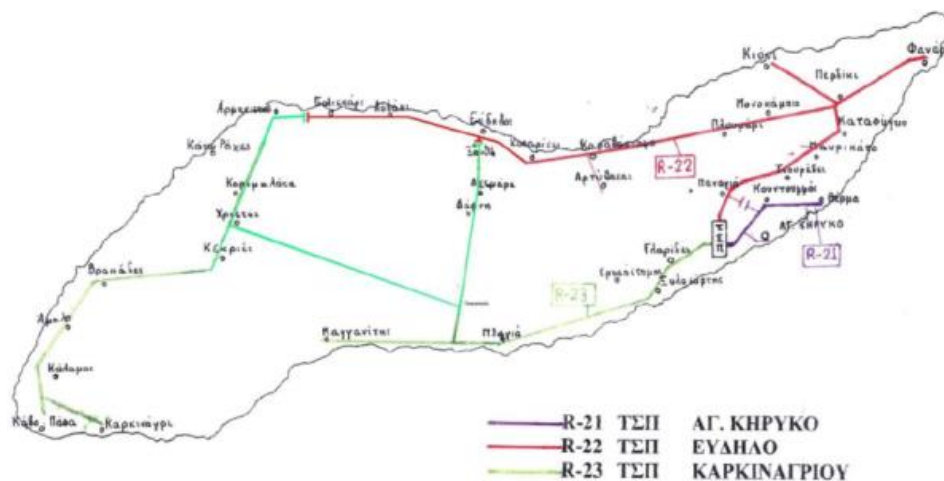
## **B.5 Βιβλιογραφία**

- [1] Jesper Ryberg and Torbjörn Tännsjö, *The Repugnant Conclusion: Essays on Population Ethics* (Library of Ethics and Applied Philosophy), Springer, 2004.
- [2] J. M. Plas, S. E. Lewis, Environmental factors and sense of community in a planned town, *American Journal of Community Psychology*, Τεύχος 24, Τόμος 1, Φεβρουάριος 1996, Σελίδες 109-143.
- [3] R. Cervero, Planned Communities, Self-containment and Commuting: A Cross-national Perspective, *Urban Studies*, Τεύχος 32, Αύγουστος 1995, Σελίδες 1135-1161.
- [4] R.K. Varma, G. Sanderson, K. Walsh, Global PV incentive policies and recommendations for utilities, 2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering – CCECE, 8-11 Μαΐου 2011, Σελίδες 1158-1163.
- [5] C. Mitchell, D. Bauknecht, P.M. Connor, Effectiveness through risk reduction: a comparison of the renewable obligation in England and Wales and the feed-in system in Germany, *Energy Policy*, Τεύχος 34, Τόμος 3, Φεβρουάριος 2006, Σελίδες 297-305.
- [6] R.H. Lasseter, P. Paigi, Microgrid: a conceptual solution, 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC '04), Τεύχος 6, Ιούνιος 2004, Σελίδες 4285-4290.
- [7] P. Moutis, S. Skarvelis-Kazakos, M. Brucoli, J. Hung and Shu-Wei Wu, Planned Communities as Microgrid Applications, 2014 5th IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), Κωνσταντινούπολη, 12-15 Οκτωβρίου 2014, Σελίδες 1-7.
- [8] S. Arora, J.W. Taylor, Short-Term Forecasting of Anomalous Load Using Rule-Based Triple Seasonal Methods, *IEEE Transactions on Power Systems*, Τεύχος 28, Τόμος 3, Αύγουστος 2013, Σελίδες 3235-3242.
- [9] Eben Upton, Gareth Halfacree, *Raspberry Pi User Guide*, Wiley, 2014.

## Γ Δίκτυο διανομής R-22 του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

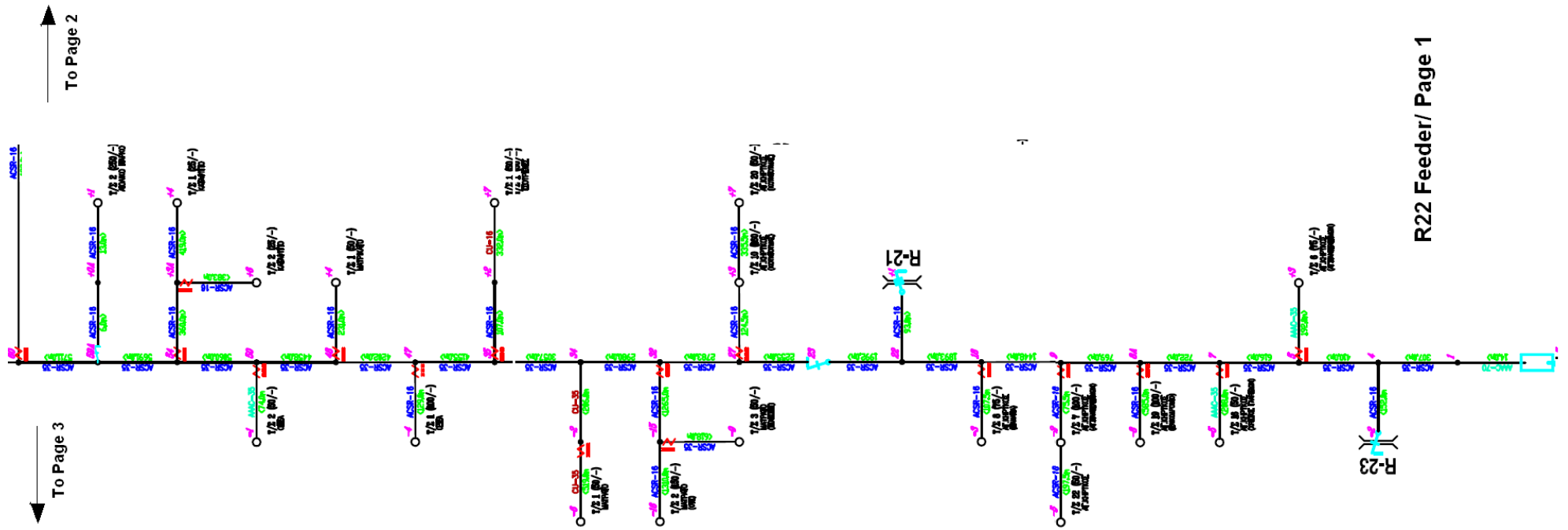
### Ικαρίας

Το ΣΗΕ Ικαρίας από αποτελείται από 3 γραμμές διανομής τις R-21, R-22 και R-23. Η χωροθεσία τους δίνεται στο Σχήμα Π.Γ.1.



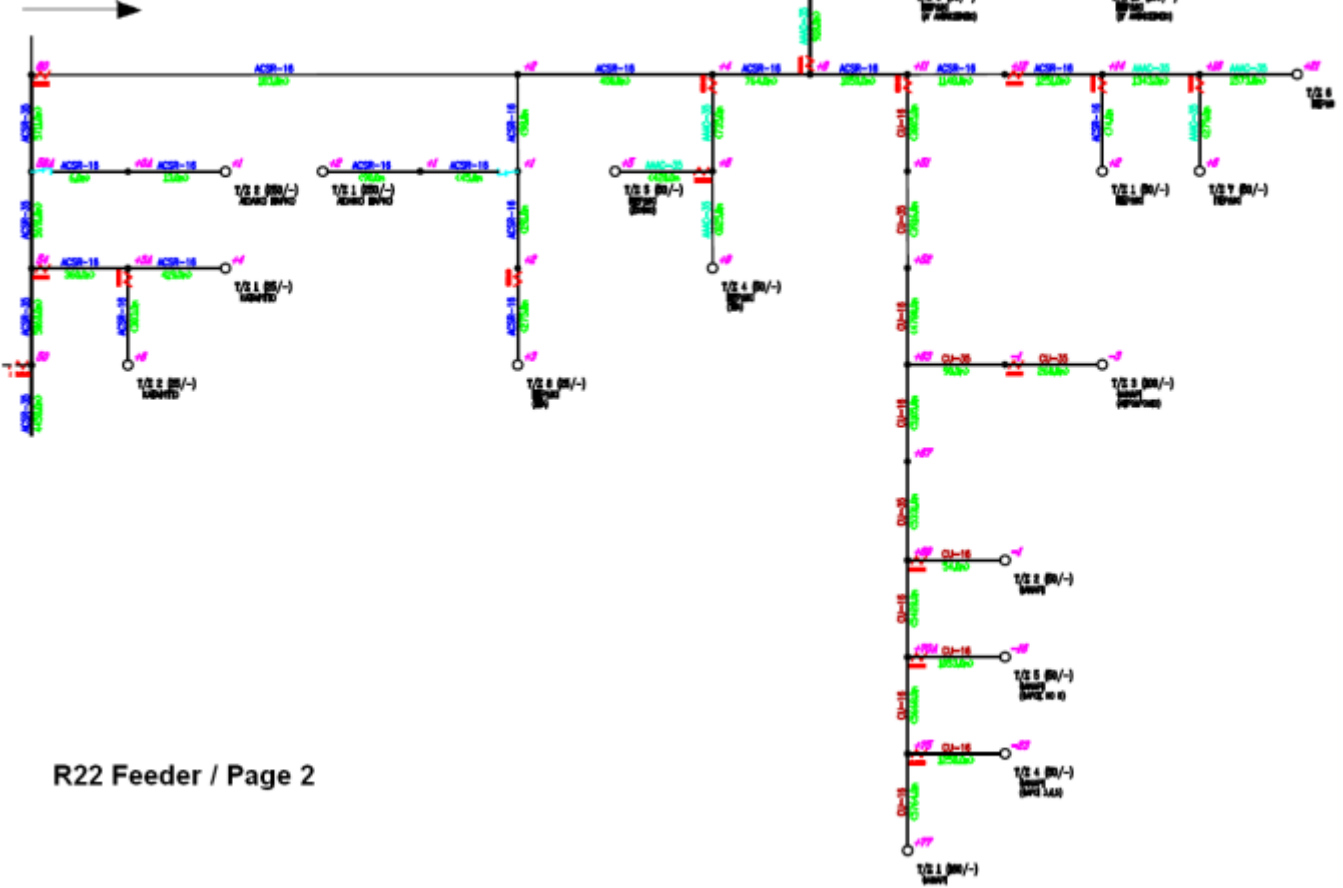
Σχήμα Π.Γ.1. Γεωγραφική αναπαράσταση του ΣΗΕ Ικαρίας.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μελέτη επί της R-22. Η διανομή αυτή εκτείνεται κυρίως στις βόρεια και δυτική πλευρές του νησιού. Λεπτομερώς, το μονογραμμικό ισοδύναμό της δίνεται στα Σχήματα Π.Γ.2-5.



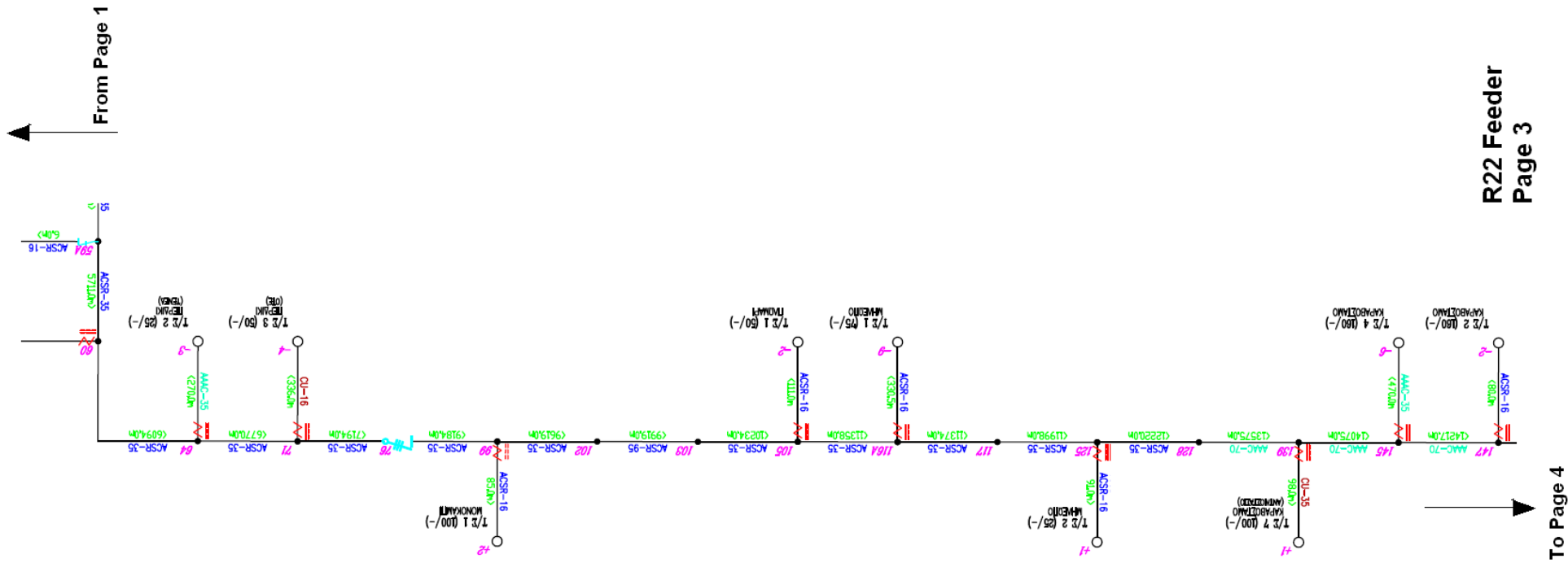
Σχήμα Π.Γ.2. Μονογραμμικό ισόδυναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Α'.

From Page 1



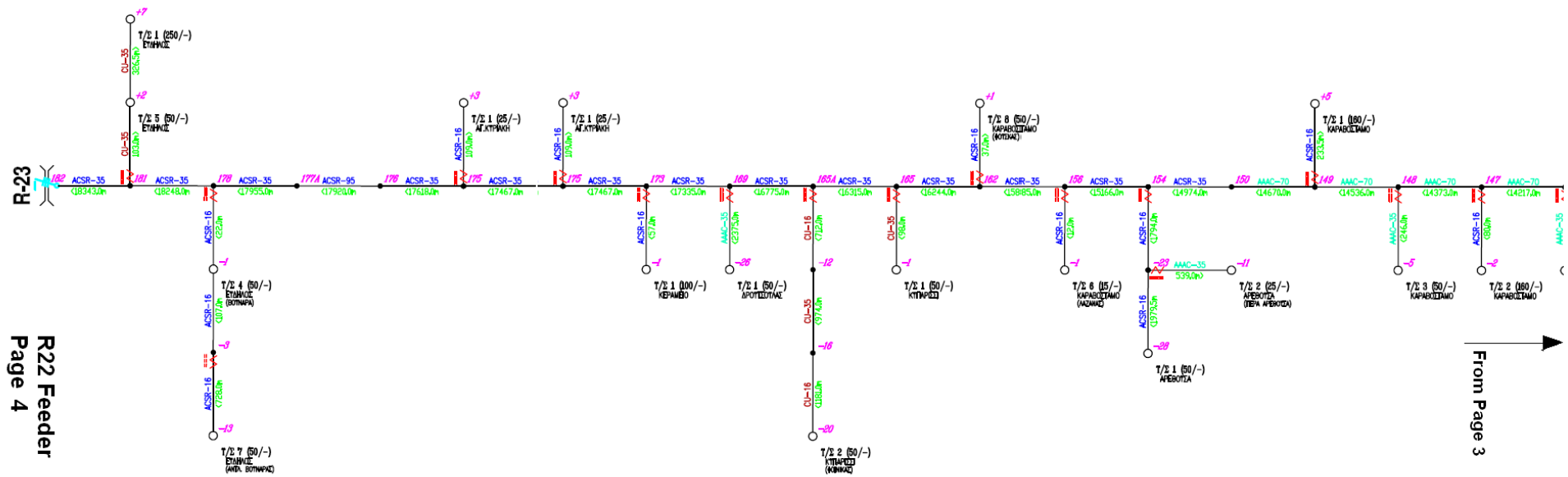
R22 Feeder / Page 2

Σχήμα Π.Γ.3. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Β'.



R22 Feeder  
Page 3

Σχήμα Π.Γ.4. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Γ'.



Σχήμα Π.Γ.5. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-22 ΣΗΕ Ικαρίας – Μέρος Δ'.

Τα χαρακτηριστικά των γραμμών της αναφερόμενης παροχής συνοψίζονται κατά τους τύπους τους στον Πίνακα Π.Γ.1.

Πίνακας Π.Γ.1. Τύπος γραμμών της παροχής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Τύπος γραμμής	Ωμική αντίσταση (Ω/km)	Επαγωγική αντίδραση (Ω/km)	Θερμικό όριο (MVA)
AAAC-70	0.562	0.370	6.2
ACSR-35	0.576	0.397	5.8
ACSR-95	0.215	0.334	11.6
ACSR-16	1.268	0.422	3.5
CU-16	1.274	0.417	3
CU-35	0.596	0.393	4.8
AAAC-35	1.071	0.393	4.2
AAAC-185	0.204	0.337	12

Οι υποσταθμοί μέσης προς χαμηλή τάση κατά την ονομασία τους από τα ανωτέρω μονογραμμικά (Σχήματα Π.Γ.2-5) και με την ονομαστική ισχύ του Μ/Σ τους δίνονται στον Πίνακα Π.Γ.2.

Πίνακας Π.Γ.2. Ονομασία και ονομαστικής ισχύς Μ/Σ ισχύος διανομής R-22 του ΣΗΕ Ικαρίας.

Ονομασία υποσταθμού	Ισχύς Μ/Σ (kVA)	Ονομασία υποσταθμού	Ισχύς Μ/Σ (kVA)
Αγ. Κήρυκος (Αγ. Παντελ.-6)	75	Καραβόσταμο – 1	160
Αγ. Κήρυκος (Χρ. Γλαδερών)	50	Καραβόσταμο (Λαζανάς)	15
Αγ. Κήρυκος (Ελικοδρόμιο)	100	Αρεθούσα (Πέρα Αρεθ.)	25
Αγ. Κήρυκος (Αγ. Παντελ.-7)	100	Αρεθούσα	50
Αγ. Κήρυκος	50	Καραβόσταμο (Φούσκας)	50
Αγ. Κήρυκος (Παναγία)	75	Κυπαρίσσι	50
Αγ. Κήρυκος (Κουντουμ.-10)	160	Κυπαρίσσι (Φοίνικας)	50
Αγ. Κήρυκος (Κουντουμ.-20)	50	Δρούτσουλας	50
Μαυράτο (ΤΕΛΕΣΤΕΤ)	50	Κεραμειό	100
Μαυράτο (ΟΤΕ)	150	Αγ. Κυριακή	25
Μαυράτο	50	Εύδηλος (Βουναρά)	50
Τσουρέδες	50	Εύδηλος (Αντλ. Βουναρά)	50
Οξέα – 1	100	Εύδηλος – 5	50
Μαυρικάτο	50	Εύδηλος – 1	250
Οξέα – 2	50	Περδίκι (ΤΕΑ - 8)	25
Καταφύγιο – 2	25	Αιολικό Πάρκο – 1	0
Καταφύγιο – 1	25	Περδίκι (Ξύλινο)	50
Αιολικό Πάρκο – 2	0	Περδίκι (ΤΕΑ - 4)	50
Περδίκι (ΥΕΝΕΔ)	25	Φανάρι (Αεροδρόμιο)	100
Περδίκι (ΟΤΕ)	50	Φανάρι – 2	50
Μονοκάμπι	100	Φανάρι (Φάρος 8)	50
Πλωμάρι	50	Φανάρι – 1	160
Μηλεωπό – 1	75	Φανάρι (Φάροι 3,4,5)	50
Μηλεωπό – 2	25	Περδίκι – 1	50
Καραβόσταμο (Αντλιοστ.)	100	Περδίκι – 7	50
Καραβόσταμο – 4	160	Περδίκι – 6	50
Καραβόσταμο – 2	160	Περδίκι (Α' Αντλιοστάσιο)	50
Καραβόσταμο – 3	50	Κιονιό	50
		Περδίκι (Β' Αντλιοστάσιο)	100



Διευκρινίζεται ότι αναλόγως της μονάδας ΔΠ που ενδεχομένως συνδεόταν σε κάποιο ζυγό του μελετώμενου ΣΗΕ εκτός της ανωτέρω λίστας, προσθέτονταν Μ/Σ κατάλληλης ισχύος. Ως κατάλληλης ισχύος εννοείται Μ/Σ που, υπό ονομαστική ισχύ μονάδας, δε φορτίζεται άνω του 80%.

Τα μοντέλα δυναμικής κατάστασης των μονάδων ΔΠ του ΕιΣΠ που απαιτούνταν για τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό κάλυψης απώλειας ισχύος του *Κεφαλαίου 2* παρατίθενται εν πολλοίς στα *Παράρτημα Δ'* και *Ε'* αμέσως παρακάτω. Υποτέθηκαν επιπλέον τα εξής:

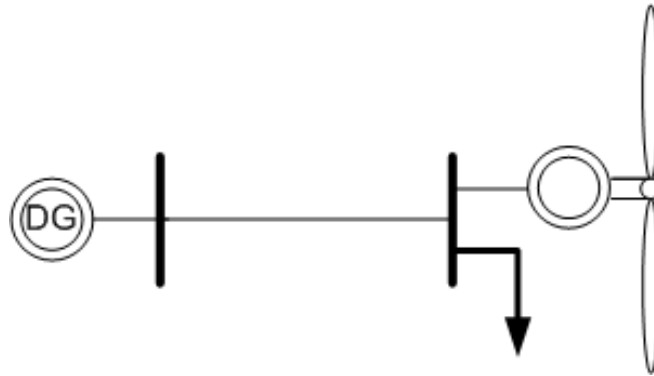
- Η μονάδα βιομάζας προσομοιώνεται ως εμβολοφόρος (τύπου diesel, βλ. *Παράρτημα Δ'*),
- Η υβριδική μονάδα Φ/Β σταθμού με μικρό αντλησιοταμιευτικό υδροηλεκτρικό προσομοιώνεται ως υδροηλεκτρική με  $T_w=1.5s$ , χωρίς μεταβατικό στατισμό και χωρίς πύργο αναπάλσεως [1],
- Η μονάδα γεωθερμίας προσομοιώνεται ως ατμοηλεκτρική τριών βαθμίδων (30%-30%-40%) με αντίστοιχες υστερήσεις  $\{T_h, T_l\}=\{0.3, 0.5\}s$  και χρόνο αναθέρμανσης  $T_{r/h}=7s$  [1,2],
- Η κάθε μονάδα παλιρροϊκής ισχύος προσομοιώνεται ως τρίπτερη έλικα πίσω από γεννήτρια DFIG (σαν Α/Γ, βλ. *Παράρτημα Δ'*) με ονομαστική γωνιακή ταχύτητα δρομέα 1.1 rad/s,
- Η κάθε μονάδα κυψέλης καυσίμου προσομοιώνεται ως ατμοηλεκτρική μιας βαθμίδας και χρονικής υστέρησης  $T_s=0.7s$  [1,2] και
- Η κάθε μονάδα υγροποιημένου αερίου πετρελαίου προσομοιώνεται ως εμβολοφόρος (τύπου diesel, βλ. *Παράρτημα Δ'*).

Η γενικότητα της προτεινόμενης μεθόδου του *Κεφαλαίου 2* δε βλάπτεται από το ανωτέρω σύνολο υποθέσεων. Εξάλλου, αποδεικνύεται σημαντικότερη η επίδραση των χρόνων εκκίνησης των μονάδων ΔΠ, παρά ο χρόνος αναρρίχησης της ισχύος τους ως τις εκάστοτε ζητούμενες τιμές. Επίσης, η μέθοδος του *Κεφαλαίου 2* δεν επηρεάζει ούτε περιορίζει την υποκατάσταση των υποτιθέμενων μοντέλων με εναλλακτικά.



## Δ Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για δοκιμή αποφόρτισης και ρύθμισης συχνότητας από ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών μεταβλητού βήματος

Το ΣΗΕ δύο ζυγών που θεωρήθηκε για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ δίνεται στο Σχήμα Π.Δ.1. Όπως φαίνεται, αποτελείται από γεννήτρια diesel και τη θεωρούμενη Α/Γ.



Σχήμα Π.Δ.1. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Α/Γ στη ΡΣ.

Τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας diesel είναι ως εξής.

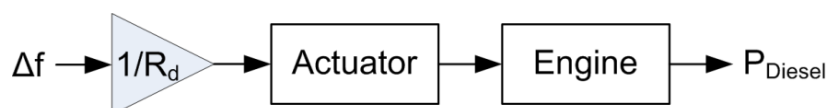
Ονομαστικά μεγέθη μηχανής και ελεγκτών:

$P_n$	= 5.0 MW
Χρονική υστέρηση μηχανισμού	= 50 ms
Νεκρός χρόνος μηχανής	= 0.15 s
Στιγμιαία αδράνεια μηχανής	= 4.0 s
Στατισμός	= 5%

Παράμετροι σύγχρονης γεννήτριας:

Αντίσταση στάτη ( $R_s$ )	= $0.29 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή στάτη ( $L_s$ )	= 0.174 mH
Αντίσταση τυλίγματος πεδίου ( $R_f$ )	= $0.59 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή τυλίγματος πεδίου ( $L_f$ )	= 0.180 mH
Αλληλεπαγωγή στάτη-πεδίου ( $L_m$ )	= 0.165 mH

Το μοντέλο του μηχανικού μέρους της γεννήτριας diesel δίνεται στο Σχήμα Π.Δ.2 κατά την [3].



Σχήμα Π.Δ.2. Μοντέλο μηχανικού μέρους γεννήτριας diesel κατά την [3].

Τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά της  $\underline{A/\Gamma}$  είναι ως εξής.

Ονομαστικά μεγέθη μηχανής και ελεγκτών:

$P_n$	= 2.4 MW	
Ακτίνα έλικας	= 55 m	
$\{c_l - c_6, \chi\}$	= {1, 1.12, 0, 0.022, 2.8, 0.38, 2}	
Ονομαστική γωνιακή ταχύτητα δρομέα	= 1.59 rad/s	
Στατισμός	= 5%	
Κέρδος ψευδοαδρανειακής απόκρισης (ως εκ του [4])		= $J_t \cdot \omega_{t,n}^2 / P_n$ .
Αδράνεια πλευράς δρομέα χαμηλών στροφών ( $J_t$ )		= $8 \cdot 10^6$ kg·N
Αδράνεια πλευράς δρομέα υψηλών στροφών (μόνο για DFIG)		= $100$ kg·N
Συντελεστής ελαστικότητας μεταξύ πλευρών δρομέα (μόνο για DFIG)		= $15 \cdot 10^6$ N/rad
Συντελεστής τριβής μεταξύ πλευρών δρομέα (μόνο για DFIG)		= $5 \cdot 10^6$ N/rad
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων (μόνο για DFIG)		= 60

Μοντέλο και παράμετροι γεννήτριας DFIG στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς υπό  $\omega_e$ :

$$\left. \begin{aligned} \tilde{v}_s &= -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_s - j \cdot \omega \cdot \tilde{\lambda}_s - \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_s \\ \tilde{v}_r &= -\tilde{r}_r \cdot \tilde{i}_r - j \cdot (\omega - \omega_r) \cdot \tilde{\lambda}_r - \frac{1}{\omega_b} \cdot p \tilde{\lambda}_r \\ \tilde{\lambda}_s &= (L_{l,s} + L_m) \cdot \tilde{i}_s + L_m \cdot \tilde{i}_r \\ \tilde{\lambda}_r &= L_m \cdot \tilde{i}_s + (L_{l,r} + L_m) \cdot \tilde{i}_r \\ \tau_e &= \lambda_{d,s} \cdot i_{q,s} - \lambda_{q,s} \cdot i_{d,s} \end{aligned} \right\}$$

Αντίσταση στάτη ( $R_s$ )	= $0.96 \cdot 10^{-3} \Omega$
Αντίσταση δρομέα ( $R_r$ )	= $0.72 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή στάτη ( $L_{l,s}$ )	= 0.042 mH
Επαγωγή δρομέα ( $L_{l,r}$ )	= 0.030 mH
Αλληλεπαγωγή στάτη-δρομέα ( $L_m$ )	= 1.250 mH

Μοντέλο και παράμετροι γεννήτριας PMSG στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς υπό  $\omega_e$ :

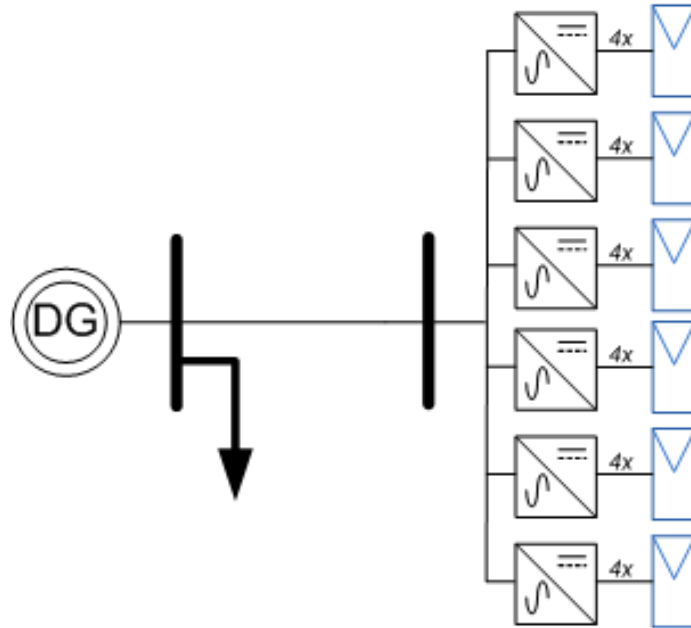
$$\left. \begin{aligned} \tilde{v}_s &= -\tilde{r}_s \cdot \tilde{i}_s + j \cdot \omega \cdot \tilde{\lambda}_s + \frac{1}{\omega_b} p \tilde{\lambda}_s \\ \lambda_{d,s} &= -L_{d,s} \cdot i_{d,s} + \lambda_f \\ \lambda_{q,s} &= -L_{q,s} \cdot i_{q,s} \\ \tau_e &= \lambda_{d,s} \cdot i_{q,s} - \lambda_{q,s} \cdot i_{d,s} \end{aligned} \right\}$$

Αντίσταση στάτη ( $R_s$ )	= $2.04 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή ευθέως άξονα στάτη ( $L_{d,s}$ )	= 0.650 mH
Επαγωγή εγκάρσιου άξονα στάτη ( $L_{q,s}$ )	= 0.455 mH
Μαγνητική ροή δρομέα ( $\Phi_f$ )	= 3.120 Wb

Ο διανυσματικός έλεγχος ρευμάτων έγινε στη βάση της αξιολόγησης που συζητείται στην [5].

## ***E Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας για δοκιμή αποφόρτισης και ρύθμισης συχνότητας από φωτοβολταϊκό σύστημα***

Το ΣΗΕ δύο ζυγών που θεωρήθηκε για τη δοκιμή των μεθόδων αποφόρτισης και συμμετοχής Φ/Β συστήματος στη ΡΣ δίνεται στο Σχήμα Π.Ε.1. Όπως φαίνεται, αποτελείται από γεννήτρια diesel και τη θεωρούμενη Α/Γ.



Σχήμα Π.Ε.1. Σύστημα δύο ζυγών για τη δοκιμή της προτεινόμενης μεθόδου αποφόρτισης και συμμετοχής Φ/Β συστήματος στη ΡΣ.

**Τα ηλεκτρομηχανικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας diesel είναι ως εξής.**

Ονομαστικά μεγέθη μηχανής και ελεγκτών:

$P_n$	= 200 kW
Χρονική υστέρηση μηχανισμού	= 30 ms
Νεκρός χρόνος μηχανής	= 0.1 s
Στιγμαία αδράνεια μηχανής	= 2.0 s
Στατισμός	= 5%

Παράμετροι σύγχρονης γεννήτριας:

Αντίσταση στάτη ( $R_s$ )	= $0.61 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή στάτη ( $L_s$ )	= 0.304 mH
Αντίσταση τυλίγματος πεδίου ( $R_f$ )	= $0.75 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή τυλίγματος πεδίου ( $L_f$ )	= 0.195 mH
Αλληλεπαγωγή στάτη-πεδίου ( $L_m$ )	= 0.170 mH

Το μοντέλο του μηχανικού μέρους της γεννήτριας diesel ισχύει όπως δόθηκε στο Σχήμα Π.7 και κατά την [3].

**Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του Φ/Β συστήματος είναι ως εξής.**

Ονομαστικά μεγέθη και ανάλυση εξοπλισμού:

$P_n$	= 100 kW
Πλήθος Φ/Β Α/Σ	= 6 τεμάχια
Ονομαστική ισχύος ανά Φ/Β Α/Σ	= 17 kW
Πλήθος στοιχειοσειρών ανά Φ/Β Α/Σ	= 4 είσοδοι
Πλήθος Φ/Β πλαίσιων ανά Φ/Β Α/Σ	= 72 τεμάχια
Ονομαστική ισχύος ανά Φ/Β πλαίσιο	= 230 Wp
Στατισμός αλγόριθμου ρύθμισης συχνότητας	= 5%

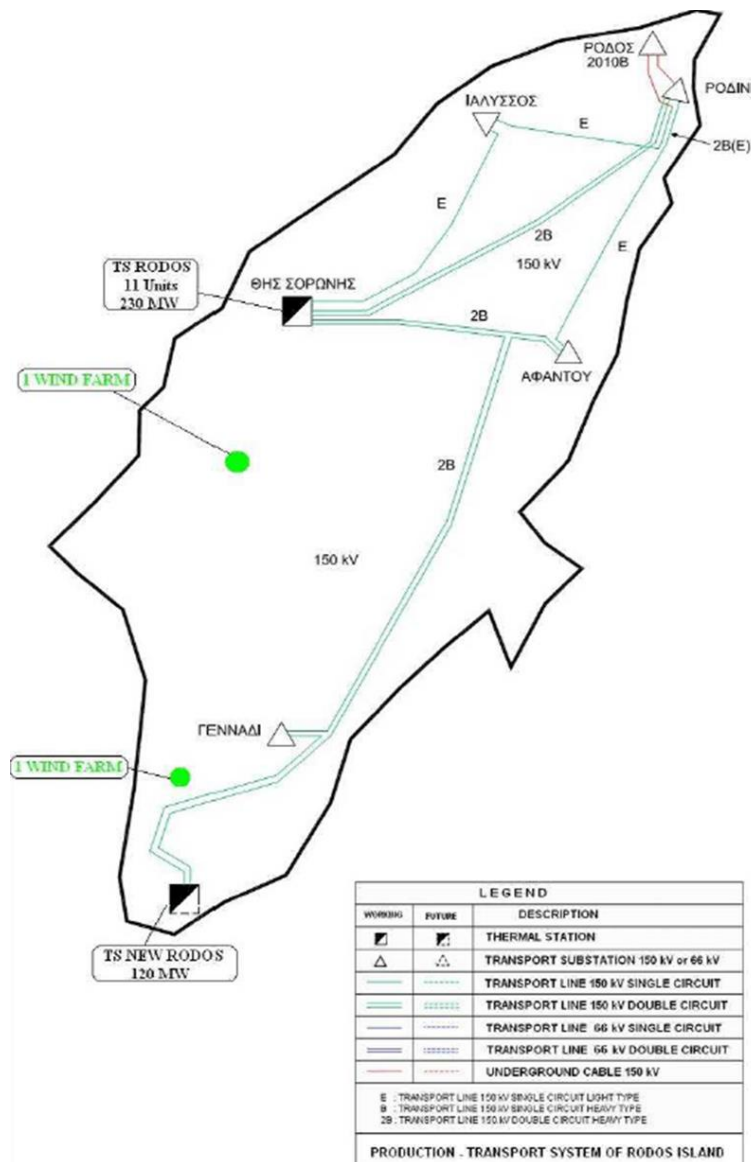
Ηλεκτρικές παράμετροι Φ/Β Α/Σ:

Αντίσταση R-L κυκλώματος ( $R_s$ )	= $4.83 \cdot 10^{-3} \Omega$
Επαγωγή R-L κυκλώματος ( $L_s$ )	= 0.535 mH
Πυκνωτής μετατροπέα συνεχούς ρεύματος ( $C_{DC}$ )	= 285 $\mu$ F

# ΣΤ Δίκτυο διανομής R-26 του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

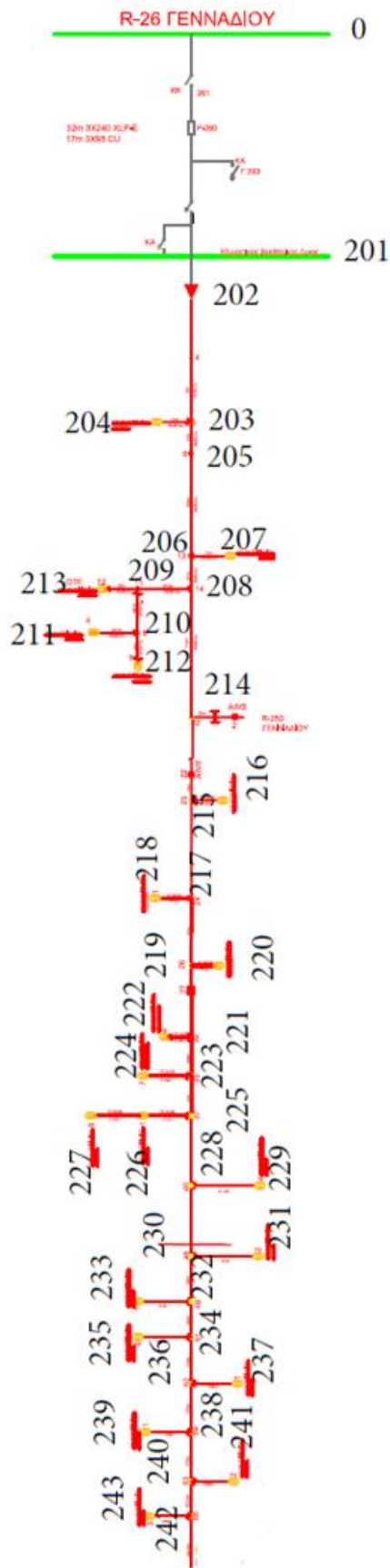
## Ρόδου

Το ΣΗΕ της Ρόδου στηρίζεται σε θερμοηλεκτρική ισχύ 194.3 MW που διαμοιράζεται σε 11 μονάδες. Η μέγιστη ισχύς 2009 ήταν 188.5 MW. Περιλαμβάνει 46 γραμμές διανομής των 15 kV και 20 kV και δίκτυο μεταφοράς σε τάσεις 150 kV και 66 kV. Η συνολική άποψη του ΣΗΕ Ρόδου δίνεται στο Σχήμα Π.ΣΤ.1.



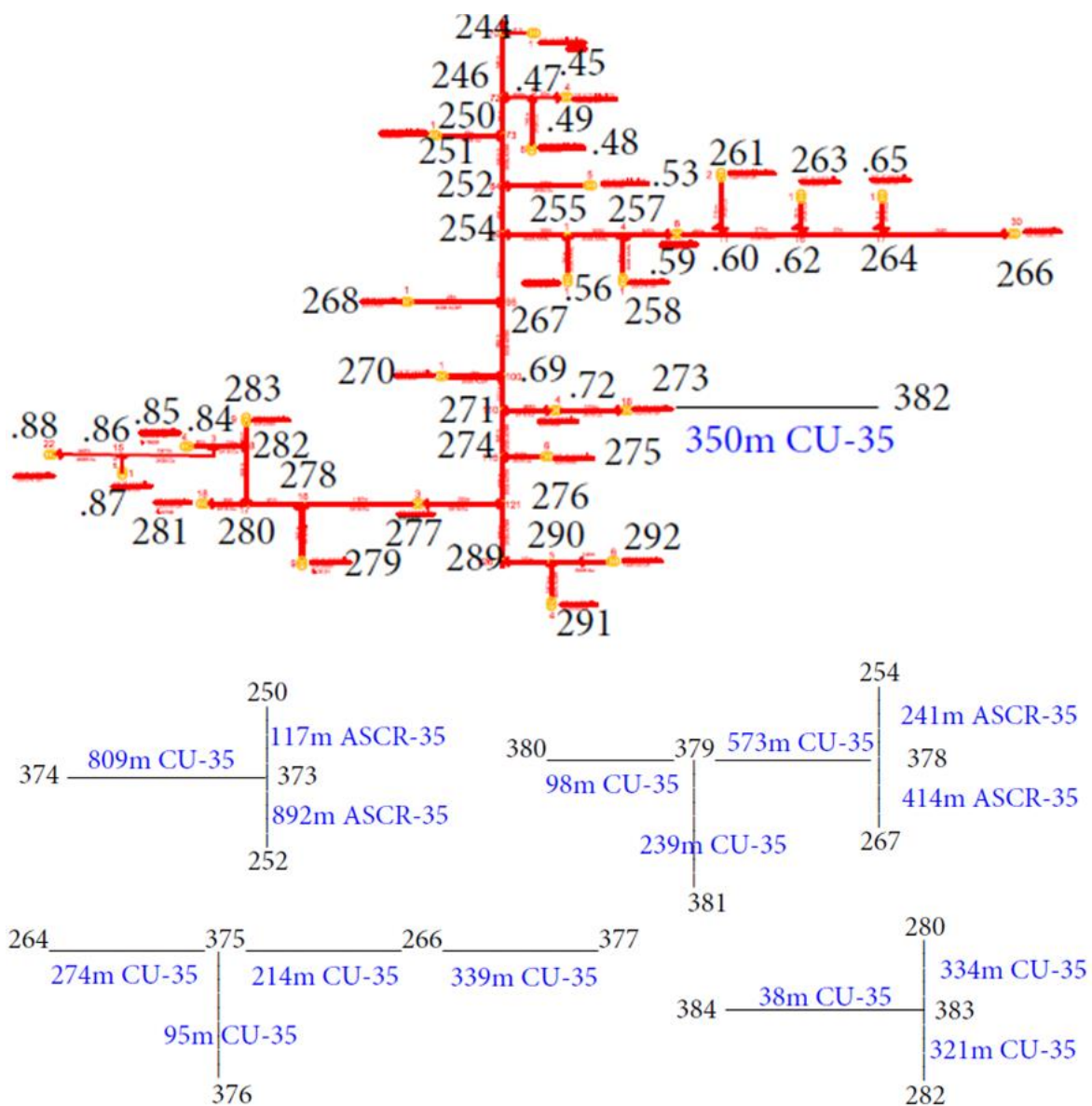
Σχήμα Π.ΣΤ.1. Γεωγραφική αναπαράσταση σε μονογραμμικό σχέδιο του ΣΗΕ Ρόδου.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μελέτη επί της R-26 Γενναδίου. Η διανομή αυτή εκτείνεται κυρίως στη νοτιοδυτική πλευρά του νησιού. Λεπτομερώς, το μονογραμμικό ισοδύναμό της δίνεται στα Σχήματα Π.ΣΤ.2-5.

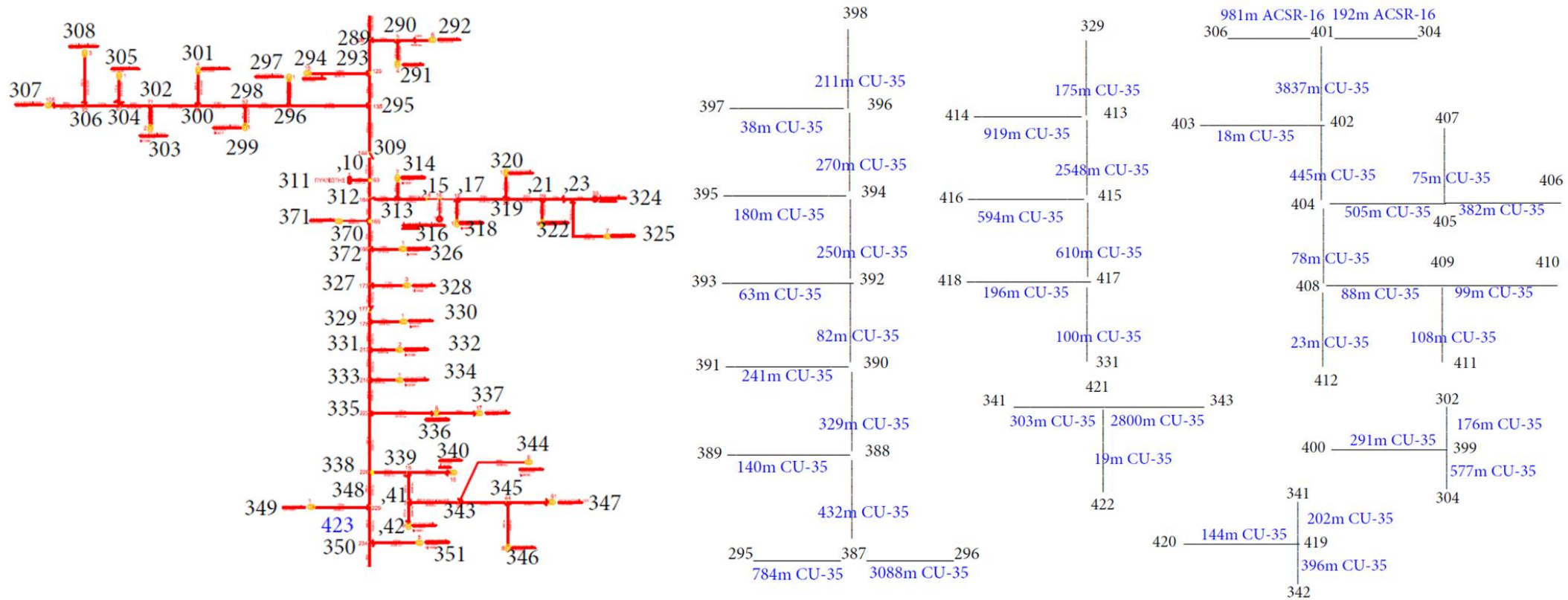


Σχήμα Π.ΣΤ.2. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Α΄.

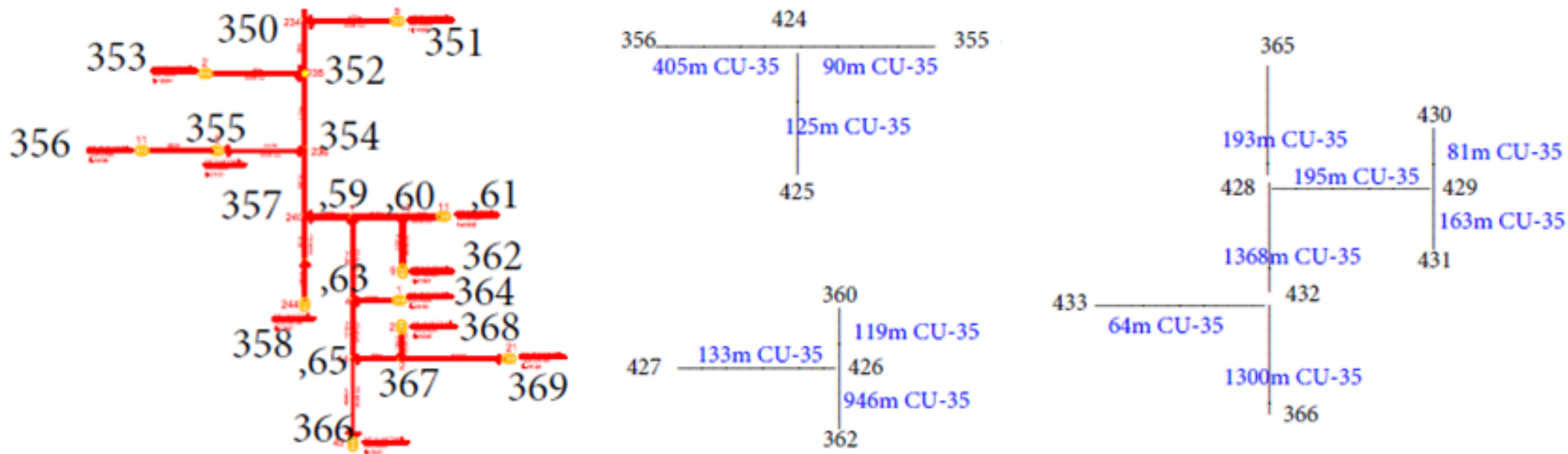




Σχήμα Π.ΣΤ.3. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Β'.



Σχήμα Π.ΣΤ.4. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Γ'.



Σχήμα Π.ΣΤ.5. Μονογραμμικό ισοδύναμο γραμμής διανομής R-26 Γενναδίου ΣΗΕ Ρόδου – Μέρος Δ'.

Τα χαρακτηριστικά των γραμμών της αναφερόμενης παροχής συνοψίζονται κατά τους τύπους τους στον Πίνακα Π.ΣΤ.1.

Πίνακας Π.ΣΤ.1. Τύπος γραμμών της παροχής R-26 Γενναδίου του ΣΗΕ Ρόδου και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Τύπος γραμμής	Ωμική αντίσταση (Ω/km)	Επαγωγική αντίδραση (Ω/km)	Θερμικό όριο (MVA)
ACSR-35	0.576	0.397	5.8
ACSR-16	1.268	0.422	3.5
CU-16	1.274	0.417	3.0
CU-35	0.596	0.393	4.8
CU-95	0.220	0.398	9.1
AAAC-35	1.071	0.393	4.2

Οι υποσταθμοί μέσης προς χαμηλή τάση κατά την αρίθμηση του ζυγού τους από τα ανωτέρω μονογραμμικά (Σχήματα Π.ΣΤ.2-5) και με την ονομαστική ισχύ του Μ/Σ τους δίνονται στον Πίνακα Π.ΣΤ.2.

Πίνακας Π.ΣΤ.2. Ζυγός και ονομαστικής ισχύς Μ/Σ ισχύος διανομής R-26 Γενναδίου του ΣΗΕ Ρόδου.

Ζυγός υποσταθμού	Ισχύς Μ/Σ (kVA)	Ζυγός υποσταθμού	Ισχύς Μ/Σ (kVA)	Ζυγός υποσταθμού	Ισχύς Μ/Σ (kVA)
204	160	261	100	320	50
207	50	263	100	322	50
211	100	265	100	324	734
212	100	266	100	325	50
213	250	268	50	328	100
216	50	270	50	330	50
218	100	272	50	332	50
220	160	273	100	334	50
222	160	275	50	336	100
224	250	277	50	337	50
226	100	279	50	342	50
227	250	281	100	344	160
229	100	283	50	346	50
231	50	285	100	347	100
233	100	288	100	349	50
235	50	291	160	351	50
237	100	292	100	353	50
239	100	294	50	355	50
241	100	297	25	356	160
243	50	299	50	358	160
245	50	301	50	364	50
248	50	303	100	366	50
249	100	305	25	368	50
251	50	307	50	369	160
253	50	308	50	371	50
256	100	314	50	389	100
258	100	316	400	411	100
259	100	318	50	418	100