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

ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ.

ΣΥΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<u>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ</u>
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΡΡΕΣ
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2022

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

ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ.

ΣΥΡΟΓΙΑΝΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ
ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

<u>ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ</u>
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΡΡΕΣ
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 12/7/2022.

Γ. Κορρές	Σ. Παπαθανασίου	Π. Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επ. Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Συρογιάννης Κωνσταντίνος Νεκτάριος
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η διαδικασία επαναφοράς ηλεκτροδότησης (Black-start) σε ένα μη διασυνδεδεμένο νησί (ΜΔΝ) με υψηλή διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Κύρια πρόκληση του Black-start σε ένα ΜΔΝ είναι ο περιορισμός του ρεύματος μαγνήτισης (inrush current) κατά τα την ενεργοποίηση του δικτύου. Η διαχείριση αυτής της πρόκλησης υλοποιήθηκε μέσω των ελέγχων του αντιστροφέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter – VSC), ο οποίος συνδέει ένα σύστημα μπαταριών (Battery Energy Storage System – BESS) στο δίκτυο. Το BESS στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο λειτουργεί, μέσω των ελέγχων του, σαν grid-forming μονάδα, δηλαδή έχει τη δυνατότητα διαμόρφωσης τάσης και συχνότητας. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε η απαραίτητη θεωρία για το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση του αλγόριθμου έλεγχου τάσης (Voltage Control) και έλεγχου ρεύματος (Current Control) του VSC ώστε να μειώνει το ρεύμα μαγνήτισης. Έπειτα, για την αντιμετώπιση του φαινομένου Cold Load Pickup (CLPU), αναπτύχθηκε αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού παραγωγής κατά τη διαδικασία Black-start σε ένα ΜΔΝ με το προγραμματιστικό εργαλείο Pyomo, βιβλιοθήκη της Python, σαν ένα MILP (Mixed Integer Linear Programming) μοντέλο και προσομοιώθηκαν τέσσερα σενάρια προκειμένου να παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου του Black-start.

Αρχικά, παρουσιάστηκαν γενικά στοιχεία για τις ΑΠΕ και για την διείσδυση τους στο παγκόσμιο μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολούθησε αναφορά στα Μικροδίκτυα (Microgrids) και στα ΜΔΝ (ειδικότερα στο ΜΔΝ της Αστυπάλαιας) με υψηλή διείσδυση Διεσπαρμένων Πηγών Ενέργειας (Distributed Energy Resources – DERs) και ΑΠΕ. Έπειτα, παρουσιάστηκε η διαδικασία και οι προκλήσεις του Black-start σε ΜΔΝ καθώς και η θεωρία για το ρεύμα μαγνήτισης.

Ακολούθησε αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας για σχεδιασμό και μοντελοποίηση του αλγόριθμου έλεγχου τάσης και του αλγόριθμου έλεγχου ρεύματος καθώς και για τον έλεγχο του VSC κατά τη διαδικασία του Black-start.

Στη συνέχεια, μοντελοποιήθηκε ένα μη διασυνδεδεμένο δίκτυο στο Simulink, όπου περιέχει BESS που ελέγχεται από συνδυαστικό έλεγχο τάσης – ρεύματος, μια ντηζελογεννήτρια και μετασχηματιστή. Μέσω των ελέγχων του αντιστροφέα προσομοιώθηκαν, όπως προαναφέρθηκε, τα τρία σενάρια επανεκκίνησης του δικτύου. Στο πρώτο σενάριο, η τάση εξόδου του BESS γίνεται απευθείας ίση με την ονομαστική τιμή της, στο δεύτερο σενάριο, η διαδικασία επιτυγχάνεται με μια ντηζελογεννήτρια, ενώ στο τρίτο σενάριο η τάση εξόδου του BESS αυξάνεται βαθμιαία μέχρι την ονομαστική του τιμή, πετυχαίνοντας την μείωση του ρεύματος μαγνήτισης.

Τέλος, αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας του Black-start σε ΜΔΝ όπου περιέχει BESS, ντηζελογεννήτριες, ΑΠΕ και τα φορτία, τα οποία μοντελοποιήθηκαν σύμφωνα με το φαινόμενο Cold Load Pickup (CLPU). Έπειτα, προσομοιώθηκαν, μέσω του Pyomo, τέσσερα σενάρια Black-start, βασισμένα στο ποσοστό φόρτισης (State of Charge - Soc) του BESS στην παραγωγή των ΑΠΕ και στο αν ενεργεί το BESS στο δίκτυο.

Λέξεις Κλειδιά

Αντιστροφέας Πηγής Τάσης, Επαναφορά Ηλεκτροδότησης, Black-start, Αλγόριθμος Ελέγχου Ρεύματος, Αλγόριθμος Ελέγχου Τάσης, Συνδυαστικός Έλεγχος, Μη Διασυνδεδεμένο Νησί (ΜΔΝ), Αστυπάλαια, Μικροδίκτυο, Ευστάθεια Μικροδικτύου, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Σύστημα μπαταριών, Ντηζελογεννήτρια, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Ρεύμα Μαγνήτισης, Grid-Forming, Cold Load Pickup, MILP, Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Abstract

In the present dissertation, the process of Black-start restoration was studied in a non-interconnected island (NII) with high integration of Renewable Energy Sources (RES). Main challenge of Black-start restoration in an NII is the limitation of the inrush current during the energization of the network. This challenge was managed through the controls of the Voltage Source Converter (VSC), which connects a Battery Energy Storage System (BESS) to the grid. The BESS in the non- interconnected network acts, through its controls, as a grid-forming unit, i.e. it has the capability of voltage and frequency modulation. In this context, the prerequisite theory was developed for the design and modeling of the Voltage Control and Current Control algorithm of the VSC to reduce the inrush current. Then, three scenarios were simulated in Matlab – Simulink to confirm the operation of the inverter controls and the monitoring of the inrush currents. Then, to contend with the Cold Load Pickup (CLPU), an algorithm was developed to optimize the generation scheduling during the Black-start process in an NII with the programming tool Pyomo, a Python library, as a MILP (Mixed Integer Linear Programming) model, and four scenarios were simulated in order to demonstrate the operation of the Black-start method.

Initially, general data on RES and their penetration into the global electricity production mix were presented. This was followed by a reference to Microgrids and NIIs (especially in the NII of Astypalaia) with high integration of Distributed Energy Resources (DERs) and RES. Then, the process and challenges of Black-start in NII as well as the theory of inrush current were presented.

This was followed by a detailed presentation of the theory for the design and modeling of the voltage control algorithm and the current control algorithm as well as for the control of the VSC during the Black-start process.

Then, a non-interconnected network was modeled in Simulink, containing a BESS controlled by a voltage-current combinatorial control, a diesel generator and a transformer. Via the controls of the VSC, as previously cited, three network restoration scenarios were simulated after closing a switch and entering the loads into the system. In the first scenario, the output voltage of the BESS is directly equal to its nominal value, in the second scenario, the process is achieved with a diesel generator, while in the third scenario the output voltage of the BESS is gradually increased up to its nominal value, achieving the reduction of inrush current.

Finally, the algorithm for the optimization of the Black-start process in a NII was developed, containing BESS, diesel generators, RES and the loads which were modeled according to the Cold Load Pickup (CLPU) phenomenon. Then, through Pyomo, four scenarios of the Black-start optimization problem were simulated, based on the State of charge (Soc) of the BESS, the production of RES and whether the BESS operates in the grid.

Key Words

Voltage Source Converter (VSC), Black-start Restoration, Current Control Algorithm, Voltage Control Algorithm, Combinatorial Control, Non Interconnected Island (NII), Astypalaia, Microgrid, Microgrid Stability, Renewable Energy Sources (RES), Battery Energy Storage System (BESS), Diesel Generator (DG), Distributed Energy Resources (DERs), Inrush Current, Grid-Forming, Cold Load Pickup, MILP, Optimization Algorithm

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κ. Γεώργιο Κορρέ καθώς και το κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πραγματικά ενδιαφέρον θέμα. Ευχαριστώ επίσης, τον εξαίρετο ερευνητή Δημήτρη Λαγό για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του καθ όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Με το κλείσιμο του βασικού κύκλου σπουδών μου, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, καθώς και στους φίλους μου που με στηρίζουν συνεχώς.

Στην οικογένεια μου, στη γιαγιά μου Ελένη και στον παππού μου Κωνσταντίνο, στους φίλους μου, σας ευχαριστώ για όλα.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Μικροδίκτυα

1.1 Εισαγωγή

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι ανεξάντλητες ενεργειακές πηγές που υπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον και προέρχονται από φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα, η γεωθερμία και η ενέργεια των κυμάτων.

1.2 Γενικά στοιχεία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

1.2.1 Γενικά για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας άρχισαν να αναπτύσσονται μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1974 [1], ενώ τις τελευταίες δεκαετίες αρχίζουν να εδραιώνονται όλο ένα και περισσότερο στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής των χωρών, σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτή η στροφή προς τις ΑΠΕ έχει να κάνει με την αυξανόμενη ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργεια, οι ΑΠΕ είναι <<φιλικές>> ως προς το περιβάλλον, με αποτέλεσμα η αυξανόμενη εδραίωση τους , να συμβάλλει στην παγκόσμια κινητοποίηση για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης.

Ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα συνεχίζουν να είναι μια από τις κύριες πηγές ενέργειας σε όλο τον κόσμο, αν και η εν λόγω πηγή είναι περιορισμένη. Αυτό, ήδη προκαλεί ανησυχίες και δημιουργεί την ανάγκη για αναδιαμόρφωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα.

Κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ [1]:

- Είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους, όπου σταδιακά εξαντλούνται.
- Είναι φιλικές ως προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας την δυνατότητα να καλύπτονται οι

ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, «ανακουφίζοντας» τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Μειονεκτήματα των ΑΠΕ [1]:

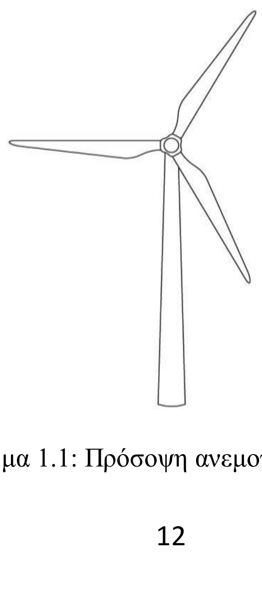
- Το κόστος επένδυσης σε ΑΠΕ ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις τιμές των συμβατικών καυσίμων.
- Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή τους απαιτούν την τήρηση εφεδρειών σε συμβατικές μονάδες παραγωγής.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητα τους οδηγεί συνήθως σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης τους.

1.2.2 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια παράγεται από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 1.1). Πολλές ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μαζί, σχηματίζουν τα αιολικά πάρκα όπου εκμεταλλεύονται μαζικά την αιολική ενέργεια, και διοχετεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

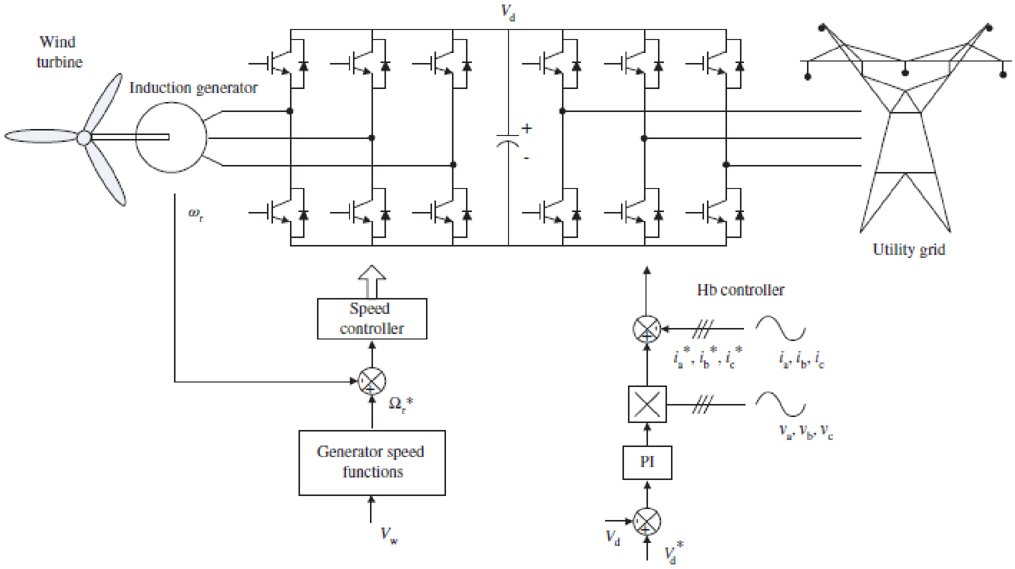
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αιολικής ενέργειας άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του 1980, φτάνοντας σήμερα να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής. Η Ελλάδα προσφέρεται στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας τόσο στα βουνά όσο και στα νησιά της. Σημαντικό πλεονέκτημα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, μέσω την Α/Γ, είναι ότι μπορεί να συμβεί και σε μη ευνοϊκές συνθήκες καιρού.

Προκειμένου να αξιοποιηθεί στα μέγιστα η αιολική ενέργεια, το υψόμετρο τοποθέτησης των Α/Γ (επιθυμητό υψόμετρο κοντά στα 30 μέτρα) παίζει καθοριστικό ρόλο. Σε εύρος τιμών του ανέμου της τάξης των 6 m/s μέχρι και 12m/s για μεγάλες Α/Γ, η απόδοση τους είναι ικανοποιητική, ενώ σε τιμές κάτω από 3.6 m/s [8] δεν είναι αποτελεσματική.



Σχήμα 1.1: Πρόσοψη ανεμογεννήτριας.

Για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, η ταχύτητα του στροβίλου μπορεί να μεταβληθεί έτσι ώστε να μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ισχύ (μέγιστη αεροδυναμική απόδοση) με έλεγχο σημείου παρακολούθησης μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking - MPPT). Το σχήμα 1.2 δείχνει ένα τυπικό σύστημα παραγωγής αιολικής ενέργειας μεταβλητής ταχύτητας, με ασύγχρονη γεννήτρια με μετατροπείς Pulse Width Modulation (PWM) .

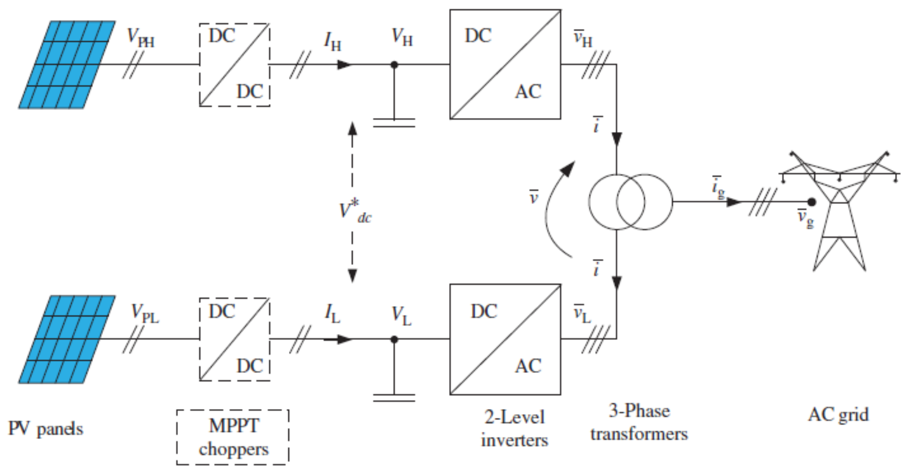


Σχήμα 1.2: Τυπικό σύστημα ανεμογεννήτριας με PWM μετατροπείς. [43]

1.2.3 Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από τον ήλιο, μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων χάρη στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Θεωρείται μια απο τις πιο, «φιλικές» προς το περιβάλλον, πηγές ενέργειας που ακόμα δεν έχει αξιοποιηθεί ανάλογα με τις τεράστιες δυνατότητες της.

Τα βασικά στοιχεία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης [10] πέρα από τα πάνελ, είναι ο αντιστροφέας (inverter), όπου μετατρέπει την συνεχή (DC) τάση εισόδου, από τα πάνελ, σε εναλλασσόμενη (AC) συμβατή για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το παραγόμενο DC στη συνέχεια μετατρέπεται σε AC και τροφοδοτείται στο δίκτυο ή χρησιμοποιείται σε απομονωμένο φορτίο. Σε ένα αυτόνομο σύστημα, υπάρχει συνήθως και σύστημα μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας. Το Σχήμα 1.3 δείχνει μια τυπική διαμόρφωση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. Η παραγόμενη τάση DC ενισχύεται από τον μετατροπέα DC–DC πριν από την μετατροπή σε AC από τον αντιστροφέα. Ο μετατροπέας DC–DC ελέγχει τη μέγιστη ισχύ εξόδου με έλεγχο MPPT.

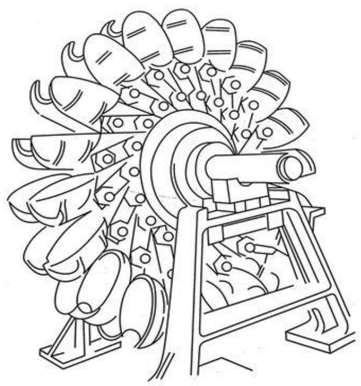


Σχήμα 1.3: Φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. [53]

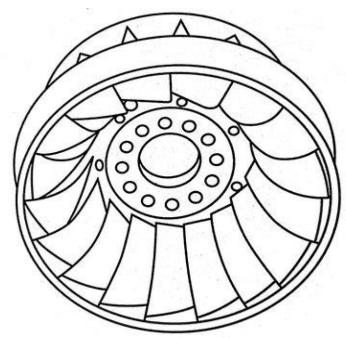
1.2.4 Υδραυλική Ενέργεια

Η υδραυλική ενέργεια είναι μια από τις παλαιότερες και μεγαλύτερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας και έχει ως κινητήρια δύναμη το νερό αξιοποιώντας τη ροή και την υψομετρική διαφορά σε μια υδατόπτωση. Η υδραυλική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των ηλεκτρογεννητριών και των στροβίλων. Οι δυο βασικοί τύποι υδροστροβίλων είναι οι δράσεως και αντιδράσεως. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι τύπου Pelton (Σχήμα 1.4) ενώ στη δεύτερη οι τύπου Francis (Σχήμα 1.5) [9]. Η εκμετάλλευση της υδραυλικής ενέργειας απαιτεί σημαντικές δαπάνες αλλά το κόστος του καυσίμου είναι μηδενικό και χρειάζεται λιγότερη συντήρηση από ένα θερμοηλεκτρικό εργοστάσιο [9].

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να συμμετέχουν αμέσως στην κάλυψη επιπλέον ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με τους θερμικούς , οι οποίοι απαιτούν κάποιο χρόνο. Έτσι, μπορούν να διαθέσουν ισχύ σε κάθε περίοδο και αποτελούν με οποιεσδήποτε συνθήκες την ασφαλή συμμετοχή του σταθμού στον προγραμματισμό παραγωγής του συστήματος [9].



Σχήμα 1.4: Υδροστρόβιλος τύπου Pelton. [9]

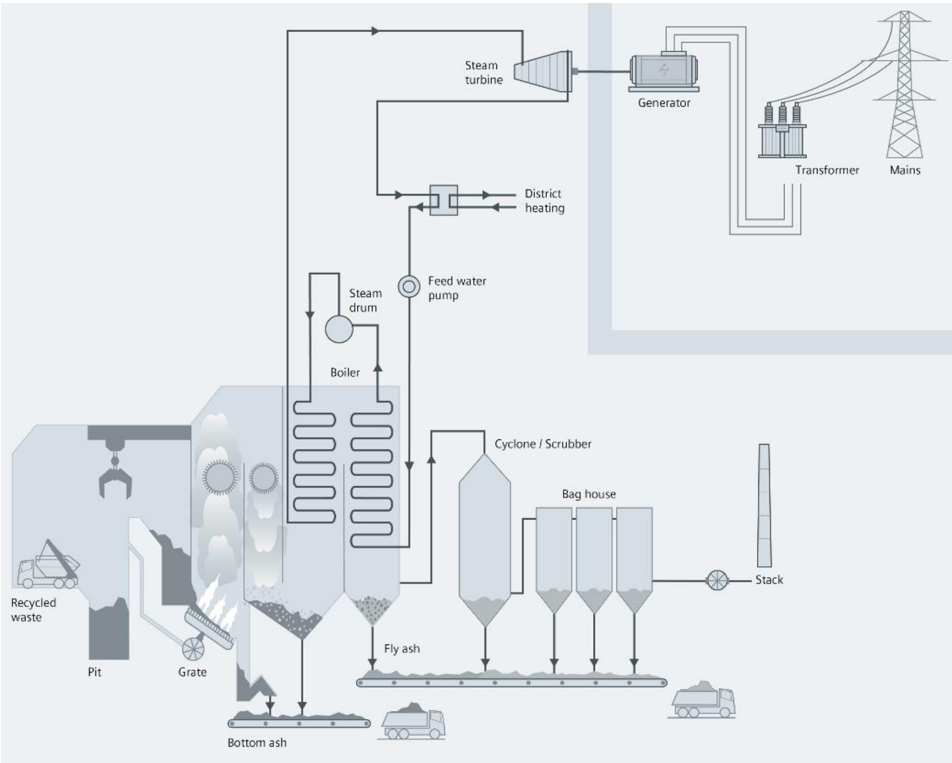


Σχήμα 1.5: Υδροστρόβιλος τύπου Francis. [9]

1.2.5 Βιομάζα

Βιομάζα είναι το βιοδιασπώμενο μέρος γεωργικών προϊόντων και υπολειμμάτων, της δασοκομίας και των δασών, όπως και των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Τα υγρά ή αέρια καύσιμα που παράγονται από βιομάζα και χρησιμοποιούνται για κάθε είδους μεταφορικό μέσο αποτελούν τα βιοκαύσιμα, ενώ αυτά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής (Σχήμα 1.6) ή θερμικής ενέργειας αποτελούν τα βιορευστά [3].

Η βιομάζα μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών είτε με απευθείας καύση της είτε με μετατροπή της σε στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα μέσω βιομηχανικών ή θερμοχημικών διεργασιών. Η ενέργεια, που περιέχεται στη φυτική και ζωική βιομάζα, αποδίδεται, έπειτα από επεξεργασία, ως καύσιμη ύλη. Με τον τρόπο αυτό, η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.



Σχήμα 1.6 : Διάγραμμα ηλεκτροπαραγωγής με χρήση βιομάζας. [32]

1.2.6 Γεωθερμία

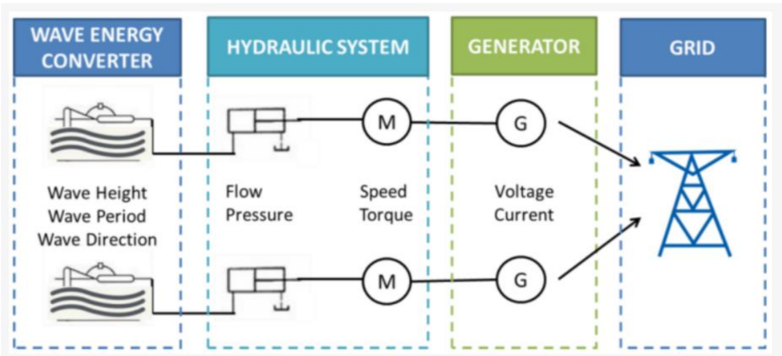
Γεωθερμία είναι η θερμική ενέργεια, όπου είναι αποθηκευμένη κάτω από την επιφάνεια της γης από 25 – 350 °C [4]. Καθώς πρόκειται για μια ανεξάντλητη και καθαρή πηγή ενέργειας, αξιοποιείται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε αγροτικές και βιομηχανικές εφαρμογές και θερμοκήπια.

Η γεωθερμία είναι οικονομική μορφή ενέργειας, όπου δεν απαιτεί μεγάλη έκταση γης και παρέχει συνεχής ενέργεια με μεγάλο συντελεστή απόδοσης. Μέσω αντλιών θερμότητας γίνεται η εκμετάλλευση της.

1.2.7 Κυματική Ενέργεια

Ένα μεγάλο μέρος της Γης, καλύπτεται απο νέρο. Αυτή η μεγάλη ποσότητα νερού, αποτελεί πηγή βιώσιμης ενέργειας. Η κυματική ενέργεια, ουσιαστικά προέρχεται απο την δυναμική ενέργεια των μοριών του νερού, εξαιτίας της κατακόρυφης ταλάντωσης τους και της κινητικής ενέργειας απο την περιστροφική κίνηση τους. Το πλεονέκτημα της κυματικής ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στην επιφάνεια της θάλασσας η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την αιολική ενέργεια που εμφανίζεται 20 μετρά υψηλοτέρα και 20-30 φορές μεγαλύτερη από την ηλιακή ενέργεια στην ιδία περιοχή [5]. Η διάφορα αυτή οφείλεται στο ότι η κυματική ενέργεια μεταφέρεται από το νερό, η πυκνότητα του οποίου είναι 800 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αέρα. Οι παγκόσμιοι πόροι κυματικής ενέργειας, σε ηλεκτρική ενέργεια, ανέρχονται σε 2 TW [5].



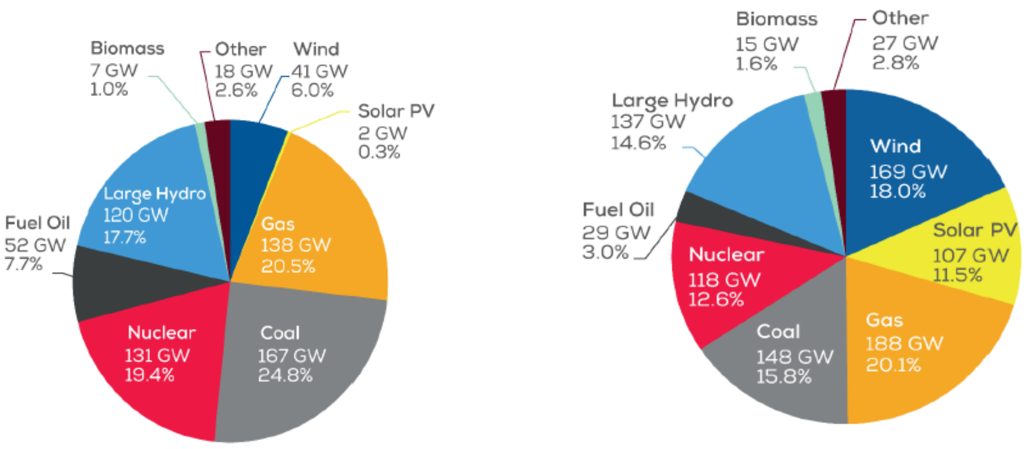
Σχήμα 1.7 : Σχηματικό διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση κυματικής ενέργειας.

[33]

1.3 Διείσδυση των ΑΠΕ στη διεθνή Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

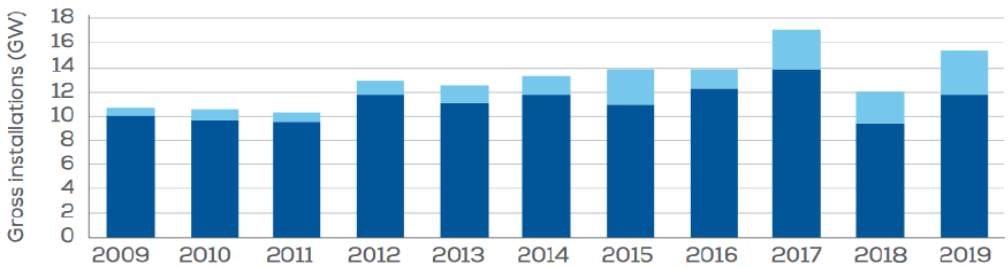
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ [1] αλλά και η σταδιακά αυξανόμενη ανάγκη για πιο «πράσινες» πολιτικές οδήγησαν στην συνεχή ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής των χωρών.

Αυτό αποτυπώθηκε με στατιστικά στοιχεία [6] (Σχήμα 1.8) αλλά και στην έντονη παρουσία έργων ΑΠΕ με πρωτοκαθεδρία των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες αυξήθηκε, παγκοσμίως, η παρουσία φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων τόσο σε βουνά και πεδιάδες (Onshore) όσο και σε θάλασσες (Offshore). Στην Ευρώπη, το μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απο ΑΠΕ προκύπτει απο την αιολική ενέργεια. Στο Σχήμα 1.9, αποτυπώνεται η εγκατάσταση επιπλέον ισχύος από Α/Γ στην Ευρώπη ανά έτος από το 2009 εώς και το 2019.



2005 2017

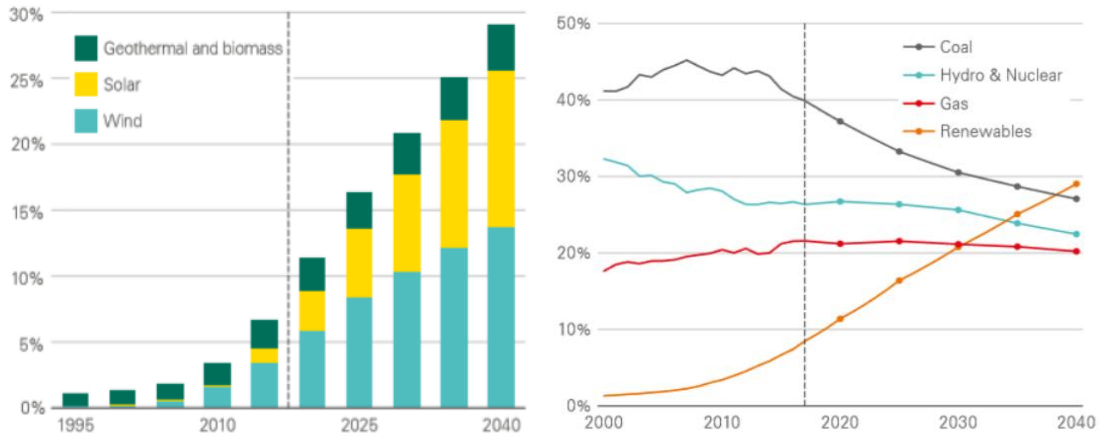
Σχήμα 1.8 : Σύνθεση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ. [6]



	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Offshore	0.6	0.9	0.8	1.2	1.5	1.5	3.0	1.6	3.2	2.7	3.6
Onshore	10.0	9.6	9.5	11.7	11.0	11.7	10.9	12.3	13.9	9.4	11.7
Total	**10.7**	**10.5**	**10.3**	**12.9**	**12.5**	**13.3**	**13.9**	**13.8**	**17.1**	**12.1**	**15.4**

Σχήμα 1.9: Εγκατάσταση επιπλέον ισχύος απο Α/Γ στην Ευρώπη ανά έτος. [6]

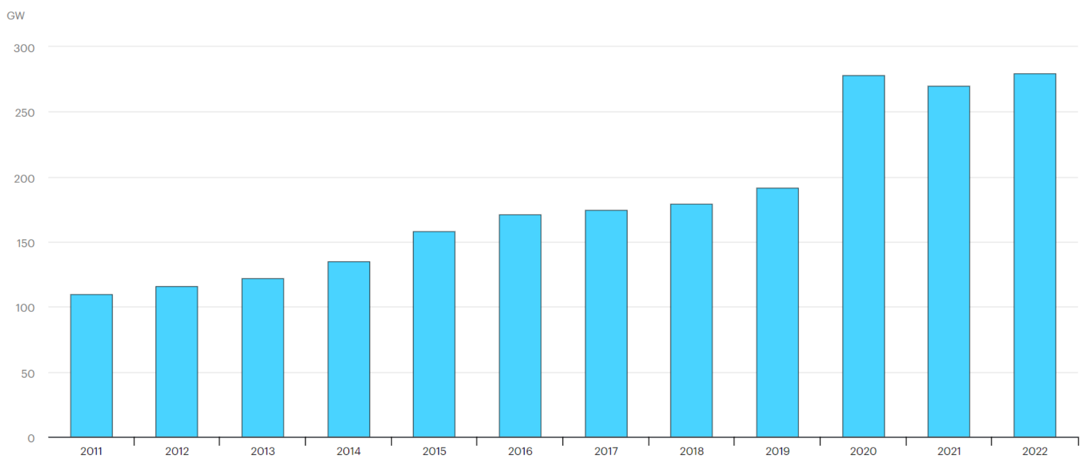
Στο ίδιο πλαίσιο που κινείται η Ευρώπη στην ανάπτυξη των ΑΠΕ, συναντάται παγκόσμια αύξηση στην παραγωγή ενέργειας απο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Σχήμα 1.10 α) και ταυτόχρονη μείωση της εξάρτησης απο συμβατικά καύσιμα (Σχήμα 1.10 β).



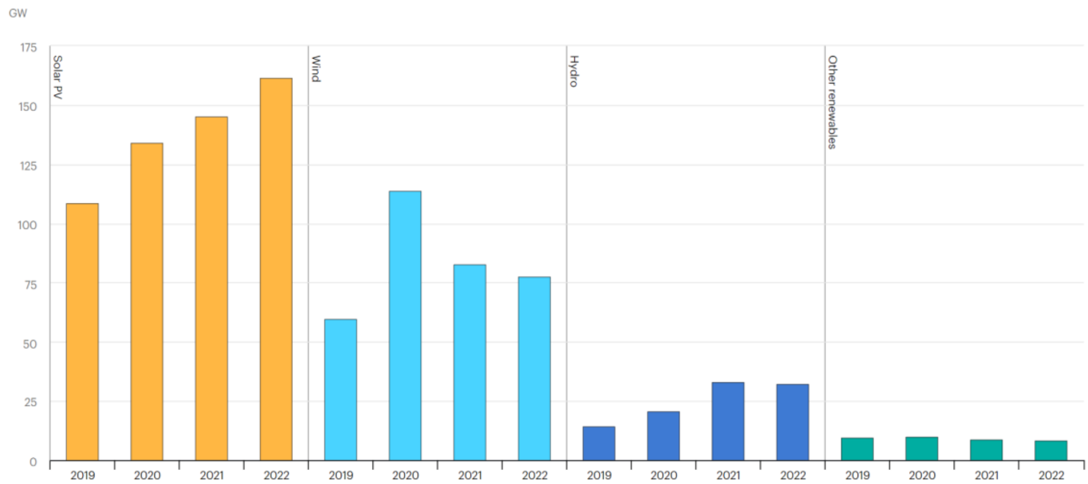
(α) (β)

Σχήμα 1.10: (α) Παγκόσμια αύξηση της παραγωγής ενέργειας απο ΑΠΕ (εκτός της υδροηλεκτρικής ενέργειας) και μελλοντικές εκτιμήσεις. [7] (β) Παγκόσμια διείσδυση ΑΠΕ ΑΠΕ (εκτός της υδροηλεκτρικής ενέργειας) στο συνολικό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής και μελλοντικές εκτιμήσεις. [7]

Η συνεχής αύξηση των επενδύσεων σε έργα ΑΠΕ παγκοσμίως, απεικονίζεται συνολικά στο Σχήμα 1.11, όπου παρουσιάζεται η εγκατάσταση επιπλέον ισχύος ανά έτος, από το 2011 εώς και το 2022, ενώ στο Σχήμα 1.12, απεικονίζεται η εγκατάσταση επιπλέον ισχύος ΑΠΕ, ανά κατηγορία των επιμέρους τεχνολογιών. Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι το 2022, η εγκατάσταση επιπλέον ισχύος από ΑΠΕ, θα προσεγγίσει τα 280 GW.

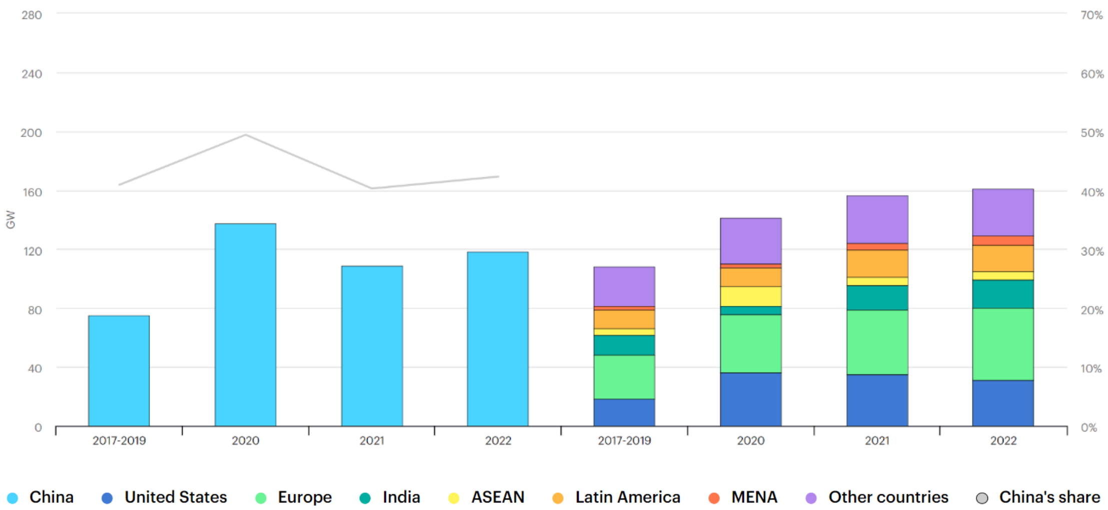


Σχήμα 1.11 : Εγκατάσταση επιπλέον ισχύος ΑΠΕ, παγκοσμίως, από το 2011 εώς και το 2022. [36]



Σχήμα 1.12: Εγκατάσταση επιπλέον ισχύος, ανά κατηγορία ΑΠΕ, από το 2019-2022. [36]

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα στοιχεία των επενδύσεων σε έργα ΑΠΕ στην Κίνα. Η Κίνα αντιπροσώπευε το 40% της παγκόσμιας αύξησης της ισχύος ΑΠΕ εδώ και αρκετά χρόνια, για πρώτη φορά το 2020 ήταν <<υπεύθυνη>> για το 50% - επίπεδο ρεκόρ που προέκυψε από την πρωτοφανή αύξηση νέων εγκαταστάσεων ΑΠΕ. Οι αναμενόμενες ετήσιες προσθήκες επιπλέον ισχύος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Κίνας (+ 45% το 2021 και + 58% το 2022) παραμένουν σημαντικά υψηλότερες από τον μέσο όρο της περιόδου 2017-2019. Στο Σχήμα 1.13 απεικονίζονται οι νέες εγκαταστάσεις ισχύος ΑΠΕ στην Κίνα από το 2017 εώς το 2022 συγκριτικά με τις υπόλοιπες που υλοποιήθηκαν παγκοσμίως.



Σχήμα 1.13 : Νέες εγκαταστάσεις ισχύος ΑΠΕ στην Κίνα, από το 2017 εώς το 2022, συγκριτικά με τις υπόλοιπες που υλοποιήθηκαν παγκοσμίως. [36]

1.4 Επίδραση της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ στο Σ.Η.Ε

Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας έχει υποστεί σημαντικές αλλαγές τις τελευταίες δεκαετίες, όπως την ανάπτυξη ΑΠΕ, την τεχνολογία ημιαγωγών, νέα αρχιτεκτονική δικτύου και μεθόδους ελέγχου.

Στα σύγχρονα δίκτυα με υψηλή Διεσπαρμένη Παραγωγή (ΔΠ), που περιλαμβάνουν μικροδίκτυα και εικονικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βασικός ρόλος δίνεται στις ΑΠΕ. Επομένως, παραδοσιακές προσεγγίσεις στη μελέτη ευστάθειας δεν συσχετίζονται. Ο στοχαστικός χαρακτήρας των ΑΠΕ οδηγεί στην ανάγκη χρήσης μιας νέας αρχιτεκτονικής δικτύου και ενσωμάτωση συστημάτων μπαταριών (BESS). Στο παρελθόν, σε πολλές χώρες στην αρχή της ανάπτυξης των ΑΠΕ, υπήρχαν οδηγίες για περιορισμό της ισχύος στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος της τάξης του 20%. Πρώτα από όλα, αυτό προκλήθηκε εξαιτίας προβλημάτων στη διατήρηση των επιπέδων συχνότητας και τάσης.

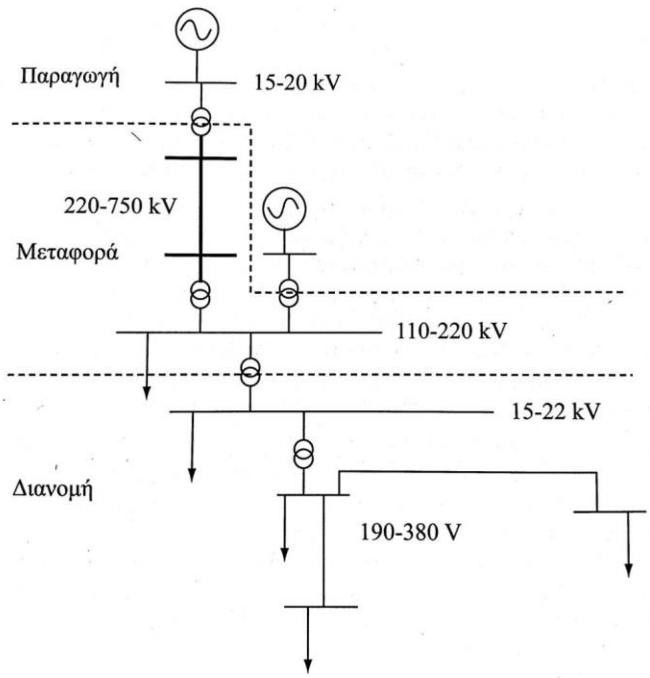
Ωστόσο, σήμερα υπάρχουν συστήματα όπου η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φτάνει το 100%, κι έτσι η λειτουργία τους διαφέρει από τα παραδοσιακά δίκτυα. Εκτός από τις σύγχρονες γεννήτριες, τα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν ασύγχρονες, επαγωγικές, διπλής τροφοδότησης (για ανεμογεννήτρια), πηγές συνεχούς ρεύματος (για φωτοβολταϊκά συστήματα), και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ημιαγωγών. Έτσι, οι ελεγκτές των ηλεκτρονικών ισχύος αναλαμβάνουν τη διατήρηση των παραμέτρων λειτουργίας του συστήματος. Η ευστάθεια εξαρτάται από τους αλγόριθμους που αποτελούν τη βάση της λειτουργίας τους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή μιας στρατηγικής διαχείρισης μικροδικτύων.

Την τελευταία δεκαετία περίπου, η κυρίαρχη τάση ήταν η απόσυρση των συμβατικών εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η βαθμιαία ανάπτυξη των ΑΠΕ. Ωστόσο, η αντικατάσταση των συμβατικών μονάδων, όπου η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω σύγχρονων γεννητριών, έχει ως συνέπεια την απώλεια της στρεφόμενης εφεδρείας και της μηχανικής αδράνειας με αποτέλεσμα η συχνότητα του δικτύου να είναι πιο ευμετάβλητη σε διαταραχές. Οι ατμοστρόβιλοι και οι αεριοστρόβιλοι των σταθμών παραγωγής ενέργειας και οι εγκαταστάσεις φυσικού αερίου διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο όσον αφορά την ευστάθεια του δικτύου, στην αδράνεια και την παροχή άεργου ισχύος (VAR - Voltage Ampere Reactive).

Οι ΑΠΕ συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος και όχι απευθείας όπως οι γεννήτριες των μεγάλων συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το γεγονός ότι οι σύγχρονοι μετατροπείς ημιαγωγών δεν έχουν περιστρεφόμενα μέρη, που σημαίνει ότι δεν έχουν αδράνεια, καθιστά αναγκαία την παροχή επικουρικών υπηρεσιών από αυτές τις μονάδες για την ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης.

1.5 Εισαγωγή στα μικροδίκτυα

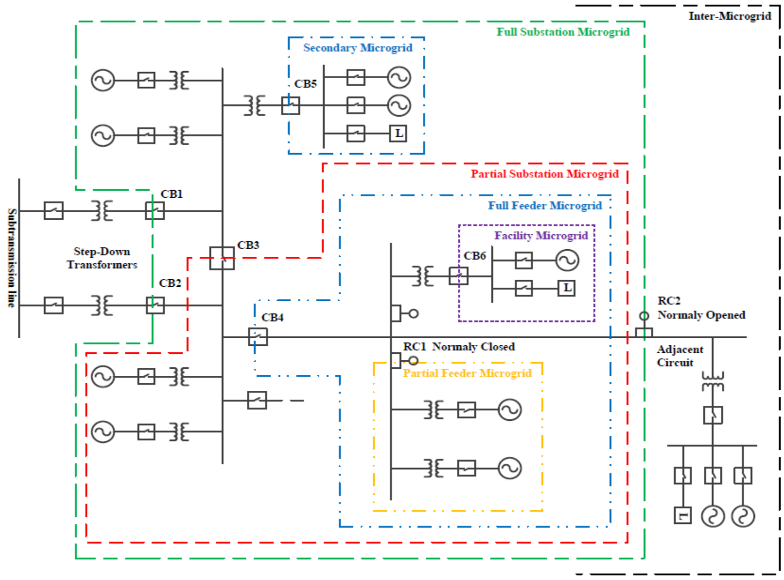
Τα Σ.Η.Ε ορίζονται ως το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές κατανάλωσης [11]. Η καλή λειτουργία του Σ.Η.Ε έγκειται στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρξη ανάγκη ηλεκτροδότησης, με το ελάχιστο δυνατό κόστος και ταυτόχρονα τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις. Βασικοί πυλώνες στην εύρυθμη λειτουργία του Σ.Η.Ε είναι η εξασφάλιση σταθερής συχνότητας, σταθερής τάσης και υψηλή αξιοπιστία στην παροχή της ηλεκτρικής ενέργεια. Το Σ.Η.Ε (Σχήμα 1.14) απαρτίζεται απο τρεις δομές, την παραγωγή ενέργειας απο τους σταθμούς παραγωγής, την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας απο τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης μέσω γραμμών υπερυψηλής και υψηλής τάσης. Τέλος, απο την διανομή μέσης τάσης, όπου διανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές μέσω υποσταθμών διανομής και γραμμών χαμηλής τάσης 380/230 V [11].



Σχήμα 1.14: Δομή Σ.Η.Ε [11]

Το μικροδίκτυο (Σχήμα 1.15) ορίζεται [14] ως μια ομάδα διασυνδεδεμένων φορτίων και διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων (DER) με καθορισμένα ηλεκτρικά όρια που ενεργεί ως μια ενιαία ελεγχόμενη οντότητα σε σχέση με το δίκτυο. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να λειτουργήσει είτε συνδεδεμένο στο δίκτυο είτε νησιδοποιημένο, πραγματοποιώντας σύνδεση ή αποσύνδεση από το κύριο δίκτυο.

Υπάρχουν κάποια απομακρυσμένα μικροδίκτυα που είναι μόνιμα απομονωμένα από το κύριο δίκτυο. Αυτά τα μικροδίκτυα μπορούν να βρεθούν σε απομακρυσμένες εγκαταστάσεις όπως Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ), απομακρυσμένες στρατιωτικές βάσεις και απομακρυσμένες αγροτικές κοινότητες.



Σχήμα 1.15: Προσδιορισμός διαφορετικών μικροδικτύων βάσει του προτύπου IEEE 1547.4 2011. [15]

Το κύριο πλεονέκτημα των μικροδικτύων σχετίζεται με την αύξηση της αξιοπιστίας, καθώς είναι ικανά να ηλεκτροδοτούν τμήματα του ΣΗΕ αυτόνομα όταν διαταραχές/βλάβες δεν επιτρέπουν την σύνδεση τους με το υπόλοιπο δίκτυο. Εάν συμβεί κάποιο σφάλμα στο σύστημα διανομής, τα μικροδίκτυα θα πρέπει να μπορούν να περάσουν από συνδεδεμένα στο δίκτυο στην απομονωμένη λειτουργία ή να εκτελούν διαδικασία επαναφοράς (Black-start), που θα μελετήσουμε και παρακάτω, εάν η μετάβαση αποτύχει.

Τα οφέλη που παρέχονται από τα μικροδίκτυα είναι [15] :

- Βελτίωση της αξιοπιστίας παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια σε ένα τμήμα του κύριου δικτύου κατά τη διάρκεια μιας διακοπής ρεύματος.
- Υποβοήθηση του συστήματος διανομής απο προβλήματα υπερφόρτωσης επιτρέποντας σε ένα τμήμα του κύριου δικτύου να νησιδοποιηθεί σκόπιμα.
- Συμβάλλει στην αντιμετώπιση προβλημάτων ποιότητας ισχύος (παραμόρφωση τάσης, πτώση τάσης, flicker, κ.λπ.) με αποσύνδεση του από το κύριο δίκτυο.
- Επιτρέπει σε πελάτες, που σκόπιμα αποφασίζουν να νησιδοποιηθούν, να τους παρέχεται ισχύς όταν έχει προγραμματιστεί συντήρηση για το κύριο δίκτυο.

Τα μικροδίκτυα υπάρχουν σε διάφορα μεγέθη και διαμορφώσεις. Μπορεί να είναι μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα με διάφορους πόρους παραγωγής και μονάδες αποθήκευσης που εξυπηρετούν πολλαπλά φορτία ή μικρά και απλά συστήματα που παρέχουν ισχύς σε έναν μόνο πελάτη. Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο μικροδίκτυα συνδέονται σε ένα μεγάλο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στο Σημείο Σύνδεσης Δικτύου (Point of Interconnection - POI) ή στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (Point of Common Coupling - PCC) και θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα απρόσκοπτης μετάβασης σε απομονωμένο τρόπο λειτουργίας.

Και στους δύο τρόπους λειτουργίας συνδεδεμένου στο δίκτυο και σε απομονωμένο τρόπο λειτουργίας, τα μικροδίκτυα θα πρέπει να διατηρούν ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης ισχύος. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, όλα τα ελεγχόμενα DER και τα φορτία θα πρέπει να συμμετέχουν ενεργά στη διατήρηση της τάσης και της συχνότητας του συστήματος σταθερά και εντός αποδεκτών ορίων.

Τα μικροδίκτυα έχουν κερδίσει έντονο ενδιαφέρον τις τελευταίες δύο δεκαετίες, λόγω των παγκόσμιων περιβαλλοντικών ζητημάτων και της ανάγκης για πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια απομακρυσμένων κοινοτήτων. Συγκεκριμένα, τα μικροδίκτυα θεωρούνται κρίσιμος κρίκος στην εξέλιξη των κάθετα ολοκληρωμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας σε έξυπνα αποκεντρωμένα δίκτυα [16]. Οντότητες, όπως κυβερνητικές υπηρεσίες, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και πανεπιστήμια σε όλο τον κόσμο αξιοποιούν τα μικροδίκτυα και ένας αυξανόμενος αριθμός μικροδικτύων αναμένεται να αναπτυχθεί την επόμενη δεκαετία.

1.6 Ευστάθεια στα μικροδίκτυα

1.6.1 Εισαγωγή στην ευστάθεια των μικροδικτύων

Το μικροδίκτυο που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο, η τάση και η συχνότητα επιβάλλονται κυρίως από το κύριο δίκτυο, περιορίζοντας τον ρόλο του μικροδικτύου στην εκτέλεση βοηθητικών υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, το πρόβλημα της ευστάθειας σε μικροδίκτυα που συνδέονται με το δίκτυο περιορίζεται στην ευστάθεια μεμονωμένων στοιχείων όπως ένα DER ή ενός συνόλου τοπικών φορτίων.

Τα απομονωμένα μικροδίκτυα αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα έξυπνα δίκτυα διανομής [16] . Σε αυτήν την περίπτωση, η τάση και η συχνότητα του συστήματος δεν υποστηρίζονται πλέον από το κύριο δίκτυο και διαφορετικά DERs πρέπει να διατηρούν αυτές τις μεταβλητές σε αποδεκτές περιοχές. Λόγω των εγγενών χαρακτηριστικών του μικροδικτύου η λειτουργία τους σε αυτόνομη λειτουργία είναι πιο απαιτητική από τα συμβατικά συστήματα, αντιμετωπίζοντας ιδιαίτερα προβλήματα ευστάθειας και επάρκειας συστήματος. Αυτές οι διαφορές θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για να διασφαλίζεται ένας αποτελεσματικός και επαρκής έλεγχος των μεταβλητών του συστήματος.

Δεδομένου ότι η ισορροπία ζήτησης και προσφοράς είναι κρίσιμης σημασίας στα μικροδίκτυα, η αβέβαιη φύση των ΑΠΕ, όπως οι ανεμογεννήτριες και οι φωτοβολταϊκές μονάδες, είναι ιδιαίτερα σημαντική σε αυτά τα συστήματα, ειδικά σε απομονωμένη/νησιδοποιημένη λειτουργία [17]. Οι αμφίδρομες ροές ισχύος μεταξύ των γεννητριών και των πελατών που καταναλώνουν αλλά και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια (prosumers) είναι επίσης ένα ζήτημα [18], λόγω των επιπλοκών στον συντονισμό του ελέγχου και της προστασίας. Δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από DERs τα οποία συνδέονται με ηλεκτρονικά ισχύος, και απο σχετικά μικρές σύγχρονες μηχανές, η αδράνεια του συστήματος είναι σημαντικά χαμηλότερη στα μικροδίκτυα σε σύγκριση με τα συμβατικά Σ.Η.Ε.

Η φύση του προβλήματος ευστάθειας ενός μικροδικτύου διαφέρει σημαντικά από εκείνη ενός συμβατικού Σ.Η.Ε, καθώς το μέγεθος των μικροδικτύων είναι μικρότερο από τα συμβατικά μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι γραμμές που μεταφέρουν ισχύ από έναν υποσταθμό διανομής στους μετασχηματιστές διανομής (feeders) είναι σχετικά μικρές και λειτουργούν σε επίπεδα μέσης τάσης, σχηματίζοντας χαμηλότερο λόγο αντίδρασης προς αντίστασης σε σύγκριση με τα συμβατικά Σ.Η.Ε. Ως αποτέλεσμα, η δυναμική απόδοση των μικροδικτύων και οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των τάσεων, των γωνιών και των ροών ενεργού και αέργου ισχύος είναι διαφορετικές από ό,τι στα συμβατικά δίκτυα.

Ένα μικροδίκτυο είναι ευσταθές εάν, αφού υποβληθεί σε μια διαταραχή, όλες οι μεταβλητές κατάστασης επανέλθουν σε (πιθανώς νέες) τιμές που ικανοποιούν λειτουργικούς περιορισμούς και χωρίς απώλειες φορτίου.Στα παραδοσιακά συστήματα, λόγω του υψηλού αριθμού φορτίων και της μεγάλης κλίμακας τους, η σκόπιμη απενεργοποίηση των φορτίων είναι αποδεκτή για να διατηρηθεί η συνέχεια της λειτουργίας τους. Τα μικροδίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να εξυπηρετούν έναν σχετικά μικρό αριθμό φορτίων, επιτρέποντας να δοθεί προτεραιότητα στη συνδεσιμότητα ορισμένων feeders (π.χ. ενός που τροφοδοτεί ένα νοσοκομείο, έναντι του υπόλοιπου συστήματος). Αν τέτοιοι κρίσιμοι feeders απενεργοποιούνται, το μικροδίκτυο δεν επιτυγχάνει πλέον τον πρωταρχικό του στόχο. Έτσι, η σκόπιμη απενεργοποίηση φορτίων για να διατηρηθεί η λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος κατά τη διάρκεια ή μετά από μια διαταραχή, εκτός από τις συγκεκριμένες περιπτώσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθιστά το σύστημα ασταθές.

Η ευστάθεια στα μικροδίκτυα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με τη φυσική αιτία μιας αστάθειας, το σχετικό μέγεθος της διαταραχής, τα φυσικά στοιχεία που εμπλέκονται στη διαδικασία, το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εμφανίζεται η αστάθεια και η μεθοδολογία για την ανάλυση ή την πρόβλεψη της αστάθειας [19]. Λόγω των χαμηλών αναλογιών X/R των γραμμών τροφοδοσίας μικροδικτύων, οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος δεν μπορούν να διαχωριστούν, και ως εκ τούτου η τάση και η συχνότητα συνδέονται έντονα στα μικροδίκτυα.

1.6.2 Ευστάθεια συχνότητας

Η ρύθμιση της συχνότητας αποτελεί σημαντική ανησυχία σε απομονωμένα μικροδίκτυα, λόγω των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν στο 1.6.1, συμπεριλαμβανομένης της χαμηλής αδράνειας του συστήματος και της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ. Επιπλέον, ο μικρός αριθμός μονάδων παραγωγής σε μικροδίκτυα θέτει το σύστημα σε κίνδυνο μεγάλων διαταραχών σε περίπτωση διακοπών της γεννήτριας. Επομένως, για τέτοιες διαταραχές, η συχνότητα του συστήματος μπορεί να παρουσιάσει μεγάλες διακυμάνσεις θέτοντας σε κίνδυνο την ευστάθεια της συχνότητας του συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, συμβατικές τεχνικές και τεχνολογίες ελέγχου συχνότητας μπορεί να μην είναι αρκετά γρήγορες για να ξεπεράσουν την ταχεία αλλαγή της συχνότητας του συστήματος, ακόμη και με την παρουσία επαρκούς εφεδρείας.

Γενικά, στα μικροδίκτυα, υπάρχει μια ισχυρή σύζευξη μεταξύ τάσης και συχνότητας στο σύστημα, γεγονός που περιπλέκει περαιτέρω τη ρύθμιση της συχνότητας.

Πρώτον, λόγω των υψηλών αναλογιών R/X των feeders των μικροδικτύων, ο συμβατικός διαχωρισμός της ροής ενεργού ισχύος και τάσης δεν ισχύει πλέον [20]. Δεύτερον, λόγω της σχετικά μικρής κλίμακας των μικροδικτύων, οι αλλαγές τάσης στους ακροδέκτες των DER αντανακλώνται σχεδόν ακαριαία στην πλευρά του φορτίου, κάτι που με τη σειρά του αλλάζει τη ζήτηση του συστήματος ανάλογα με τους δείκτες ευαισθησίας τάσης φορτίου. Επομένως, αυτή η σύζευξη τάσης-συχνότητας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση ευστάθειας και στον έλεγχο της συχνότητας στα μικροδίκτυα.

Η αστάθεια συχνότητας μπορεί να προκληθεί για διάφορους λόγους και εκδηλώνεται με διάφορους τρόπους στα μικροδίκτυα. Για παράδειγμα, μια μεγάλη αύξηση του φορτίου που συνοδεύεται από ανεπαρκή απόκριση του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε γρήγορη μείωση της συχνότητας, λόγω χαμηλής αδράνειας του συστήματος, οδηγώντας σε blackout. Ο κακός συντονισμός πολλαπλών ελεγκτών συχνότητας και η κατανομή ισχύος μεταξύ των DER μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας μικρών διαταραχών με αποτέλεσμα να προκύψουν μεγάλες ταλαντώσεις συχνότητας χωρίς απόσβεση σε διάστημα λίγων δευτερολέπτων έως λίγων λεπτών, ένα φαινόμενο που σπάνια παρατηρείται σε μεγάλα δίκτυα [21].

Η ανεπαρκής εφεδρεία παραγωγής μπορεί επίσης να οδηγήσει στο να βρίσκεται η συχνότητα σταθερής κατάστασης εκτός αποδεκτών περιοχών λειτουργίας, ενεργοποιώντας ρελέ απενεργοποίησης φορτίου υπό συχνότητα, όπως στα μεγάλα δίκτυα.

1.6.3 Ευστάθεια τάσης

Στα συμβατικά Σ.Η.Ε, μια κύρια αιτία της αστάθειας τάσης είναι οι μεγάλες γραμμές μεταφοράς, οι οποίες περιορίζουν τη μεταφορά ισχύος μεταξύ παραγωγής και φορτίων. Ωστόσο, στα μικροδίκτυα, οι feeders είναι σχετικά μικροί, με αποτέλεσμα να προκύπτουν σχετικά μικρές πτώσεις τάσης μεταξύ του άκρου αποστολής και λήψης των feeders. Έτσι, στα μικροδίκτυα, η κατάρρευση τάσης, δηλαδή η αργή παρατεταμένη μείωση της τάσης που σχετίζεται με τη διαδικασία ανάκτησης φορτίου δεν έχει παρατηρηθεί. Ωστόσο, με τα τρέχοντα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να εξελίσσονται σε μικροδίκτυα, οι πτώσεις τάσης μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα, ιδίως για ασθενέστερα δίκτυα.

Στα μικροδίκτυα, τα όρια των DER και η κακή κατανομή άεργου ισχύος μεταξύ τους στο σύστημα είναι κρίσιμοι παράγοντες για την αστάθεια τάσης. Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η άεργος ισχύς διαχειρίζεται κυρίως τοπικά, με ρύθμιση της τάσης στους ακροδέκτες των γεννητριών. Ωστόσο, στα μικροδίκτυα, οι feeders είναι μικροί, και έτσι οποιεσδήποτε αλλαγές στις τάσεις των ακροδεκτών των DER αντικατοπτρίζονται σχεδόν αμέσως στο υπόλοιπο σύστημα. Ως εκ τούτου, μικρές διαφορές στη τάση στα DER, εάν δεν συντονιστούν σωστά, θα διοχετεύσουν υψηλές ροές άεργου ισχύος, οδηγώντας σε μεγάλες ταλαντώσεις τάσης.

Η σωστή κατανομή άεργου ισχύος μεταξύ πολλαπλών DER σε ένα μικροδίκτυο γίνεται μέσω της καμπύλης στατισμού (droop) τάσης-αεργού ισχύος, παρόμοια με πολλαπλές εγκαταστάσεις παραγωγής σε μεγάλα Σ.Η.Ε.

Όπως στην περίπτωση του droop ενεργού ισχύος-συχνότητας, σύμφωνα με το παράδειγμα του droop άεργου ισχύος-τάσης, το μέγεθος αναφοράς της τάσης εξόδου ενός DER μειώνεται γραμμικά καθώς αυξάνεται η έγχυση άεργου ισχύος. Έτσι, η ιδέα είναι ότι τα DER με droop τάσης-άεργου ισχύος έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στην παροχή άεργου ισχύος στο σύστημα.

Αυτός ο μηχανισμός αποτυγχάνει να επιτύχει την επιθυμητή κατανομή άεργου ισχύος, για τρεις κύριους λόγους [16]. Πρώτον, σε αντίθεση με τη συχνότητα, το μέγεθος της τάσης ποικίλλει σε όλο το σύστημα, και επομένως δεν είναι ένα αποτελεσματικό σήμα ανάδρασης για τοπικούς DER με σκοπό την κατανομή άεργου ισχύος. Δεύτερον, η έννοια της πτώσης τάσης έχει αναπτυχθεί με βάση την προϋπόθεση ότι οι γραμμές είναι επαγωγικές, επομένως η ροή αέργου ισχύος συνδέεται με το μέγεθος της τάσης. Τέλος, η σχέση μεταξύ της τάσης του συστήματος και της κατανάλωσης άεργου ισχύος καθορίζεται από την ευαισθησία της τάσης του φορτίου, η οποία είναι γενικά μη γραμμική.

Ένας άλλος τύπος ευστάθειας τάσης στο μικροδίκτυο σχετίζεται με την ικανότητα των DER που βασίζονται σε VSC (Voltage Source Converter), όπου θα αναλυθεί στα Κεφάλαια 3 και 4, να διατηρούν την τάση κατά μήκος του πυκνωτή του dc-link. Ανάλογα με τον τύπο DER, αυτή η τάση διατηρείται μέσω ενός μετατροπέα buck/boost ή του αντιστροφέα DC/AC. Σε κάθε περίπτωση, οι κυματισμοί τάσης στον πυκνωτή εξαρτώνται από την εγχυόμενη/απορροφούμενη στιγμιαία ισχύ του μετατροπέα. Ως εκ τούτου, μπορεί να προκύψουν καταστάσεις όπου η έγχυση ενεργού ισχύος του μετατροπέα είναι κοντά στην οριακή τιμή του, οπότε η αύξηση της ζήτησης άεργου ισχύος, μπορεί να προκαλέσει μεγάλες διακυμάνσεις στην έγχυση ενεργού και άεργου ισχύος των DER. Ανάλογα με την απόκριση του συστήματος και τα χαρακτηριστικά του φορτίου, μπορεί να προκύψει αστάθεια τάσης μετά από μεγάλη διαταραχή, όπως ξαφνική αλλαγή στη ζήτηση και στην ισχύς εξοδου των ΑΠΕ ή διακοπή λειτουργίας της γεννήτριας. Μικρές διαταραχές, όπως μικρές σταδιακές αλλαγές στη ζήτηση, μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε αστάθεια τάσης.

1.7 Προηγμένα μικροδίκτυα και σύστημα διαχείρισης μικροδικτύου MGMS

1.7.1 Προηγμένα μικροδίκτυα

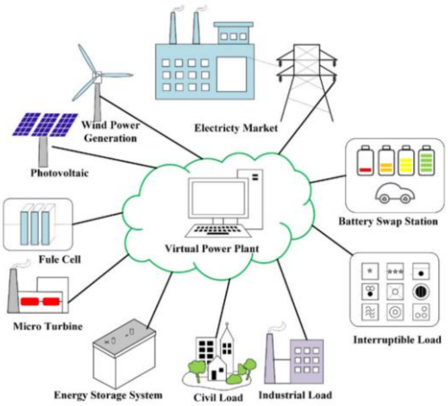
Όπως προαναφέρθηκε, ένα μικροδίκτυο είναι μια ομάδα διασυνδεδεμένων φορτίων και κατανεμημένων ενεργειακών πόρων (DERs) εντός σαφώς καθορισμένων ηλεκτρικών ορίων που λειτουργούν ως ενιαία ελεγχόμενη οντότητα. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί και να αποσυνδεθεί από το δίκτυο για να μπορέσει να λειτουργήσει είτε σε συνδεδεμένο στο δίκτυο ή αποπομονωμένο.

Ωστόσο, καθώς η διείσδυση των DER αυξάνεται, μειώνεται το λειτουργικό κόστος, επιτυγχάνεται συμμετοχή στην αγορά, και αυξάνεται η αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα, η έννοια του μικροδικτύου έχει εξελιχθεί σε αυτό που ονομάζουμε προηγμένο μικροδίκτυο [37].

Σε σχέση με τον αρχικό ορισμό, το προηγμένο μικροδίκτυο, αντί να επικεντρωθεί στην ικανότητα του για νησιδοποίηση για επίτευξη προστασίας από πιθανή διακοπή της παροχής ισχύος, το προηγμένο μικροδίκτυο περιλαμβάνει περαιτέρω έμφαση στη διαχείριση παραγωγής και ζήτησης. Το προηγμένο μικροδίκτυο είναι σε θέση να εξισορροπήσει το ισοζύγιο παραγωγής και ζήτησης, να υλοποιήσει οικονομική κατανομή ανάμεσα στους πόρους παραγωγής, και να επιτύχει υψηλή αξιοπιστία.

Το όραμα για τα προηγμένα μικροδίκτυα, είναι να αναπτυχθούν στο σύστημα διανομής προκειμένου να εξυπηρετούν τους καταναλωτές και να περιέχουν DER. Καθώς όμως η διείσδυση των DER αυξάνεται συνεχώς, τα προηγμένα μικροδίκτυα θα αποτελέσουν σημαντικό μέρος των εικονικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής (Virtual Power Plants - VPPs) (Σχήμα 1.16) που ανατροφοδοτούν με ισχύ το σύστημα μεταφοράς και θα συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας [38]. Καθώς όλο και περισσότερα DER και μικροδίκτυα ενσωματώνονται στη σύστημα διανομής, η έννοια του VPP αποκτά μεγαλύτερη αξία.

Στο σύστημα διανομής, τα μικροδίκτυα, τα DERs που φιλοξενούνται στο δίκτυο και τα ελεγχόμενα φορτία μπορούν να συγκετρωθούν και να σχηματίσουν VPP που διασυνδέεται με το σύστημα μεταφοράς και παρέχει υποστήριξη στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, με παροχή ενεργού και άεργου ισχύος. Το VPP μπορεί να παρέχει υποστήριξη πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας, υποστήρικη άεργου ισχύος και συμμετοχή στην ενεργειακή αγορά [52]. Επιπλέον, τα προηγμένα μικροδίκτυα στο ίδιο σύστημα διανομής, μπορούν επίσης να ανταλλάξουν ισχύς μεταξύ τους με αποτέλεσμα να αυξήσουν την αξιοπιστία και αποφευχθούν οι απώλειες ισχύος στη μεταφορά.



Σχήμα 1.16 : Εικονικός Σταθμός Ηλεκτροπαραγωγής VPP. [40]

1.7.2 Σύστημα διαχείρισης προηγμένων μικροδικτύων MGMS

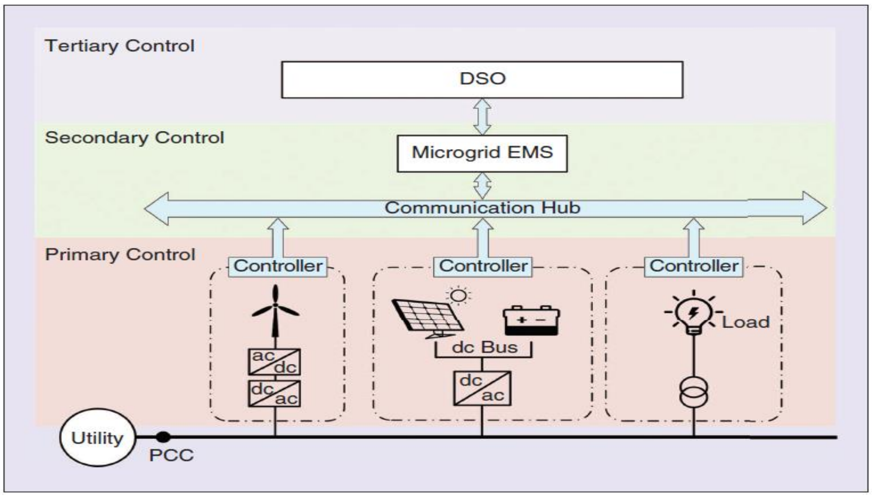
Η τεχνολογία που κάνει τα προηγμένα μικροδίκτυα εφικτά είναι το Σύστημα Διαχείρησης Μικροδικτύων (MGMS). Ο κύριος έλεγχος MGMS, βασίζεται στο μοντέλο προγνωστικού ελέγχου, στον έλεγχο του κατανεμημένου δικτύου, και τον έλεγχο στατισμού (Droop control) [39].

Οι κύριες λειτουργίες ελέγχου του MGMS κατηγοριοποιούνται συνήθως σε τρία επίπεδα [42] , στο πρωτεύον, στο δευτερεύον και τριτεύον έλεγχο (Σχήμα 1.17).

Ο **πρωτεύων έλεγχος**, έχει ως βασικές λειτουργίες την ανίχνευση νησιδοποίησης, τον έλεγχο των μετατροπέων, την ρύθμιση συχνότητας και τάσης και τον έλεγχο καταμερισμού ισχύος. Στο μικροδίκτυο, οι μετατροπείς πηγής τάσης (VSC), διασυνδέουν DER και μικροδικτύο. Συνήθως, για ένα AC μικροδίκτυο, τα χαρακτηριστικά της αδράνειας των σύγχρονων γεννητριών προσομοιώνονται ηλεκτρονικά μέσω των VSC, για να εξασφαλίζεται ανθεκτικότητα στη διακύμανση συχνότητας και τάσης. Το VSC έχει δύο στάδια ελέγχου, έλεγχο εξόδου μετατροπέα και έλεγχο καταμερισμού ισχύος. Στο πρώτο στάδιο, ελέγχεται η τάση και το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα. Στο δεύτερο στάδιο, ελέγχεται η έξοδος των ενεργειακών πόρων στο μικροδίκτυο, για να καλύψουν τη ζήτηση ισχύος, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι η συχνότητα και η τάση του συστήματος, κινούνται σε αποδεκτά όρια.

Ο **δευτερεύον έλεγχος** του MGMS, είναι υπεύθυνος για τη οικονομική και αξιόπιστη λειτουργία του μικροδικτύου. Οι κύριες λειτουργίες του ελέγχου περιλαμβάνουν το αυτόματο έλεγχο παραγωγής και το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του μικροδικτύου (EMS). Ο κύριος στόχος του EMS είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του μικροδικτύου και μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας του.

Ο **τριτεύον έλεγχος** είναι το ανώτερο επίπεδο ελέγχου MGMS. Οι λειτουργίες του ελέγχου περιλαμβάνουν υποστήριξη, μέσω παροχής ενεργού και αέργου ισχύος, στο σύστημα μεταφοράς, βοηθητικές υπηρεσίες καθώς και σκόπιμη νησιδοποίηση.



Σχήμα 1.17 : Σχηματικό διάγραμμα των τριών ελέγχων του MGMS. [52]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εισαγωγή στην Επαναφορά Ηλεκτροδότησης (Black-start) Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ)

2.1 Συστήματα Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών

2.1.1 Γενικά για τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Πολλά νησιά δεν είναι συνδεδεμένα με το κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ), καλύπτουν την ζήτηση ηλεκτρικής ηλεκτρικής ενέργειας που καλούνται να εξυπηρετήσουν, κυρίως από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, με υψηλό κόστος παραγωγής αλλά και με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα ελληνικά ΜΔΝ, καλύπτουν την ζήτηση κυρίως από συμβατικές γεννήτριες εσωτερικής καύσης, ισχύος < 100 kW έως 50 MW [29]. Στα μεγαλύτερα ΜΔΝ, χρησιμοποιούνται και ατμοστρόβιλοι, αεριοστρόβιλοι και μονάδες συνδυασμένου κύκλου.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των ΜΔΝ [34] είναι ότι:

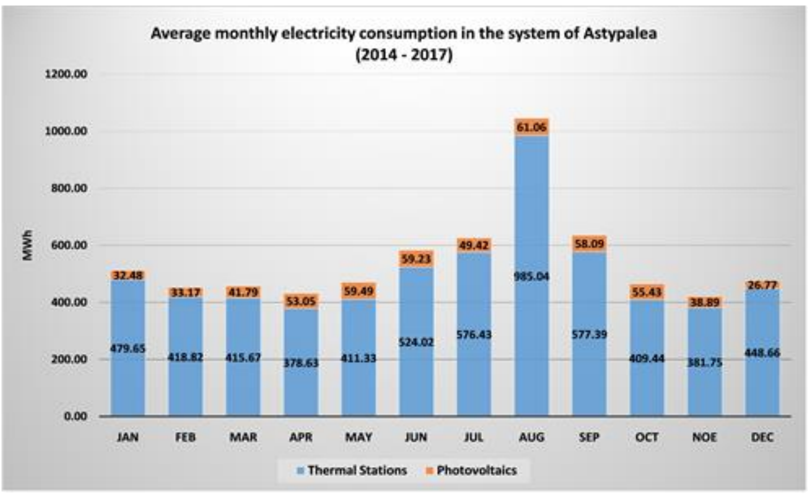
- Διαφέρουν σε έκταση και πληθυσμό. Σε πολλές περιπτώσεις, δεν είναι εύκολα προσβάσιμα.
- Έχουν άφθονο δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδιαίτερα αιολικής και ηλιακής ενέργειας.
- Δεν μπορούν να ανταλλάζουν ηλεκτρική ενέργεια με άλλα ηλεκτρικά συστήματα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αξιοπιστία και η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού.
- Εφόσον δεν είναι διασυνδεδεμένα με άλλο ηλεκτρικό σύστημα υψηλής αδράνειας, πιθανόν να προκύψουν προβλήματα που αφορούν την ευστάθεια της τάσης και της συχνότητας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις υψηλών ποσοστών διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) Μη Ελεγχόμενης Παραγωγής.

Η σύνδεση κάθε ΜΔΝ με το κύριο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι εφικτή, τουλάχιστον βραχυπρόθεσμα. Αυτό γιατί τα έργα διασύνδεσης είναι πολύπλοκα και η υλοποίησή τους απαιτούν αρκετά χρόνια. Η οικονομική τους βιωσιμότητα εξαρτάται κυριώς από την σχέση κατανάλωσης και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι απαραίτητο να εντοπιστούν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις που χρησιμοποιούν τοπικές πηγές ενέργειας. Οι λύσεις πρέπει να έχουν το ελάχιστο περιβαλλοντικό αντίκτυπο δεδομένου ότι τα νησιά αυτά περιλαμβάνουν περιοχές υψηλής οικολογικής σημασίας.

Οι ΑΠΕ, οι οποίες είναι ανεξάντλητες, μπορούν να αποτελέσουν λύση, αφού είναι εναρμονισμένες με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν. Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των ΑΠΕ οδηγούν σε βελτίωση της απόδοσης, προηγμένες στρατηγικές ελέγχου και υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Επιπλέον, η αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες (BESS) έχει φτάσει σε επίπεδα που επιτρέπουν εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

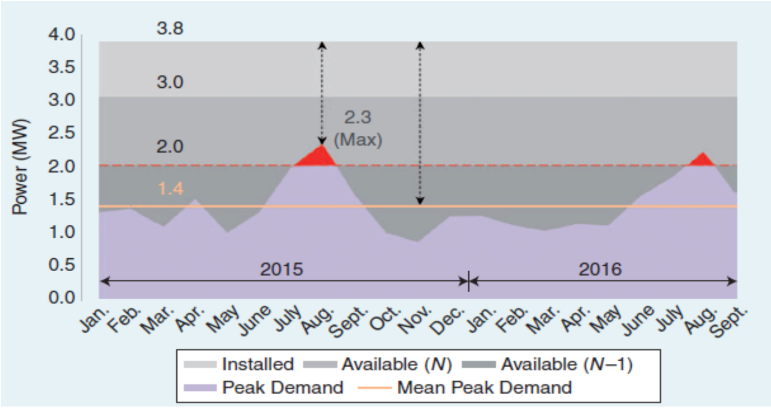
2.1.2 Η περίπτωση της Αστυπάλαιας και η διείσδυση των ΑΠΕ στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά

Η εγκατεστημένη ισχύς στα ΜΔΝ υπερβαίνει σημαντικά τη ζήτηση αιχμής προκειμένου να υπάρχει η απαραίτητη εφεδρεία, όπως υπαγορεύεται από τον Κώδικα Διαχείρισης για ΜΔΝ (τουλάχιστον ίση με την εγκατεστημένη ισχύς της μεγαλύτερης συμβατικής μονάδας ανά σύστημα). Επί του παρόντος, η εγκατεστημένη ισχύς υπερβαίνει την ετήσια αιχμή ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά 30–65% [29]. Ένα παράδειγμα ΜΔΝ, είναι αυτό της Αστυπάλαιας, με μέγιστη αιχμή φορτιού τα 2.3 MW και ετήσια ζήτηση ενέργειας 6.600 MWh (έτος 2015). Στο Σχήμα 2.1, απεικονίζεται η μέση μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα της Αστυπάλαιας την περίοδο 2014-2017.



Σχήμα 2.1: Μέση μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην Αστυπάλαιας την περίοδο 2014-2017. [34]

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζονται η εγκατεστημένη ισχύς και η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς (στις καταστάσεις Ν και Ν−1), μαζί με τη διακύμανση της αιχμής φορτίου σε μηνιαία βάση. Η υπόθεση της Αστυπάλαιας, εικονογραφεί μια κατάσταση, όπου η μόνιμη εγκατεστημένη ισχύς δεν επαρκεί για την εξυπηρέτηση του συνολικού φορτίου. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος επιτυγχάνεται, είτε μέσω φορητών ντηζελογεννητριών ή με μεταφορά μονάδων παραγωγής από άλλα συστήματα, όπου υπάρχει πλεονάζουσα ισχύς.

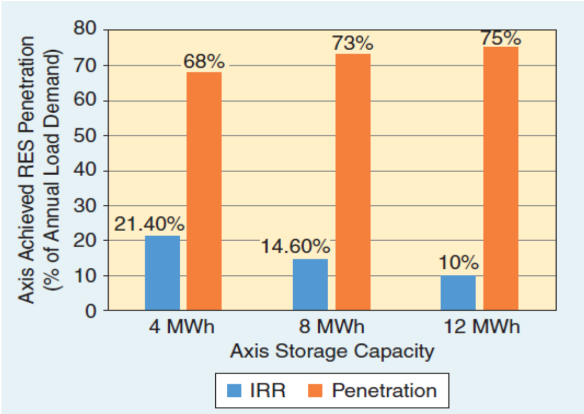


Σχήμα 2.2 : Μέγιστη ζήτηση ισχύος της Αστυπάλαιας την περίοδο 2015-2016. [29]

Τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται από εξαιρετικό αιολικό και ηλιακό δυναμικό, με αποτέλεσμα τη σημαντική ανάπτυξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας απο ΑΠΕ. Επί του παρόντος, λειτουργούν περισσότεροι από 5.000 σταθμοί ΑΠΕ [29] σε όλα τα ΜΔΝ, με συνολική εγκατεστημένη ισχύς που ξεπερνά τα 483 MW. Η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ και η συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο των νησιών παρουσιάζει σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, φθάνοντας επί του παρόντος σε συνολικό επίπεδο περίπου 19% για όλα τα ΜΔΝ.

Αν και οι Α/Γ και τα φωτοβολταϊκά έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζουν την ισχύς εξόδου τους (Non-dispatchable), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε επίπεδα διείσδυσης των ΑΠΕ έως 25–30% [29], πρόσφατες μελέτες έχουν αποδείξει ότι στα ΜΔΝ μπορεί να εγκατασταθεί συνολική ισχύς απο ΑΠΕ άνω των 1.000 MW, οδηγώντας σε διείσδυση περίπου στο 50% της ετήσιας ζήτησης φορτίου. Υψηλά επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ, μπορούν να επιτευχθούν μόνο μέσω της ενσωμάτωσης σταθμών ΑΠΕ με δυνατότητα προσαρμογής της ισχύς εξόδου τους (Dispatchable RES stations), ενώ η αποθήκευση ενέργειας είναι ο κύριος παράγοντας για τη μετάβαση από τις τρέχουσες ενεργειακές διεισδύσεις ΑΠΕ (περίπου 20%), σε επίπεδο μεγαλύτερο του 50%.

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας, απαιτούν μεγάλο κόστος επένδυσης, και σύμφωνα με σενάριο της έρευνας του [29], η αύξηση της ισχύος που είναι δυνατόν να αποθηκευτεί από τις μπαταρίες οδηγεί σε μείωση του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (Internal rate of return - IRR) - δείκτη που αξιολογεί την απόδοση μιας επένδυσης. Ωστόσο, παρουσιάζεται αύξηση των επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ, με αύξηση της αποθήκευσης των μπαταριών (Σχήμα 2.3).



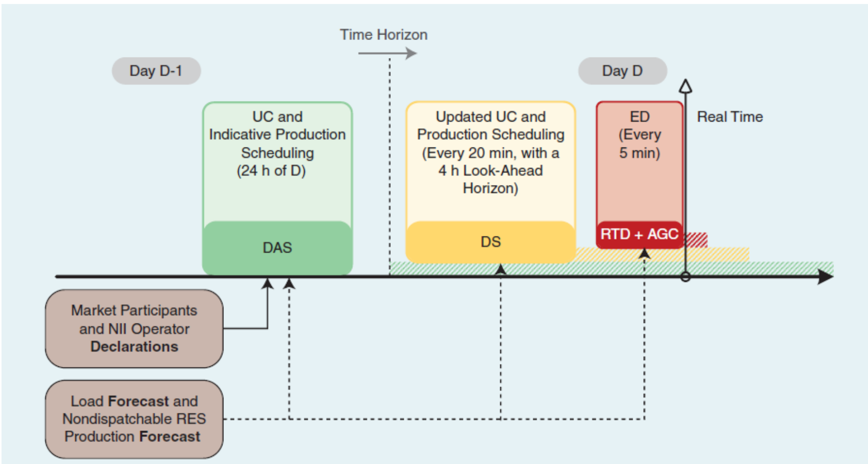
Σχήμα 2.3 : Επίδραση της αύξησης της αποθήκευσης των μπαταριών, στο IRR της επένδυσης και στη διείσδυση των ΑΠΕ. [29]

2.1.3 Διαδικασία Διαχείρισης της Παραγωγής σε ΜΔΝ

Για τη διαχείριση παραγωγής σε ΜΔΝ, ο Κώδικας Διαχείρισης των ΜΔΝ προβλέπει την εφαρμογή της βέλτιστης ένταξης μονάδων και κατανομής φορτίου, των οποίων οι κύριοι στόχοι είναι η μεγιστοποίηση της απορρόφησης ενέργειας από ΑΠΕ, και η ελαχιστοποίηση στα λειτουργικά κόστη των συμβατικών μονάδων.

Ο Κώδικας Διαχείρισης των ΜΔΝ είναι ο ίδιος για όλα τα ΜΔΝ με μικρές διαφορές για τα μικρότερα συστήματα. Συνολικά, η διαχείριση της παραγωγής σε ένα ΜΔΝ αποτελείται από το βέλτιστο προγραμματισμό της ένταξης μονάδων, την οικονομική κατανομή σε πραγματικό χρόνο των dispatchable μονάδων παραγωγής και τις περικοπές ισχύος για τις ΑΠΕ μη ελεγχόμενης παραγωγής.

Σύμφωνα με τον Κώδικα Διαχείρισης των ΜΔΝ, τρεις κύριες διαδικασίες [29] συνιστούν την διαχείρηση παραγωγής της επόμενης ημέρας (day-ahead) και της ενδοημερήσιας (intraday). Όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.4, αυτές είναι ο κυλιόμενος προγραμματισμός της επόμενης ημέρας (RDAS), προγραμματισμός της κατανομής (DS) και η κατανομή σε πραγματικό χρόνο (RTD).



Σχήμα 2.4 : Σχηματική απεικόνιση διαχείρησης της παραγωγής σε ΜΔΝ. [29]

Αρχικά πραγματοποιείται η διαδικασία **RDAS**,όπου διαχωρίζεται σε δυο διαδικασίες:

- Η πρώτη περιέχει το πρόβλημα της διαχείρισης της παραγωγής την ημέρα D-1 για την κατανομή της ημέρας D προκειμένου να καθοριστεί το πρόγραμμα παραγωγής από τις dispatchable μονάδες παραγωγής. Τα δεδομένα εισόδου του προβλήματος είναι οι δηλώσεις των συμμετεχόντων της Αγοράς και του Διαχειριστή του ΜΔΝ καθώς και οι πρόβλεψη φορτίου και παραγωγής των ΑΠΕ μη ελεγχόμενης παραγωγής.

- Η δεύτερη διαδικασία αποτελεί μια ενδοημερήσια αναθεώρηση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, για το δεύτερο μισό της κατανομής της ημέρας D, με πιο ακριβή στοιχεία για την πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ.

Ο προγραμματισμός της κατανομής (**DS**) είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ενδοημερήσια διαχείριση της παραγωγής των ΜΔΝ που στοχεύει στην τελική κατάσταση της παραγωγής των dispatchable μονάδων. Ο προγραμματισμός κατανομής εκτελείται κάθε 20 λεπτά, με χρονικό ορίζοντα 4 ωρών. Το τελικό στάδιο για την διαχείριση παραγωγής στα ΜΔΝ συνιστά την διαδικασία **RTD,** όπου υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο η οικονομική κατανομή.

Ο σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίου, και διενεργείται κάθε 5 λεπτά. Ο Κώδικας Διαχείρισης ΜΔΝ παρέχει επίσης έλεγχο της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο μέσω του σταθμού αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC).

2.2 Εισαγωγή στο Black-start ενός ΜΔΝ

Η επαναφορά ηλεκτροδότησης (Black-start) είναι η ικανότητα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για επανεκκίνηση τμημάτων του συστήματος μετά από μια ολική σβέση (blackout). Αυτό συνεπάγεται την εκκίνηση των απομονωμένων σταθμών παραγωγής ενέργειας και τη σταδιακή επανασύνδεση τους για να σχηματίσουν ξανά ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Η διαδικασία του Black-start βασίζεται κυρίως σε μεγάλες συμβατικές ή μεγάλες υδροηλεκτρικες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέονται με τη υψηλή τάση μεταφοράς, το οποίο είναι γνωστό ως στρατηγική «από πάνω προς τα κάτω» (top-down). Στα ΜΔΝ βασίζεται στις γεννήτριες (κυρίως ντηζελογεννήτριες) του τοπικού σταθμού παραγωγής.

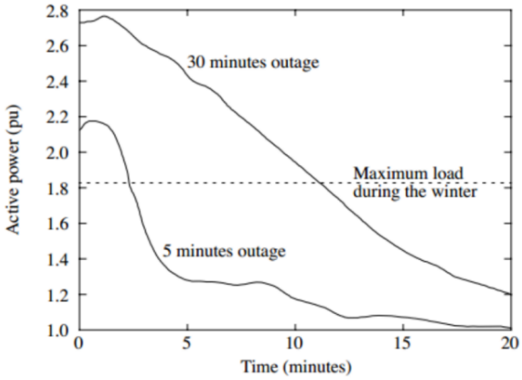
Η ανάγκη για αντικατάσταση συμβατικών μονάδων με ΑΠΕ θα θέσει εκτός λειτουργίας πολλές τέτοιες μονάδες που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι τώρα ως κύριες πηγές για την διαδικασία του Black-start. Ωστόσο, οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ και οι μονάδες αποθήκευσης μπορούν να συμβάλουν στην επανεκκίνηση του συστήματος ενός ΜΔΝ.

2.3 Προκλήσεις κατά τη διαδικασία του Black-start

Το Black-start ενός μικροδικτύου ή μη διασυνδεδεμένου δικτύου ορίζει τη διαδικασία επαναφοράς του μετά από διακοπή λειτουργίας χωρίς εξωτερική υποστήριξη τάσης. Καθώς αναπτύσσονται περισσότεροι κατανεμημένοι ενεργειακοί πόροι, αποθήκευση ενέργειας και μικροδίκτυα στα συστήματα ισχύος, είναι σημαντικο να εξεταστούν επιλογές για αποκατάσταση του συστήματος, χωρίς την παρουσία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας.

Η κύρια πρόκληση της διαδικασίας Black-start ενός μη διασυνδεδεμένου δικτύου είναι το φαινόμενο που ονομάζεται «cold load pickup». Σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, τα θερμοστατικά φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα, ενώ κατά τη διάρκεια του Black-start όλων αυτών των φορτίων, αυτά καταναλώνουν ισχύς ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να προκύψει πιθανόν ένα νέο blackout. Ως συνέπεια, θα έχουμε πολύ μεγαλύτερη ζήτηση ισχύος από ότι σε κανονικές συνθήκες.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5, έπειτα από μετρήση του «cold load pickup» για 625 σπίτια (εκ των οποίων τα 525 διέθεταν ηλεκτρικές συσκευές θέρμανσης) [31], παρατηρούμε πως ακομά και μετά από μικρή διακοπή της ηλεκτροδότησης (χρονικής διάρκειας 5 λεπτών), η αρχική ζήτηση ισχύος των φορτίων κατά την διάρκεια της επαναφοράς φτάνει τα 2.1 α.μ (δηλαδή 2.1 φορές την ονομαστική τους τιμή). Η διάρκεια του «cold load pickup» ήταν περιπού 20 λεπτά.



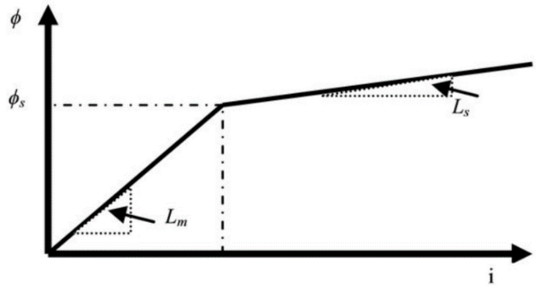
Σχήμα 2.5 : Μέτρηση του «cold load pickup» για 625 σπίτια. [31]

Ταυτόχρονα, κατά την επαναφορά του συστήματο, στα πρώτα δευτερόλεπτα, έπειτα από ένα blackout, προκύπτουν μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης, τα οποία προκαλούνται από τον κορεσμό των μετασχηματιστών (inrush currents). Όταν γίνεται απευθείας εκκίνηση του συστήματος, το ρεύμα μαγνήτισης είναι αρκετά μεγάλο για να προκαλέσουν πιθανό σφάλμα στους αντιστροφείς του μη διασυνδεδεμένου δικτύου και παραμόρφωση της τάσης εξόδου εξαιτίας των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών του inrush current του μετασχηματιστή. Αυτό αντιμετωπίζεται με σταδιακή αύξηση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

Για την εκτέλεση της διαδικασίας του Black-start, μια τουλάχιστον μονάδα του μικροδικτύου θα πρέπει να έχει την ικανότητα τουλάχιστον να διενεργεί σαν Black-start μονάδα, δηλαδή να μπορεί να διαμορφώνει τάση και συχνότητα. Υποθέτοντας ότι ένα σύστημα μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας (BESS) είναι αυτή η grid-forming μονάδα, ικανότητα της για Black-start μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν όλα τα στοιχεία και τα συστήματα ελέγχου μπορούν να ενεργοποιηθούν και να διατηρηθούν χωρίς εξωτερική παροχή ισχύος.

2.4 Ρεύματα μαγνήτισης (inrush currents) κατά την ενεργοποίηση των μετασχηματιστών του δικτύου

Κατά τη διάρκεια ενεργοποίησης ενός μετασχηματιστή (ΜΣ), μέτα από ένα φαινόμενο ολικής σβέσης, εμφανίζεται ένα μεταβατικό ρεύμα (το οποίο θα μπορούσε να είναι πολλαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή) για μια σύντομη περίοδο ώσπου να σταθεροποιηθεί. Αυτό το μεταβατικό ρεύμα, γνωστό ως ρεύμα μαγνήτισης (inrush current), προκαλείται από τον κορεσμένο πυρήνα του μετασχηματιστή. Το Σχήμα 2.6 απεικονίζει τη χαρακτηριστική μαγνητικής ροής - ρεύματος με αναπαράσταση δύο κλίσεων, της μαγνητικής ροής ενός μετασχηματιστή πριν και μετά το σημείο κορεσμού, που συμβολίζεται με Lm και Ls, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.6 : Χαρακτηριστική μαγνητικής ροής και ρεύματος του μετασχηματιστή [46].

Όταν εφαρμόζεται τάση $v(t) = Vmsin(\omega t + \theta)$ στον μετασχηματιστή, η μαγνητική ροή μπορεί να υπολογιστεί με ολοκλήρωση ως [46] :

$$\varphi(t) = \frac{Vm}{\omega}[-\cos(\omega t + \theta) + \cos(\theta)] + \varphi_0 \quad (2.1)$$

όπου Vm είναι το πλάτος της τάσης, ω είναι η γωνιακή συχνότητα, θ η αρχική φάση της τάσης και φ_0 η μαγνητική ροή του πυρήνα του μετασχηματιστή. Ο κορεσμός του μετασχηματιστή εμφανίζεται όταν αλλάζει η κλίση του Σχήματος 2.6, όπου και $\varphi(t) = \varphi_s$

Η χρονική στιγμή του κορεσμού (saturation), t_s , είναι :

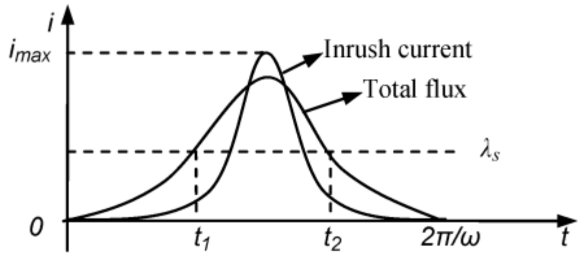
$$t_s = \frac{\cos^{-1}\left[(\ \varphi_0 - \varphi_s)\frac{\omega}{V_m} + cos\theta\right] - \theta}{\omega} \quad (2.2)$$

Η μαγνητική ροή, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου κορεσμού, γράφεται ως εξής :

$$\varphi(t) = \begin{cases} L_m i(t) & 0 < t < t_s \\ L_S i(t) & t_s < t < \frac{2(\pi-\theta)}{\omega} - t_s \end{cases} \tag{2.3}$$

Η εξίσωση (2.4) αποτυπώνει την εκτίμηση του μέγιστου ρεύματος μαγνήτισης του μετασχηματιστή (Σχήμα 2.7) [47] :

$$i_{max} = \frac{\left[(\varphi_0 - \varphi_s)\frac{\omega}{V_m} + cos\theta + 1\right]V_m}{\omega L_s} \tag{2.4}$$



Σχήμα 2.7 : Γραφική ρεύματος μαγνήτισης και μαγνητικής ροής του μετασχηματιστή [47].

Από τις παραπάνω εξισώσεις φαίνεται πως όταν ο ΜΣ ενεργοποιείται με ονομαστική τάση στα άκρα του το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης θα μπορούσε να είναι αρκέτα μεγαλύτερο από την ονομαστική του τιμή. Όπως θα παρουσιαστεί και στα επόμενα Κεφάλαια, η επανεκκίνηση ενός ΜΔΝ επιτυγχάνεται και προσομοιώνεται μέσω σταδιακής αύξησης της τάσης εξόδου αντιστροφέα μπαταριών προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το φαινόμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μοντελοποιήση του αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) και ανάλυση της θεωρίας ελέγχου του

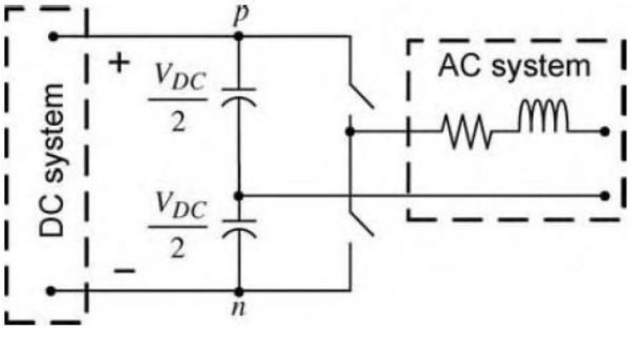
3.1 Εισαγωγή

Η μονάδα αποθήκευσης στο ΜΔΝ μπορεί να συμβάλει στην επανεκκίνηση του δικτύου. Με την χρήση του Simulink σχεδιάσαμε έναν τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter) μέσω του οποίου επιτεύχθηκε ο έλεγχος ισχύος στο αυτόνομο δίκτυο που επιτρέπει την επανεκκίνηση του. Στη συνέχεια παρατίθεται η απαραίτητη θεωρία και αναλύεται η μοντελοποίηση του αντιστροφέα, πάνω στην οποία βασιστήκαμε για την ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του κυκλώματος. [26]

3.2 Ανιστροφείς με πηγή τάσης

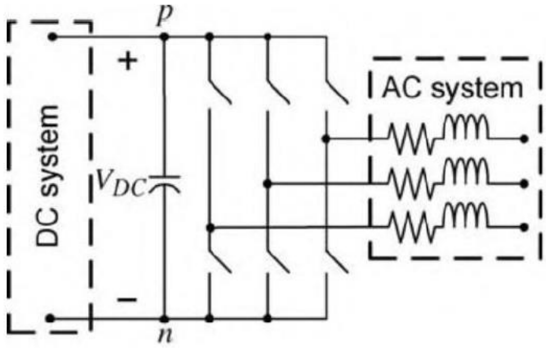
Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το βασικό κυκλωματικό διάγραμμα ενός μονοφασικού αντιστροφέα δύο επιπέδων με πηγή τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας. Η ημιγέφυρα αποτελείται από τον πάνω και τον κάτω ημιαγωγικό διακόπτη, ενώ σε κάθε διακόπτη είναι συνδεμένη αντιπαράλληλα μια δίοδος ελεύθερης διεύλευσης, η οποία δίνει τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ρεύματος.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από την είσοδο προς την έξοδο αλλά και από την έξοδο προς την είσοδο. Παράλληλα στους διακόπτες είναι συνδεδεμένοι δύο ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές με μεγάλη χωρητικότητα έτσι ώστε η τάση στα άκρα τους να είναι σταθερή. Ο αντιστροφέας καλείται δύο επιπέδων καθώς η τάση εξόδου του κάθε στιγμή μπορεί να πάρει μία εκ των δύο τιμών, ή αυτή του κόμβου p $(+VDC/2)$, ή αυτή του κόμβου n $(-VDC/2)$, ανάλογα με το ποιος διακόπτης άγει κάθε φορά.



Σχήμα 3.1 : Σχηματικό διάγραμμα μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, δύο επιπέδων

Με την παράλληλη σύνδεση τριών μονοφασικών αντιστροφέων ημιγέφυρας, προκύπτει ο τριφασικός αντιστροφέας με πηγή τάσης (Σχήμα 3.2)



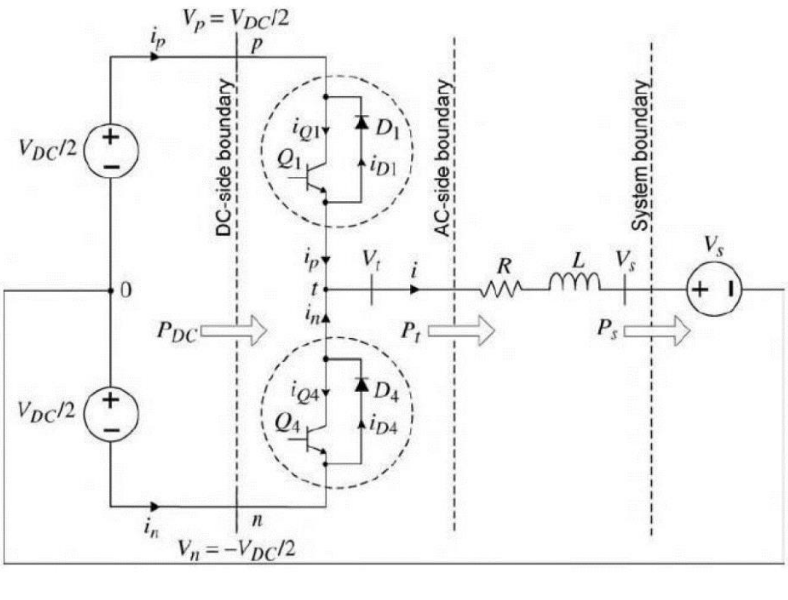
Σχήμα 3.2 : Σχηματικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα

Για την περιγραφή και κατανόηση του πειράματος και του αλγορίθμου ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι απαραίτητη η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς του μονοφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας [13].

3.3 Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

3.3.1 Δομή του ιδανικού αντιστροφέα

Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3



Σχήμα 3.3 : Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας.

Ο αντιστροφέας αποτελείται από δύο διακοπτικά στοιχεία Q1, Q2, τα οποία μπορεί να είναι ελεγχόμενα ή μη (τρανζίστορς ή δίοδοι), και δύο διόδους D1, D2 οι οποίες είναι συνδεδεμένες αντιπαράλληλα, η κάθεμία με το αντίστοιχο διακοπτικό στοιχείο.

Σε κάθε τρανζίστορ, η θετική ροή του ρεύματος είναι αυτή όταν κατευθύνεται από τον συλλέκτη στον εκπομπό. Αντίστοιχα στην δίοδο, η θετική φορά του ρεύματος υποτίθεται όταν αυτό ρέει από την άνοδο προς την κάθοδο. Εάν ορίσουμε ως ip το ρεύμα που εξέρχεται από τον συνδυασμό του τρανζίστορ 1 και της διόδου 1, και αντίστοιχα ως in το ρεύμα που εξέρχεται από τον συνδυασμό του τρανζίστορ 4 και της διόδου 4, με θετικές φορές αυτές που διαφαίνονται στο σχήμα, τότε ισχύει $ip = iQ1 - iD1$ και $in = iQ4 - iD4$.

Οι κόμβοι p και n είναι οι τερματικοί ακροδέκτες της DC πλευράς, και η διακεκομμένη ευθεία που περνάει από αυτούς τους δύο κόμβους, ορίζει το τέλος της DC πλευράς του αντιστροφέα. Στην DC πλευρά του ο αντιστροφέας τροφοδοτείται από δύο πανομοιότυπες πηγές συνεχούς τάσης $VDC/2$.

Ο κόμβος t ορίζει τον τερματικό ακροδέκτη της AC πλευράς του αντιστροφέα (ο δεύτερος τερματικός ακροδέκτης είναι αυτός της γείωσης). Οι ακροδέκτες εξόδου της AC πλευράς συνδέονται, μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου με ωμική αντίσταση R και αυτεπαγωγή L, στο δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης. Θεωρούμε το δίκτυο εναλλασσόμενης τάσης πολύ μεγαλύτερο (άπειρο) σε σχέση με το αυτόνομο, και για αυτό το παριστάνουμε ως μία ανεξάρτητη πηγή τάσης Vs (η τιμή της οποίας δεν μεταβάλλεται όταν αλλάζουν οι δυναμικές του αυτόνομου δικτύου). Ο αρνητικός ακροδέκτης της πηγής Vs συνδέεται με τον κόμβο 0, ο οποίος σηματοδοτεί το κοινό σημείο σύνδεσης των δύο πηγών συνεχούς τάσης. Αυτόν τον κόμβο επιλέγουμε ως κόμβο αναφοράς, για τον υπολογισμό των διαφόρων τάσεων του κυκλώματος.

Η τάση Vt είναι η τάση στους ακροδέκτες εξόδου της AC πλευράς του αντιστροφέα, ή με άλλα λόγια η τάση εξόδου του αντιστροφέα. Η τάση αυτή έχει την μορφή ενός διακοπτικού τετραγωνικού παλμού, και κατά συνέπεια περιέχει ανεπιθύμητες αρμονικές. ‘Ετσι, ο κλάδος της σύνθετης αντίστασης που συνδέεται στους ακροδέκτες εξόδου της AC πλευράς, λειτουργεί ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο συμβάλλει στην δημιουργία τάσης εξόδου, με μειωμένη αλλοίωση από ανεπιθύμητες αρμονικές [13].

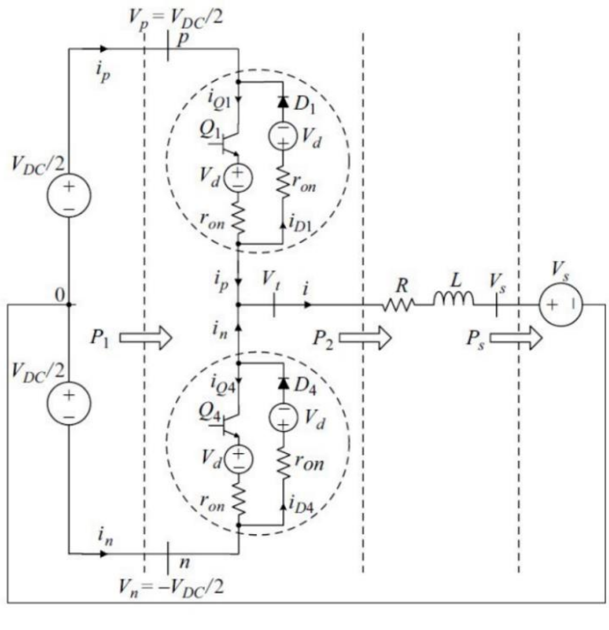
3.3.2 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας

Σε αυτό το τμήμα του κεφαλαίου, παρουσιάζεται ο μη ιδανικός αντιστροφέας ημιγέφυρας και αναλύονται οι εξισώσεις και ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο έλεγχος αυτός. Στην ανάλυσή μας θα συμπεριλάβουμε τις εσωτερικές τάσεις και αντιστάσεις των τρανζίστορ και των διόδων.

Υποθέσεις για την ανάλυση:

- Κατά την περίοδο αγωγής τους, τα διακοπτικά στοιχεία (τρανζίστορ και δίοδοι) μοντελοποιούνται ως μία εσωτερική πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση.
- Κατά την περίοδο αποκοπής, τα διακοπτικά στοιχεία (τρανζίστορ και δίοδοι) μοντελοποιούνται ως ασυνέχεια του κυκλώματος (ανοικτό κύκλωμα).
- Η μετάβαση από την αποκοπή στην αγωγή των διακοπτικών στοιχείων (τρανζίστορ και δίοδοι), είναι ακαριαία.
- Η μετάβαση από την αγωγή στην απόκοπή των τρανζίστορ, υπόκειται στο φαινόμενο ρεύματος απορροής, και η αντίστοιχη μετάβαση των διόδων, υπόκειται στο φαινόμενο αντίστροφου ρεύματος ανάκαμψης.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του μη ιδανικού μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας (Σχήμα 3.4), για κάθε τρανζίστορ και δίοδο, η πηγή Vd αντιπροσωπεύει την εσωτερική πτώση τάσης του στοιχείου, ενώ αντίστοιχα η αντίσταση ron την εσωτερική αντίσταση του στοιχείου, κατά την περίοδο αγωγής του. Για την μελέτη του αλγορίθμου ελέγχου του αντιστροφέα, θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο μέσου όρου. Οι μεταβλητές των εξισώσεων αντιστοιχούν σε μέσες τιμές στη διάρκεια μιας διακοπτικής περιόδου. (Το σύμβολο της μέσης τιμής θα παραλείπεται.)



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα μονοφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν την δυναμική συμπεριφορά του αντιστροφέα, στην εναλλασόμενη (AC) πλευρα είναι :

$$L\frac{di(t)}{dt} + (R + ron)i(t) = Vt(t) - Vs(t), \quad (3.1)$$

$$Vt(t) = \frac{VDC}{2}m(t),\ |m(t)| \leq 1 \quad (3.2)$$

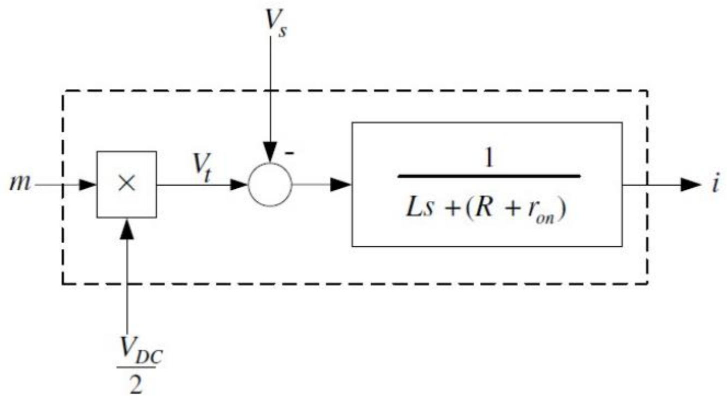
Όπου:

- Το ρεύμα i είναι η μεταβλητή κατάστασης. Περιγράφει την κατάσταση του δυναμικού συστήματος στις διάφορες χρονικές στιγμές.
- Η τάση Vs είναι η εισερχόμενη στο σύστημα διαταραχή. Είναι μια μεταβλητή η οποία επηρεάζει την δυναμική του συστήματος, της οποίας όμως την τιμή δεν μπορούμε να επηρεάσουμε.
- Η τάση Vt, στην έξοδο του αντιστροφέα, είναι η είσοδος ελέγχου. Ουσιαστικά ο ελέγχος υλοποιείται μέσω της ρύθμισης αυτής της μεταβλητής.

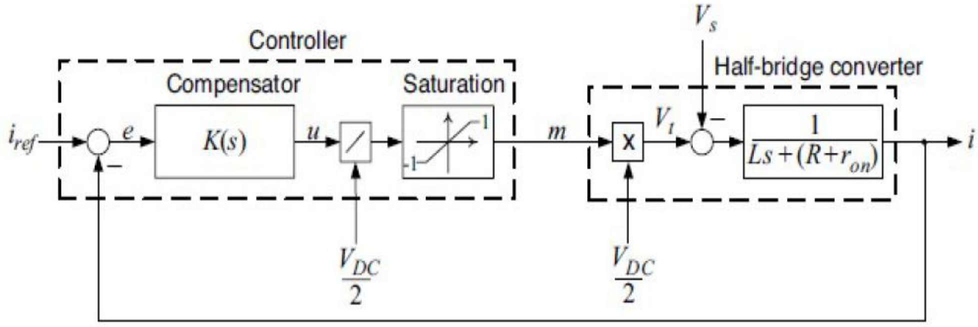
Μέσω της (3.2), προκύπτει ότι η Vt είναι ανάλογη του σήματος διαμόρφωσης πλάτους m, με σταθερά αναλογίας το $VDC/2$, και κατά συνέπεια η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα μπορεί να ελεγχθεί από τη διαμόρφωση πλάτουςα (m). Το σήμα διαμόρφωσης πλάτους, προκύπτει από την τεχνική ελέγχου των ημιαγωγικών διακοπτών του αντιστροφέα (SPWM).

3.3.3 Έλεγχος κλειστού βρόχου μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας

Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ελέγχου ανοιχτού βρόχου (Σχήμα 3.5) του συστήματος που περιγράφεται απο τις εξισώσεις (3.1) και (3.2). Προκειμένου να έχουμε τον έλεγχο του ρεύματος εξόδου, προσθέτουμε στον ανοιχτό βρόχο έναν κλάδο ανάδρασης για να συγκρίνεται το ρεύμα εξόδου με την τιμή της αναφοράς. Αυτό πραγματοποιείται μέσω του κλειστού βρόχου (Σχήμα 3.6)



Σχήμα 3.5 : Έλεγχος ανοιχτού βρόχου αντιστροφέα πηγής τάσης



Σχήμα 3.6 : Έλεγχος κλειστού βρόχου αντιστροφέα πηγής τάσης

Μέσω του Σχήματος 3.6, παρατηρούμε πως γίνεται σύγκριση της τιμής αναφοράς $iref$ με το ρεύμα εξόδου i. Το σφάλμα που προκύπτει $e = iref - i$, επεξεργάζεται από τον ελεγκτή με συνάρτηση μεταφοράς K(s) και προκύπτει το σήμα ελέγχου u. Έπειτα από διαίρεση με το $V_{DC}/2$, παράγεται το σήμα διαμόρφωσης πλάτους m και αφού περάσει από έναν περιοριστή για περιορισμό του εύρους του σε [-1,1] για να ικανοποιείται το $|m| \leq 1$.Έτσι, δεν γίνεται υπερδιαμόρφωση από την SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) γεννήτρια.

Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης μεταφοράς του ελεγκτή K(s) εξαρτάται από τη μορφή του σήματος αναφοράς και την επιθυμητή λειτουργία του. Συγκεκριμένα, στο πείραμα που διεξάγουμε, το σήμα αναφοράς $iref$ θεωρούμε ότι μεταβάλλεται βηματικά και το σήμα διαταραχής Vs το μετασχηματίζουμε κατάλληλα ώστε να πάρει τη μορφή DC σήματος. Για τις προδιαγραφές του συστήματος, γίνεται χρήση ενός αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή PI.

Γενική συνάρτηση μεταφοράς :

$$K(s) = kp + \frac{ki}{s} \text{ ή } K(s) = \frac{kps+ki}{s} \tag{3.3}$$

Ο ολοκληρωτικός όρος ki, εξασφαλίζει πως το ρεύμα i, ακολουθεί την τιμή της αναφοράς $iref$, με μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης, χωρίς την επίδραση της διαταραχής Vs. Με βάση το Σχήμα 3.5, η συνάρτηση μεταφοράς ανοιχτού βρόχου του συστήματος είναι η:

$H(s) = K(s)*\frac{1}{Ls+(R+ron)}$ και με διαίρεση, αριθμητή και παρανομαστή, με $\frac{kp}{Ls}$

προκύπτει πως :

$$H(s) = \frac{kp}{Ls} * \frac{s+\frac{ki}{kp}}{s+\frac{(R+ron)}{L}} \tag{3.4}$$

Το σύστημα αυτό, έχει έναν ευσταθή πόλο, στο αριστερό μιγαδικό ημιεπίπεδο. Αυτός είναι ο s = - $\frac{R+ron}{L}$, όπου R, ron και L θετικά. Για τυπικές τιμές των παραμέτρων, ο πόλος αυτός βρίσκεται πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων και αντιστοιχεί σε μία αργή φυσική απόκριση συχνότητας.

Για να βελτιώσουμε την απόκριση συχνότητας ανοιχτού βρόχου του συστήματος, μπορούμε να εξουδετερώσουμε τον ευσταθή πόλο τοποθετώντας ένα αντίστοιχο μηδενικό στον αριθμητή της συνάρτησης μεταφοράς του PI ελεγκτή. Έτσι, πρέπει να επιλέξουμε κατάλληλες τιμές για τα κέρδη του ελεγκτή ώστε $\frac{ki}{kp} = \frac{R+ron}{L}$

Με βάση την παραπάνω σχέση, προκύπτει πως:

$$H(s) = \frac{kp}{Ls}$$

και η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου:

$$G(s) = \frac{i(s)}{iref(s)} = \frac{\frac{kp}{Ls}}{1+\frac{kp}{Ls}} = \frac{kp}{kp+Ls}$$

ή $G(s) = \frac{1}{1+\frac{L}{kp}s}$ (3.5)

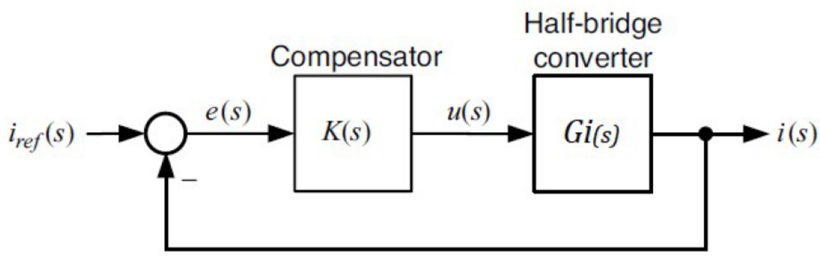
Η ταχύτητα του ελέγχου του συστήματος καθορίζεται από τη χρονική απόκριση του συστήματος $\tau i = \frac{L}{kp}$ και έτσι η (3.5) γίνεται:

$G(s) = \frac{1}{1+\tau i s}$, όπου έχει μοναδιαίο κέρδος. (3.6)

Ο χρονικός όρος τi, πρέπει να είναι μικρός για να έχουμε αποτελεσματικό έλεγχο ρεύματος όπως και ο όρος $\frac{1}{\tau i}$, που αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης του συστήματος κλειστού βρόχου, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές μικρότερος από την διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα. Οπότε ο όρος τi πρέπει να είναι μικρός άλλα τόσο μικρός ώστε να μην ικανοποιεί το απαιτούμενο μέγεθος που θα πρέπει να έχει ο όρος $\frac{1}{\tau i}$.

3.3.4 Συμπεριφορά ελεγκτή σε σύστημα με ημιτονοειδείς μεταβλητές εισόδου

Παρακάτω παρουσιάζεται το κλειστό σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα, το οποίο απεικονίζεται σε απλοποιημένη διαγραμματική μορφή (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 : Απλοποιημένο σχήμα ελέγχου κλειστού βρόχου του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας

- Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι η K(s)
- Η συνάρτηση μεταφοράς του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας είναι η Gi(s)

Η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου είναι :

$$G(s) = \frac{i(s)}{iref(s)} = \frac{H(s)}{1+H(s)}, \ \text{με} \ H(s) = K(s) * Gi(s) \qquad (3.7)$$

Η απόκριση συχνότητας του κλειστού συστήματος μας, το οποίο είναι γραμμικό και χρονικά αναλλοίωτο, είναι :

$$G(s)|_{s=j\omega} = \frac{H(j\omega)}{1+H(j\omega)} \qquad (3.8)$$

Και σε πολικές συντεταγμένες : $G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\delta}$ (3.9)

Σύμφωνα με τον ορισμό της απόκρισης συχνότητας, όταν ένα ημιτονοειδές σήμα, μιας συχνότητας ωο, εισέρχεται σε ένα γραμμικό-χρονικά αμετάβλητο (LTI) σύστημα, το σήμα εξόδου του συστήματος έχει την ίδια συχνότητα με το σήμα διέγερσης, το πλάτος του είναι ίσο με το πλάτος του σήματος εισόδου διαιρεμένο με το $|G(j\omega o)|$ και η φάση του είναι αυτή του σήματος εισόδου με επιπλέον καθυστέρηση δ.Για να ακολουθεί το σήμα εξόδου το σήμα αναφοράς με μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης, πρέπει το πλάτος της συνάρτησης μεταφοράς $|G(j\omega o)|$ να είναι ίσο με τη μονάδα και η καθυστέρηση δ να είναι ίση με μηδέν. Με βάση την εξίσωση (3.8), αυτό επιτυγχάνεται όταν το κέρδος ανοιχτού βρόχου $|H(j\omega o)|$ είναι άπειρο, στην συχνότητα του σήματος αναφοράς.

Στο δίκτυο που γίνεται η προσομοίωση, η εισερχόμενη διαταραχή στο σύστημα Vs, αντιστοιχεί στην φασική τάση του δικτύου, η οποία ως γνωστόν είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου σταθερής κυκλικής συχνότητας ωο.

Το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα της γραμμής. Το ωο είναι σταθερό αφού και η συχνότητα του δικτύου f είναι σταθερή 50Hz. Έτσι ο ελεγκτής θα πρέπει να ακολουθεί το σήμα αναφοράς :

$$iref(t) = Icos(\omega_o t + \varphi) * u(t) \qquad (3.10)$$

όπου:

- I, το πλάτος του σήματος αναφοράς
- φ, η αρχική φάση και
- u(t), η μοναδιαία βηματική συνάρτηση

Αν η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου του συστήματος δίνεται από την (3.6), η έξοδος στη μόνιμη μορφή θα είναι:

$$i(t) = \frac{I}{\sqrt{1+(\tau i\omega o)^2}} cos(\omega o t + \varphi + \delta) \qquad (3.11)$$

με $\delta = -tan^{-1}(\tau i\omega o)$, η μετατόπιση φάσης. (3.12)

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, με έναν PI ελεγκτή, το ρεύμα εξόδου i ακολουθεί το ρεύμα αναφοράς με σφάλματα τόσο στο πλάτος όσο και στην φασική γωνία. Το ρεύμα εξόδου είναι αντιστρόφως ανάλογο με τον όρο $\sqrt{1+(\tau i \omega o)^2}$ οπότε το πλάτος του είναι μικρότερο από αυτό του ρεύματος αναφοράς. Επίσης, το ρεύμα i έπεται του $iref$ κατά την γωνία δ. Και τα δύο σφάλματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή $(\tau i \omega o)^2$ άρα και από το τi. Η δυνατότητα του συστήματος κλειστού βρόχου να ακολουθεί, με μικρό σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς εξαρτάται από το εύρος ζώνης, $\frac{1}{\tau i}$, του συστήματος.

Οπότε, ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς μπορεί να ακολουθηθεί με αμελητέα σφάλματα στο πλάτος και στη φασική γωνία, μόνο όταν η τιμή του τi είναι ικανοποιητικά μικρή. Ωστόσο, η επιλογή μικρής τιμής για το τi μπορεί να μην είναι εφικτή εξαιτίας πρακτικών περιορισμών του συστήματος ή και απαιτήσεων.

Για μικρότερα σφάλματα κατά τον έλεγχο ημιτονοειδών σημάτων, χρειάζεται ένας ελεγκτής με πιο περίπλοκη συνάρτηση μεταφοράς, μεγαλύτερης τάξης, κάτι που δεν είναι επιθυμητό, αλλά και να σχεδιάσουμε έναν βρόχο ελέγχου με πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Ωστόσο, πρέπει να κρατήσουμε το εύρος ζώνης του βρόχου ικανοποιητικά μικρό για να μην επηρεάζεται το δίκτυο και η ποιότητα των χαρακτηριστικών μεγεθών του, από την διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα.

Σε τριφασικά συστήματα με μετατροπείς πηγής τάσης συχνά απαιτείται να παρακολουθείται το σήμα αναφοράς, με πολύ μικρά σφάλματα μόνιμης κατάστασης, το οποίο παράλληλα υπόκειται σε διάφορες ταχείες μεταβολές. Για να εξυπηρετήσουμε αυτόν τον σκοπό απαιτείται ένας ελεγκτής με απλοποιημένη συνάρτηση. Ο αποτελεσματικός έλεγχος του ανιστροφέα θα γίνει χρησιμοποιώντας έναν απλοποιημένο ελεγκτή, με μικρό εύρος ζώνης, ο οποίος θα ακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια το μεταβαλλόμενο σήμα αναφοράς.

Αυτό θα πραγματοποιηθεί με την μετατροπή των ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς σε συνεχή (DC), έτσι ώστε όταν χρησιμοποιήσουμε έναν PI ελεγκτή ο οποίος παρουσιάζει την απαραίτητη συμπεριφορά, όταν δίνεται σε αυτόν ως διέγερση ένα συνεχές σήμα.

3.4 Μετασχηματισμός ημιτονοειδών σημάτων σε DC

3.4.1 Αναπαράσταση συμμετρικών τριφασικών σημάτων με φασιθέτες χώρου

Έχουμε τα εξής συμμετρικά τριφασικά σήματα :

- $fa(t) = \hat{f}cos(\omega\tau\ +\ \theta o)$,
- $fb(t) = \hat{f}cos(\omega\tau\ +\ \theta o\ -\ \frac{2\pi}{3})$
- $fc(t) = \hat{f}cos(\omega\tau\ +\ \theta o\ -\ \frac{4\pi}{3}))$, (3.13)

Με $\hat{f}$ το πλάτος, ω τη κυκλική συχνότητα και θο την αρχική φάση του ημιτονοειδούς σήματος. Προφανώς και οι τρείς φάσεις θα έχουν ίδιο πλάτος και κυκλική συχνότητα, και κάθε μία φάση θα έχει διαφορά φάσης από την επόμενη 120 μοίρες.

Η αναπαράσταση των τριών αυτών σημάτων με φασιθέτη χώρου είναι η :

$$\vec{f}(\mathrm{t}) = \frac{2}{3}\left[e^{j0}\mathrm{fa}(\mathrm{t}) + e^{j\frac{2\pi}{3}}\mathrm{fb}(\mathrm{t}) + e^{j\frac{4\pi}{3}}\mathrm{fc}(\mathrm{t})\right] \tag{3.14}$$

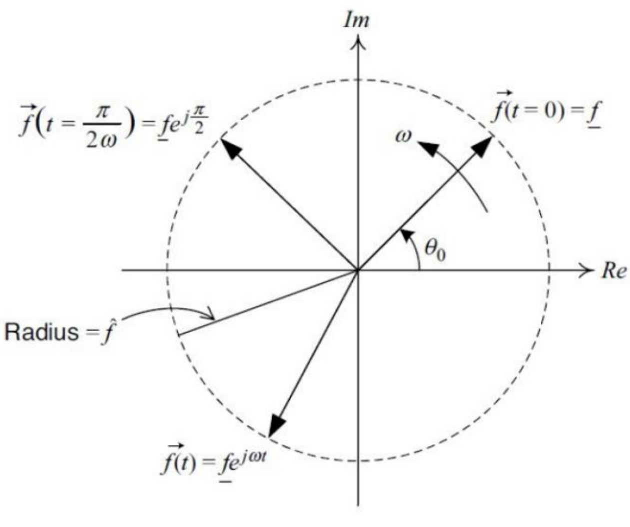
Τοποθετώντας στην (3.14) τις εξισώσεις (3.13) και χρησιμοποιώντας τις ταυτότητες $\cos\theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ και $e^{j0} + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{4\pi}{3}} = 0$

Προκύπτει πως :

$$\vec{f}(\mathrm{t}) = (\hat{f}e^{j\theta o})\, e^{j\omega t} = \tilde{f}e^{j\omega t}, \;\; \text{με} \;\; \tilde{f} = (\hat{f}e^{j\theta o}) \tag{3.15}$$

Το πλάτος $\tilde{f}$, αποτελεί μιγαδικό αριθμό και μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα διάνυσμα στο μιγαδικό επίπεδο. Όταν το $\tilde{f}$ είναι σταθερός μιγαδικός αριθμός, ανιστοιχεί στον κλασσικό φασιθέτη που χρησιμοποιείται για την ανάλυση γραμμικών κυκλωμάτων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους. Στην περίπτωση αυτή, το πέρας του διανύσματος κινείται στην περιφέρεια κύκλου με κέντρο την αρχή των αξόνων του μιγαδικού επιπέδου.

Μέσω της (3.15), ο φασιθέτης χώρου $\vec{f}(\mathrm{t})$ αναπαριστά τον φασιθέτη $\tilde{f}$ ο οποίος παράλληλα περιστρέφεται αντιωρολογιακά, έχοντας κυκλική συχνότητα ω.
Η αναπαράσταση αυτή του $\vec{f}(\mathrm{t})$ διατηρεί την μορφή της και στην περίπτωση που το $\hat{f}$ δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται. Οπότε, όταν το $\hat{f}$ είναι συνάρτηση του χρόνου, το ίδιο θα είναι και ο φασιθέτης $\tilde{f}$ [45].



Σχήμα 3.8 : Αναπαράσταση φασιθετών στο μιγαδικό επίπεδο

Ο ορισμός των φασιθετών χώρου μπορεί να επεκταθεί ώστε να αναπαριστά ένα τριφασικό σύστημα συμμετρικών σημάτων, με μεταβαλλόμενη συχνότητα.

Έστω το τριφασικό συμμετρικό σύστημα, στο οποίο η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται:

$$f\alpha(t) = \hat{f}(t)\cos[\theta(t)], \quad fb(t) = \hat{f}(t)\cos[\theta(t) - \frac{2\pi}{3}], \quad fc(t) = \hat{f}(t)\cos[\theta(t) - \frac{4\pi}{3}] \tag{3.16}$$

Και $\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega(\tau)dt$

Μέσω της (3.14), και των παραπάνω εξισώσεων καταλήγουμε στην γενική μορφή του χωρικού φασιθέτη:

$$\vec{f}(t) = (\hat{f}e^{j\theta(t)}) \tag{3.17}$$

Οι εξισώσεις των τριφασικών σημάτων μπορούν να προκύψουν από τον φασιθέτη μέσω των παρακάτων εξισώσεων:

$$fa(t) = Re\,(\vec{f}(t)e^{-j0}),\; fb(t) = Re\,(\vec{f}(t)e^{-j\frac{2\pi}{3}}),\; fc(t) = Re\,(\vec{f}(t)e^{-j\frac{4\pi}{3}}) \tag{3.18}$$

3.4.2 Μετασχηματισμός Clarke και αβ-επίπεδο

Ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα, όπως είδαμε παραπάνω, μπορεί να αναπαρασταθεί και να περιγραφεί πλήρως από τους χωρικούς φασιθέτες, οι οποίοι εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες. Ωστόσο για την εφαρμογή ελέγχου σε ένα τριφασικό σύστημα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται εξισώσεις και απεικονίσεις στο Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων όπου, καλείσαι να διαχειριστείς πραγματικές συναρτήσεις του χρόνου.

Στο σημείο αυτό, θα περάσουμε από το μιγαδικό επίπεδο και τους φασιθέτες χώρου στο αβ πεδίο το οποίο είναι δισδιάστατο , μέσω της χρήσης του μετασχηματισμού Clarke.

Ο φασιθέτης $\vec{f}(t)$ μπορεί να αναλυθεί σε:

$$\vec{f}(t) = fa(t) + jf\beta(t) \tag{3.19}$$

- Το fa αναφέρεται ως συνιστώσα του άξονα α του φασιθέτη $\vec{f}(t)$
- Το $f\beta$, αντίστοιχα αναφέρεται ως συνιστώσα του άξονα β.

Μέσω της (3.19) και της (3.14) και αν εξισώσουμε πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτει ο μετασχηματισμός από το abc στο αβ πεδίο, ο οποίος είναι ο εξής :

$$\begin{bmatrix} fa(t) \\ f\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathrm{C} \begin{bmatrix} fa(t) \\ fb(t) \\ fc(t) \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

$$\text{με } \mathrm{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Μέσω των (3.18), (3.19) μπορούμε να εκφράσουμε τα σήματα $fa(t)$, $fb(t)$, $fc(t)$ συναρτήσει των συνιστωσών $fa(t)$, $f\beta(t)$, και να προκύψει ο αντίστροφος μετασχηματισμός. (από το αβ στο abc πεδίο)

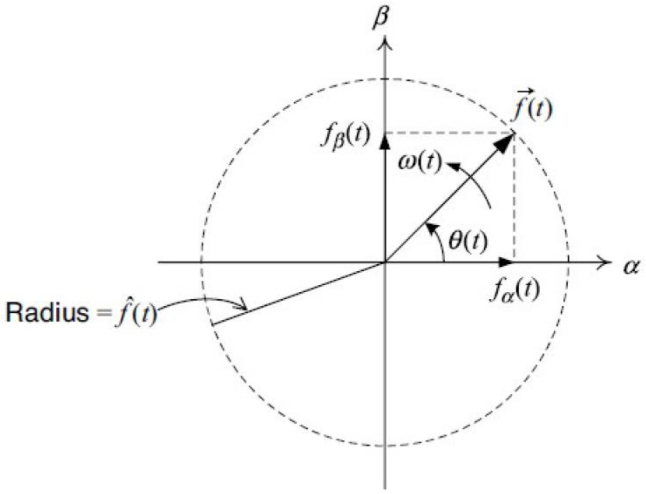
Έχουμε:

$$\begin{aligned} fa(t) &= Re\left[\left(fa(t) + jf\beta(t)\right)e^{-j0}\right] = fa(t) \\ fb(t) &= Re\left[\left(fa(t) + jf\beta(t)\right)e^{-j\frac{2\pi}{3}}\right] = -\frac{1}{2}fa(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}f\beta(t) \\ fc(t) &= Re\left[\left(fa(t) + jf\beta(t)\right)e^{-j\frac{4\pi}{3}}\right] = -\frac{1}{2}fa(t) - \frac{\sqrt{3}}{2}f\beta(t) \end{aligned} \tag{3.22}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις γράφονται σε μορφή πινάκων:

$$\begin{bmatrix} fa(t) \\ fb(t) \\ fc(t) \end{bmatrix} = C^T \begin{bmatrix} fa(t) \\ f\beta(t) \end{bmatrix} \quad (3.23), \quad \text{με } C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \tag{3.24}$$

Οι συνιστώσες $fa(t)$ και $f\beta(t)$ είναι οι προβολές του διανύσματος $\vec{f}(t)$ στον πραγματικό και φανταστικό άξονα αντίστοιχα (Σχήμα 3.9). Έτσι μπορούμε να μετονομάσουμε τον πραγματικό και φανταστικό άξονα σε α και β.



Σχήμα 3.9 : Απεικόνιση φασιθέτη $\vec{f}(t)$ στο αβ – επίπεδο

Μέσω του παραπάνω σχήματος προκύπτει πως :

$\hat{f}(t) = \sqrt{fa(t)^2 + f\beta(t)^2}$

$\cos[\theta(t)] = \dfrac{fa(t)}{\hat{f}(t)}$ ή $fa(t) = \hat{f}(t)\cos[\theta(t)]$ (3.25)

$\sin[\theta(t)] = \dfrac{f\beta(t)}{\hat{f}(t)}$ ή $f\beta(t) = \hat{f}(t)\sin[\theta(t)]$

Οι τριφασικές εξισώσεις τάσης και ρεύματος εκφρασμένες στο αβ – επίπεδο :

$\vec{u}(t) = u\alpha(t) + ju\beta(t)$

$\vec{\imath}(t) = i\alpha(t) + ji\beta(t)$

Η στιγμιαία φαινόμενη ισχύς : $s(t) = \vec{u}(t) * \vec{\imath}(t)$

Η στιγμιαία ενεργός ισχύς: $p(t) = \frac{3}{2}[ua(t)ia(t) + u\beta(t)i\beta(t)]$ (3.26)

Η στιγμιαία άεργός ισχύς: $q(t) = \frac{3}{2}[-ua(t)i\beta(t) + u\beta(t)i\alpha(t)]$

3.4.3 Μετασχηματισμός Park και dq-επίπεδο

Ενώ έγινε μεταφορά από τις πολικές συντεταγμένες και τους φασιθέτες στο καρτεσιανό επίπεδο, οι συνιστώσες των τριφασικών σημάτων στο αβ - επίπεδο είναι και πάλι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου. Όμως, δεν είναι εφικτό να επιτευχθεί αποδοτικός έλεγχος του συστήματος, όταν τα σήματα εισόδου είναι ημιτονοειδή. Έτσι, μέσω του μετασχηματισμού Park θα γίνει μεταφορά στο πεδίο dq.

Διάφορα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης ισχύος αναλύονται στο dq-επίπεδο, οπότε η αναπαράσταση των μετατροπέων και των συστημάτων ελέγχου τους στο dq πεδίο, μας δίνει την δυνατότητα να εφαρμόσουμε μεθοδολογίες που αφορούν ηλεκτρικά συστήματα. Όταν ο έλεγχος εφαρμόζεται στο πεδίο dq, το πρόβλημα της παρακολούθησης ημιτονοειδών σημάτων αναφοράς μετασχηματίζεται σε πρόβλημα παρακολούθησης DC σημάτων. Οπότε, η χρήση ενός PI ελεγκτή είναι εφικτή.

Έχουμε το φασιθέτη χώρου, εκφρασμένο στις συνιστώσες α,β:

$$\vec{f}(t) = fa(t) + jf\beta(t)$$

Ο μετασχηματισμός από αβ – πεδίο σε dq :

$$fd + \mathrm{j}fq = [fa(t) + \mathrm{j}f\beta(t)]e^{-j\varepsilon(t)} \tag{3.27}$$

Όπου ισοδυναμεί με την μετατόπιση φάσης του $\vec{f}(t)$ κατά γωνία -ε(t). Στην γενική περίπτωση όπου μπορεί να μεταβάλλεται και η συχνότητα του συστήματος, η γενική μορφή του $\vec{f}(t)$ είναι η:

$$\vec{f}(t) = fa(t) + jf\beta(t) = \hat{f}(t)e^{j[\theta o + \int \omega(\tau)d\tau]} \tag{3.28}$$

με $\varepsilon(t) = \varepsilon o + \int \omega(\tau)d\tau$ και μέσω των (3.19) και (3.27) έχουμε πως :

$$fd + \mathrm{j}fq = \hat{f}(t)e^{j(\theta o - \varepsilon o)} \tag{3.29}$$

Το οποίο είναι σταθερός μιγαδικός αριθμός, οπότε οι συνιστώσες των αντίστοιχων τριφασικών σημάτων είναι DC. Αυτό ισχύει με την προϋπόθεση ότι τα $d\theta(t)/dt$ και $d\varepsilon(t)/dt$ πρέπει να είναι ίσα (τα θ(t) και ε(t) δεν πρέπει να είναι απαραίτητα ίσα).

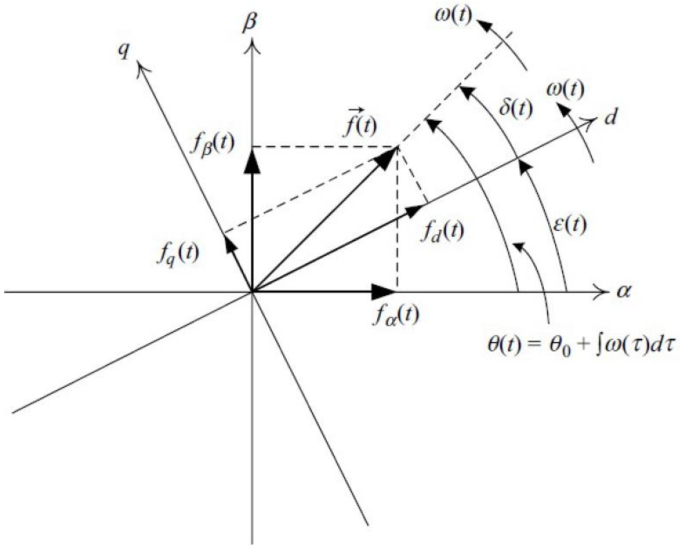
Ο αντίστροφος μετασχηματισμός, για να περάσουμε από το dq πεδίο στο αβ, βρίσκεται από την σχέση (3.27) με πολλαπλασιασμό με το $e^{j\varepsilon(t)}$, οπότε προκύπτει:

$$\vec{f}(t) = fa(t) + jf\beta(t) = (fd + jfq)e^{j\varepsilon(t)} \tag{3.30}$$

ή $\vec{f}(t) = fd(1 + 0j)e^{j\varepsilon(t)} + fq(0 + 1j)e^{j\varepsilon(t)}$ (3.31)

Μέσω της (3.31), παρατηρούμε πως οι συνιστώσες του διανύσματος $\vec{f}(t)$, fd και fq, αναπαρίστανται σε ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων, όπου οι άξονες και τα μοναδιαία διανύσματα $(1+0j)e^{j\varepsilon(t)}$ και $(0+1j)e^{j\varepsilon(t)}$ συμπίπτουν. Τα (1+0j) και (0+1j) είναι τα μοναδιαία διανύσματα που βρίσκονται πάνω στους α, β άξονες του αβ-επιπέδου, αντίστοιχα.

Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι συνιστώσες του διανύσματος $\vec{f}(t)$ βρίσκονται σε ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα $d\varepsilon(t)/dt$ σε σχέση με το αβ-επίπεδο. Το dq αναφέρεται και ως περιστρεφόμενο επίπεδο αναφοράς, και η ταχύτητα περιστροφής του dq πεδίου επιλέγεται ίση με αυτή του διανύσματος $\vec{f}(t)$ (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10 : Αναπαράσταση των dq – αβ επιπέδων σε κοινό διάγραμμα

Τα στοιχεία του κοινού διαγράμματος των επιπέδων dq – αβ:

- ε(t), είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο αβ και dq
- ω(t) = dθ(t)/dt = dε(t)/dt, είναι η ταχύτητα περιστροφής του $\vec{f}(t)$ και του επιπέδου dq
- δ(t), είναι η γωνία του $\vec{f}(t)$ από τον άξονα d
- θ(t) = δ(t) + ε(t), είναι η γωνία του $\vec{f}(t)$ από τον άξονα α

Ο μετασχηματισμός από το αβ – επίπεδο στο dq , μέσω της ταυτότητας Euler $e^{j\varphi}$ = cos(φ) + jsin(φ), σε μορφή πινάκων :

$$\begin{bmatrix} fd(t) \\ fq(t) \end{bmatrix} = R\ [\varepsilon(t)] \begin{bmatrix} f\alpha(t) \\ f\beta(t) \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

μέ $R[\varepsilon(t)]=\begin{bmatrix} cos\varepsilon(t) & sin\varepsilon(t) \\ -sin\varepsilon(t) & cos\varepsilon(t) \end{bmatrix}$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός από το dq στο αβ – επίπεδο, σε μορφή πινάκων :

$$\begin{bmatrix} fa(t) \\ f\beta(t) \end{bmatrix} = R^{-1}[\varepsilon(t)] \begin{bmatrix} fd(t) \\ fq(t) \end{bmatrix}, \tag{3.33}$$

με $R^{-1}[\varepsilon(t)] = R[-\varepsilon(t)] = \begin{bmatrix} cos\varepsilon(t) & sin\varepsilon(t) \\ -sin\varepsilon(t) & cos\varepsilon(t) \end{bmatrix}$

Μέσω της (3.20) και της (3.32), προκύπτει ο μετασχηματισμός από το abc στο dq επίπεδο:

$$\begin{bmatrix} fd(t) \\ fq(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} R\ [\varepsilon(t)] C \begin{bmatrix} fa(t) \\ fb(t) \\ fc(t) \end{bmatrix} \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} fd(t) \\ fq(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T\ [\varepsilon(t)] \begin{bmatrix} fa(t) \\ fb(t) \\ fc(t) \end{bmatrix} \tag{3.34}$$

$$\text{Με } T\ [\varepsilon(t)] = R\ [\varepsilon(t)] C = \begin{bmatrix} cos\varepsilon(t) & \cos[\varepsilon(t) - \frac{2\pi}{3}] & \cos[\varepsilon(t) - \frac{4\pi}{3}] \\ sin\varepsilon(t) & \sin[\varepsilon(t) - \frac{2\pi}{3}] & \sin[\varepsilon(t) - \frac{4\pi}{3}] \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

Ο μετασχηματισμός από το dq επίπεδο απευθείας στο abc προκύπτει αν αντικαταστήσουμε την σχέση (3.33) στην σχέση (3.23) :

$$\begin{bmatrix} fa(t) \\ fb(t) \\ fc(t) \end{bmatrix} = T\ [\varepsilon(t)]^T \begin{bmatrix} fd(t) \\ fq(t) \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

$$\text{Με } T\ [\varepsilon(t)]^T = C^T \mathrm{R}[-\varepsilon(t)] \begin{bmatrix} cos\varepsilon(t) & sin\varepsilon(t) \\ \cos\left[\varepsilon(t) - \frac{2\pi}{3}\right] & \sin[\varepsilon(t) - \frac{2\pi}{3}] \\ \cos\left[\varepsilon(t) - \frac{4\pi}{3}\right] & \sin[\varepsilon(t) - \frac{4\pi}{3}] \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

Παράλληλα μέσω του Σχήματος 3.10 προκύπτουν οι σχέσεις :

- $\hat{f}\ (t) = \sqrt{fd(t)^2 + fq(t)^2}$,
- $\sin[\delta(t)] = \frac{fq(t)}{\hat{f}\ (t)} = \frac{fq(t)}{\sqrt{fd(t)^2 + fq(t)^2}}$ ή $fq(t) = \hat{f}\ (t)\sin[\delta(t)]$ (3.38)
- $\cos[\delta(t)] = \frac{fd(t)}{\hat{f}\ (t)} = \frac{fd(t)}{\sqrt{fd(t)^2 + fq(t)^2}}$ ή $fd(t) = \hat{f}\ (t)\cos[\delta(t)]$
- Με δ(t) = θ(t) – ε(t).

Οι $fd(t)$, $fq(t)$ απλοποιούνται σε DC μεγέθη, με την γωνία δ(t) να είναι σταθερή. Το δ(t) είναι η γωνία του διανύσματος $\vec{f}(t)$ με τον άξονα d. Όταν εξαναγκάζουμε το πεδίο dq να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με αυτήν που περιστρέφεται το διανύσματα $\vec{f}(t)$, τότε η γωνία αυτή κρατείται σταθερή.

Εάν, ρυθμίσουμε την αρχική γωνία δ0 να ισούται με το μηδέν, δηλαδή θ(t) = ε(t), τότε για τις συνιστώσες θα ισχύει πως $fd(t) = \hat{f}(t)$ και $fq(t) = 0$. Αν εκφράσουμε τα τριφασικά ρεύματα και τις τάσεις στο dq - επίπεδο θα έχουμε :

$\vec{V}(t) = [Vd(t) + jVq(t)]e^{j\varepsilon(t)}$ και $\vec{\imath}(t) = [id(t) + jiq(t)]e^{j\varepsilon(t)}$

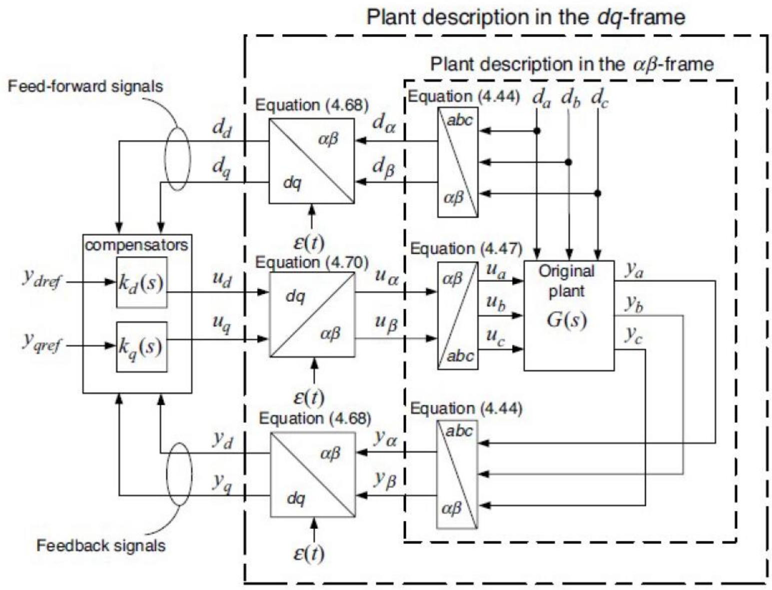
Επίσης,

- Η στιγμιαία φαινόμενη ισχύς: $s(t)=\vec{u}(t)\,\vec{\imath}(t)^{*}$,
- Στιγμιαία ενεργός ισχύς: $P(t)=\frac{3}{2}[Vd(t)id(t)+Vq(t)iq(t)]$ (3.39)
- Στιγμιαία άεργος ισχύς: $Q(t)=\frac{3}{2}[-Vd(t)iq(t)+Vq(t)id(t)]$

Στην περίπτωση που ρυθμίσουμε τις συνιστώσες dq του διανύσματος της τάσης ώστε $vd(t)=\vec{u}(t)$ και $vq(t)=0$, από την (3.39) φαίνεται πως η ενεργός ισχύς γίνεται ευθέως ανάλογη του $id(t)$ και η άεργος ισχύς του $iq(t)$, σχέσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο τριφασικών συστημάτων με μετατροπείς.

3.5 Γενική μορφή του ελέγχου στο dq-πεδίο

Το γενικό διάγραμμα ελέγχου των τριφασικών συστημάτων, που ενσωματώνουν μετατροπείς πηγής τάσης, στο dq πεδίο, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11 : Γενικό διάγραμμα ελέγχου συστημάτων με μετατροπείς πηγής τάσης

Όπως παρατηρούμε, τα βασικά βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε είναι:

- Μετασχηματισμός των τριφασικών ημιτονοειδών σημάτων εισόδου d_a, d_b, d_c του συστήματος στο αβ-πεδίο d_α και d_β - σήματα διαταραχής - και στη συνέχεια στο πεδίο dq d_d, d_q.
- Ο έλεγχος των σημάτων στο dq-πεδίο, όπου τα διαφόρα σήματα είναι DC.
- Η παραγωγή και αντίστροφη μετατροπή των σημάτων ελέγχου από το πεδίο dq u_d, u_q στο αβ u_α, u_β και στη συνέχεια στο abc u_a ,u_b, u_c.
- Η απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος στο πεδίο abc y_a, y_b, y_c.
- Η ανάδραση της απόκρισης του συστήματος στους ελεγκτές, αφού πρώτα κάνουμε τις μετατροπές των σημάτων από το πεδίο abc στο αβ-πεδίο y_α, y_β και στη συνέχεια στο dq y_d, y_q.

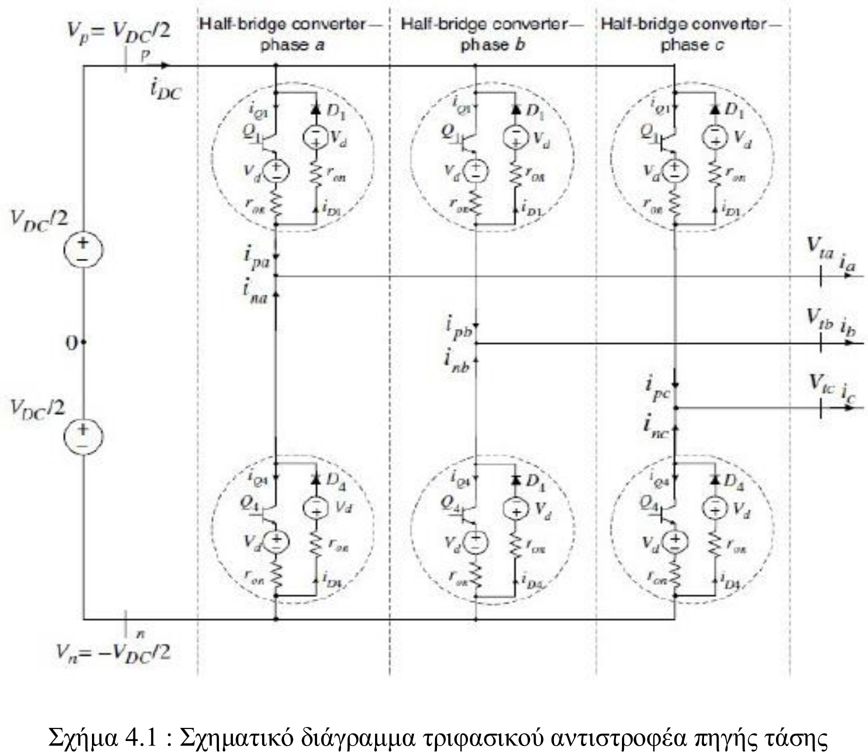
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Έλεγχος ισχύος τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC)

4.1 Κυκλωματική δομή τριφασικού αντιστροφέα

Με παραλληλισμό των κυκλωμάτων τριών πανομοιότυπων μονοφασικών αντιστροφέων ημιγέφυρας, σχηματίζεται το κύκλωμα του τριφασικού αντιστροφεά δύο επιπέδων (Σχήμα 4.1).

Ο τριφασικός αντιστροφέας καλείται δύο επιπέδων, αφού όπως φαίνεται και στο κύκλωμα, στην AC πλευρά κάθε ημιγέφυρας, η τάση εναλλάσσεται μεταξύ των τιμών -VDC και VDC. Επίσης, οι ακροδέκτες στην AC πλευρά κάθε ημιγέφυρας συνδέονται με μία φάση του τριφασικού δικτύου. Οι DC πλευρές, αντίστοιχα, κάθε ημιγέφυρας συνδέονται παράλληλα με μία κοινή DC πηγή τάσης. Τέλος, ο τριφασικός αντιστροφέας προσφέρει αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ της DC πηγής και του AC συστήματος.



Σχήμα 4.1 : Σχηματικό διάγραμμα τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης

4.1.1 Μοντέλο και γενική δομή ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης στο dq-επίπεδο

Σε αυτό το τμήμα του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι δυναμικές εξισώσεις του τριφασικού αντιστροφέα στο dq πεδίο. Η μεταφορά από το abc πεδίο στο dq γίνεται με βάση την θεωρία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3. Μέσω της (3.2) του κεφαλαίου 3, η οποία μας δίνει την τάση στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας, παίρνουμε την τάση στην AC πλευρά της κάθε φάσης του τριφασικού αντιστροφέα.

Έχουμε:

- $Vta(t) = \frac{Vdc}{2} ma(t),$
- $Vtb(t) = \frac{Vdc}{2} mb(t),$ (4.1)
- $Vtc(t) = \frac{Vdc}{2} mc(t)$

Το σήμα διαμόρφωσης πλάτους $mabc(t)$ αποτελεί ένα συμμετρικό τριφασικό σήμα το οποίο εκφράζεται ως:

- $ma(t) = \widehat{m}(t) cos\varepsilon(t),$
- $mb(t) = \widehat{m}(t)\cos[\varepsilon(t) - \frac{2\pi}{3}],$ (4.2)
- $mc(t) = \widehat{m}(t)\cos[\varepsilon(t) - \frac{4\pi}{3}]$
- Το ε(t) περιέχει τη συχνότητα και την αρχική φάση.

Σε μορφή φασιθέτη χώρου, οι (4.2) μπορούν να γραφούν ως :

$$\vec{V}t(t) = \frac{Vdc}{2}\vec{m}(t) \quad (4.3)$$

Με αντίστροφο μετασχηματισμό Park:

$$\vec{V}(t) = [Vtd(t) + jVtq(t)]e^{j\varepsilon(t)} \text{ και } \vec{m}(t) = [md(t) + jmq(t)]\, e^{j\varepsilon(t)} \quad (4.4)$$

Μέσω της (4.3) και της (4.4), έχουμε πως:

$$[Vtd(t) + jVtq(t)]e^{j\varepsilon(t)} = \frac{Vdc}{2}[md(t) + jmq(t)]\, e^{j\varepsilon(t)} \quad (4.5)$$

Αν εξισώσουμε πραγματικά και φανταστικά μέρη προκύπτει:

$$Vtd(t) = \frac{Vdc}{2} md(t) \quad \text{και} \quad Vtq(t) = \frac{Vdc}{2} mq(t) \quad (4.6)$$

Από τις (4.6) παρατηρούμε ότι οι $V_{td}(t)$ και $V_{tq}(t)$ συνιστώσες της τάσης στην AC πλευρά του τριφασικού αντιστροφέα είναι ευθέως ανάλογες με τις συνιστώσες $m_{d(t)}$, $m_q(t)$, αντίστοιχα, του σήματος διαμόρφωσης, με σταθερά αναλογίας $\frac{Vdc}{2}$.

Οπότε, το τριφασικό σύστημα ελεγκτή - αντιστροφέα στο dq πεδίο, περιγράφεται από δύο γραμμικά υποσυστήματα. Οι ισχείς στην DC και AC πλευρά των αντιστροφέων είναι περίπου ίσες (αν αμελήσουμε τις εσωτερικές απώλειες ισχύος εξαιτίας των διακοπτικών στοιχείων), οπότε :

$P_{DC}(t) = P_t(t)$ ή

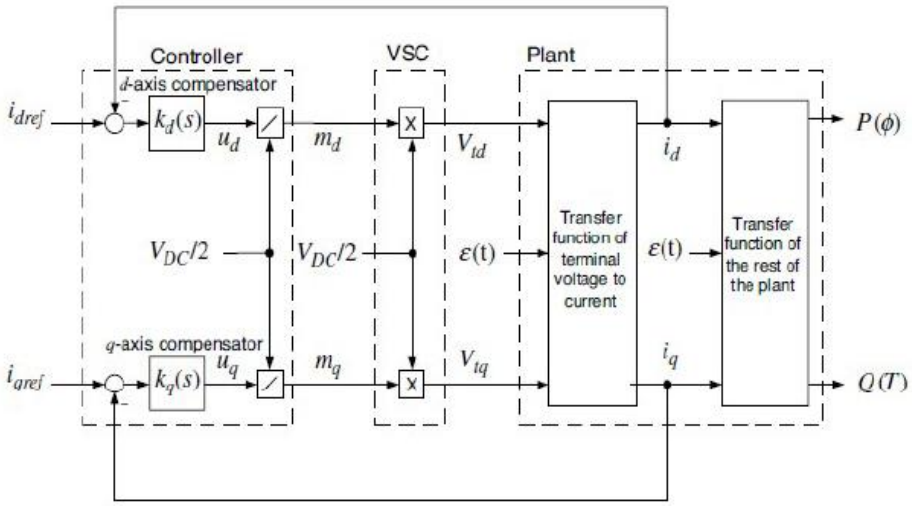
$$V_{DC}(t) i_{DC}(t) = V_{ta}(t) i_{ta}(t) + V_{tb}(t) i_{tb}(t) + V_{tc}(t) i_{tc}(t), \qquad (4.7)$$

Αν εκφράσουμε την ισχύ στο dq – επίπεδο, τότε:

$$V_{DC}(t) I_{DC}(t) = \frac{3}{2}[V_{td}(t) i_d(t) + V_{tq}(t) i_q(t)] \qquad (4.8)$$

Το μοντέλο του τριφασικού αντιστροφέα δυο επιπέδων, στο dq - επίπεδο περιγράφεται από τις (4.5), (4.6). Το Σχήμα 4.2, απεικονίζει ένα γενικό διάγραμμα με απλουστευμένη μορφή του έλεγχο κλειστού βρόχου του τριφασικού αντιστροφέα στο dq πεδίο. Με βάση αυτό, παρατηρούμε ότι στο σύστημα εφαρμόζεται έλεγχος ρεύματος, καθώς αυτό το μέγεθος που μετράται id, iq, δίνεται ως ανάδραση στον ελεγκτή και ρυθμίζεται σύμφωνα με μια επιθυμητή τιμή αναφοράς.

Ο έλεγχος του ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω της ρύθμισης της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα Vtd, Vtq, η οποία ρυθμίζεται μέσω του σήματος διαμόρφωσης md, mq. Στόχος του ελέγχου ρεύματος, είναι η ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος, οι οποίες ανταλλάσσονται μεταξύ του αντιστροφέα και του υπόλοιπου AC δικτύου. Οι τιμές $idref, iqref$ υπολογίζονται με βάση τις επιθυμητές τιμές της ισχύος. Έτσι ολοκληρώνεται το σύστημα ελέγχου, με αυτό το επιπλέον επίπεδο.



Σχήμα 4.2 : Γενικό σχήμα ελέγχου του τριφασικού αντιστροφέα στο dq - επίπεδο

4.2 Έλεγχος της ισχύος του αντιστροφέα

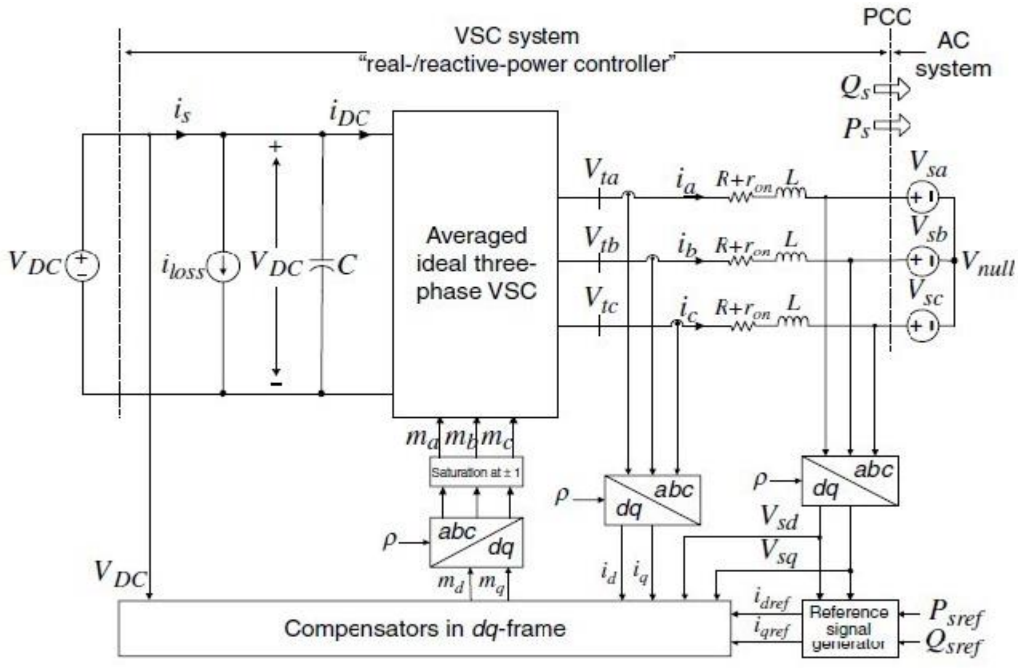
Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργού Ps και αέργου Qs ισχύος στην έξοδο του τριφασικού αντιστροφέα, είναι γνωστές ως αλγόριθμος ελέγχου τάσης (Voltage Control) και αλγόριθμος ελέγχου ρεύματος (Current Control).

Ο έλεγχος τάσης πρωταγωνιστεί σε εφαρμογές υψηλής τάσης και ισχύος και σε μικρότερο βαθμό έχει βρει εφαρμογή στη βιομηχανία. Τα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου είναι η απλότητα του και ο μικρός αριθμός βρόχων ελέγχου. Το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι δεν διαθέτει κλειστό βρόχο ελέγχου του ρεύματος γραμμής του δικτύου, και κατά συνέπεια ο τριφασικός αντιστροφέας δεν προστατεύεται έναντι υπερεντάσεων. Επίσης, το ρεύμα μπορεί να υποστεί μεγάλες ταλαντώσεις, εάν επιβάλλουμε στο σύστημα γρήγορες μεταβολές ισχύος ή συμβούν σφάλματα στην AC πλευρά του συστήματος.

Η δεύτερη μέθοδος είναι γνωστή ως αλγόριθμος ελέγχου ρεύματος. Σε αυτήν την περίπτωση, εφαρμόζεται αυστηρός έλεγχος του ρεύματος της γραμμής, μεταβάλλοντας την τάση στην έξοδο του αντιστροφέα. Με αυτόν τον αλγόριθμο, σε αντίθεση με τον έλεγχο της τάσης, ο αντιστροφέας προστατεύεται από τις πιθανές υπερεντάσεις που μπορεί να προκύψουν. Άλλα πλεονεκτήματα αυτού του αλγορίθμου είναι ότι είναι ανθεκτικός και ανταπεξέρχεται με μεγάλη αξιοπιστία στις μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος. Τέλος, έχει μεγάλη ακρίβεια στον έλεγχο.

Η ενεργός ισχύς Ps ελέγχεται από τη συνιστώσα *id* του ρεύματος της γραμμής και η άεργος ισχύς Qs ελέγχεται από τη συνιστώσα *iq* (Σχήμα 4.3). Αρχικά τα σήματα εισόδου και ανάδρασης μετασχηματίζονται στο πεδίο dq και στη συνέχεια εισάγονται στους ελεγκτές, οι οποίοι με την σειρά τους παράγουν τα σήματα ελέγχου.

Τέλος, τα σήματα ελέγχου μετασχηματίζονται στο πεδίο abc και τροφοδοτούνται στον αντιστροφέα [27].



Σχήμα 4.3 : Διάγραμμα ελέγχου ρεύματος για την ρύθμιση ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης.

Στοιχεία του Σχήματος 4.3:

- V_{DC}, η DC πηγή τάσης, σταθερής τιμής.
- Ps και Qs, η ενεργός και αεργός ισχύς αντίστοιχα, που ανταλλάσσονται με το δίκτυο.
- $Psref$ και $Qsref$, οι τιμές αναφοράς των ισχύων, βάση των οποίων γίνεται ο έλεγχος.
- $Vsabc$, η συμμετρική τριφασική τάση του δικτύου, όπου πλάτος και συχνότητα είναι σταθερά.
- $Vtabc$, συμμετρική τριφασική τάση στην έξοδο του αντιστροφέα.
- R, L, το φίλτρο για μείωση των αρμονικών τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα.
- ron, η αντίσταση αγωγής των διακοπτικών στοιχείων.
- $mabc$, σήματα διαμόρφωσης πλάτους.

4.2.1 Δυναμικό μοντέλο του συστήματος στο dq-πεδίο

Έχουμε τις εξισώσεις των AC φασικών τάσεων του δικτύου :

$$Vsa(t) = \hat{V}scos(\omega ot + \theta o),$$

$$Vsb(t) = \hat{V}scos\left(\omega ot + \theta o - \frac{2\pi}{3}\right), \qquad (4.9)$$

$$Vsc(t) = \hat{V}scos\left(\omega ot + \theta o - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Με $\hat{V}s$ το πλάτος της πηγής τάσης, ω_o η κυκλική συχνότητα του δικτύου και θο, η αρχική φάση της πηγής.

Ο φασιθέτης χώρου της $Vsabc$ είναι:

$$\vec{V}s(t) = \hat{V}se^{j(\omega ot+\theta o)} \qquad (4.10)$$

Η δυναμική συμπεριφορά της AC πλευράς του συστήματος περιγράφεται με τη χρήση φασιθετών χώρου :

$$L\frac{\overrightarrow{di}}{dt} = -(R + ron)\vec{\imath} + \vec{V}t - \vec{V}s \qquad (4.11)$$

Μέσω της (4.10) και (4.11) έχουμε:

$$L\frac{\overrightarrow{di}}{dt} = -(R + ron)\vec{\imath} + \vec{V}t - \hat{V}se^{j(\omega ot+\theta o)} \qquad (4.12)$$

Με αντίστροφο μετασχηματισμό park, και με αντικάσταση στην (4.12), τα

- $\vec{\imath} = (id + jiq)e^{j\varepsilon(t)}$
- $\vec{V}t = (Vtd + jVtq)e^{j\varepsilon(t)}$

εχουμε πως :

$$L\frac{d}{dt}[(id + jiq)e^{j\varepsilon(t)}] = -(R + ron)((id + jiq)e^{j\varepsilon(t)}) + (Vtd + jVtq)e^{j\varepsilon(t)}) - \hat{V}se^{j(\omega ot+\theta o)} \qquad (4.13)$$

Στην συνέχεια διαχωρίζουμε τα πραγματικά και τα φανταστικά μέρη της (4.13) :

$$L\frac{did}{dt} = L\frac{d\varepsilon(t)}{dt}iq - (R + ron)id + Vtd - \hat{V}scos[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)],$$

$$L\frac{diq}{dt} = -L\frac{d\varepsilon(t)}{dt}id - (R + ron)iq + Vtq - \hat{V}ssin[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)] \qquad (4.14)$$

Θέτοντας την μεταβλητή ελέγχου ω(t) = $\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$, έχουμε :

$$L\frac{did}{dt} = L\omega(t)iq - (R + ron)id + Vtd - \hat{V}scos[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)],$$

$$L\frac{diq}{dt} = -L\omega(t)id - (R + ron)iq + Vtq - \hat{V}ssin[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)] \qquad (4.15)$$

Απο εξισώσεις (4.15) έχουμε τα εξής δεδομένα:

- Τα id, iq και $\varepsilon(t)$ είναι οι μεταβλητές κατάστασης .
- Τα Vtd, Vtq και $\omega(t)$ είναι οι είσοδοι ελέγχου.
- Το σύστημα των εξισώσεων (4.15) είναι μη γραμμικό εξαιτίας των όρων $\omega(t)iq$, $\omega(t)iq$, $cos[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)]$ και $sin[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)]$.

Επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για τα ω(t) και ε(t), μπορούμε να γραμμικοποιήσουμε , άρα να απλοποιήσουμε τις εξισώσεις (4.15).

Θέτουμε $\omega(t)=\omega_o$ και $\varepsilon(t)=\omega ot + \theta_o$, οι (4.15) γίνονται :

$$L\frac{did}{dt} = L\omega(t)iq - (R + ron)id + Vtd - \hat{V}s,$$

$$L\frac{diq}{dt} = -L\omega(t)id - (R + ron)iq + Vtq \qquad (4.16)$$

Αυτές οι εξισώσεις περιγράφουν ένα γραμμικό σύστημα δεύτερης τάξης, το οποίο διεγείρεται από την σταθερή είσοδο $\hat{V}s$, πλάτος της τάσης του δικτύου και δίνουν τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.

Επομένως, αν οι Vtd και Vtq είναι DC στην μόνιμη κατάσταση, το ίδιο θα ισχύει και για τις μεταβλητές id, iq. Η σχέση ε(t) = ωot + θο, θα διασφαλίζεται απο το PLL (Phase-Locked Loop).

4.2.2 Phase-Locked Loop (PLL)

Το PLL είναι ένα σύστημα ελέγχου, το οποίο παράγει ένα σήμα εξόδου του οποίου η φάση σχετίζεται με την φάση του σήματος εισόδου [55].

Από το μετασχηματισμό Park ισχύει πως :

$$Vsd + jVsq = \hat{V}se^{j(\omega ot+\theta o)}e^{-j\varepsilon(t)} \quad \text{και} \quad e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + jsin(\varphi)$$

$$Vsd + jVsq = \hat{V}scos[wot + \theta o - \varepsilon(t)] + j\hat{V}\text{ssin}[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)] \qquad (4.17)$$

$Vsd = \hat{V}scos[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)]$, Vsq=$\hat{V}s\sin[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)]$

Μέσω των (4.16) και (4.17) προκύπτει:

$$L\frac{did}{dt} = L\omega(t)iq - (R + ron)id + Vtd - Vsd,$$

$$L\frac{diq}{dt} = -L\omega(t)id - (R + ron)iq + Vtq - Vsq, \qquad (4.18)$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \omega(t)$$

Αν ρυθμίσουμε το $\varepsilon(t) = \omega ot + \theta o$ τότε από την δεύτερη εξίσωση εκ των δύο (4.17) θα ισχύει $Vsq = 0$. Η ρύθμιση αυτή, θα επιτυγχάνεται με βάση την ανάδραση:

$\omega(t) = H(p)Vsq(t)$ (4.19)

Όπου :

$H(p)$ είναι γραμμική συνάρτηση μεταφοράς και $p = \frac{d}{dt}$ είναι ο διαφορικός τελεστής.

Αντικαθιστώντας στην τρίτη εκ των (4.18) τις (4.19) και την δεύτερη εκ των (4.17), έχουμε :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \hat{V}sH(p)\sin[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)] \qquad (4.20)$$

Η δυναμική συμπεριφορά του PLL, περιγράφεται από την (4.20). Αφού το PLL (Σχήμα 4.4) πετυχαίνει την ρύθμιση ε(t)= ωot + θo , το $\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)$ θα είναι σχεδόν μηδεν.

Θεωρούμε έτσι, ότι $\sin[\omega ot+\theta o-\varepsilon(t)] \approx \omega ot+\theta o-\varepsilon(t)$. Άρα η (4.20) γίνεται :

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \hat{V}sH(p)[\omega ot + \theta o - \varepsilon(t)] \qquad (4.21)$$

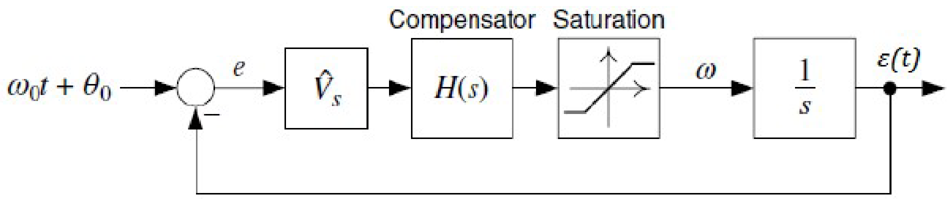
Η παραπάνω σχέση αναπαριστά έναν κλασσικό έλεγχο κλειστού βρόχου :

- με σήμα αναφοράς, το $\omega ot+\theta o$,
- έξοδο, το $\varepsilon(t)$ και
- συνάρτηση μεταφοράς, $\hat{V}sH(p)$.

Αφού με το PLL πετυχαίνουμε την ρύθμιση $\varepsilon(t) = \omega ot + \theta o$ (και $\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \omega o$), οι εξισώσεις (4.17) γίνονται:

$Vsd = \hat{V}s$

$Vsq = 0$



Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα ελέγχου PLL.

4.2.3 Ενεργός και Άεργος ισχύς αντιστροφέα

Στο dq – επίπεδο, στην έξοδο του αντιστροφέα :

Ενεργός ισχύς : $Ps(t) = \frac{3}{2}[Vsd(t)id(t) + Vsq(t)iq(t)]$ (4.22)

Άεργός ισχύς: $Qs(t) = \frac{3}{2}[-Vsd(t)iq(t) + Vsq(t)id(t)]$

Με το PLL, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, θα έχουμε πως:

$Vsd = \hat{V}s$ και $Vsq = 0$, άρα :

$Ps(t) = \frac{3}{2}\hat{V}sid(t),$

$Qs(t) = -\frac{3}{2}\hat{V}siq(t)$ (4.23)

Παρατηρούμε ότι η ενεργός και άεργος ισχύς στην έξοδο του αντιστροφέα μπορούν να ελεγχθούν από τα $id(t)$ και $iq(t)$, αντίστοιχα. Αν λύσουμε τις (4.22) ως προς τις συνιστώσες του ρεύματος και βάλουμε τις επιθυμητές ισχείς που θέλουμε να διοχετεύουμε ή να απορροφούμε από το σύστημα προκύπτει :

$idref(t) = \frac{2}{3\hat{V}s}Psref(t),$

$iqref(t) = -\frac{2}{3\hat{V}s}Qsref(t)$ (4.24)

Είναι εμφανές, πως με αποδοτικό έλεγχο του ρεύματος στις τιμές αναφοράς, δηλαδή $id \approx idref$ και $iq \approx i\,qref$ τότε πετυχαίνουμε και τον αντίστοιχο έλεγχο των ισχύων $Ps \approx Psref$και $Qs \approx Qsref$.

4.2.4 Αλγόριθμος ελέγχου ρεύματος (Current Control)

Οι εξισώσεις (4.16), ως προς md και mq, μας δίνουν :

$md(t) = \frac{2}{Vdc}(ud - L\omega oiq + Vsd)$ ή $md(t) = \frac{2}{Vdc}\left(ud - L\omega oiq + \hat{V}s\right)$

$$mq(t) = \frac{2}{Vdc}(uq - L\omega oid + Vsq) \text{ ή } mq(t) = \frac{2}{Vdc}(uq - L\omega oid) \quad (4.25)$$

Αν στις (4.24), αντικαταστήσουμε τις εισόδους ελέγχου ud και uq, προκύπτει:

$$Vtd(t) = \left(ud - L\omega oiq + \hat{V}s\right),$$
$$Vtq(t) = (uq - L\omega oid) \quad (4.26)$$

Μέσω των (4.25) και (4.16), προκύπτουν οι σχέσεις :

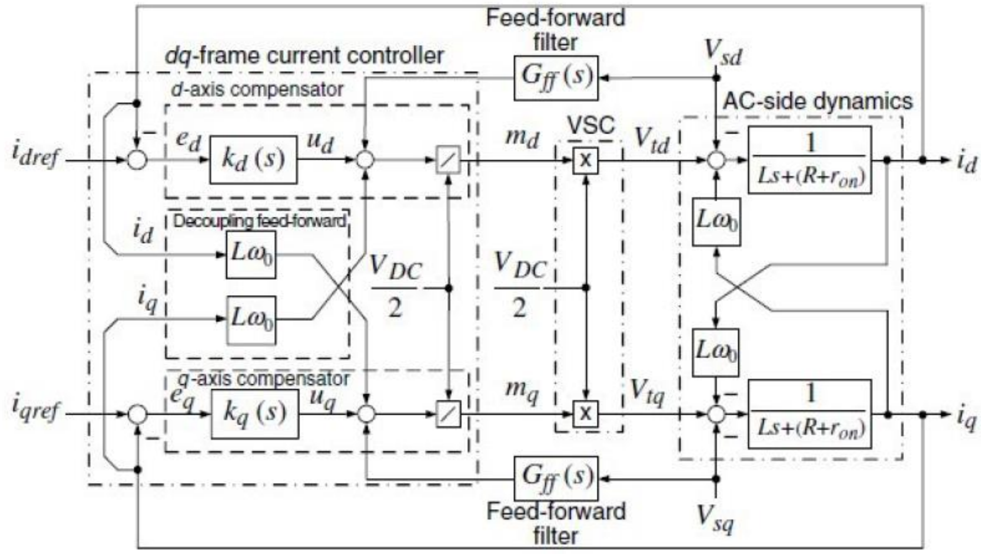
$$L\frac{did}{dt} = -(R + ron)id + ud,$$
$$L\frac{diq}{dt} = -(R + ron)iq + uq \quad (4.27)$$

Τελικά δημιουργήσουμε δύο ασύζευκτες (κάθε εξίσωση περιλαμβάνει μεταβλητές μόνο της μίας συνιστώσας, d ή q), γραμμικές εξισώσεις, δευτέρου βαθμού. Δηλαδή, δύο ανεξάρτητα συστήματα, στα οποία μπορούμε να ελέγχουμε τα id και iq, μέσω των σημάτων ελέγχου ud και uq, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ελέγχου ρεύματος, όπου για κάθε συνιστώσα ρεύματος αντιστοιχεί η ίδια διαδικασία [13].

Αρχικά υπολογίζεται η τιμή αναφοράς του ρεύματος $idref$ από τη (4.24). Στη συνέχεια, μετράται η τιμή του ρεύματος της γραμμής και μετατρέπεται στο πεδίο dq (id). Στον ελεγκτή με συνάρτηση μεταφοράς $kd(s)$, δίνεται ως είσοδος το σφάλμα του ρεύματος, δηλαδή η διαφορά $ed = idref - id$, και στην έξοδό του παρέχεται το σήμα ud.

Από το τελευταίο αφαιρείται ο όρος $L\omega oiq$ και στη συνέχεια διαιρείται με το $\frac{VDC}{2}$ για την παραγωγή του σήματος διαμόρφωσης - σήμα ελέγχου md.

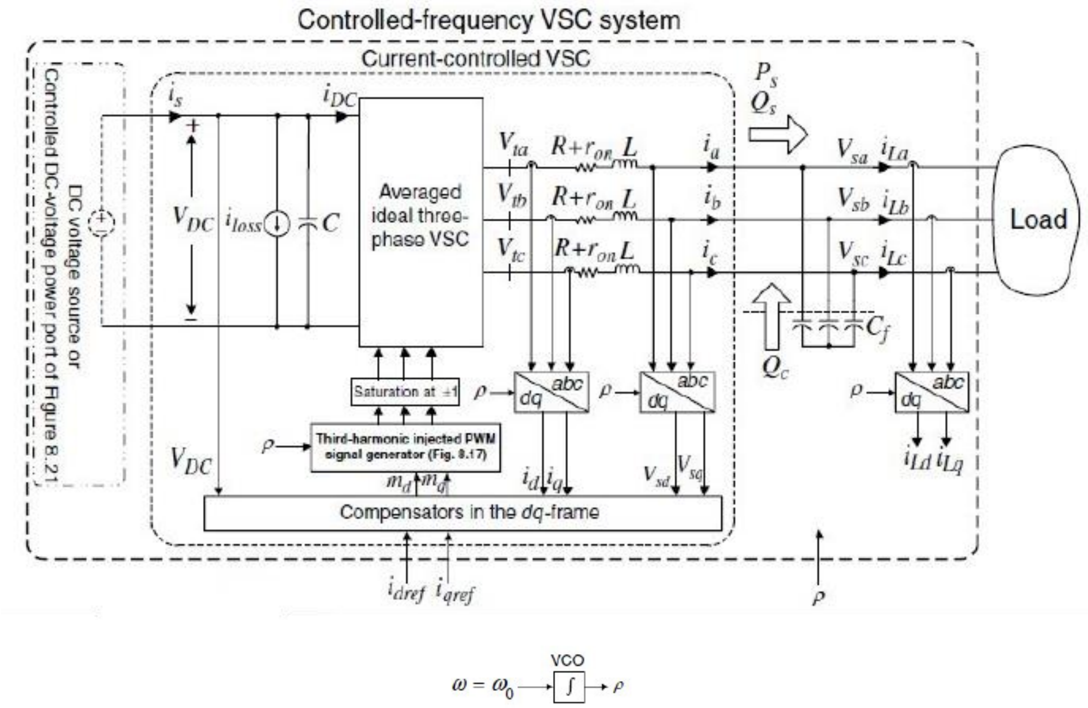
Το σήμα αυτό, αφού μεταφερθεί στο abc πεδίο, δίνεται ως είσοδος στον αντιστροφέα, και είναι υπεύθυνο για την μεταβολή της τάσης στην έξοδό του, Vt. Μέσω των δυναμικών του συστήματος στην AC πλευρά, με κατάλληλη μεταβολή της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, προκύπτει η επιθυμητή μεταβολή του ρεύματος, το οποίο μετράται και επανατροφοδοτείται, κλείνοντας έτσι τον βρόχο ελέγχου.



Σχήμα 4.5 : Διάγραμμα ελέγχου ρεύματος του αντιστροφέα

4.2.5 Έλεγχος τάσης (Voltage Control) σε αντιστροφέα με ελεγχόμενη συχνότητα

Με χρήση του νόμου τάσεων Kirchoff στην AC πλευρά του δικτύου του Σχήματος 4.6, προκύπτουν οι εξισώσεις που είχαμε και στον έλεγχο ρεύματος, και έτσι καταστρώνουμε τον έλεγχο τάσης [55].



Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα συστήματος αντιστροφέα ελεγχόμενης συχνότητας

Στην AC πλευρά του δικτύου, μέσω της σχέσης ρευμάτων Kirchoff, λαμβάνουμε τις εξισώσεις :

$$Cf\frac{dVsa}{dt} = ia - iLa$$

$$Cf\frac{dVsb}{dt} = ib - iLb \qquad (4.28)$$

$$Cf\frac{dVsc}{dt} = ic - iLc$$

Ή σε διανυσματική μορφή :

$$Cf\frac{d\vec{V}s}{dt} = \vec{\imath} - \overrightarrow{\imath L} \qquad (4.29)$$

Στο dq – επίπεδο, με χρήση της $\vec{f} = (fd + jfq)e^{j\rho}$, η (4.29) γίνεται :

$$Cf\frac{d[(Vsd+jVsq)e^{j\rho}]}{dt} = (id + jiq)e^{j\rho} - (iLd + jiLq)e^{j\rho} \qquad (4.30)$$

Με διάσπαση της εξίσωσης (4.30) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος έχουμε :

$$Cf\frac{dVsd}{dt} = Cf(\omega Vsq) + id - iLd$$

$$Cf\frac{dVsq}{dt} = -Cf(\omega Vsd) + iq - iLq \qquad (4.31)$$

Με ω(t) = $\frac{d\rho}{dt}$

Από τις εξισώσεις (4.31), παρατηρούμε ότι :

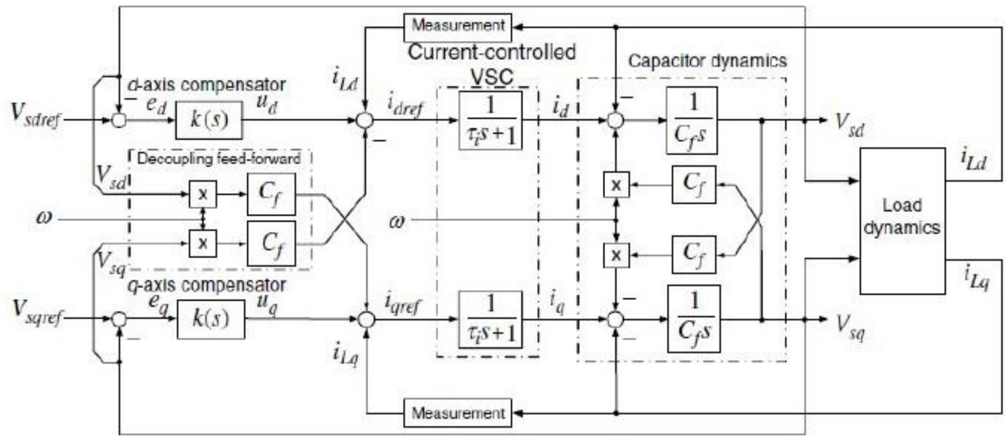
- Τα Vsd, Vsq είναι οι έξοδοι του συστήματος.
- Τα id, iq και ω είναι οι είσοδοι ελέγχου.
- Τα iLd, iLq είναι οι διαταραχές του συστήματος.

Για να ελέγξουμε την τάση Vs ως προς μέτρο και συχνότητα, όπως και στον έλεγχο ρεύματος, θα αποζεύξουμε τις εξισώσεις μεταξύ τους για να μπορούμε να ελέγξουμε τα Vsd, Vsq μέσω των $idref, iqref$:

$$idref = ud - Cf(\omega Vsq) + iLd \qquad (4.32)$$

$$iqref = uq - Cf(\omega Vsd) + iLq$$

Στην πράξη, συγκρίνουμε τα Vsd, Vsq με τα $Vsdref, Vsqref$ και παίρνουμε τα σφάλματα ed, eq τα οποία τροφοδοτούμε σε ένα ελεγκτή ώστε να παράγει τα ud, uq.



Σχήμα 4.7 : Διάγραμμα ελέγχου τάσης αντιστροφέα ελεγχόμενης συχνότητας

Έπειτα, λόγω της απόζευξης που έχουμε κάνει προσθέτουμε τα απαραίτητα σήματα ώστε μέσω των (4.32) να πάρουμε τα $idref, iqref$ τα οποία μέσω της συνάρτησης μεταφοράς του σχήματος που προκύπτει από τη θεωρία του ελέγχου ρεύματος μας δίνουν τα id, iq .

Στην συνέχεια, προσθέτουμε τα απαραίτητα σήματα για να πάρουμε μέσω των (4.31) τα Vsd, Vsq. Παρατηρούμε ότι θέλοντας να οδηγήσουμε τα Vsd, Vsq στις επιθυμητές τιμές, ελέγχουμε συνεχώς τα $idref, iqref$, όπου είναι μία ακόμα μέθοδος για να πάρουμε τα $idref, iqref$ πέρα από την μέθοδο που είδαμε με τις ισχύς στον έλεγχο ρεύματος [28].

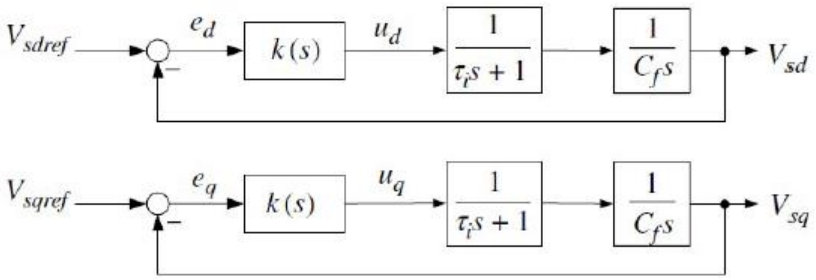
4.2.6 Υπολογισμός των τιμών του PI ελεγκτή για τον έλεγχο τάσης

Έχουμε τη συνάρτηση μεταφοράς του ρεύματος $Gi(s) = \frac{1}{1+ti(s)}$ η οποία έχει μοναδιαίο κέρδος DC. Οπότε, η $(1-Gi(s))$ έχει κέρδος DC μηδέν. Άρα το $Gi(s) = \frac{1}{1+ti(s)}$, για μικρό ts μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο για μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Με βάση αυτό, παίρνουμε τις παρακάτω απλοποιημένες εξισώσεις [55]:

$$\frac{Vsd(s)}{ud(s)} \approx \mathrm{Gi(s)}\frac{1}{Cfs} \quad \text{και} \quad \frac{Vsq(s)}{uq(s)} \approx \mathrm{Gi(s)}\frac{1}{Cfs} \tag{4.33}$$

Οι (4.33) παριστάνουν δύο αποζευγμένα συστήματα όπου τα Vsd, Vsq μπορούν να ελεγχθούν από τα ud, uq αντίστοιχα (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8 : Απλοποιημένο διάγραμμα ελέγχου τάσης

Το σύστημα έχει ένα πόλο στο μηδέν ($s = 0$) και ένα πραγματικό πόλο στο ($s = -\frac{1}{ti}$). Για να έχουμε μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα PI ελεγκτή με συνάρτηση μεταφοράς:

- k(s) = $k\frac{s+z}{s}$ (4.34)

Και το κέρδος του βρόχου:

- l(s) = $\frac{k}{tiCf}(\frac{s+z}{s+ti^{-1}})$ (4.35)

Σε χαμηλές συχνότητες έχουμε $arg\ [l(j\omega m)] \approx -180°$ λόγω του διπλού πόλου στο μηδέν. Με z < ti^{-1} , η γωνία του l($j\omega$) αρχικά φτάνει σε ένα μάξιμουμ δm για συχνότητα ωm και στη συνέχεια προσεγγίζει ασυμπτωτικά τις - 180°.

Τα δm και ωm δίνονται από :

$\delta m = sin^{-1}(\frac{1-tiz}{1+tiz})$ (4.36)

ωm = $\sqrt{zti^{-1}}$

Αν την οριακή συχνότητα ωm τη θέλουμε ίση με κάποια συχνότητα ωc θα πρέπει να τηρείται η σχέση:

$|arg\ [l(j\omega m)]| = |arg\ [l(j\omega c)]|$ = 1 (4.37)

που ικανοποιείται για $k = Cf\omega c$

Αν θέλουμε να τον αναλύσουμε σε κέρδη ki, kp θα έχουμε ότι :

$ki = k * z,$ (4.38)

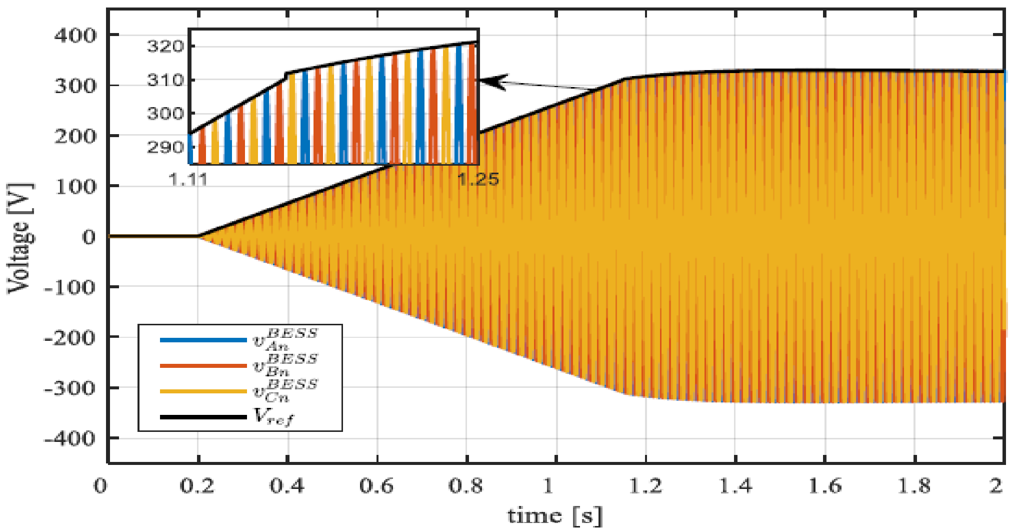
$kp = k$ (4.39)

Παρατηρούμε ότι σε αυτόν τον έλεγχο χρησιμοποιείται και ο έλεγχος ρεύματος (Current Control) με τη διαφορά ότι τα ρεύματα αναφοράς προέρχονται από τον έλεγχο της τάσης και όχι από τις επιθυμητές ισχύς P, Q που θέλουμε.

4.3 Έλεγχος του VSC αντιστροφέα κατά τη διαδικασία του Black-start

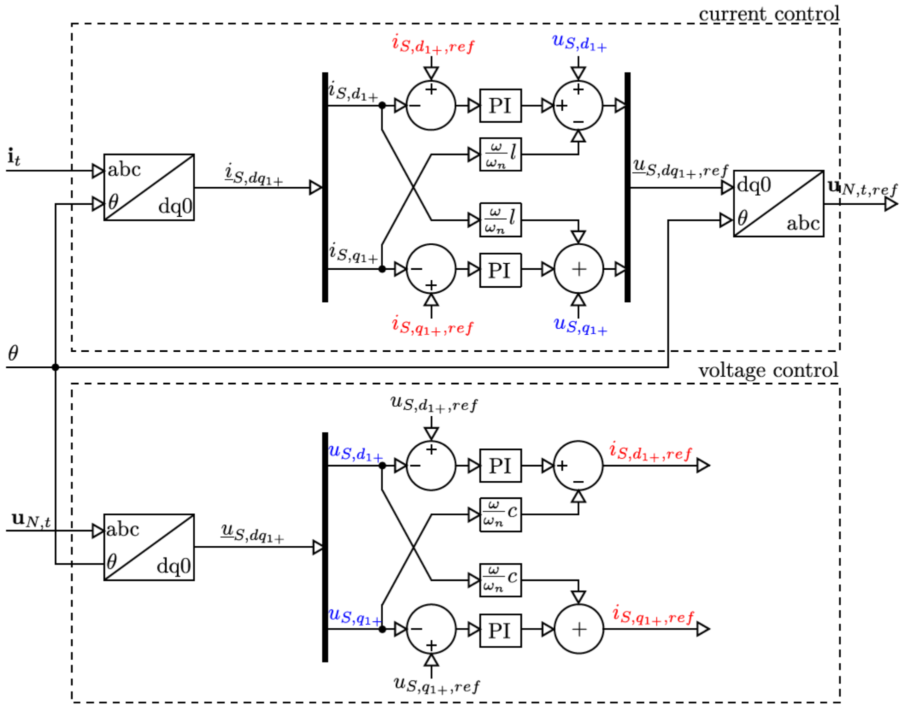
Για την εκτέλεση της διαδικασίας του Black-start, μια τουλάχιστον μονάδα του μικροδικτύου θα πρέπει να έχει την ικανότητα τουλάχιστον να διενεργεί Black-start, δηλαδή να μπορεί να διαμορφώνει τάση και συχνότητα (grid-forming). Υποθέτοντας ότι ένα σύστημα μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας (BESS) είναι αυτή η grid-forming μονάδα, ικανότητα της για Black-start μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν όλα τα στοιχεία και τα συστήματα ελέγχου μπορούν να ενεργοποιηθούν και να διατηρηθούν χωρίς εξωτερική παροχή ισχύος [30]. Η ικανότητα του BESS για Black-start βασίζεται στον έλεγχο που διενεργεί ο VSC του, ο οποίος είναι grid-forming μετατροπέας. Στο Κεφάλαιο 6, θα αναλυθεί η διαδικασία και ο αλγόριθμος για το Black-start ενός μη διασυνδεδεμένου νησιού, το οποίο θα διαθέτει BESS και υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Όταν γίνεται απευθείας εκκίνηση του συστήματος, το inrush current είναι αρκετά μεγάλο για να προκαλέσει πιθανό σφάλμα στους αντιστροφείς του μη διασυνδεδεμένου δικτύου και παραμόρφωση της τάσης εξόδου εξαιτίας των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών του inrush current του μετασχηματιστή. Ένας τρόπος μείωσης των ρευμάτων μαγνήτισης, είναι η σταδιακή αύξηση της τάσης, σε μορφή ράμπας, του αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) όπου συμμετέχει στην διαδικασία της επαναφοράς ηλεκτροδότησης. Η τριφασική τάση στην έξοδο του αντιστροφέα, θα ακολουθεί το σήμα αναφοράς της ράμπας $Vref$ (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Ελεγχόμενη τάση εξόδου από το VSC του BESS κατά την διάρκεια του Black-Start. [35]

Το σήμα αναφοράς της τάσης εισάγεται στον έλεγχο τάσης και έπειτα από συνδυαστικό έλεγχο τάσης-ρεύματος (Σχήμα 4.10) προκύπτει το σήμα ελέγχου του VSC, όπως θα δούμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Με την διαδικασία αυτή ο grid-forming αντιστροφέας λειτουργεί ουσιαστικά σαν πηγή τάσης προκειμένου να ελεγχθεί η τάση και η συχνότητα κατά την διαδικασία του Black-start.



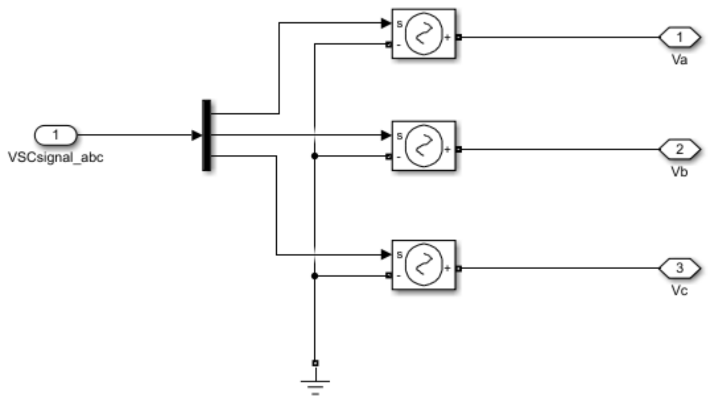
Σχήμα 4.10 : Συνδυαστικός έλεγχος τάσης-ρεύματος του VSC. [30]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μοντελοποίηση των ελέγχων του VSC και προσομοίωση επανεκκίνησης μη διασυνδεδεμένου δικτύου

5.1 Μοντελοποίηση του μη διασυνδεδεμένου δικτύου στο Simulink

Η μοντελοποίηση ξεκινά με το μπλοκ του αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS) ο οποίος προσομοιώνεται με τρεις ελεγχόμενες πηγές τάσης (Σχήμα 5.1). Στο ζυγό που συνδέονται οι τρεις ελεγχόμενες πηγές τάσης, έχουμε ως είσοδο το σήμα διαμόρφωσης *VSCsignal_abc* από τον συνδυαστικό αλγόριθμο ελέγχου.



Σχήμα 5.1 : Μοντελοποίηση Αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) στο Simulink.

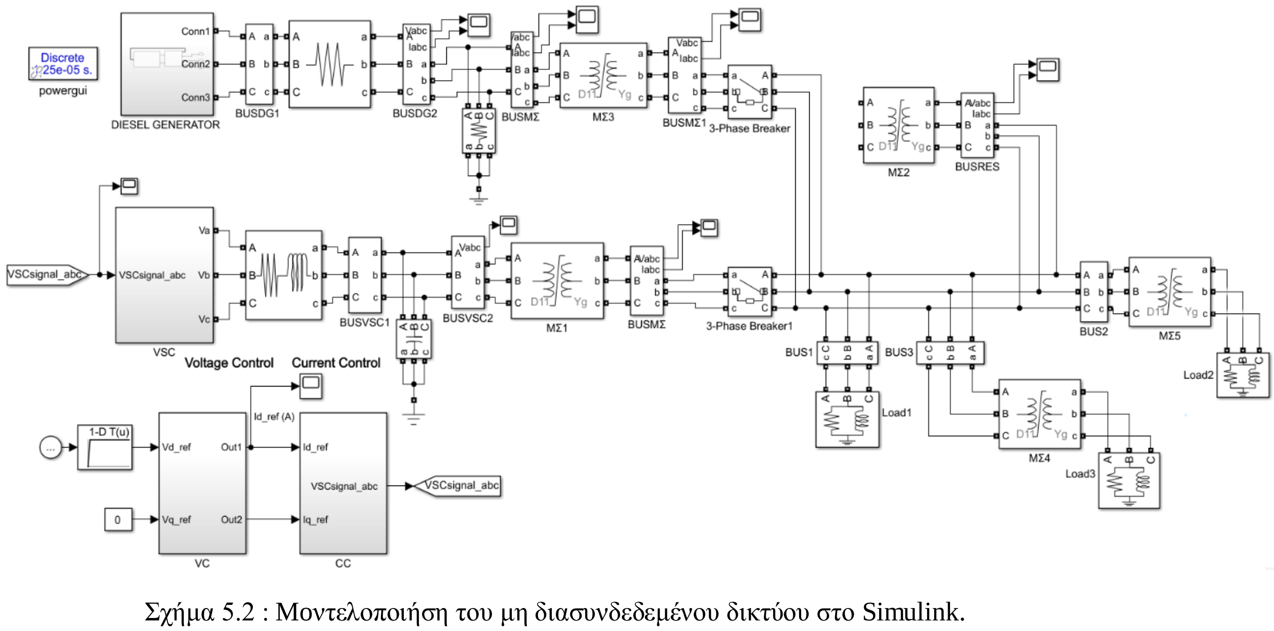
Για τη μοντελοποίηση του συστήματος (Σχήμα 5.2), τοποθετείται σε σειρά με τις ελεγχόμενες πηγές, μια αντίσταση R και μια αντίδραση L, όπου R=0.001 Ω και L=0.01 H. Στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετείται ένας πυκνωτής ως προς τη γη, C=500 μF, δημιουργώντας ένα βαθυπερατό φίλτρο για την περικοπή των αρμονικών του VSC.

Ο αντιστροφέας με το σύστημα αποθήκευσης μπαταριών συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης (15kV) με τον τριφασικό μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης ΜΣ1 συνδεσμολογίας Τριγώνο-Αστέρα-γειωμένο, ονομαστικής ισχύος 2.5MVA και ενεργό τιμή τάσης πρωτεύοντος 400V και δευτερεύοντος 15kV.

Στη συνέχεια, αφου μοντελοποιήθηκε, προστέθηκε στο δίκτυο, μια ντηζελογεννήτρια (Diesel Generator) ονομαστικής ισχύος 3.2MVA, με ονομαστική πολική τάση 400V. Η ντηζελογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσης τάσης με το μετασχηματιστή ανύψωση τάσης ΜΣ3 συνδεσμολογίας Τριγώνο-Αστέρα-γειωμένο, ονομαστικής ισχύος 4MVA και ενεργό τιμή τάσης πρωτεύοντος 400V και δευτερεύοντος 15kV.

Μετά τους μετασχηματιστές των γραμμών της ντηζελογεννήτριας και του συστήματος μπαταριών συνδέεονται τριφασικοί διακόπτές, με εσωτερική αντίσταση Ron=0.001Ω. Δεξιά των διακοπτών, τοποθετήθηκαν οι γραμμές και οι ζυγοί των φορτίων του δικτύου.

Στο ζυγό BUS1, υπάρχει το φορτίο Load1, ονομαστικής ισχύος 700kW και τάσης 15kV. Στο ζυγό BUS2, υπάρχει το φορτίο Load2, ονομαστικής ισχύος 200kW και τάσης 400V όπου τροφοδοτείται από το μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης ΜΣ5 συνδεσμολογίας Τριγώνο-Αστέρα-γειωμένο, ονομαστικής ισχύος 2MVA και ενεργό τιμή τάσης πρωτεύοντος 15κV και δευτερεύοντος 400V. Στο ζυγό BUS3, υπάρχει το φορτίο Load3, ονομαστικής ισχύος 300kW και τάσης 400V όπου τροφοδοτείται από το μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης ΜΣ4 συνδεσμολογίας Τριγώνο-Αστέρα-γειωμένο, ονομαστικής ισχύος 2MVA και ενεργό τιμή τάσης πρωτεύοντος 15κV και δευτερεύοντος 400V.



Σχήμα 5.2 : Μοντελοποιήση του μη διασυνδεδεμένου δικτύου στο Simulink.

Στο δίκτυο τοποθετήθηκε και ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης ΜΣ2 συνδεσμολογίας Τριγώνο-Αστέρα-γειωμένο, ονομαστικής ισχύος 2.5MVA και ενεργό τιμή τάσης πρωτεύοντος 400V και δευτερεύοντος 15kV, που συνδέει τις ΑΠΕ στη μέση τάση.

Προκειμένου να παρατηρηθούν πιθανά ρεύματα μαγνήτισης (inrush currents) των μετασχηματιστών κατά την διαδικασία επανεκκίνησης του δικτύου, τα μπλοκ των μετασχηματιστών σχεδιάστηκαν ώστε να προσομοιώνουν κορεσμό (saturation) κατά τη ενεργοποίηση τους και την σύνδεση των φορτίων στο σύστημα. Παρακάτω απεκονίζεται ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά του κορεσμού :

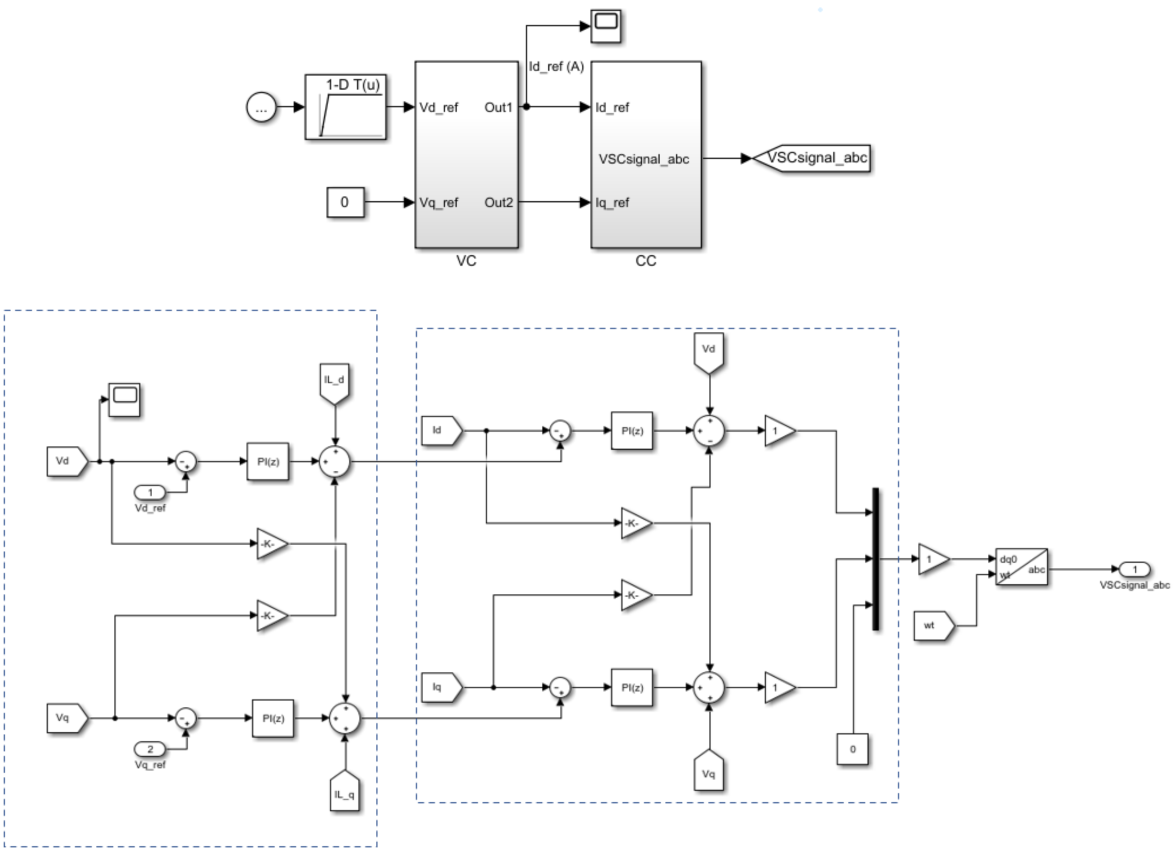
Πίνακα 5.1: *Χαρακτηριστικά καμπύλης κορεσμού των ΜΣ*

Ρεύμα μαγνήτισης	**Μαγνητική ροή**
$i_1 = 0$	$Ph_1 = 0$
$i_2 = 0.024$	$Ph_2 = 1.2$
$i_3 = 9.9999$	$Ph_3 = 1.52$

5.2 Μοντελοποίηση του Έλεγχου Τάσης και Έλεγχου Ρεύματος στο Simulink

5.2.1 Μοντελοποίηση του Ελέγχου Τάσης (Voltage Control)

Ο έλεγχος που θα χρησιμοποιήσουμε είναι συνδυαστικός έλεγχος τάσης (VC) και ρεύματος (CC) (Σχήμα 5.3) όπου το σήμα *VSCsignal_abc* που προκύπτει τροφοδοτεί τον VSC αντιστροφέα.



Σχήμα 5.3 : Μπλοκ του συνδυαστικού ελέγχου τάσης (VC) και ρεύματος (CC) στο Simulink.

Στον έλεγχο τάσης (Σχήμα 5.5), ο αντιστροφέας VSC διαμορφώνει την τάση και τη συχνότητα. Ο έλεγχος τάσης ωθεί τις dq συνιστώσες της τάσης να ακολουθούν τις τιμές αναφοράς τους παράγοντας τις τιμές αναφοράς των dq συνιστωσών του ρεύματος αντιστροφέα.

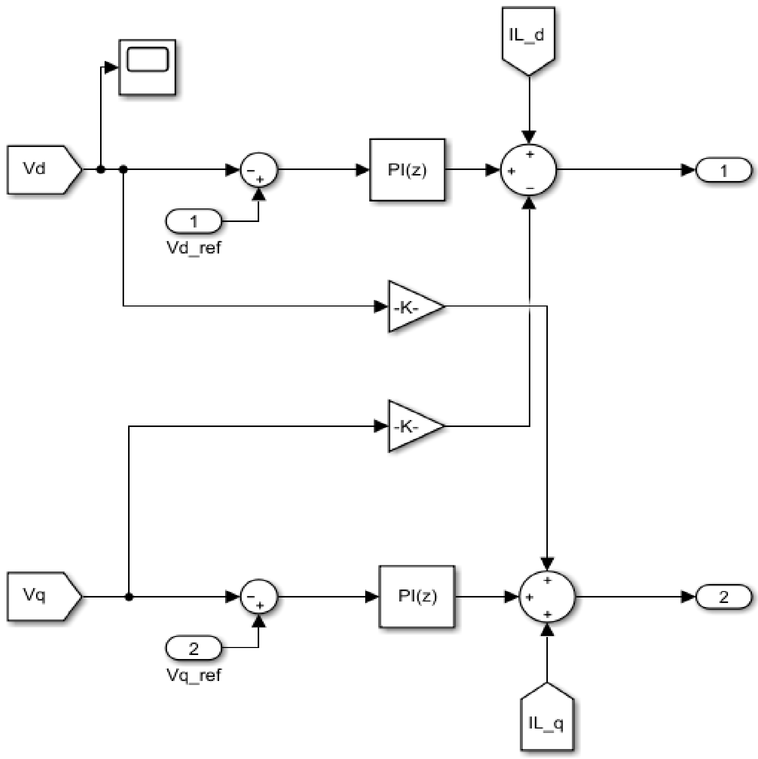
Έπειτα, όπως θα δούμε και παρακάτω, τις εισάγουμε στον έλεγχο ρεύματος, με αποτέλεσμα να προκύπτει ένα σήμα διαμόρφωσης *VSCsignal_abc*, το οποίο θα δημιουργήσει στην έξοδο του αντιστροφέα την επιθυμητή τάση. Μέσω της προσομοίωσης θα παρατηρήσουμε τις αποκρίσεις συχνότητας και τάσης εξαιτίας του φορτίου στο δίκτυο.

Η τάση λειτουργίας του δικτύου είναι 400 V πολική.

Οπότε στην έξοδο του αντιστροφέα :

- $Vd = 400\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 326.5986$ V

Ως τιμή αναφοράς για το Vq, έχουμε $Vq\_ref = 0$ ενώ για το Vd επιλέχθηκε, μέσω της βιβλιοθήκης του Simulink, ένα 1-D Lookup Table προκειμένου να δημιουργηθεί μια ράμπα τιμών με μέγιστη τιμή τάσης της ράμπας να είναι τα 326.5986 V (Τάση εξόδου του αντιστροφέα), όπως θα παρουσιαστεί και στην προσομοίωση.



Σχήμα 5.4 : Μοντελοποίηση Έλεγχου Τάσης στο Simulink.

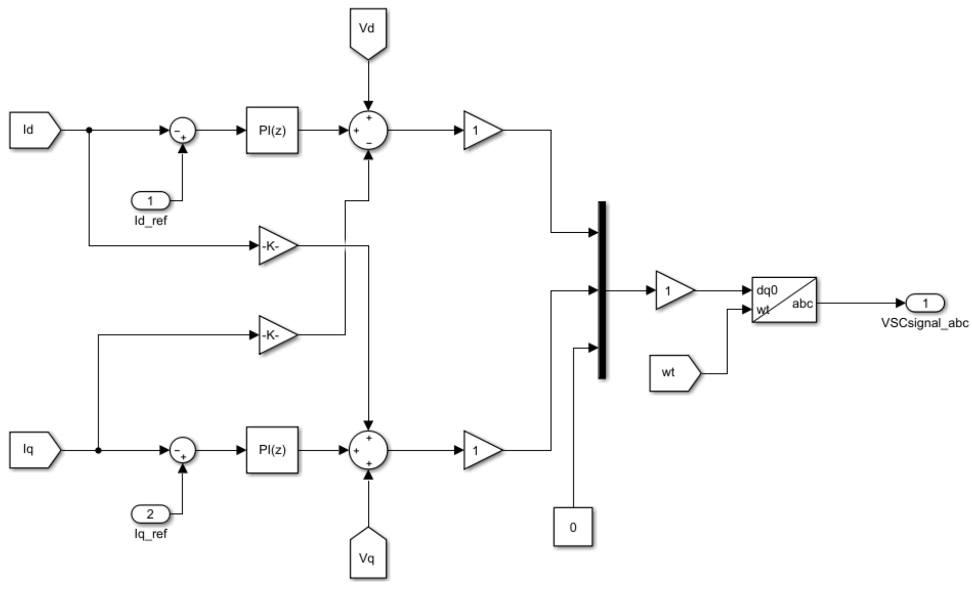
Στο Σχήμα 5.4, έχουμε ως εισόδους τις συνιστώσες Vd και Vq. Τα IL_d και IL_q είναι οι διαταραχές του συστήματος. Οι τάσεις αναφοράς είναι οι Vd_ref και Vq_ref ενώ τα κέρδη του PI ελεγκτή βάσει του προηγούμενου κεφαλαίου είναι $kp = 6$ και $ki = 30$.

Η υλοποίηση του ελέγχου γίνεται με σύγκριση των σημάτων Vd και Vq με αυτά των σημάτων αναφοράς Vd_ref και Vq_ref. Τα σφάλματα διέρχονται μέσα από έναν PI ελεγκτή και στην έξοδο έχουμε τα σήματα αναφοράς ρεύματος των συνιστωσών dq, που εισάγονται στον έλεγχο ρεύματος.

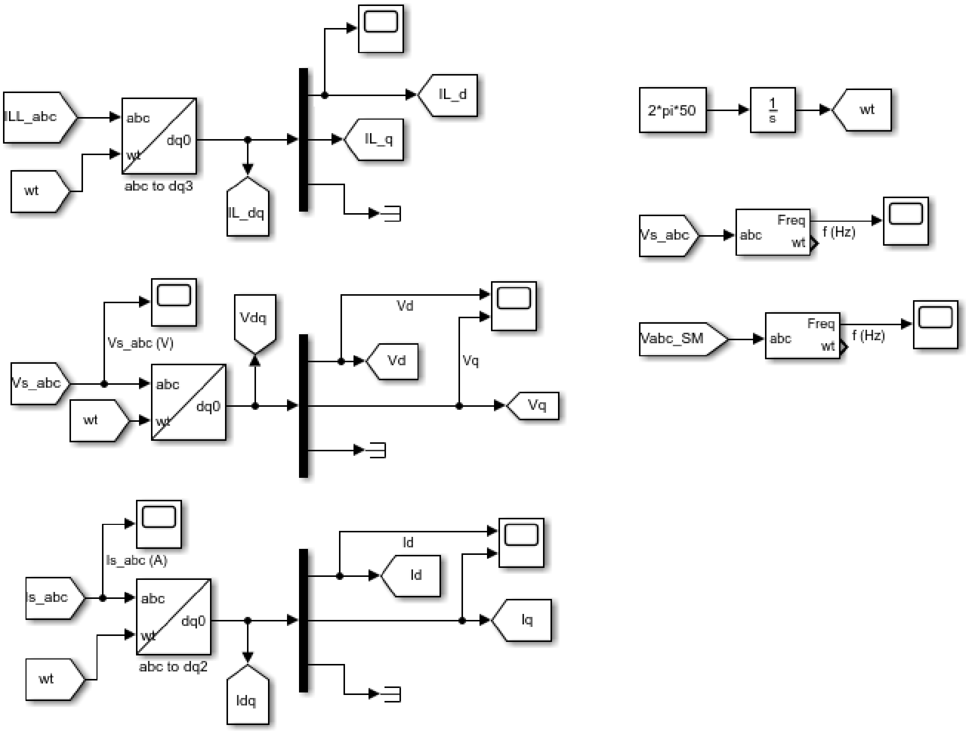
5.2.2 Μοντελοποίηση του Ελέγχου Ρεύματος (Current Control)

Η υλοποίηση του ελέγχου ρεύματος (Σχήμα 5.5) επιτυγχάνεται με την σύγκριση των σημάτων Id και Iq με τα σήματα αναφοράς Id_ref και Iq_ref και έπειτα με την είσοδο σε έναν PI ελεγκτή. Τα κέρδη του ελεγκτή είναι $kp = 20$ και $ki = 2$. Με τους όρους Vd και Vq πετυχαίνουμε ταχύτερη απόκριση σε μεταβολές. Έπειτα με την βοήθεια ενός κέρδους προκύπτει το επιθυμητό σήμα σε dq πεδίο, το οποίο μετατρέπουμε, μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Park, σε τριφασικό λαμβάνοντας το *VSCsignal_abc*. Το *VSCsignal_abc* σήμα διαμόρφωσης εισέρχεται στις ελεγχόμενες πηγές τάσης οι οποίες προσομοιώνουν τον αντιστροφέα VSC.

Για το μετασχηματισμό Park των τριφασικών σημάτων εισόδου χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο block του Simulink με την επιλογή της παραμέτρου που δέχεται ως είσοδο την ωt και όταν ωt = 0, να είναι « 90 degrees behind phase A axis » ώστε ένα σήμα θετικής ακολουθίας, μοναδιαίου πλάτους και μηδενικής φάσης να δίνει μοναδιαία d συνιστώσα και μηδενική q συνιστώσα. Το ωt το λαμβάνεται με ολοκλήρωση της σταθεράς 2πf (f=50 Hz), όπου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6 μαζί με όλες τις μετατροπές των σημάτων που χρησιμοποιήθηκαν.



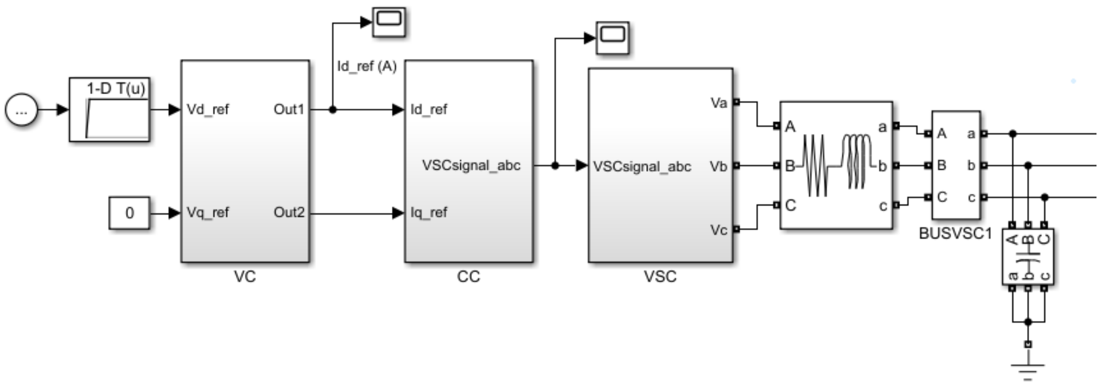
Σχήμα 5.5 : Μοντελοποίηση του έλεγχου ρεύματος στο Simulink.



Σχήμα 5.6 : PLL και μετατροπές των σημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο Simulink.

5.3 Προσομοίωση σεναρίων εκκίνησης του μη διασυνδεδεμένου δικτύου στο Simulink

5.3.1 Σενάριο Α – Σύστημα μπαταριών με αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) (Απευθείας ονομαστική τάση εξόδου αντιστροφέα)



Σχήμα 5.7 : Σύστημα μπαταριών με αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC).

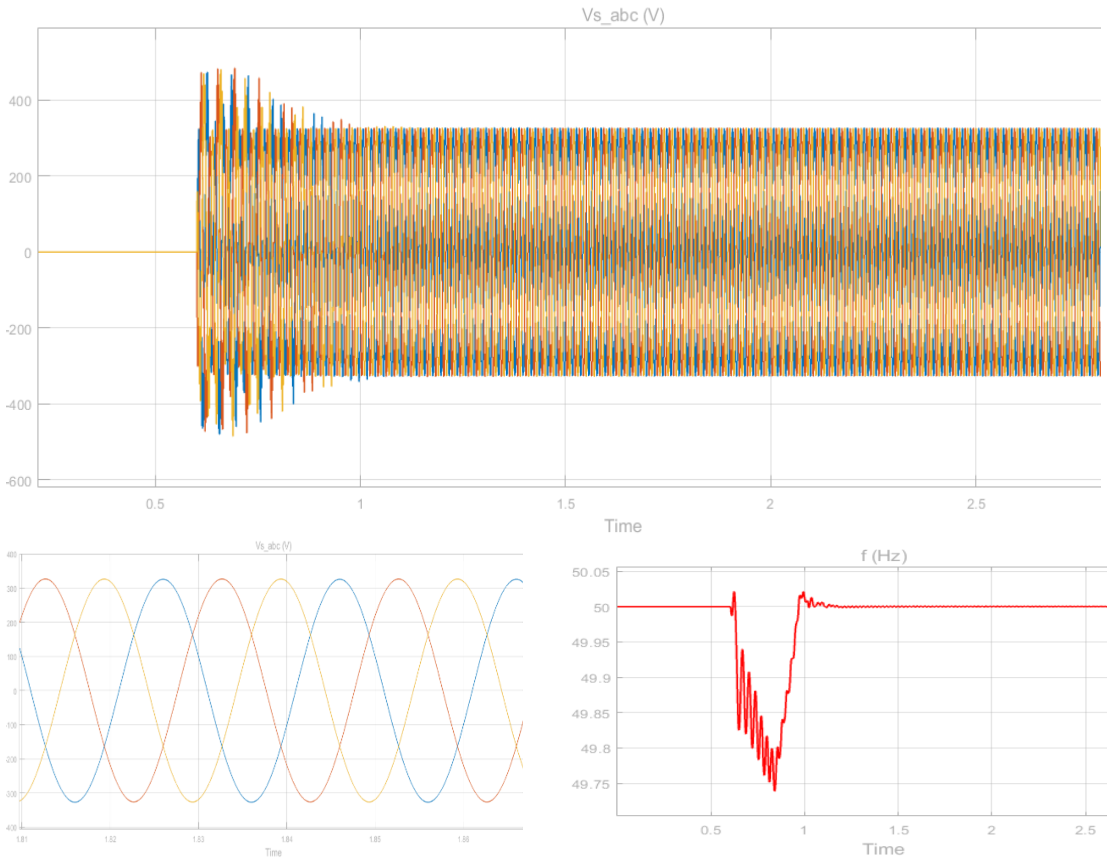
Σκοπός του Σεναρίου Α, είναι η προσομοίωση των ελεγχών του VSC στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, και η παρατήρηση των ρευμάτων μαγνήτισης κατά το κλείσιμο του διακόπτη, όταν ο αντιστροφέας παράγει απευθείας ονομαστική τάση εξόδου (326.59 V).

Στο Σενάριο Α, ο αντιστροφέας των μπαταριών είναι υπεύθυνος για την διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου μετά το κλείσιμο του διακόπτη και τη σύνδεση των φορτίων ισχύος 1.2MW.

Σε αυτήν τη περίπτωση, η ενεργοποίηση των ΜΣ του δικτύου για την επαναφορά των φορτίων, γίνεται από τον VSC με την τάση εξόδου του να λαμβάνει απευθείας ονομαστική τιμή. Τη χρονική στιγμή 0.6s, ο VSC αρχίζει να διαμορφώνει την τάση και να εγχέει ρεύμα. Ο αντιστροφέας αρχίζει να παρέχει τάση για την ενεργοποίηση ΜΣ και στη συνέχεια του δικτύου. Ο διακόπτης κλείνει τη χρονική στιγμή 0.6s.

Όταν γίνεται απευθείας εκκίνηση του συστήματος, όπως αναλύθηκε και σε θεωρητικό επίπεδο, τα inrush currents των ΜΣ είναι αρκετά μεγάλα για να προκαλέσουν πιθανό σφάλμα στους αντιστροφείς του μη διασυνδεδεμένου δικτύου και παραμόρφωση της τάσης εξόδου. Αυτό προκύπτει εξαιτίας των μη-γραμμικών χαρακτηριστικών του inrush current του μετασχηματιστή. Αυτό αποτυπώνεται και στη προσομοίωση.

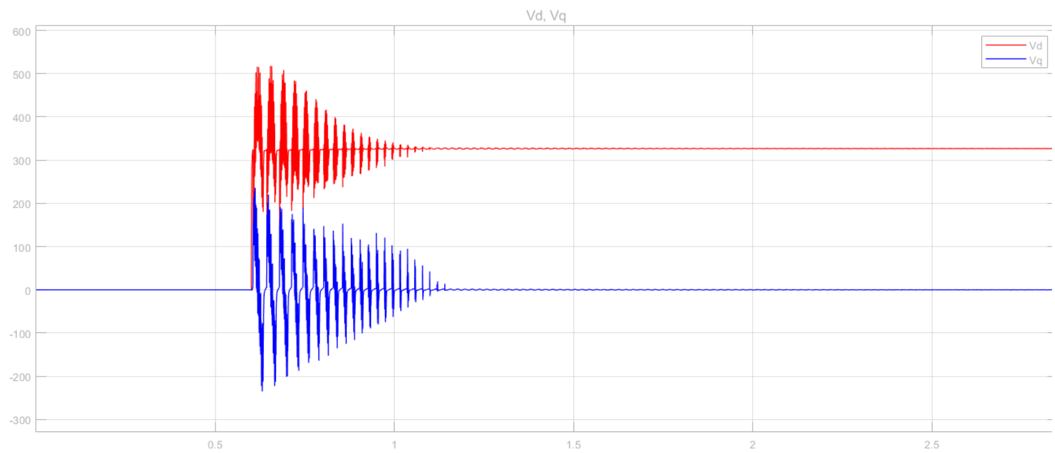
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Simulink απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 5.8 : Διαγράμματα τάσης εξόδου αντιστροφέα Vs_abc και της συχνότητα f.

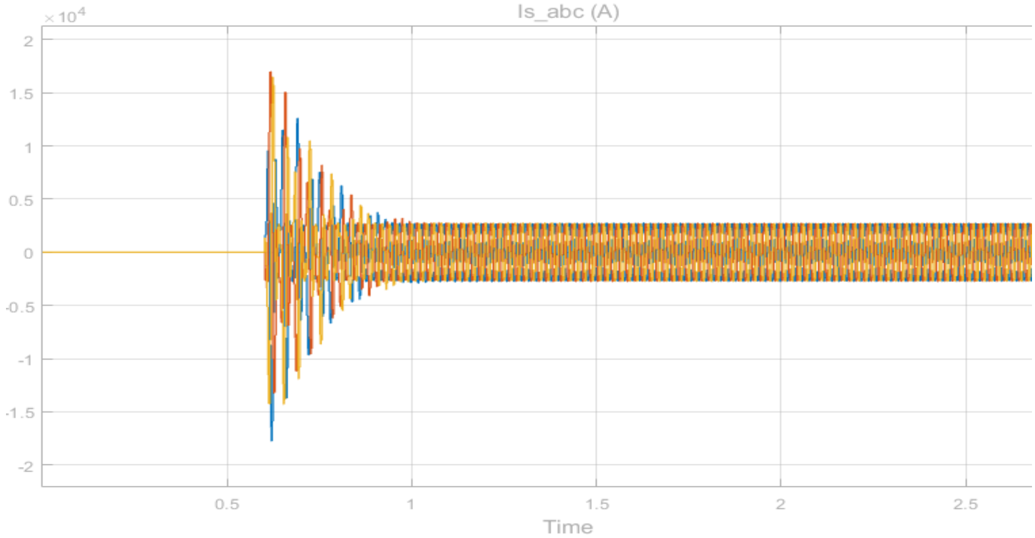
Στο διάγραμμα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, στο Σχήμα 5.8, παρατηρείται τάση μεγαλύτερη της ονομαστικής, την στιγμή που κλείνει ο διακόπτης, όπου σταδιακά μειώνεται από τα 490 V στα 326.59 V τη χρονική στιγμή 0.98s. Η συχνότητα f, τη χρονική στιγμή 0.6s, αρχίζει να βυθίζεται εως τα 49.74 Hz και επανέρχεται στα 50 Hz τη χρονική στιγμή 1.07s. Η απόκριση στα φορτία των 1.2 MW ήταν αρκετά γρήγορη λόγω του ελέγχου του αντιστροφέα.

Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζεται η Vd και η Vq.



Σχήμα 5.9 : Διάγραμμα Vd και Vq.

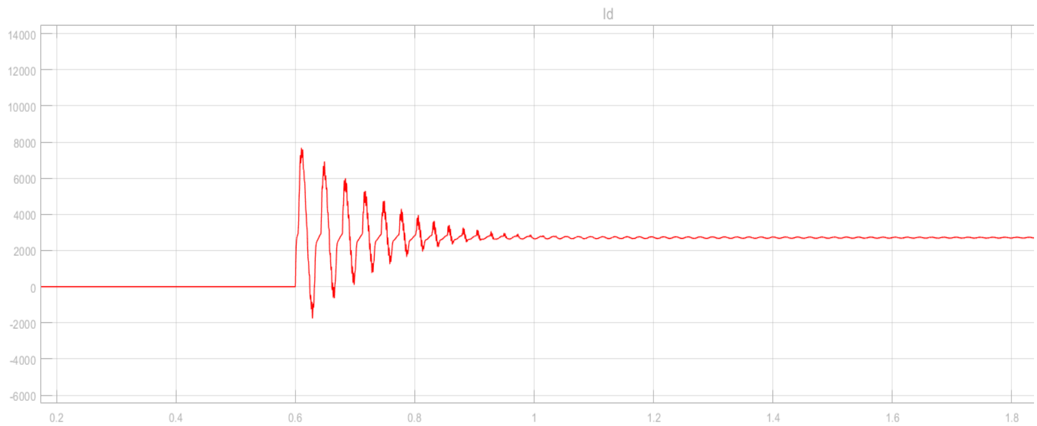
Η διακύμανση τόσο της Vd όσο και της Vq, είναι αισθητή εξαιτίας της απευθείας φόρτισης του ΜΣ με ονομαστική τάση στα άκρα του. Τη χρονική στιγμή 1.1s και 1.15s, εξισορροποιείται τόσο η Vd όσο και η Vq. Η Vd σταθεροποιείται στα 326.59 V και το Vq στο 0, όσο δηλαδή οι τιμές αναφοράς τους στον έλεγχο τάσης του VSC. Στο παρακάτω διάγραμμα, παρουσιάζεται το τριφασικό ρεύμα εξόδου του VSC, Is_abc.



Σχήμα 5.10 : Διάγραμμα ρεύματος εξόδου αντιστροφέα Is_abc.

Από το διάγραμμα παρατηρείται το φαινόμενο του inrush current, κατά το κλείσιμο του διακόπτη, αφού ο ΜΣ τροφοδοτήθηκε απευθείας με ονομαστική τάση στα άκρα του. Από την προσομοιώση, διαπιστώθηκε πως το inrush current είναι περίπου 7 φορές το ονομαστικό ρεύμα. Αυτός ο έλεγχος του VSC, με απευθείας φόρτιση του ΜΣ με ονομαστική τάση, οδηγεί στην ανάγκη για υπερδιαστασιολόγηση του αντιστροφέα προκειμένου να αντιμετωπίσει τα ρεύματα μαγνήτισης.

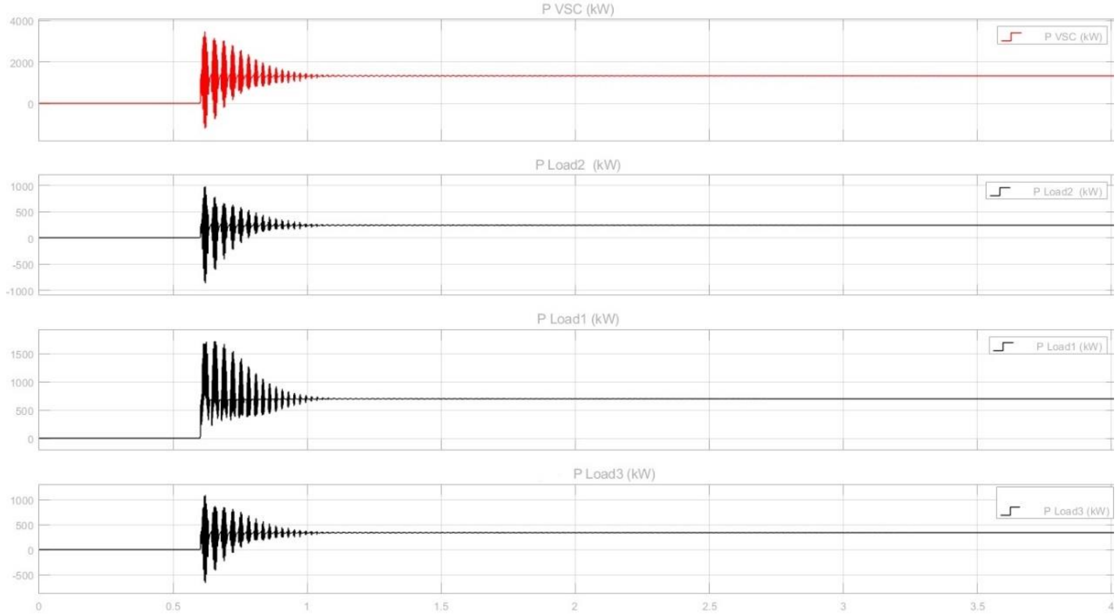
Η διακύμανση λόγω των ρευμάτων μαγνήτισης αποτυπώνεται και στο διάγραμμα του Id, του Σχήματος 5.11, όπου διαρκεί 0.4s. Στη συνέχεια, το Id σταθεροποιείται περίπου στα 2700 A.



Σχήμα 5.11 : Διάγραμμα Id.

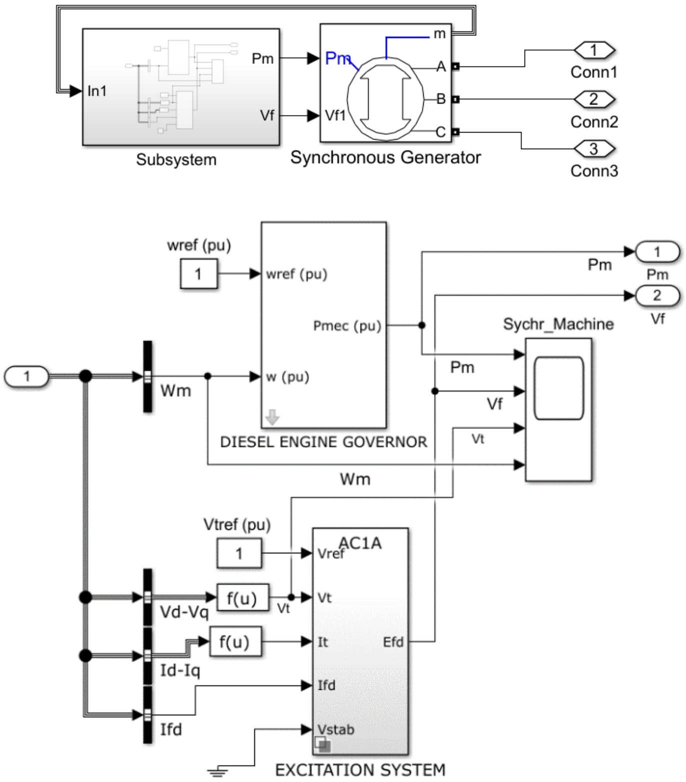
Στο Σχήμα 5.12, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ισχύς εξόδου του αντιστροφέα των μπαταριών και η ζήτηση ισχύος των φορτίων. Όπως αποτυπώθηκε και στο διάγραμμα Id, τη χρονική στιγμή 0.6, ο αντιστροφέας παράγει κατευθείαν ισχύς για να καλύψει την είσοδο των φορτίων στο δίκτυο.

Παρατηρούνται υψηλές διακυμάνσεις στο διάγραμμα, λόγω των ρευμάτων μαγνήτισης των ΜΣ, μέχρι το 1s, όπου και σταθεροποιείται η ισχύς των μπαταριών περίπου στα 1.33 MW.



Σχήμα 5.12 : Διαγράμματα ισχύος μπαταριών αντιστροφέα P VSC και ισχείς φορτίων P Load1, Load2, Load3.

5.3.2 Σενάριο Β – Ντηζελογεννήτρια 3.2 MVA



Σχήμα 5.13 : Μοντελοποίηση ντηζελογεννήτριας και υποσύστημα ρυθμιστή στροφών και συστήματος διέγερσης.

Στο Σχήμα 5.13, απεικονίζεται η μοντελοποίηση της ντηζελογεννήτριας καθώς και ο ρυθμιστής στροφών (Governor) της, όπου βασίζεται στο μοντέλο DEGOV1 και το σύστημα διέγερσης. Το Subsystem περιέχει το ρυθμιστή στροφών και το σύστημα διέγερσης, όπου f(u) = $\sqrt{u(1)^2 + u(2)^2}$ μέσα από το οποίο προκύπτει η ισχύς Pm και η τάση διέγερσης Vf, όπου είναι είσοδοι του μπλοκ της Σύγχρονης Γεννήτριας. Η σταθερά αδράνειας είναι $H = 2.2\ MWs/MVA$ και $f = 50\ Hz$.

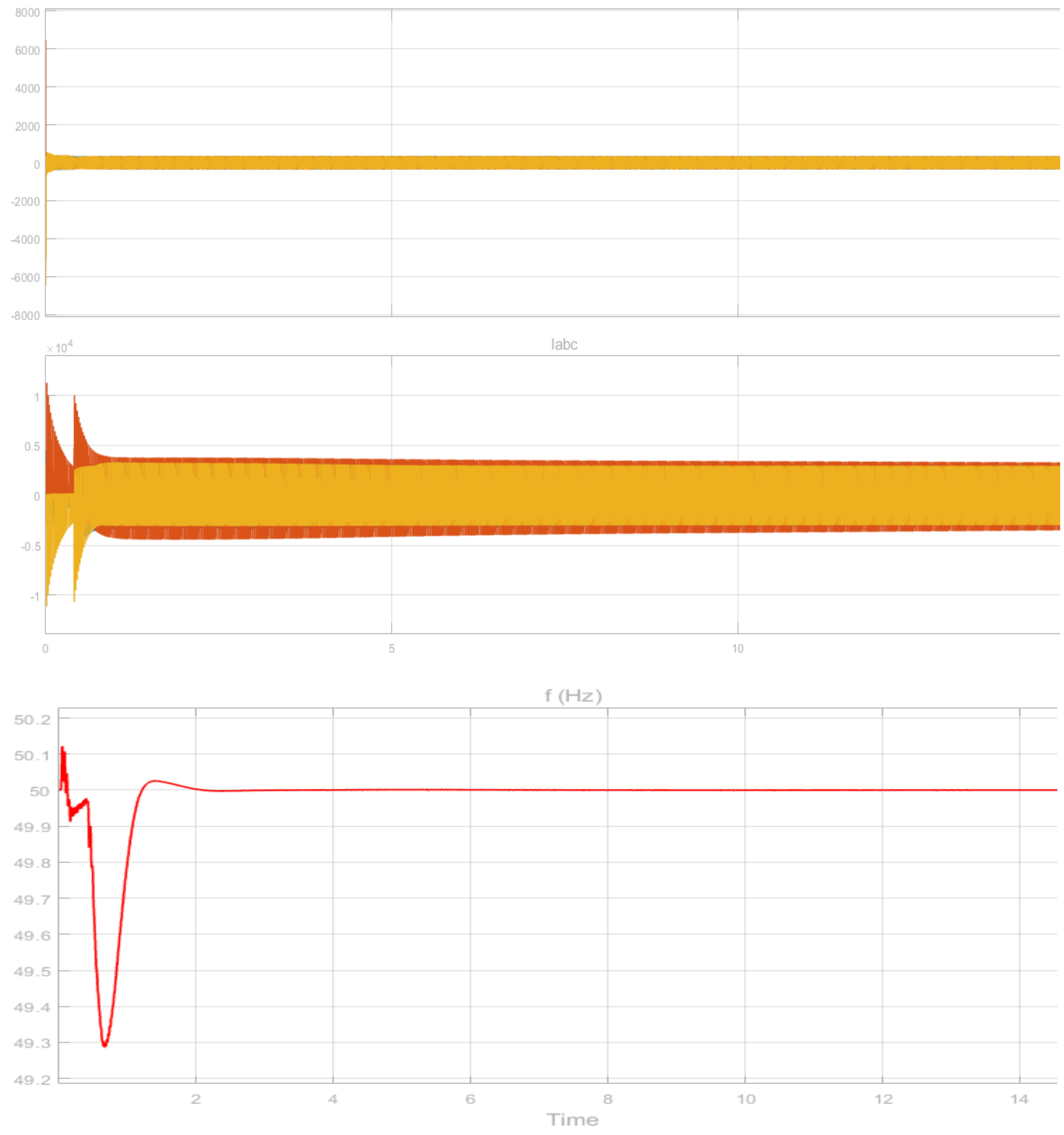
Πίνακα 5.2: *Χαρακτηριστικά του Governor*

Time Constant T1	0.1 sec
Time Constant T2	0.02 sec
Time Constant T3	0.2 sec
Time Constant T4	0.25 sec
Time Constant T5	0.009 sec
Time Constant T6	0.00984 sec
Actuator Gain K	80
Engine Delay Td	0.012 sec
Maximum Limit Tmax	1.1 pu
Minimum Limit Tmin	0.0 pu
Droop Drp	0.347
Time Constant TE	0.00 sec

Σκοπός του Σεναρίου Β, είναι η προσομοίωση ντηζελογεννήτριας ισχύος 3.2 MVA και ονομαστικής τάσης 400V πολική στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, και η παρατήρηση των ρευμάτων μαγνήτισης (inrush currents) κατά το κλείσιμο του διακόπτη.

Στο Σενάριο Β, η ντηζελογεννήτρια διαμορφώνει τάση και συχνότητα στο δίκτύο μετά το κλείσιμο του διακόπτη και τη σύνδεση των φορτίων ισχύος 1.2MW. Σε αυτό το σενάριο, η ενεργοποίηση των ΜΣ του δικτύου για την επαναφορά των φορτίων, γίνεται από τη ντηζελογεννήτρια. Ουσιαστικά, από το 0 εως το 0.4s, υφίσταται blackout στο δίκτυο. Το 0.4s, κλείνει ο διακόπτης και η ντηζελογεννήτρια μέσω του ρυθμιστή στροφών αρχίζει να παρέχει τάση και να εγχέει ισχύς για την ενεργοποίηση του ΜΣ και στη συνέχεια του δικτύου, τροφοδοτώντας τα φορτία που συνδέονται στο σύστημα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Simulink απεικονίζονται παρακάτω :

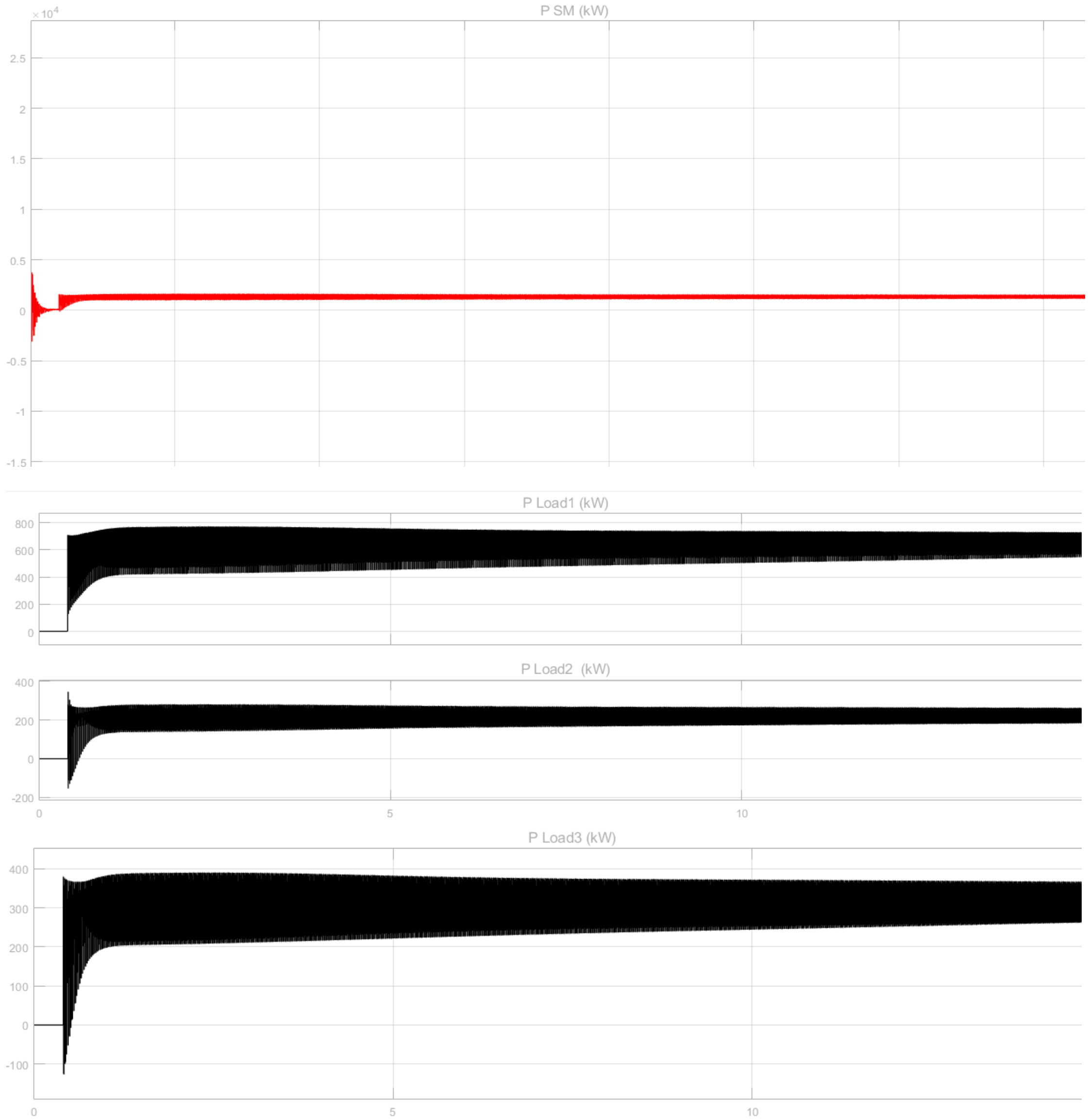


Σχήμα 5.14 : Διάγραμμα τάσης, ρεύματος και συχνότητας ντηζελογεννήτριας.

Στο Σχήμα 5.14, απεικονίζονται τα διαγράμματα της τάσης, του ρεύματος και της συχνότητας της ντηζελογεννήτριας.

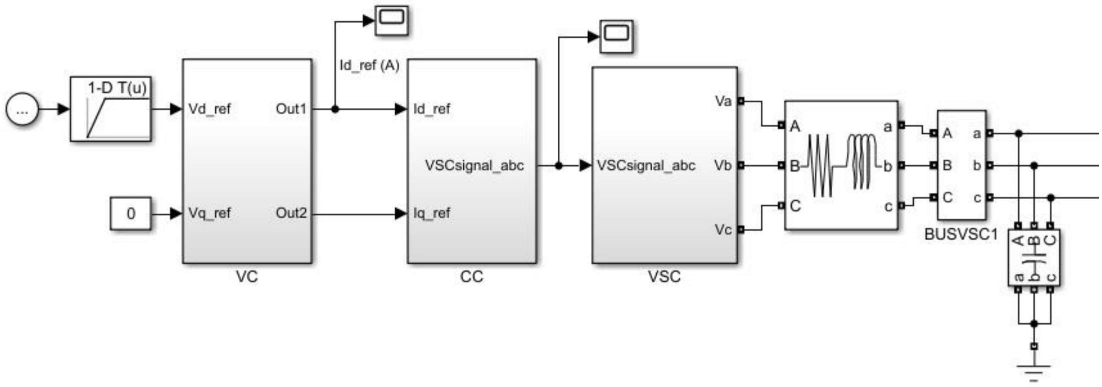
Όπως και στο Σενάριο Β, στο διάγραμμα του τριφασικού ρεύματος, υπάρχει ρεύμα μαγνήτισης εξαιτίας της απευθείας φορτίσης του ΜΣ με ονομαστική τάση. Το αρχικό ρεύμα είναι 12 kA και σταδιακά σταθεροποιείται στα 2900 A. Η συχνότητα f, τη στιγμή που συνδέονται τα φορτία, βυθίζεται στα 49.3 Hz και στη συνέχεια επιστρέφει στα 50 Hz τη χρονική στιγμή 2s, μέσω του ρυθμιστή στροφών.

Στο Σχήμα 5.15, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ισχύς εξόδου της Ντηζελογεννήτριας και η ζήτηση ισχύος των φορτίων. Παρατηρούνται υψηλές διακυμάνσεις στο διάγραμμα, λόγω των ρευμάτων μαγνήτισης των ΜΣ, μέχρι που σταθεροποιείται η ισχύς της Ντηζελογεννήτριας P SM περίπου στα 1.3 MW.



Σχήμα 5.15 : Διαγράμματα ισχύος ντηζελογεννήτριας P SM και ισχείς φορτίων P Load1, Load2, Load3..

5.3.3 Σενάριο Γ – Σύστημα μπαταριών με αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) (Σταδιακή αύξηση τάσης εξόδου αντιστροφέα)



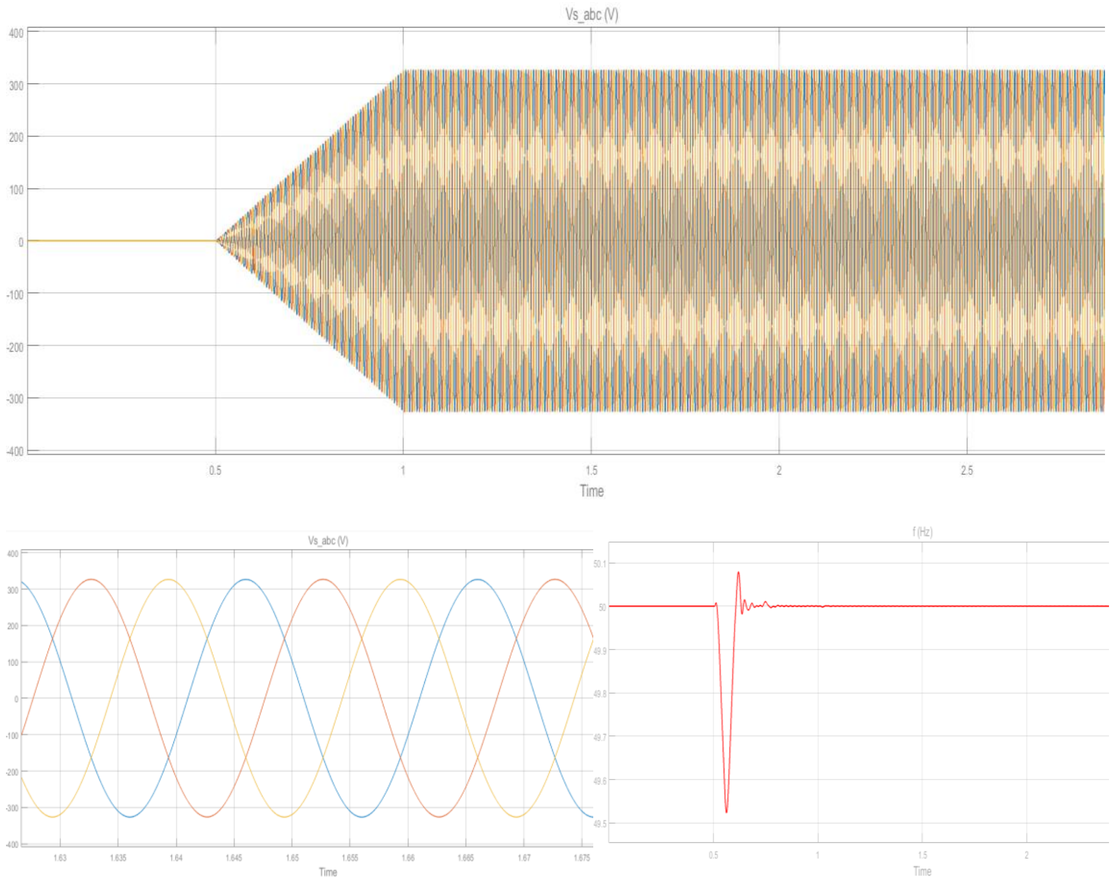
Σχήμα 5.16 : Σύστημα μπαταριών με αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC)

Σκοπός του Σεναρίου Γ, είναι η προσομοίωση των ελεγχών του VSC στο μη διασυνδεδεμένο δίκτυο, καθώς και η παρατήρηση ρευμάτων μαγνήτισης (inrush currents) κατά το κλείσιμο του διακόπτη, όταν ο αντιστροφέας αυξάνει σταδιακά την τάση εξόδου.

Στο Σενάριο Γ, ο αντιστροφέας των μπαταριών είναι υπεύθυνος για την διαμόρφωση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου μετά το κλείσιμο του διακόπτη και τη σύνδεση των φορτίων ισχύος 1.2MW.

Σε αυτό το σενάριο, η ενεργοποίηση των ΜΣ του δικτύου για την επαναφορά των φορτίων, γίνεται από τον VSC με τάση εξόδου του, σε μορφή ράμπας. Η ράμπα προκύπτει από ένα 1-D Lookup table και λαμβάνει χρονικές τιμές 0, 0.5, 1 και 10 sec (άξονας χρονικής διάρκειας ράμπας) , ενώ οι τιμές της τάσης είναι 0, 326.59 V (άξονας τιμών τάσης εξόδου του αντιστροφέα). Ουσιαστικά, από το 0 εως το 0.5s, υφίσταται blackout στο δίκτυο, και από το 0.5 – 1s, ο αντιστροφέας αρχίζει να παρέχει τάση σταδικαά αυξανόμενη για την ενεργοποίηση του ΜΣ και στη συνέχεια του δικτύου. Ο διακόπτης κλείνει τη χρονική στιγμή 0.6s.

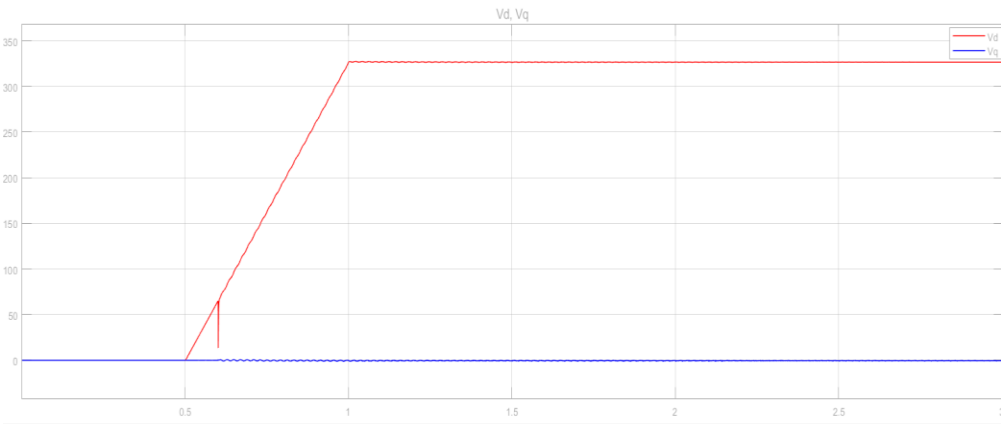
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Simulink απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 5.17 : Διαγράμματα τάσης εξόδου αντιστροφέα Vs_abc και της συχνότητα f.

Στο διάγραμμα της Vs_abc φαίνεται ότι η τριφασική τάση <<ακολουθεί>> το σήμα αναφοράς Vd_ref, σε μορφή ράμπας, που λαμβάνει ως είσοδο ο έλεγχος τάσης. Στο 0.5s, ο αντιστροφέας ξεκινά να διαμορφώνει την τάση εώς το 1s όπου η τάση γίνεται 326.59 V (ονομαστική). Στο διάγραμμα της f, παρατηρείται διακύμανση της συχνότητας εώς τα 49.53 Hz για 0.2s. Στη συνέχεια, η συχνότητα εξισορροπείται στα 50 Hz , μέσω του ελέγχου του αντιστροφέα.

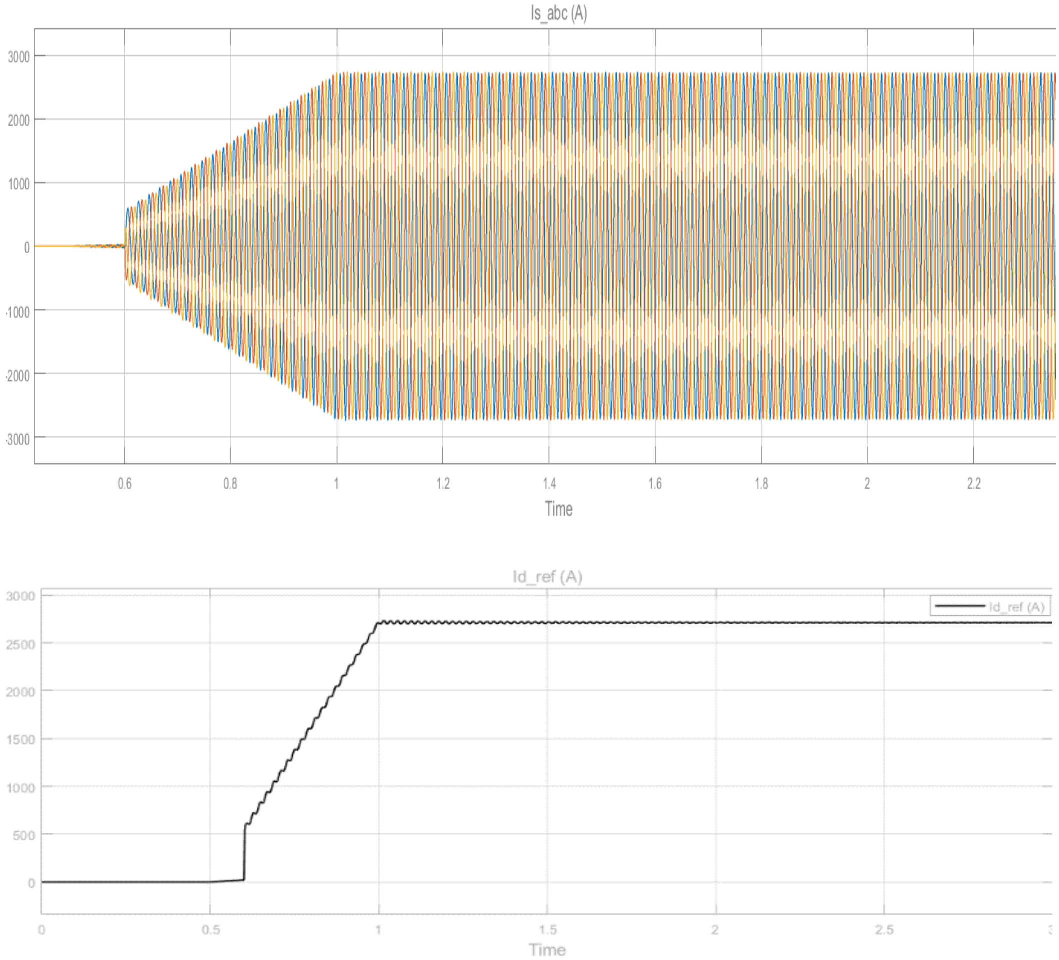
Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τάσεις Vd και Vq του αντιστροφέα.



Σχήμα 5.18 : Διάγραμματα Vd και Vq.

Όσον αφορά το Vd, πράγματι ακολουθεί το Vd_ref και στο 1s, λαμβάνει ονομαστική τιμή, 326.59 V. Τη χρονική στιγμή 0.6s, όπου κλείνει ο διακόπτης και τα φορτία συνδέονται στο δίκτυο, παρατηρείται μια στιγμιαία πτώση τάσης, λόγω της βηματικής φύσης των φορτίων. Το Vq, σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι μηδέν, όσο δηλαδή το Vq_ref, που εισάγεται στον έλεγχο τάσης.

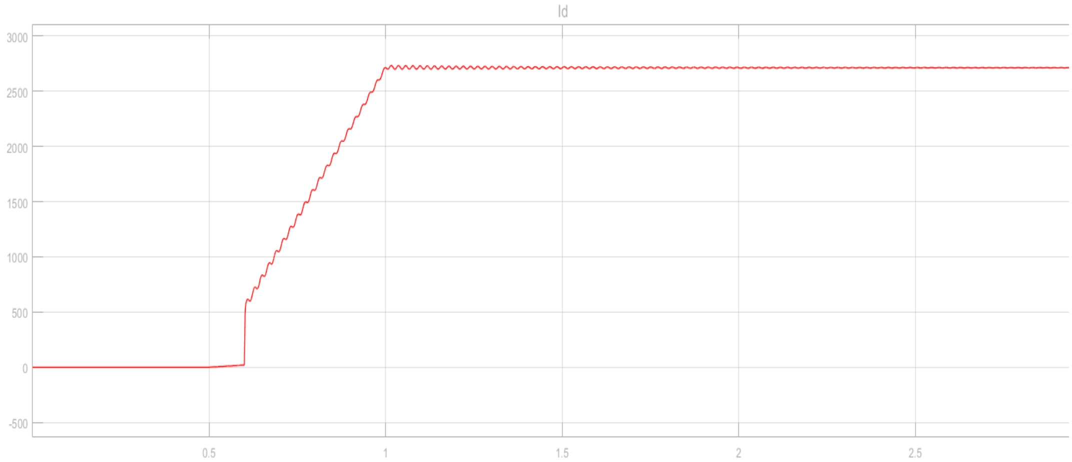
Στο Σχήμα 5.20, απεικονίζεται το διάγραμμα Is_abc και το Id_ref.



Σχήμα 5.19 : Διάγραμμα ρεύματος αντιστροφέα Is_abc και ρεύματος αναφοράς Id_ref.

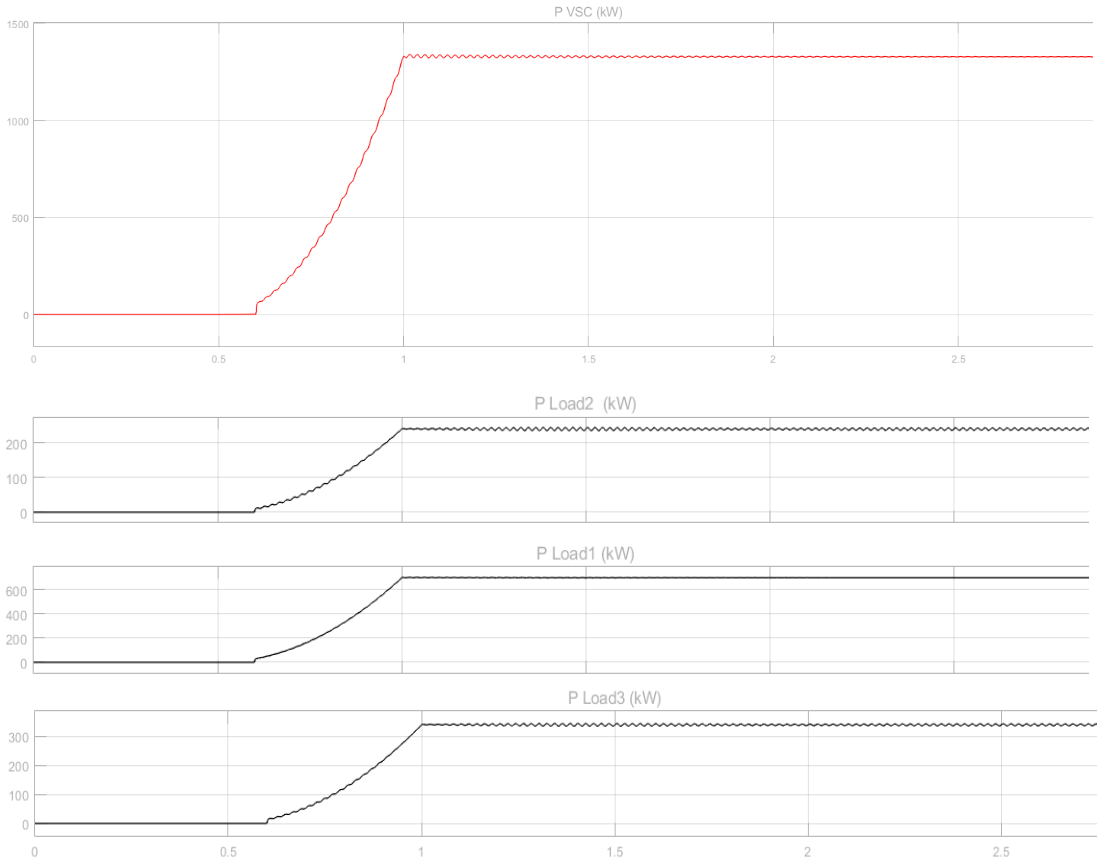
Τη χρονική στιγμή 0.6, όπου κλείνει ο διακόπτης, ο αντιστροφέας των μπαταριών αρχίζει να εγχέει ρεύμα στο δικτύο. Το Is_abc <<ακολουθεί>> το σήμα αναφοράς Id_ref, που εισάγεται στον έλεγχο ρεύματος. Από το διάγραμμα του τριφασικού ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα, είναι φανερό πως δεν προκύπτουν ρεύματα μαγνήτισης κατά το κλείσιμο του διακόπτη. Αυτό συμβαινεί λόγω της σταδιακής αύξησης της τάσης, σε μορφή ράμπας, όπως είχε προαναφερθεί, σε θεωρητικό επίπεδο πριν την προσομοιώση, στο Κεφάλαιο 2 και 4.

Στο διάγραμμα Id (Σχήμα 5.20), φαίνεται πως ο αντιστροφέας των μπαταριών εγχέει κατευθείαν ρεύμα, κατά το κλείσιμο του διακόπτη, προκειμένου να καλύψει τη ζήτηση ισχύος των φορτίων, και όπως προαναφέρθηκε συνεχίζει να εγχέει ρεύμα σταδιακά σε μορφή ράμπας εώς το 1s. Στη συνέχεια, σταθεροποιείται στα 2700 A.



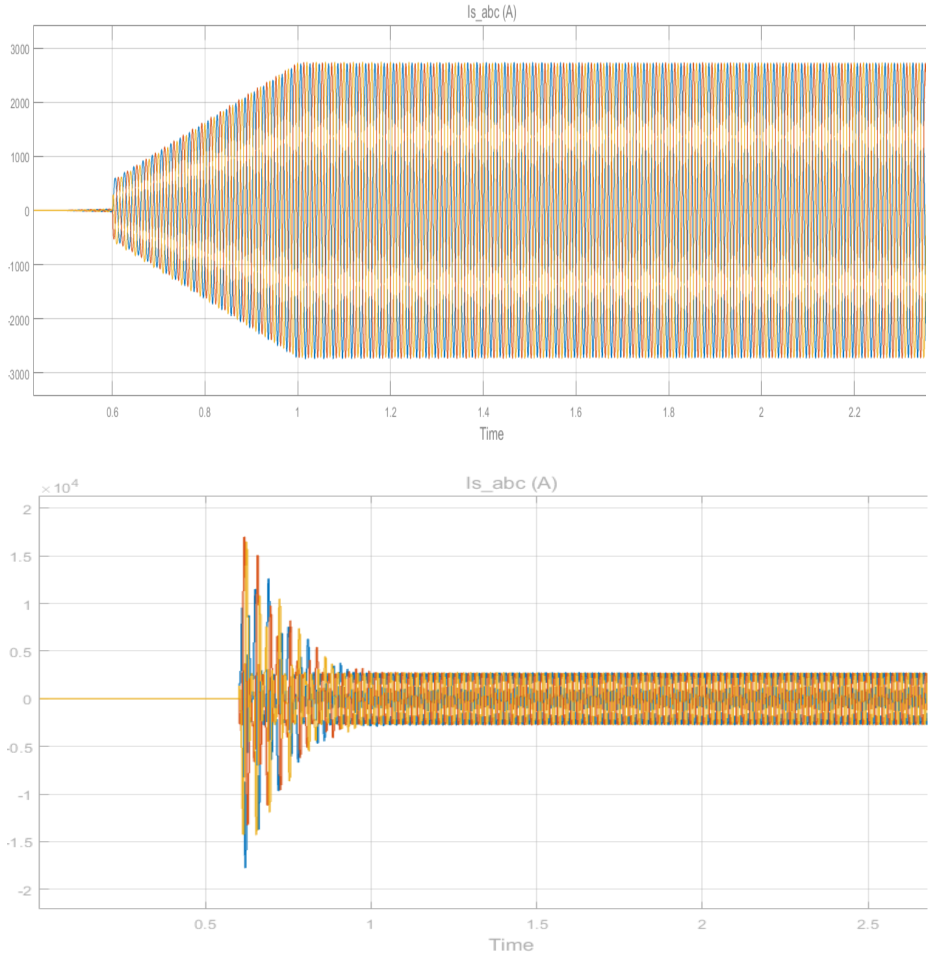
Σχήμα 5.20 : Διάγραμμα Id.

Στο Σχήμα 5.21, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ισχύς εξόδου του αντιστροφέα των μπαταριών και η ζήτηση ισχύος των φορτίων. Όπως αποτυπώθηκε και στο διάγραμμα Id, τη χρονική στιγμή 0.6, ο αντιστροφέας παράγει κατευθείαν ισχύς για να καλύψει την είσοδο των φορτίων και στη συνέχεια αυξάνεται σταδιακά μέχρι το 1s, όπου και σταθεροποιείται περίπου στα 1.33 MW.



Σχήμα 5.21 : Διαγράμματα ισχύος αντιστροφέα μπαταριών P VSC και ισχείς φορτίων P Load1,Load2,Load

Οι προσομοιώσεις του Σεναρίου Α και του Σεναρίου Γ, αποτύπωσαν πράγματι, πως η σταδιακή φορτίση του ΜΣ με τάση εξόδου του αντιστροφέα μπαταριών σε μορφή ράμπας, κατά το κλείσιμο του διακόπτη και σύνδεσης των φορτίων, αποτρέπει τη δημιουργία ρευμάτων μαγνήτισης. Στο Σενάριο Α, ο ΜΣ φορτίζεται απευθείας με ονομαστική τάση στα άκρα του με αποτέλεσμα να προκληθούν ισχυρά ρεύματα μαγνήτισης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.22



Σχήμα 5.22 : Διαγράμματα ρεύματος Is_abc του αντιστροφέα στο Σενάριο Α και στο Σενάριο Β.

Από τις προσομειώσεις, φαίνεται πως κατά την επαναφορά ηλεκτροδότησης ενός μη διασυνδεδεμένου δικτύου, μέσω σταδιακής φόρτισης, σε μορφή ράμπας, από τον αντιστροφέα του συστήματος μπαταριών, τα ρεύματα μαγνήτισης μειώνονται σημαντικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αλγόριθμος για την Επαναφορά Ηλεκτροδότησης (Black-start) σε ΜΔΝ και μεθοδολογία επίλυσης του

6.1 Περιγραφή του MILP μοντέλου της διαδικασίας Black-start

Ο αλγόριθμος του προβλήματος Black-start σε ΜΔΝ βασίζεται σε μοντέλο MILP (Mixed Integer Linear Programming). Η επίλυση του υλοποιείται μέσω του Pyomo, βιβλιοθήκη της Python, ως ένα Concrete μοντέλο με σύνολα (Sets), παραμέτρους (Parameters), μεταβλητές (Variables), περιορισμούς (Constraints) και της αντικειμενικής συνάρτησης (Objective function).

Ο σκοπός του μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση των καταναλωτών, που δεν διαθέτουν ηλεκτρική ενέργεια, μεγιστοποιώντας την συνολική ενέργεια που είναι δυνατόν να αποκατασταθεί. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται μέσω διακριτών βημάτων, και παράγεται η βέλτιστη ακολουθία των στοιχείων του προβλήματος για την βελτιστοποίηση του μοντέλου. Το μοντέλο διαθέτει γεννήτριες με δυνατότητα Black-start, όπου μπορούν να προσαρμόσουν την ισχύς εξόδου τους, γεννήτριες χώρις δυνατότητα προσαρμογής ισχύς εξόδου (Ανεμογεννήτρια και Φωτοβολταϊκά*)*, συστήματα μπαταριών (BESS), διακόπτες και τα φορτία που πρόκειται να αποκατασταθούν.

6.2 Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του μοντέλου

Όπως προαναφέρθηκε το μοντέλο του αλγορίθμου περιέχει σύνολα, παραμέτρους και μεταβλητές. Οι διακόπτες του συστήματος, που καθορίζουν πότε εντάσσεται ένα στοιχείο του μοντέλου στο δίκτυο και πότε όχι μοντελοποιήθηκαν σαν δυαδικές (binary) μεταβλητές, όπου όταν λαμβάνουν την τιμή 1, είναι ενεργοποιημένες, ενώ όταν λαμβάνουν την τιμή 0, είναι ανενεργές. Παρακάτω απεικονίζονται οι Πίνακες με τα χαρακτηριστικά του αλγόριθμου.

Πίνακας 6.1: *Σύνολα του μοντέλου.*

Σύνολα

T	Σύνολο των διακριτών χρονικών βημάτων

G	Σύνολο των γεννητριών (DGs)
B	Σύνολο των μπαταριών (BESS)
L	Σύνολο των φορτίων
RES	Σύνολο των Α/Γ (WT)
RESS	Σύνολο των Φ/Β (PV)
E	Σύνολο των γραμμών διανομής

Πίνακας 6.2: *Μεταβλητές του μοντέλου.*

Μεταβλητές

$\boldsymbol{Pg_G g, t}$	Ενεργός ισχύς γεννήτριας στο βήμα t
$\boldsymbol{Rgup_G g, t}$	Αύξηση ισχύος γεννήτριας σε περίπτωση αποσύνδεσης παραγωγής
$\boldsymbol{Rgdown_G g, t}$	Μείωση ισχύος γεννήτριας σε περίπτωση αποσύνδεσης φορτίου
$\boldsymbol{xg_G g, t}$	Κατάσταση γεννήτριας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό:0)
$\boldsymbol{xbrg_E ij, t}$	Κατάσταση γραμμής ij της γεννήτριας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο:1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{Rbup_B e, t}$	Αύξηση ισχύος μπαταρίας σε περίπτωση αποσύνδεσης παραγωγής
$\boldsymbol{Rbdown_B e, t}$	Μείωση ισχύος μπαταρίας σε περίπτωση αποσύνδεσης φορτίου
$\boldsymbol{ESS_B e, t}$	Ισχύς μπαταρίας στο βήμα t
$\boldsymbol{xb_B e, t}$	Κατάσταση μπαταρίας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{Ped_B e, t}$	Αποφόρτιση μπαταρίας στο βήμα t
$\boldsymbol{Pec_B e, t}$	Φόρτιση μπαταρίας στο βήμα t
$\boldsymbol{xed_B e, t}$	Κατάσταση αποφόρτισης μπαταρίας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xec_B e, t}$	Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xbrb_E ij, t}$	Κατάσταση γραμμής ij της μπαταρίας στο βήμα t (Ενεργοποιημένο:1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{Pl_L l, t}$	Ζήτηση ενεργού ισχύος του φορτίου στο βήμα t
$\boldsymbol{xl_L l, t}$	Κατάσταση φορτίου στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xbrl_E ij, t}$	Κατάσταση γραμμής ij του φορτίου στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{Pwt_{RES} w, t}$	Ενεργός ισχύς Α/Γ στο βήμα t
$\boldsymbol{Ppv_{RESS} p, t}$	Ενεργός ισχύς Φ/Β στο βήμα t
$\boldsymbol{xres_{RES} w, t}$	Κατάσταση Α/Γ στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xress_{RESS} p, t}$	Κατάσταση Φ/Β στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xbrwt_E ij, t}$	Κατάσταση γραμμής ij της Α/Γ στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)
$\boldsymbol{xbrpv_E ij, t}$	Κατάσταση γραμμής ij του Φ/Β στο βήμα t (Ενεργοποιημένο :1 Ανενεργό: 0)

Πίνακας 6.3: *Παράμετροι του μοντέλου.*

Παράμετροι

$\boldsymbol{Pgmax_G}$	Μέγιστη ενεργός ισχύς γεννήτριας
$\boldsymbol{Pgmin_G}$	Ελάχιστη ενεργός ισχύς γεννήτριας
$\boldsymbol{Prampg_G}$	Μέγιστος ρυθμός αύξηση ισχύος με ράμπα από γεννήτρια
$\boldsymbol{aal}$	Ρυθμός μείωσης της καμπύλης του CLPU του φορτίου l
$\boldsymbol{bl}$	Συντελεστής βαρύτητας φορτίου l
$\boldsymbol{Dl}$	Διάρκεια επαναφοράς του φορτίου l σε κανονική κατάσταση
$\boldsymbol{SDl}$	Συντελεστής φορτίου σε κανονική κατάσταση
$\boldsymbol{SUl}$	Συντελεστής φορτίου κατά τη διαδικασία του Black-start
$\boldsymbol{Pecmax}$	Μέγιστη ισχύς Φόρτισης μπαταρίας
$\boldsymbol{Pedmax}$	Μέγιστη ισχύς αποφόρτισης μπαταρίας
$\boldsymbol{nec}$	Συντελεστής φόρτισης μπαταρίας
$\boldsymbol{ned}$	Συντελεστής αποφόρτισης μπαταρίας
$\boldsymbol{Pwt}$	Μέγιστη ενεργός ισχύς της Α/Γ
$\boldsymbol{Ppv}$	Μέγιστη ενεργός ισχύς του Φ/Β
$\boldsymbol{Emax}$	Μέγιστη ενεργός ισχύς της μπαταρίας
$\boldsymbol{Socini}$	Αρχική κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας
$\boldsymbol{Socmax}$	Μέγιστη φόρτιση της μπαταρίας
$\boldsymbol{Socmin}$	Ελάχιστη φόρτιση της μπαταρίας
$\boldsymbol{Gcost}$	Κόστος λειτουργίας γεννήτριας
$\boldsymbol{\Delta T}$	Χρονική διάρκεια μεταξύ των βημάτων

6.3 Αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου

Κατά τη διάρκεια ενός γενικού blackout ή μιας μερικής διακοπής ρεύματος σε ένα μικροδίκτυο είτε σε ένα ΜΔΝ, το κρισιμότερο ζήτημα είναι η αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης των καταναλωτών.

Με βάση αυτήν τη συνθήκη, η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου μεγιστοποιεί τη συνολική ενέργεια που είναι δυνατόν να αποκατασταθεί, επανατροφοδοτόντας, σταδιακά, με διακριτά βήματα Τ, σε χρονικό ορίζοντα $T * \Delta T$, τα φορτία του συστήματος. Στην αντικειμενική συνάρτηση συνυπολογίζεται και ο συντελεστής βαρύτητας του κάθε φορτίου, αφού η αναγκαιότητα αποκατάστασης κάποιων φορτίων με κάποιων άλλων διαφοροποιείται, καθώς και το κόστος παραγωγής της γεννήτριας.

Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως εξής :

$$\max \sum_{l\varepsilon L} \sum_{t\varepsilon T} Pl_L l,t * bl * \Delta T - \sum_{g\varepsilon G} \sum_{t\varepsilon T} Gcost * Pg_G g,t \tag{6.1}$$

υπό τους περιορισμούς:

- *Περιορισμοί για το ισοζύγιο ισχύος*
- *Περιορισμοί για το CLPU των φορτίων*
- *Περιορισμοί για την γεννήτρια*
- *Περιορισμοι για το σύστημα μπαταριών*
- *Περιορισμοί για την εφεδρεία του συστήματος μπαταριών και της γεννήτριας*
- *Περιορισμοί για τις ΑΠΕ*
- *Περιορισμοι για τις διασυνδέσεις μεταξυ των στοιχείων του συστήματος*

6.4 Περιορισμοί του μοντέλου

6.4.1 Περιορισμοί για το ισοζύγιο ισχύος

Το μοντέλο ροής ισχύος (Power flow) που χρησιμοποιείται κυρίως στην αποκατάσταση δικτύων είναι το γραμμικό DC μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος το οποίο αγνοεί την άεργο ισχύς και τα επίπεδα τάσης. Η AC βέλτιστη ροή ισχύος είναι μη γραμμική και επιβαρύνει σημαντικά το πρόβλημα. Επομένως, γραμμικοποιημένες εξισώσεις Distflow χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ροής ισχύος [44].

Η εξίσωση για το ισοζύγιο ισχύος για $g \in G,\ e \in B,\ w \in RES,\ p \in RESS,\ l \in L,\ t \in \mathrm{T}$ διατυπώνεται ως εξής:

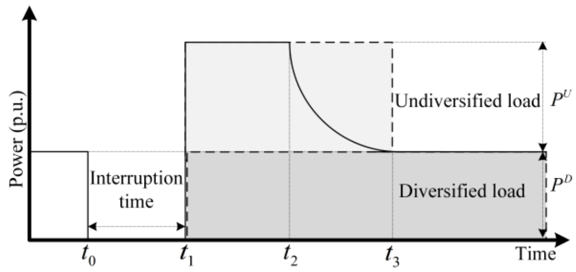
$$Pg_G g,t + Ped_B e,t + Pwt_{RES} w,t + Ppv_{RESS} p,t = Pl_L l,t + Pec_B e,t \tag{6.2}$$

6.4.2 Περιορισμοί για το Cold Load Pickup (CLPU) των φορτίων

Μετά από παρατεταμένη περίοδο διακοπή ολικής σβέσης (blackout), πιθανόν να συμβεί το φαινόμενο Cold load pickup (CLPU). Όπως έχει προαναφερθεί, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, τα θερμοστατικά φορτία κατανέμονται ομοιόμορφα, ενώ κατά τη διάρκεια του Black-start όλων αυτών των φορτίων, αυτά καταναλώνουν ισχύς ταυτόχρονα με αποτέλεσμα να προκύψει πιθανόν ένα νέο blackout. Ως συνέπεια, θα έχουμε πολύ μεγαλύτερη ζήτηση ισχύος από ότι σε κανονικές συνθήκες.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, η κατανάλωση ισχύος από τα φορτία ορίζεται ως ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (Diversified load), ενώ κατά τη διάρκεια του Black-start, ανομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο (Undiversified load). Τη χρονική στιγμή, t_0 εώς την t_1 το σύστημα υπόκειται σε συνθήκες blackout. Τη χρονική στιγμή t_1, το φορτίο έχει αποκατασταθεί και καταναλώνει ισχύς PU ενώ την t3 το φορτίο επανέρχεται στη κανονική κατάσταση με ζήτηση ισχύος PD.

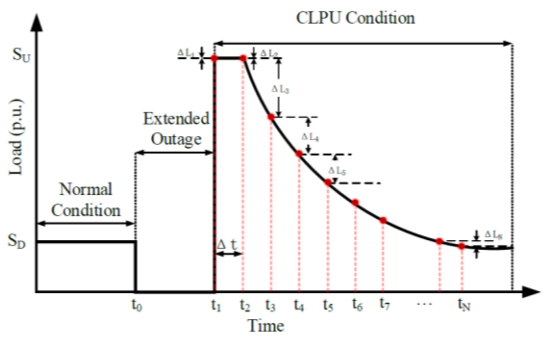
Η τυπική συμπεριφορά του CLPU μπορεί να αναπαρασταθεί χρησιμοποιώντας μια εκθετική συνάρτηση, η οποία είναι που φαίνεται στο Σχήμα 6.2, όπου στη χρονική διάρκεια t_2 - t_1 η ισχύς του φορτίου είναι $SUl * PD$. Η χρονική διάρκεια t_3 - t_1 είναι η διάρκεια του CLPU.



Σχήμα 6.2 : Καμπύλη CLPU με μπλοκ ζήτησης ισχύος PU και PD. [54]

Στη παρούσα διπλωματική, το μοντέλο CLPU που προτείνεται για τη μοντελοποίηση του φορτίου, κατά το Black-start, αναλύεται σε επιμέρους διακριτά χρονικά βήματα, με βάση μιας δεδομένης καμπύλης CLPU.

Το σχήμα 6.3 απεικονίζει μια τυπική εκθετική καμπύλη CLPU :



Σχήμα 6.3 : Καμπύλη CLPU με διακριτά χρονικά βήματα. [14]

Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τα χρονικά βήματα (ο χρόνος αποκατάστασης t1 για κάθε φορτίο δεν είναι προκαθορισμένος) και ο κατακόρυφος άξονας αντιπροσωπεύει τη ζήτηση φορτίου που παρουσιάζεται στο σύστημα. Κάθε χρονικό βήμα t απέχει χρονικά από το t-1 και το t+1 βήμα αντίστοιχα, χρονική διάρκεια ΔT.

Οι εξισώσεις του CLPU διατυπώνονται ως εξής [14]:

$$Pl_L l,t = Pl_L * \left(SUl * \; xlLl,t \; - \sum_{k=1}^{t} \Delta Pl(k) * \; xlLl,t-k+1\right), \; l \in L, t \in T \tag{6.3}$$

όπου Pl_L η ενεργός ισχύς του φορτίου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας

και $$\Delta Pl(k) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ Ll(k) - Ll(k-1), & 1 < k \leq N \end{cases} \tag{6.4}$$

Αν Cl,k είναι η χρονική διάρκεια μεταξύ του χρονικού βήματος όπου το φορτίο l, ξεκινά να αποκτά ομοιόμορφη κατανομή και του χρονικού βήματος kth,

τότε, $Cl,k = (k-1) * \Delta T - Dl$ με $1 \leq k \leq N$ (6.5)

και $Ll(k) = (SD + (SlU - SlD)e^{-aal*Cl,k}) * u(Cl,k) + SU\big(1 - u(Cl,k)\big),$ (6.6)

όπου, $$u(i) = \begin{cases} 1, & i > 0 \\ 0, & i \leq 0 \end{cases} \tag{6.7}$$

6.4.3 Περιορισμοί για τη γεννήτρια

Οι γεννήτριες θα πρέπει σε κάθε χρονικό βήμα να διατηρούν εντός ορίων την ισχύς εξόδου τους προκειμένου να αποφευχθεί πιθανή βλάβη κατά τη λειτουργία τους.

Οπότε:

$$Pgmin_G * xg_G g,t \leq Pg_G g,t \leq Pgmax_G * xg_G g,t \;, \; g \in G, t \in T \tag{6.8}$$

Ο ρυθμός αύξησης της ισχύς εξόδου της γεννήτριας από το ένα χρονικό βήμα στο επομένο θα πρέπει να διατηρείται εντός ορίων.

Οπότε :

$$-Prampg_G * \Delta T \leq Pg_G g,t - Pg_G g,t,t-1 \leq Prampg_G * \Delta T, g \in G, t \in T, t > 1 \tag{6.9}$$

6.4.4 Περιορισμοί για τις μπαταρίες (BESS)

Η ύπαρξη του BESS με τον grid-forming αντιστροφέα είναι σημαντική κατά τη διαδικασία του Black-start του ΜΔΝ. Διαθέτει την ικανότητα να εγχέει στιγμιαία ενεργό ισχύ αλλά και να απορροφά ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Οι περιορισμοί που διέπουν το BESS, για $e \in B$ και $t \in T$, είναι οι εξής:

$$0 \leq Ped_B e,t \leq Pedmax * xed_B e,t \tag{6.10}$$

$$0 \leq Pec_B e,t \leq Pecmax * xec_B e,t \tag{6.11}$$

$$ESS_B e,1 = Socini * Emax \tag{6.12}$$

$$ESS_B e,t = ESS_B e,\text{t-1} + ned * Pec_B e,t * \Delta T - \frac{1}{ned} * Ped_B e,t * \Delta T, \ t > 1 \tag{6.13}$$

$$Socmin * Emax \leq ESS_B e,t \leq Socmax * Emax \tag{6.14}$$

Οι περιορισμοί (6.10) και (6.11) διατηρούν τη φόρτιση και την έγχυση ενεργού ισχύος του BESS εντός καθορισμένων ορίων.

Οι περιορισμοί (6.12) – (6.14) καθορίζουν την αρχική φόρτιση του BESS, την φόρτιση του στο χρονικό βήμα t, και όρια στα οποία μπορεί να κυμαίνεται, αντίστοιχα.

6.4.5 Περιορισμοί για την εφεδρεία του συστήματος μπαταριών και της γεννήτριας

Περιορισμοί για συσχέτιση παραγωγής και εφεδρείας της γεννήτριας με τη μέγιστη ισχύ, με g ∈ G και t ∈ T:

$$Pg_G g,t + Rgup_G g,t \leq Pgmax_G * xg_G g,t \tag{6.14}$$

$$Rgup_G g,t \geq 0 \tag{6.15}$$

$$Pg_G g,t + Rgdown_G g,t \geq Pgmin_G * xg_G g,t \tag{6.16}$$

$$Rgdown_G g,t \geq 0 \tag{6.17}$$

Περιορισμοί για συσχέτιση παραγωγής και εφεδρείας συστήματος μπαταριών με τη μέγιστη ισχύ, με e ∈ B και t ∈ T:

$$Ped_B e,t + Rbup_B e,t \leq Pbmax * xb_B e,t + Pec_B e,t \tag{6.18}$$

$$Rbup_B e,t \geq 0 \tag{6.19}$$

$$Pec_B e,t + Rbdown_B e,t \geq Pbmax * xb_B e,t + Ped_B e,t \tag{6.20}$$

$$Rbdown_B e,t \geq 0 \tag{6.21}$$

Οι απαιτήσεις συστήματος σε εφεδρείες είναι οι εξής:

- Αθροιστικά οι εφεδρείες για αύξηση ισχύος της μπαταρίας και της γεννήτριας πρέπει να καλύπτουν την απώλεια μονάδας ΑΠΕ.

$$Rbup_B e,t + Rgup_G g,t \geq Pwt_{RES} w,t \tag{6.22}$$

$$Rbup_B e,t \ + Rgup_G g,t \geq Ppv_{RESS} p,t \qquad (6.23)$$

- Αθροιστικά οι εφεδρείες για μείωση ισχύος της μπαταρίας και της γεννήτριας πρέπει να καλύπτουν την απώλεια οποιουδήποτε εκ των φορτίων:

$$Rbdown_B e,t \ + Rgdown_G g,t \geq P_{L1} \qquad (6.24)$$

$$Rbdown_B e,t \ + Rgdown_G g,t \geq P_{L2}$$

$$Rbdown_B e,t \ + Rgdown_G g,t \geq P_{LN}$$

Η μπαταρία θα πρέπει να μπορεί να αναλάβει το φορτίο της γεννήτριας αν αυτή αποσυνδεθεί (το ανάποδο δεν το λαμβάνουμε υπόψιν):

$$Rbup_B e,t \geq Pg_G g,t \qquad (6.25)$$

6.4.6 Περιορισμοί για τις ΑΠΕ

Οι ΑΠΕ θα πρέπει σε κάθε χρονικό βήμα να διατηρούν εντός οριών την ισχύς εξόδου τους.

Οπότε :

$$0 \leq \ Pwt_{RES} w,t \ \leq Pwt * xres_{RES} w,t \ , \ w \in RES, t \in T \qquad (6.26)$$

$$0 \leq \ Ppv_{RESS} p,t \ \leq Ppv * xress_{RESS} p,t \ , \ p \in RESS, t \in T \qquad (6.27)$$

όπου ο περιορισμός (6.26) αναφέρεται σε Α/Γ και ο (6.27) σε Φ/Β.

6.4.7 Περιορισμοι για τις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος

Οι περιορισμοί για τις διασυνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος υλοποιούνται μέσω των δυαδικών (binary) μεταβλητών τους, οι οποίες εντάσσουν ή αποκόπτουν κάποιο στοιχείο ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης.

- Περιορισμοί για τις γραμμές των φορτίων

$$xbrl_E ij,t \leq \ xbrg_E ij,t + \ xbrb_E ij,t \ , \ (i,j) \in E \ , t \in T \qquad (6.28)$$

$$xbrl_E ij,t - \ xbrl_E ij,t-1 \ \geq 0 \ , \ (i,j) \in \ E \ , t \in T \ \ , t > 1 \qquad (6.29)$$

- Περιορισμοί για τις γραμμές των ΑΠΕ

$$xbrwt_E ij,t \leq xbrg_E ij,t + xbrb_E ij,t\ ,\ (i,j) \in E\ , t \in T \tag{6.30}$$

$$xbrpv_{E ij,t} \leq xbrg_E ij,t + xbrb_E ij,t,\ (i,j) \in B\ , t \in T \tag{6.31}$$

- Περιορισμοί για τις γραμμές των γεννητριών

$$xbrg_E ij,t \leq xg_{G1} g,t + xg_{GN} g,t,\ (i,j) \in E\ , g \in G,\ t \in T \tag{6.32}$$

$$xg_G g,t + xg_G g,t-1, \geq 0\ ,\ g \in G\ , t \in T\ , t > 1 \tag{6.33}$$

- Περιορισμοί για τις γραμμές του συστήματος μπαταριών

$$xbrb_E ij,t \leq xed_B e,t\ ,\ (i,j) \in E\ , e \in B,\ t \in T \tag{6.34}$$

$$xed_B e,t + xec_B e,t \leq 1\ ,\ (i,j) \in E\ , e \in B,\ t \in T \tag{6.35}$$

Οι περιορισμοί (6.28) και (6.29) ενεργοποιούν τη γραμμή του φορτίου μόνο εάν έχει ήδη ενεργοποιηθεί η γραμμή της μπαταρίας είτε η γραμμή της γεννήτριας και εξασφαλίζουν πως οι γραμμές των φορτίων θα παραμείνουν ενεργοποιημένες αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (6.30) και (6.31) ενεργοποιούν τη γραμμή των ΑΠΕ μόνο εάν έχει ήδη ενεργοποιηθεί η γραμμή της μπαταρίας είτε η γραμμή της γεννήτριας.

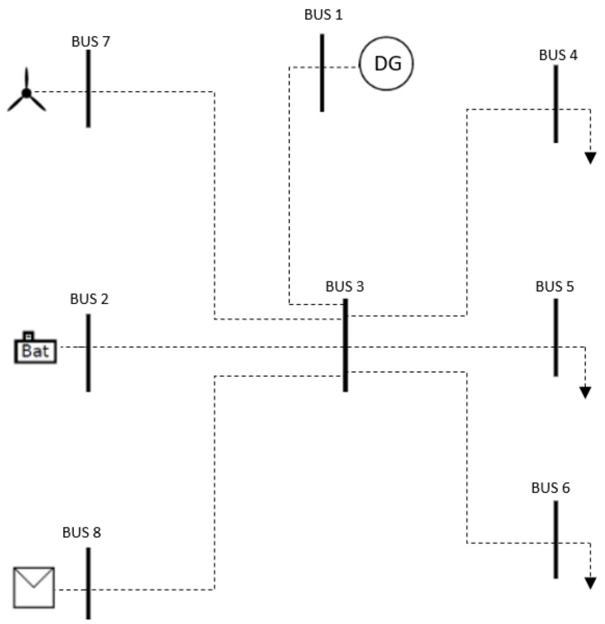
Οι περιορισμοί (6.32) και (6.33) ενεργοποιούν τη γραμμή της γεννήτριας μόνο εάν έχει ήδη ενεργοποιηθεί ο κόμβος της γεννήτριας και εξασφαλίζουν πως οι γραμμές των γεννητριών θα παραμείνουν ενεργοποιημένες αντίστοιχα.

Οι περιορισμοί (6.34) και (6.35) ενεργοποιούν τη γραμμή της μπαταρίας μόνο εάν έχει ήδη ενεργοποιηθεί ο κόμβος της μπαταρίας και εξασφαλίζουν πως η μπαταρία δεν μπορεί να φορτίζει και να εγχέει ισχύ ταυτόχρονα, αντίστοιχα.

6.5 Προσομοίωση του Αλγορίθμου της Επαναφοράς Ηλεκτροδότησης (Black-start) σε ΜΔΝ

6.5.1 Χαρακτηριστικά της Προσομοίωσης

Ο αλγόριθμος του προβλήματος Black-start σε ΜΔΝ βασίζεται σε μοντέλο MILP. Η επίλυση του υλοποιείται μέσω του Pyomo, βιβλιοθήκη της Python, ως ένα Concrete μοντέλο, όπως έχει προαναφερθεί. Μέσω προσομοιώσεων του προβλήματος βελτιστοποίησης, υλοποιήθηκαν τρία σενάρια με δυο επιμέρους υποσενάρια προκειμένου να παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου του Black-start. Τα τρία σενάρια βασίστηκαν πάνω στο μονογραμμικό απλοποιημένο δίκτυο του Σχήματος 6.4.



Σχήμα 6.4 : Μονογραμμικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε στα τρία σενάρια

Όπου στο Ζυγό 1 (BUS 1) βρίσκεται η ντηζελογεννήτρια, στο Ζυγό 2 (BUS2) το σύστημα μπαταριών, στους Ζυγούς 4-6 (BUS 4-6) τα φορτιά του δικτύου και στους Ζυγούς 7 και 8 (BUS 7-8) βρίσκεται η Α/Γ και τα Φ/Β.

Το μοντέλο των φορτίων του συστήματος, σε κάθε σενάριο, βασίζεται στο CLPU. Αρχικά σε κάθε προσομοίωση, οι γραμμές και τα φορτία δεν είναι ενεργοποιημένα εξαιτίας ολικού blackout στο δίκτυο.

Οι ντηζελογεννήτριες σε κάθε σενάριο συμμετέχουν στη διαδικασία του Black-start στο βήμα $T_i \geq 3$, όπου $i \in T$. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να προετοιμαστούν για την επανεκκίνηση του συστήματος.

Σε όλα τα σενάρια η χρονική διάρκεια μεταξύ των διακριτών βημάτων είναι σταθερή και ίση με ΔΤ = 1 min.

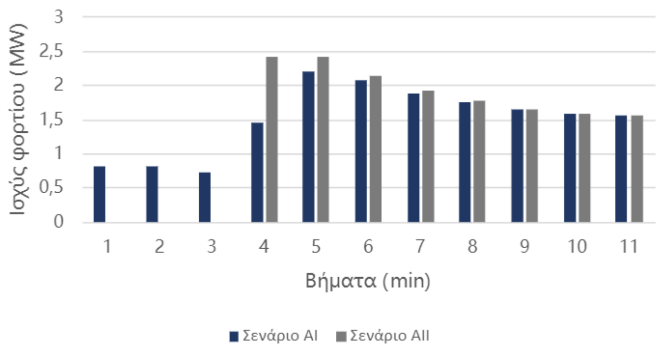
6.5.2 Σενάριο Α - Διαφοροποιημένες αρχικές συνθήκες φόρτισης (Soc) του συστήματος μπαταριών υπό το ίδιο φορτίο

Οι παράμετροι του Σεναρίου Α απεικονίζονται στον Πίνακα 6.4. Στο Σενάριο ΑΙ η αρχική φόρτιση του συστήματος μπαταριών είναι $Socini = 60\ \%$, και στο Σενάριο ΑΙΙ είναι $Socini = 30\ \%$. Το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 1.2 MW (Τρία φορτία ισχύος 0.4 MW) και στις δυο περιπτώσεις.

Πίνακας 6.4: *Παράμετροι του Σενάριού Α*

Pgmax*G*	1.6 MW
Pgmin*G*	0.4 MW
Prampg*G*	0.5 MW
aa*l*	1.5
b*l*	5.0
D*l*	2.9 min
SD*l*	1.3
SU*l*	2.0
Pecmax	1.5 MW
Pedmax	1.5 MW
nec	0.9
ned	0.9
Pwt	0.8 MW
Ppv	0.4 MW
Emax	12 MWh
Socmax	95 %
Socmin	30 %
Gcost	0.6
T	11

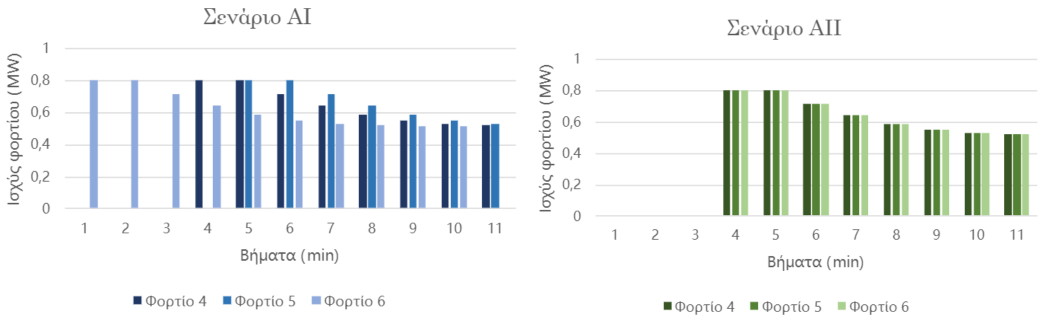
Τα αποτελέσματα της προσομοιώσης των σεναριών, όπου υλοποιήθηκαν μέσω του Pyomo απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 6.7 : Συνολική ισχύς φορτίων που συνδέθηκε στο δίκτυο, ανά βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Στό το Σχήμα 6.7, παρατηρείται πως στο Σενάριο ΑΙ ($Socini = 60\ \%$) η αποκατάσταση των φορτίων επιτυγχάνεται γρηγορότερα, στο βήμα 1, σε αντίθεση με το Σενάριο ΑΙΙ ($Socini = 30\%$), όπου τα φορτία αποκαθίστανται στο βήμα 4.

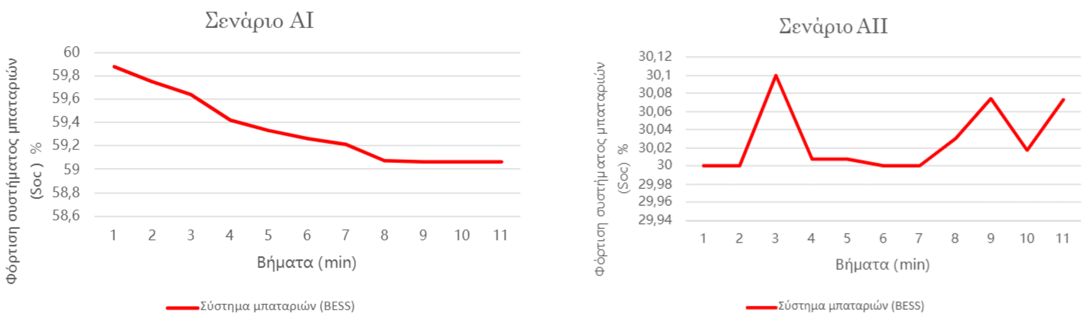
Η αποκατάσταση των φορτίων αποτυπώνεται αναλυτικά στο Σχήμα 6.8.



Σχήμα 6.8 : Ζήτηση ισχύος φορτίων που αποκαταστάθηκαν, ανά, βήμα στα επιμέρους Σενάρια. Τα φορτία επανέρχονται σε κανονικές συνθήκες ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το CLPU μοντέλο.

Τα φορτία 4, 5, και 6 αφού αποκατασταθούν, επιστρέφουν σταδιακά σε κανονικά επίπεδα ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το μοντέλο CLPU, όπως αναλύθηκε στους περιορισμούς (6.3) – (6.7).

Στο Σχήμα 6.9, απεικονίζονται οι φορτίσεις του συστήματος μπαταριών (BESS) στα επιμέρους Σενάρια.

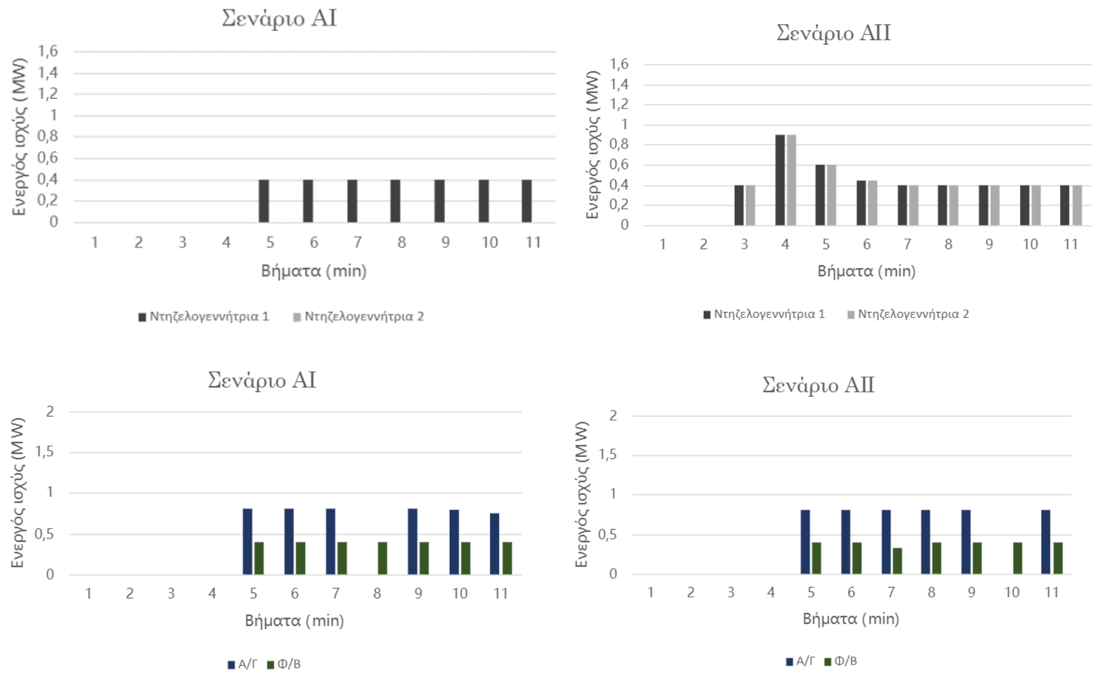


Σχήμα 6.9 : Φόρτιση συστήματος μπαταριών (Soc), άνα βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Οι δυο γραφικές του Σχήματος 6.9, προκύπτουν από τους περιορισμούς (6.12) – (6.14). Στο πρώτο σενάριο, το αρχικό Soc είναι $Soc_{ini} = 60$ %. Φαίνεται πως από το βήμα 1 εώς το βήμα 11, το Soc μειώνεται αφού το σύστημα μπαταριών εγχέει ισχύ στο δίκτυο από το πρώτο βήμα αφού συμμετέχει ως Black-start μονάδα.

Στο δεύτερο σενάριο, το αρχικό Soc είναι $Socini = 30$ %. Στα πρώτα δυο βήματα το BESS δεν εγχέει ισχύ στο δίκτυο, ενώ στο τρίτο βήμα αρχίζει να φορτίζει αφού $Soc(t = 2) = Socmin$. Στο βήμα 3 αρχίζει να εγχέει ισχύ εώς και και το βήμα 6 όπου ξανά αρχίζει να φορτίζει μέχρι το βήμα 9. Στο βήμα 9 εγχέει ισχύ στο δίκτυο και στη συνέχεια φόρτιζει προκειμένου να τηρούνται οι περιορισμοί του Soc.

Στο Σχήμα 6.10, απεικονίζεται η παραγωγή των ντηζελογεννητριών (DG) και των ΑΠΕ στα δυο Σενάρια

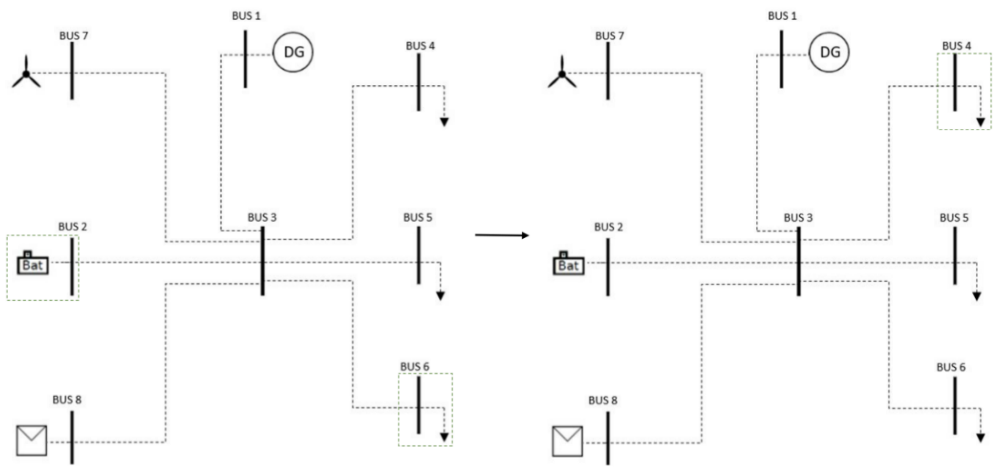


Σχήμα 6.10: Παραγωγή ντηζελογεννητριών και ΑΠΕ, ανά βήμα, στα δυο Σενάρια.

Στο Σενάριο AII η παραγωγή των ντηζελογεννητριών είναι υψηλότερη από το Σενάριο AI, προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση ισχύος των φορτίων, αφού το Socini στο δεύτερο σενάριο έχει την ελάχιστη δυνατή τιμή. Στο πρώτο σενάριο το BESS εγχέει ισχύ από το βήμα 1 ενώ η ντηζελογεννήτρια 1 συνδέεται στο δίκτυο στο βήμα 5, και η παραγωγή της περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο, 0.4 MW. Η ντηζελογεννήτρια 2 δεν συνδέεται στο σύστημα. Στο δεύτερο σενάριο, όπως προαναφέρθηκε, η παραγωγή των ντηζελογεννητριών είναι υψηλότερη. Στο βήμα 4 η παραγωγή είναι η μέγιστη, ίση με 0.9 MW για τη κάθε DG για να καλύψει τα φορτία και στη συνέχεια μειώνεται αφού συνδέεονται οι ΑΠΕ.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία επαναφοράς των φορτίων :

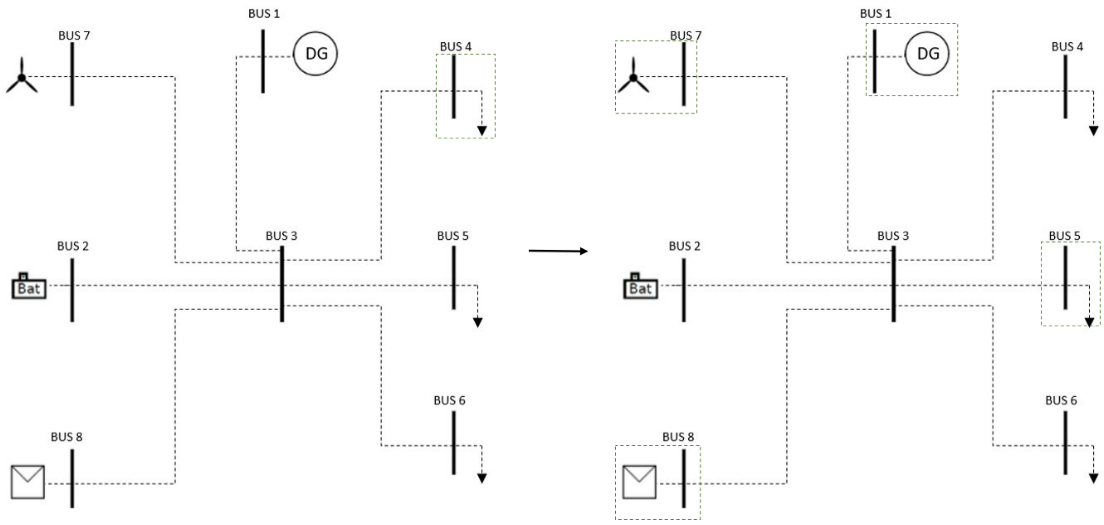
<u>Σενάριο AI</u>



Σχήμα 6.11 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 1 και βήμα 4.

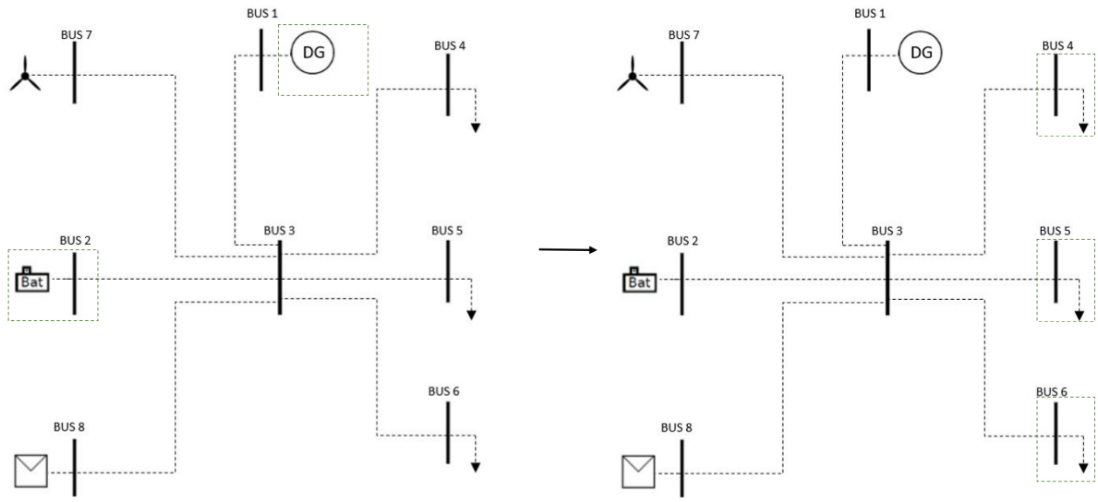
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11, η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου στο βήμα 1 εγχέει $Ped = 0.8\ MW$ και αποκαθιστά το φορτίο 6 (0.8 MW). Στα βήματα 2 και 3 δεν αποκαθίσταται φορτίο, ενώ στο βήμα 4 εγχέει $Ped = 1.44\ MW$ και αποκαθιστά το φορτίο 4 (0.8 MW).

Στο βήμα 5 (Σχήμα 6.12), συνδέεται η ντιζελογεννήτρια 1, η Α/Γ και τα Φ/Β στο δίκτυο και παράγουν $Pg = 0.4\ MW, Pwt = 0.8\ MW\ και\ Ppv = 0.4\ MW$ αντίστοιχα, και αποκαθίσταται το φορτίο 5 (0.8 MW). Όλα τα φορτία που επανέρχονται σε ένα ορισμένο βήμα μετά το blackout, συνεχίζουν να έχουν ζήτηση ισχύος σύμφωνα με το CLPU μοντέλο.



Σχήμα 6.12 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 5.

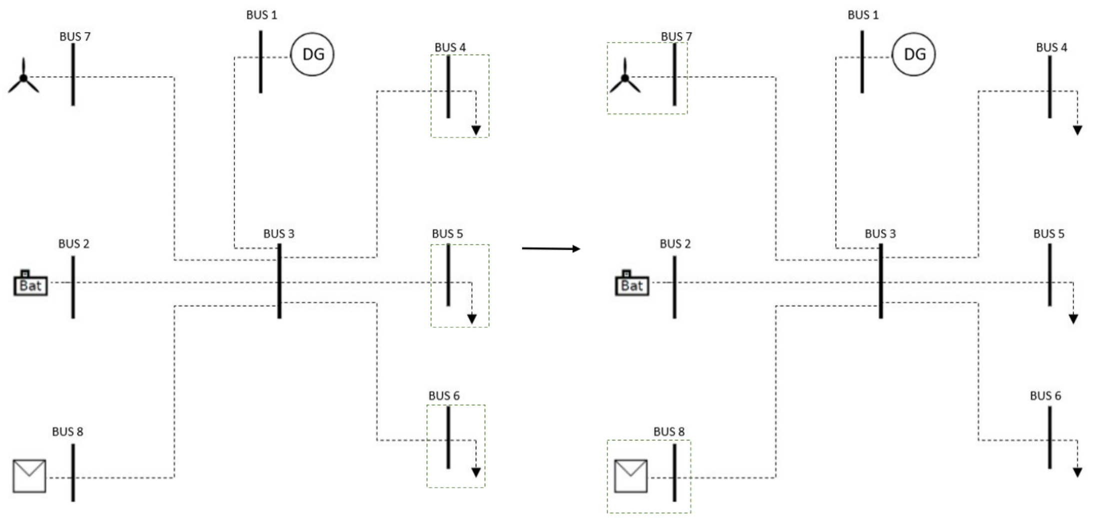
<u>Σενάριο ΑΙΙ</u>



Σχήμα 6.13 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 3 και βήμα 4.

Στο Σενάριο AII, στο βήμα 3 η DG παράγει $Pg = 0.4\,MW$ και το BESS φορτίζει με $Pec = 0.8\,MW$. Στο βήμα 4, $Pg = 0.9\,MW$, $Ped = 0.6\,MW$ και τα φορτία έχουν αποκατασταθεί (2.4 MW). Να σημειωθεί ότι ένω τα φορτία έχουν ονομαστική ισχύ σε κανονική λειτουργία 1.2 MW, εξαιτιάς του CLPU κατά την επαναφορά τους, έχουν ζήτηση ισχύος ίση με $PL = 1.2 * SUl = 2.4\,MW$ (όπου ο συντελεστής SUl διαφοροποείται ανάλογα με το φορτίο).

Στο βήμα 5 (Σχήμα 6.14), συνδέονται οι ΑΠΕ και παράγουν $Pwt = 0.8\,MW$ και $Ppv = 0.4\,MW$.



Σχήμα 6.14 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 5.

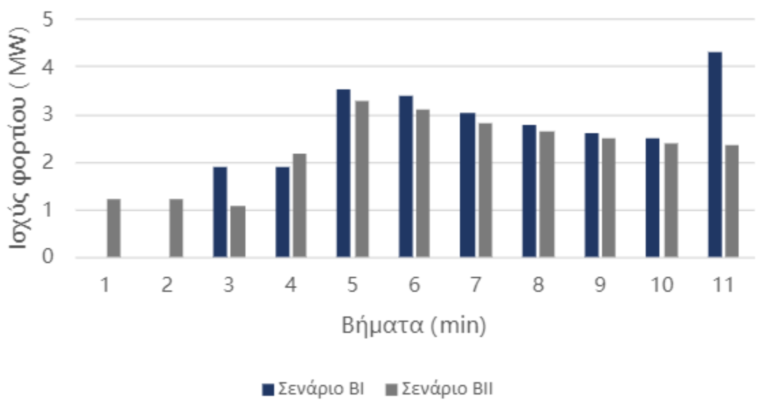
6.5.3 Σενάριο Β – Ίδιες αρχικές συνθήκες φόρτισης (Soc) του συστήματος μπαταριών υπό διαφορετικό φορτίο

Οι παράμετροι του Σεναρίου Β απεικονίζονται στον Πίνακα 6.5. Στο Σενάριο BI η αρχική φόρτιση του συστήματος μπαταριών είναι $Socini = 92$ %, όπως και στο Σενάριο BII είναι $Socini = 92$ %. Το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 2.8 MW (Τρία φορτία ισχύος 0.9333 MW) στη πρώτη περίπτωση και 1.8 MW (Τρία φορτία ισχύος 0.6 MW) στη δεύτερη.

Πίνακας 6.5 **:** *Παράμετροι του Σεναριου Β*

Pgmax*G*	1.6 MW
Pgmin*G*	0.4 MW
Prampg*G*	0.5 MW
aa*l*	1.5
b*l*	5.0
D*l*	2.9 min
SD*l*	1.3
SU*l*	2.0
Pecmax	1.5 MW
Pedmax	1.5 MW
nec	0.9
ned	0.9
Pwt	0.8 MW
Ppv	0.4 MW
Emax	12 MWh
Socmax	95 %
Socmin	30 %
Gcost	0.6
T	11.0

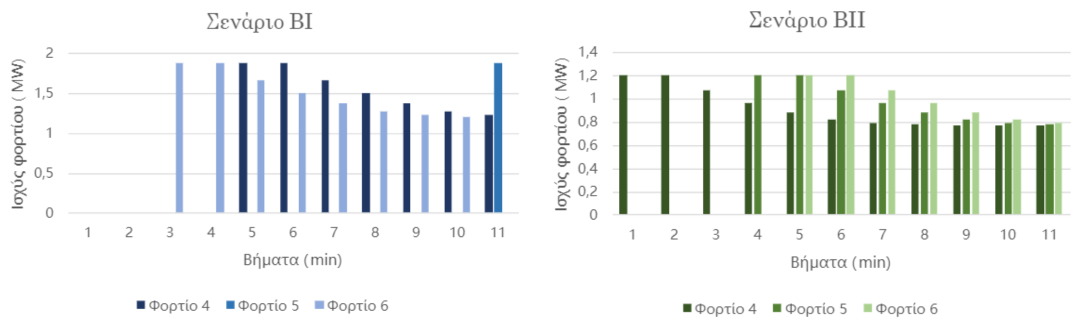
Τα αποτελέσματα της προσομοιώσης των σεναριών, όπου υλοποιήθηκαν μέσω του Pyomo απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 6.15 : Συνολική ισχύς φορτίων που συνδέθηκε στο δίκτυο, ανά βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.15, στο Σενάριο BII ($PL = 1.8\ MW$) η αποτατάσταση των φορτίων επιτυγχάνεται γρηγορότερα, στο βήμα 1 σε αντίθεση με το Σενάριο BII ($PL = 2.8\,MW$), όπου τα φορτία αρχίζουν να αποκαθίστανται στο βήμα 3.

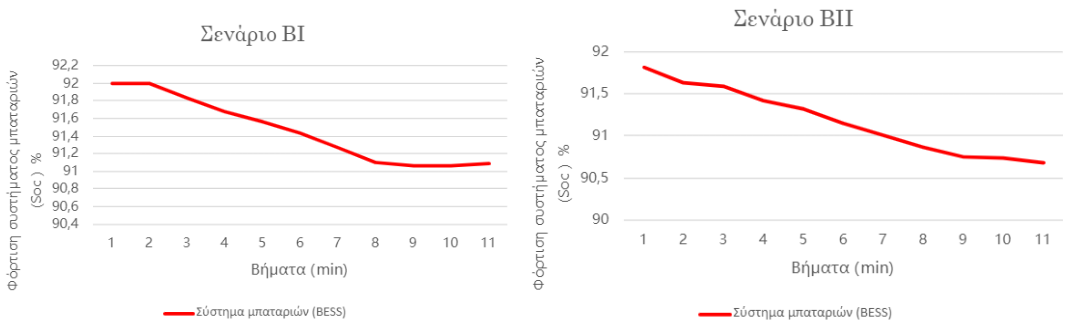
Η αποκατάσταση των φορτίων αποτυπώνεται αναλυτικά στο Σχήμα 6.16.



Σχήμα 6.16 : Ζήτηση ισχύος φορτίων που αποκαταστάθηκαν, ανά, βήμα στα επιμέρους Σενάρια. Τα φορτία επανέρχονται σε κανονικές συνθήκες ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το CLPU μοντέλο.

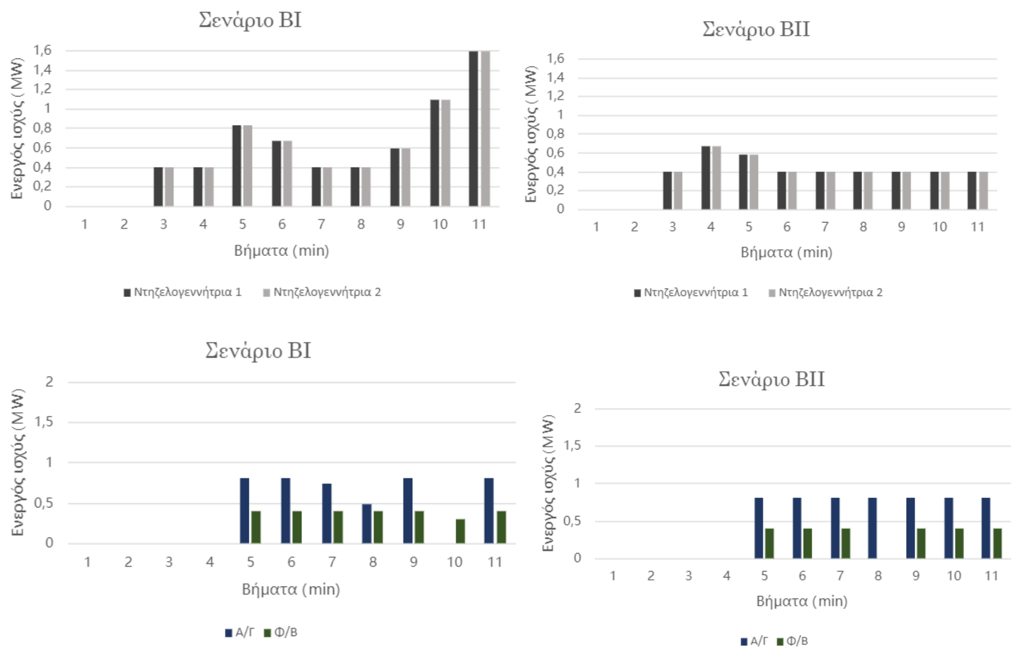
Τα φορτία 4, 5, και 6 αφού αποκατασταθούν, επιστρέφουν σταδιακά σε κανονικά επίπεδα ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το μοντέλο CLPU, όπως αναλύθηκε στους περιορισμούς (6.3) – (6.7). Στο πρώτο σενάριο τα φορτία 4,5 και 6 επανέρχονται στα βήματα 5, 3 και 11 αντίστοιχα ενώ στο δεύτερο σενάριο επανέρχονται στα βήματα 1, 4 και 5.

Στο Σχήμα 6.9, απεικονίζονται οι φορτίσεις του συστήματος μπαταριών (BESS) στα επιμέρους σενάρια.



Σχήμα 6.17 : Φόρτιση συστήματος μπαταριών (Soc), άνα βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Στο πρώτο σενάριο, το BESS ξεκινά να εγχέει ισχύ $Ped = 1.066\,MW$ στο βήμα 3 μέχρι το βήμα 9. Στο βήμα 11, φορτίζει με $Pec = 91\,kW$. Στο δεύτερο σενάριο, το BESS εγχέει ισχύ $Ped = 1.2\,MW$ από το βήμα 1, χώρις να έχει συνδεθεί η DG, αφού μπορεί να καλύψει το φορτίο 4 που συνδέεται στο βήμα 1. Συνεχίζει να εγχέει ισχύ μέχρι το βήμα 11 και το Soc συνεχίζει να μειώνεται μέχρι και αυτό το βήμα.

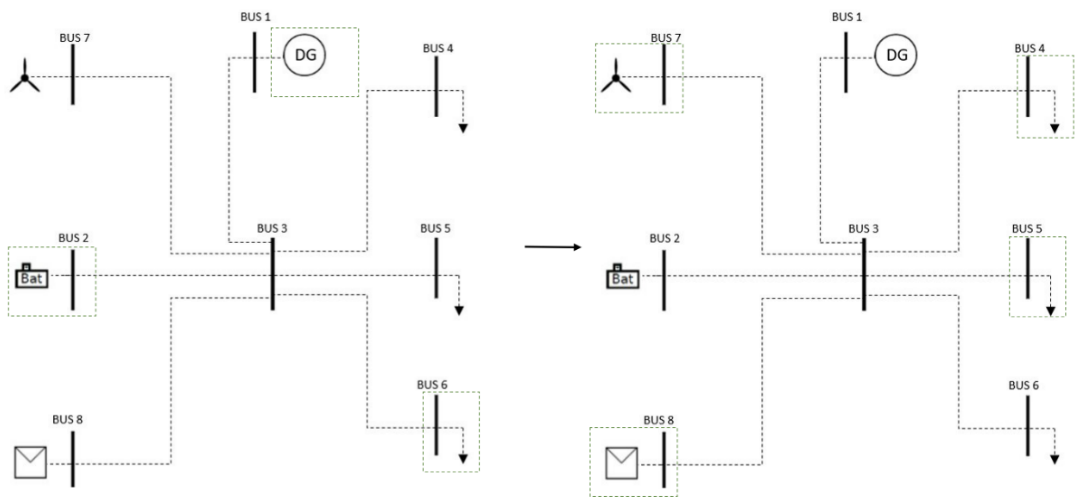


Σχήμα 6.18 : Παραγωγή ντηζελογεννητριών και ΑΠΕ, ανά βήμα, στα δυο Σενάρια.

Στο Σενάριο ΒΙ η παραγωγή των ντηζελογεννητριών είναι υψηλότερη από το Σενάριο ΒΙΙ, προκειμένου να καλυφθεί τη ζήτηση ισχύος των φορτίων. Στο δεύτερο σενάριο το BESS εγχέει ισχύ από το βήμα 1 ενώ η ντηζελογεννήτρια 1 και 2 συνδέονται στο δίκτυο στο βήμα 3, και η παραγωγή τους μεγιστοποιείται στο βήμα 4, με $Pg = 0.662\ MW$, η καθεμία. Στο πρώτο σενάριο, όπως προαναφέρθηκε, η παραγωγή των ντηζελογεννητριών είναι υψηλότερη. Στο βήμα 11 η παραγωγή είναι η μέγιστη, ίση με 1.59 MW για τη κάθε DG για να καλύψει το φορτίο 5 που αποκαθίσταται σε αυτό το βήμα. Σε κάθε βήμα τηρείται τόσο το $Pg < Pgmax$ όσο και το $Pg,\mathrm{t} - Pg,\mathrm{t-1} \leq Prampg$.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία επαναφοράς των φορτίων :

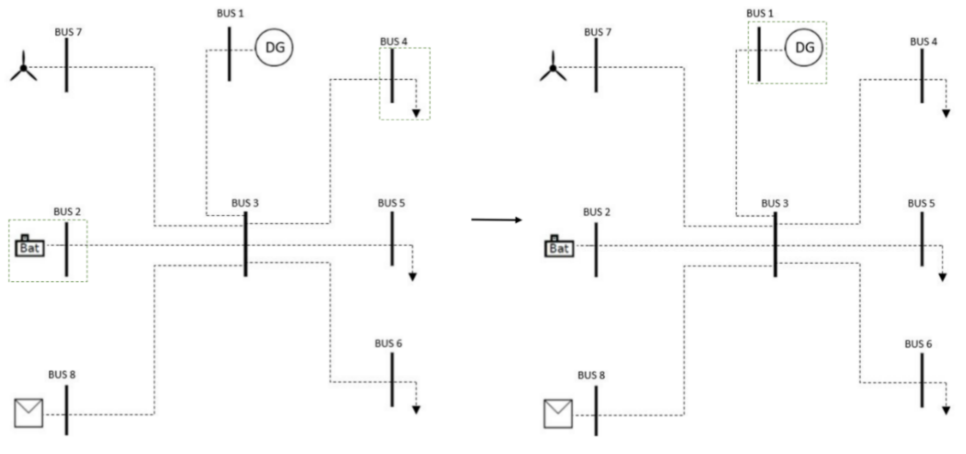
<u>Σενάριο ΒΙ</u>



Σχήμα 6.19 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 3 και βήμα 5 και 11.

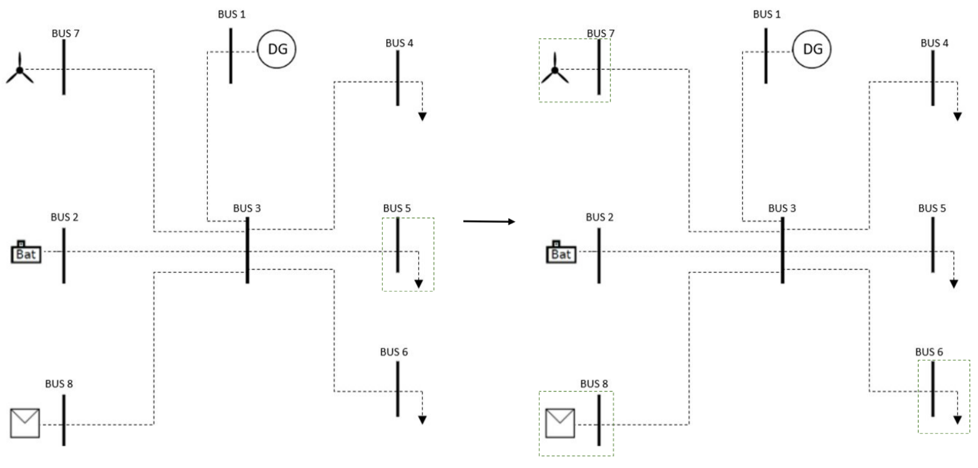
Στο Σενάριο BI, στο βήμα 3, η DG παράγει $Pg = 0.4\ MW$ και το BESS εγχέει ισχύ $Ped = 1.066\ MW$. Το φορτίο 6 επανέρχεται (1.8666 MW). Στο βήμα 5, $Pg = 0.827\ MW$ (η καθεμία), Ped = 0.672 MW και το φορτίο 4 έχει αποκατασταθεί (1.8666 MW). Στο βήμα 5, συνδέονται και οι ΑΠΕ και παράγουν Pwt = 0.8 MW και $Ppv = 0.4\ MW$. Στο βήμα 11, επανέρχεται το φορτίο 5 (1.8666 MW) με τις DGs να παράγουν $Pg = 1.59\ MW$ η καθεμία, BESS φορτίζει με $Pec = 91\ kW$, η Α/Γ παράγει $Pwt = 0.8\ MW$ και τα Φ/Β παράγουν $Ppv = 0.4\ MW$.

<u>Σενάριο BII</u>



Σχήμα 6.20 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 1 και βήμα 3.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20, η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου στο βήμα 1 εγχέει $Ped = 1.2\ MW$ και αποκαθιστά το φορτίο 4 (1.2 MW). Στο βήμα 2 δεν αποκαθίσταται φορτίο, ενώ στο βήμα 3 εγχέει $Ped = 268\ kW$ και συνδέεται στο δίκτυο οι DGs, όπου παράγει $Pg = 0.4\ MW$ (η καθεμία). Στο βήμα 4 (Σχήμα 6.21), οι DGs παράγουν $Pg = 1.32\ MW$, το BESS εγχέει $Ped = 0.837\ MW$ και το φορτίο 5 αποκαθίσταται (1.2 MW). Στο βήμα 5, η Α/Γ και τα Φ/Β συνδέονται στο δίκτυο και παράγουν $Pwt = 0.8\ MW$ και $Ppv = 0.4\ MW$ αντίστοιχα, και αποκαθίσταται το φορτίο 6 (1.2 MW).



Σχήμα 6.21 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 4 και βήμα 5.

6.5.4 Σενάριο Γ - Ίδιες αρχικές συνθήκες φόρτισης (Soc) του συστήματος μπαταριών με διαφοροποιημένη ισχύ από ΑΠΕ υπό το ίδιο φορτίο

Οι παράμετροι του Σεναρίου ΓΙ και Σεναρίου ΓΙΙ απεικονίζονται στον Πίνακα 6.6 και Πίνακα 6.7. Στο Σενάριο ΓΙ η αρχική φόρτιση του συστήματος μπαταριών *είναι* $Socini = 60$ %, όπως και στο Σενάριο ΒΙΙ είναι $Socini = 60$ %. Το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 1 MW (Τρία φορτία ισχύος 0.333 MW) και στα δυο σενάρια. Τα επίπεδα ονομαστικών τιμών ισχύος των ΑΠΕ βρίσκονται παρακάτω.

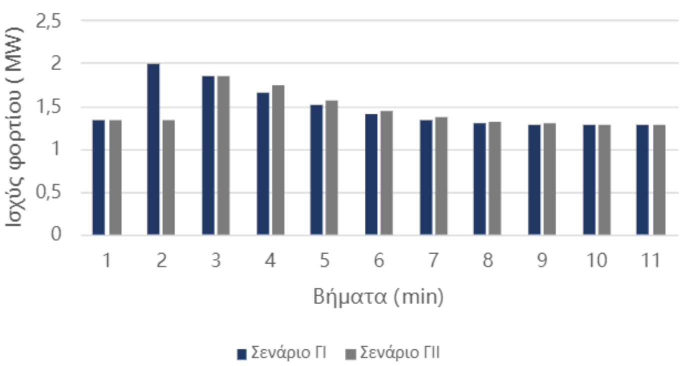
Πίνακας 6.6 **:** *Παράμετροι του Σεναριου ΓΙ*

Pgmax*G*	1.6 MW
Pgmin*G*	0.4 MW
Prampg*G*	0.5 MW
aa*l*	1.5
b*l*	5.0
D*l*	2.9 min
SD*l*	1.3
SU*l*	2.0
Pecmax	1.5 MW
Pedmax	1.5 MW
nec	0.9
ned	0.9
Pwt	**1.8 MW**
Ppv	**0.8 MW**
Emax	12 MWh
Socmax	95 %
Socmin	30 %
Gcost	0.6
T	11

Πίνακας 6.7 **:** *Παράμετροι του Σεναριου ΓΙΙ*

Pgmax*G*	1.6 MW
Pgmin*G*	0.4 MW
Prampg*G*	0.5 MW
aa*l*	1.5
b*l*	5.0
D*l*	2.9 min
SD*l*	1.3
SU*l*	2.0
Pecmax	1.5 MW
Pedmax	1.5 MW
nec	0.9
ned	0.9
Pwt	**0.5 MW**
Ppv	**0.25 MW**
Emax	12 MWh
Socmax	95 %
Socmin	30 %
Gcost	0.6
T	11

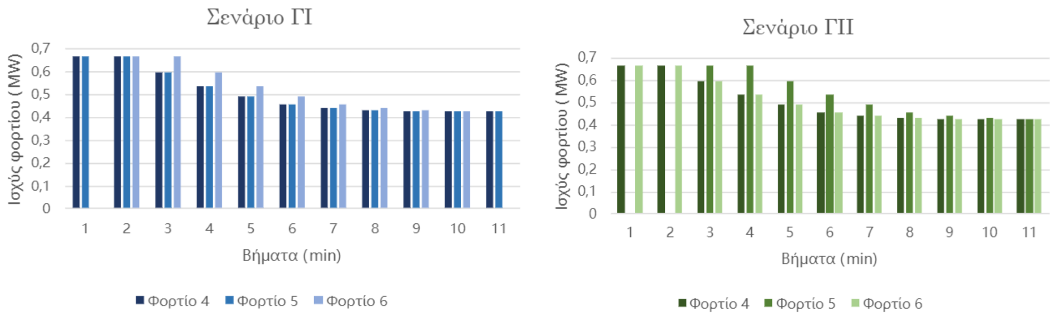
Τα αποτελέσματα της προσομοιώσης των σεναριών, όπου υλοποιήθηκαν μέσω του Pyomo απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 6.22 : Συνολική ισχύς φορτίων που συνδέθηκε στο δίκτυο, ανά βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.22, στο Σενάριο ΓΙ ($Pwt = 1.8\, MW$ και $Ppv = 0.8 MW$) η αποκατάσταση των φορτίων ξεκινά στο βήμα 1 όπως και στο Σενάριο ΓΙΙ ($Pwt = 0.5\, MW$ και $Ppv = 0.25\, MW$). Στις δυο προσομοιώσεις, το συνολικό φορτίο ήταν το ίδιο. Η διαφορά στις μέγιστες τιμές ισχύος των ΑΠΕ στα επιμέρους σενάρια, κατεύθυνε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αυξήσει την παραγωγή των DGs και την έγχυση ισχύος του BESS στο Σενάριο ΓΙΙ, όπου η παραγωγή των ΑΠΕ ήταν σημαντικά χαμηλότερη.

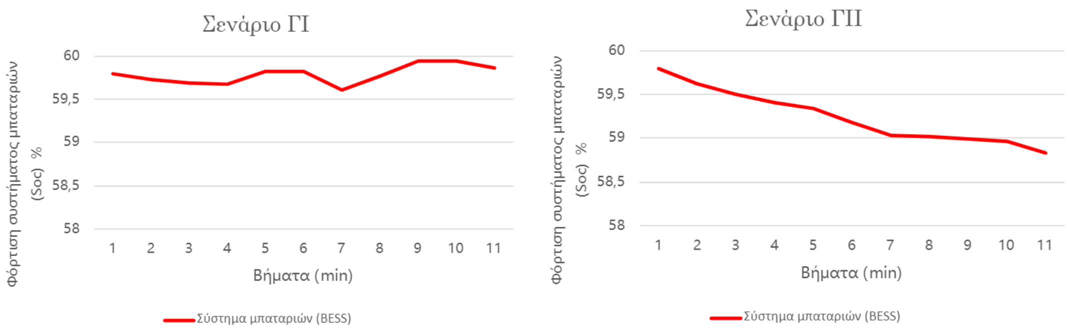
Η αποκατάσταση των φορτίων αποτυπώνεται αναλυτικά στο Σχήμα 6.23.



Σχήμα 6.23 : Ζήτηση ισχύος φορτίων που αποκαταστάθηκαν, ανά, βήμα στα επιμέρους Σενάρια. Τα φορτία επανέρχονται σε κανονικές συνθήκες ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το CLPU μοντέλο.

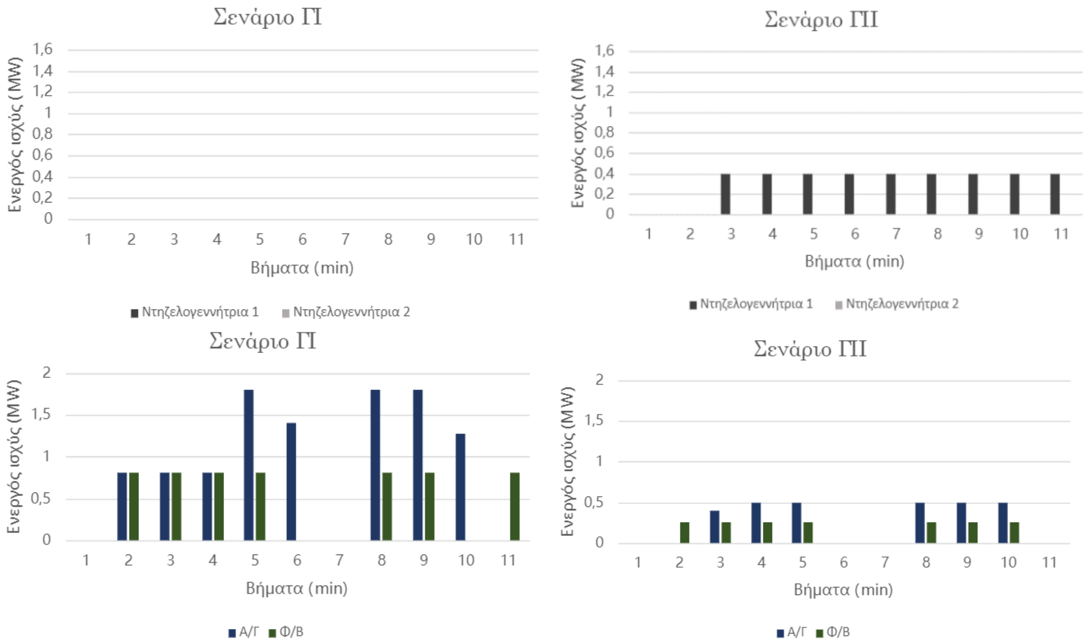
Στο Σενάριο ΓΙ, τα φορτία 4 και 5 συνδέθηκαν στο δίκτυο στο βήμα 1 ενώ το φορτίο 6 στο βήμα 2. Στο Σενάριο ΓΙΙ, τα φορτία 4 και 6 συνδέθηκαν στο βήμα 1 ενώ το φορτίο 5 στο βήμα 3. Όλα τα φορτία επιστρέφουν σταδιακά σε κανονικά επίπεδα ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το μοντέλο CLPU, όπως αναλύθηκε στους περιορισμούς (6.3) – (6.7).

Στο Σχήμα 6.24, απεικονίζονται οι φορτίσεις του συστήματος μπαταριών (BESS) στα επιμέρους Σενάρια.



Σχήμα 6.24 : Φόρτιση συστήματος μπαταριών (Soc), άνα βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Στο πρώτο σενάριο η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου εγχέει ισχύ στο βήμα 1 εώς το βήμα 4. Στα βήματα 5, 8 και 9 το BESS φορτίζει και αυξάνει το Soc αφού η παραγωγή των ΑΠΕ είναι υψηλή. Οι DGs δεν συνδέονται σε κανένα βήμα της διαδικασίας αφού το φορτίο καλύπτεται από τις ΑΠΕ και το BESS. Στο δεύτερο σενάριο η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου εγχέει ισχύ από το βήμα 1 μέχρι και το βήμα 11, χώρις να φορτίσει αφού η παραγωγή των ΑΠΕ είναι χαμηλή. Το Soc μειώνεται σε όλα τα βήματα.

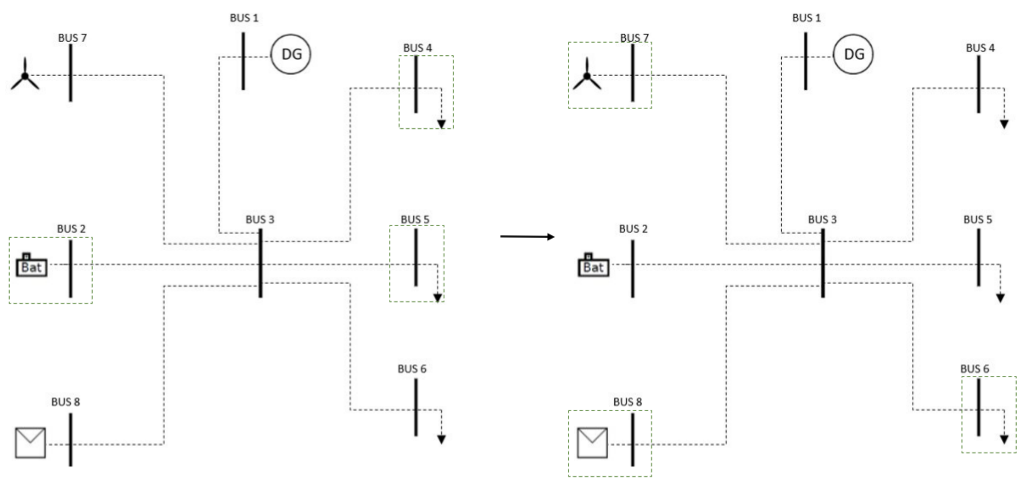


Σχήμα 6.25 : Παραγωγή ντηζελογεννητριών και ΑΠΕ, ανά βήμα, στα δυο Σενάρια.

Στο Σενάριο ΓII η παραγωγή των DGs είναι υψηλότερη από το Σενάριο ΓI, προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση ισχύος των φορτίων, αφού η παραγωγή των ΑΠΕ είναι μικρή. Στο πρώτο σενάριο ,όπως προαναφέρθηκε, οι DGs δεν συνδέεονται στη διαδικασία. Στο δεύτερο σενάριο το BESS εγχέει ισχύ από το βήμα 1 ενώ η ντηζελογεννήτρια 1 συνδέεται στο δίκτυο στο βήμα 3, και η παραγωγή τους σε όλα τα βήματα είναι $Pg = 0.4\ MW$. Σε κάθε βήμα τηρείται τόσο το $Pg < Pgmax$ και το $Pg,\mathrm{t} - Pg,\mathrm{t}-1 \leq Prampg$, όπως και σε όλα τα Σενάρια.

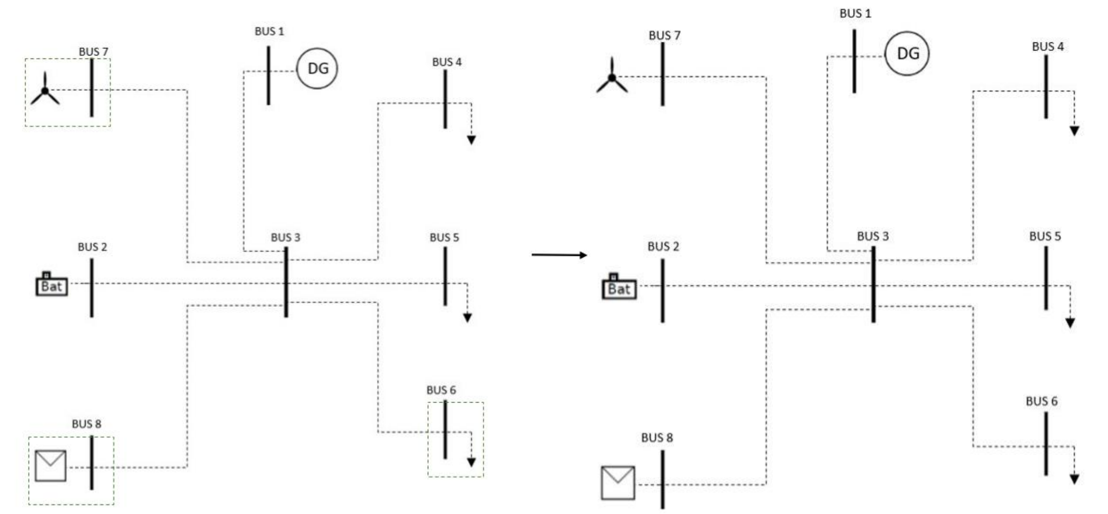
Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία επαναφοράς των φορτίων :

Σενάριο ΓI



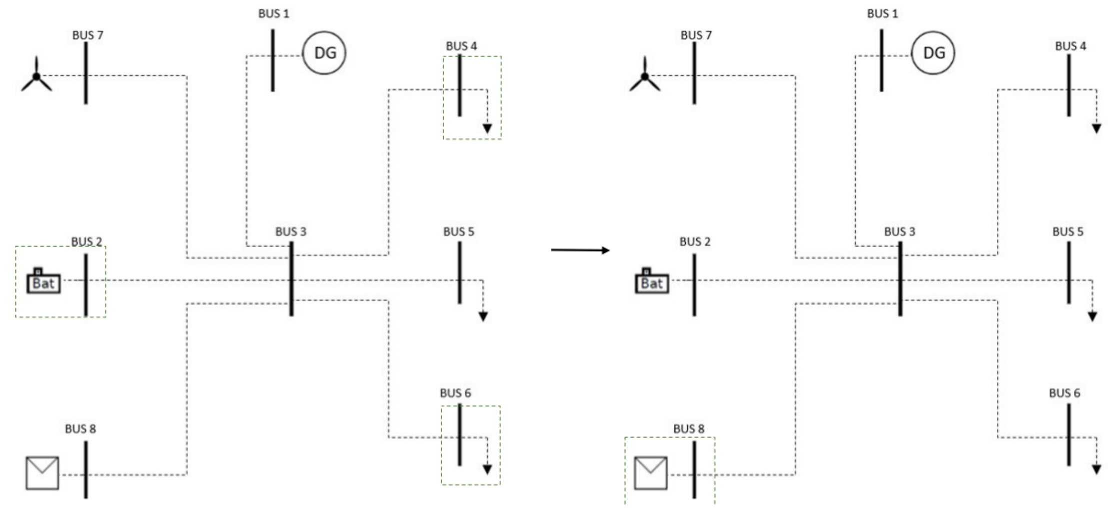
Σχήμα 6.26 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 1 και βήμα 2.

Στο Σενάριο ΓI, στο βήμα 1, το BESS εγχέει ισχύ Ped = 1.33 MW και το φορτία 4 και 5 συνδέονται (0.666 MW). Στο βήμα 2, $Ped = 0.398\ MW$, συνδέονται οι ΑΠΕ με παραγωγή $Pwt = 0.8\ MW$ και $Ppv = 0.8\ MW$ και το φορτίο 6 (0.333 MW) συνδέεται. Ο αλγόριθμος δεν συμπεριλαμβάνει τις DGs στη διαδιακασία επανεκκίνησης του δικτύου αφου τα φορτία καλύπτονται από τις ΑΠΕ και το BESS. Στα βήματα 5, 8 και 9 το BESS φορτίζει με $Pec(t = 5) = 1.08\ MW, Pec(t = 8) = 1.3\ MW, Pec(t = 9) = 1.31\ MW$ αντίστοιχα αφού η παραγωγή των ΑΠΕ είναι υψηλή και καλύπτει τη ζήτηση ισχύος των φορτίων



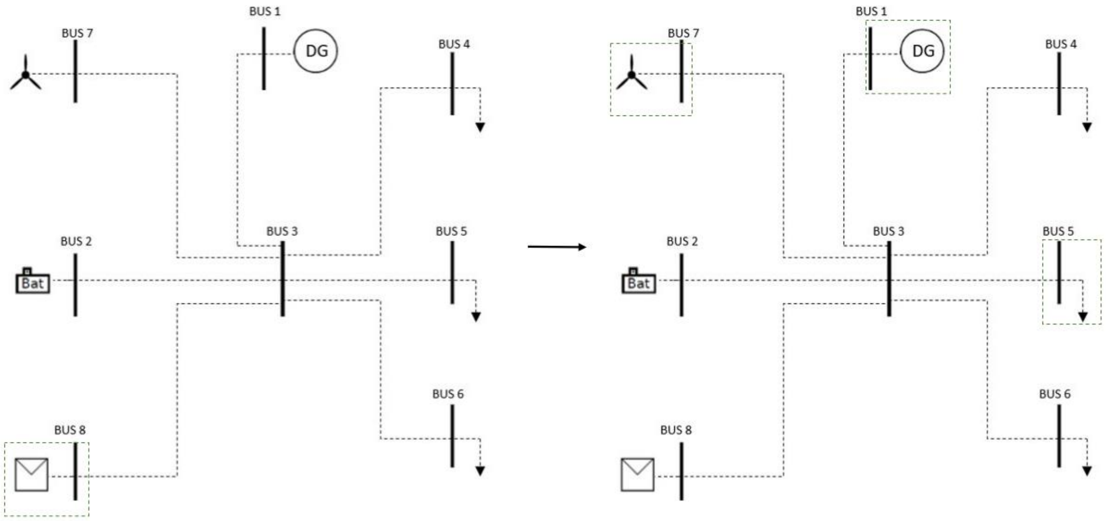
Σχήμα 6.27 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων ολοκληρώνεται στο βήμα 2.

<u>Σενάριο ΓII</u>



Σχήμα 6.28 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 1 και βήμα 2.

Στο Σενάριο ΓII, στο βήμα 1, το BESS εγχέει ισχύ $Ped = 1.33$ MW και τα φορτίο 4 και 5 συνδέονται (0.666 MW). Στο βήμα 2, συνδέονται τα Φ/Β και παράγουν $Ppv = 0.25\,MW$. Στο βήμα 3, συνδέεται η DG με παραγωγή $Pg = 0.4\,MW$ και η Α/Γ με $Pwt = 0.4\,MW$. Το Φ/Β συνεχίζει να παράγει $Ppv = 0.25\,MW$, το BESS εγχέει $Ped = 1.08\,MW$ και το φορτίο 5 συνδέεται (0.333 MW).



Σχήμα 6.29 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 2 και βήμα 3.

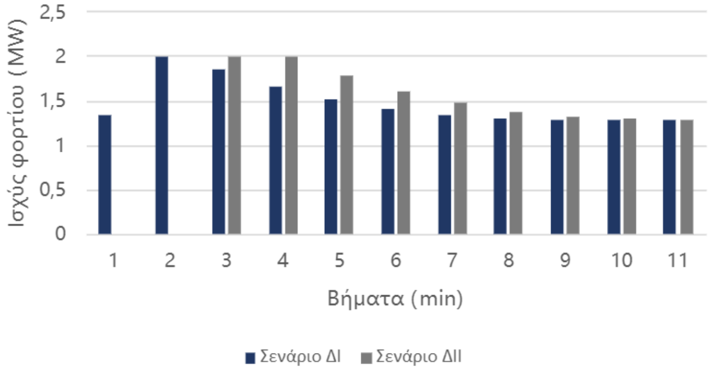
6.5.5 Σενάριο Δ - Επανεκκίνηση του ΜΔΝ με σύστημα μπαταριών και χωρίς σύστημα μπαταριών υπό το ίδιο φορτίο

Στο Σενάριο Δ, γίνεται σύγκριση επανεκκίνησης του ΜΔΝ με σύστημα μπαταριών και χώρις, υπό το ίδιο φορτίο. Η παραγωγή των ΑΠΕ στα επιμέρους σενάρια είναι η ίδια. Οι παράμετροι του Σεναρίου ΔΙ είναι ίδιοι με του Σενάριο ΓΙ. Οι παραάμετροι του Σεναρίου ΔΙΙ απεικονίζονται στον Πίνακα 6.8. Στο Σενάριο ΔΙ η αρχική φόρτιση του συστήματος μπαταριών $\text{είναι}\ Socini = 60\ \%$. Το συνολικό φορτίο του δικτύου είναι 1 MW (Τρία φορτία ισχύος 0.333 MW) και στα δυο επιμέρους σενάρια.

Πίνακας 6.8 **:** *Παράμετροι του Σεναριου ΔΙΙ*

Pgmax*G*	1.6 MW
Pgmin*G*	0.4 MW
Prampg*G*	0.5 MW
aa*l*	1.5
b*l*	5.0
D*l*	2.9 min
SD*l*	1.3
SU*l*	2.0
Pecmax	–
Pedmax	–
nec	–
ned	–
Pwt	**1.8 MW**
Ppv	**0.8 MW**
Emax	–
Socmax	–
Socmin	–
Gcost	0.6
T	11

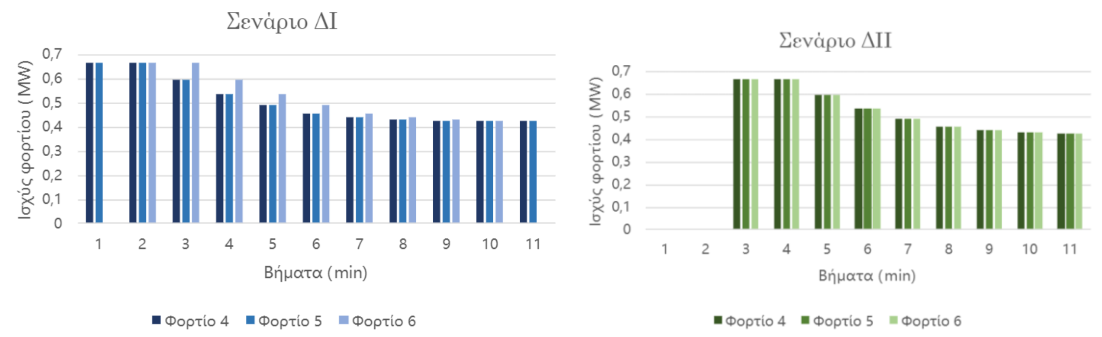
Τα αποτελέσματα της προσομοιώσης των σεναριών, όπου υλοποιήθηκαν μέσω του Pyomo απεικονίζονται παρακάτω :



Σχήμα 6.30 : Συνολική ισχύς φορτίων που συνδέθηκε στο δίκτυο, ανά βήμα, στα επιμέρους Σενάρια.

Στο Σενάριο ΔI (Ενεργεί το σύστημα μπαταριών στο ΜΔΝ) η αποκατάσταση των φορτίων ξεκινά στο βήμα 1 ενώ στο Σενάριο ΔII (Δεν ενεργεί το σύστημα μπαταριών στο ΜΔΝ) τα φορτία συνδέονται στο βήμα 3. Στις δυο προσομοιώσεις, το συνολικό φορτίο ήταν το ίδιο, ώστοσο, όπως αποτυπώθηκε στο Σχήμα 6.30, στο σενάριο όπου διενεργεί το BESS τα φορτία συνδέεονται στο σύστημα γρηγορότερα.

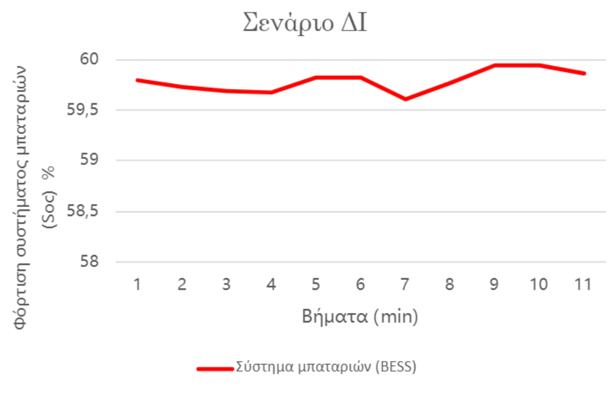
Η αποκατάσταση των φορτίων αποτυπώνεται αναλυτικά στο Σχήμα 6.23.



Σχήμα 6.31 : Ζήτηση ισχύος φορτίων που αποκαταστάθηκαν, ανά, βήμα στα επιμέρους Σενάρια. Τα φορτία επανέρχονται σε κανονικές συνθήκες ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το CLPU μοντέλο.

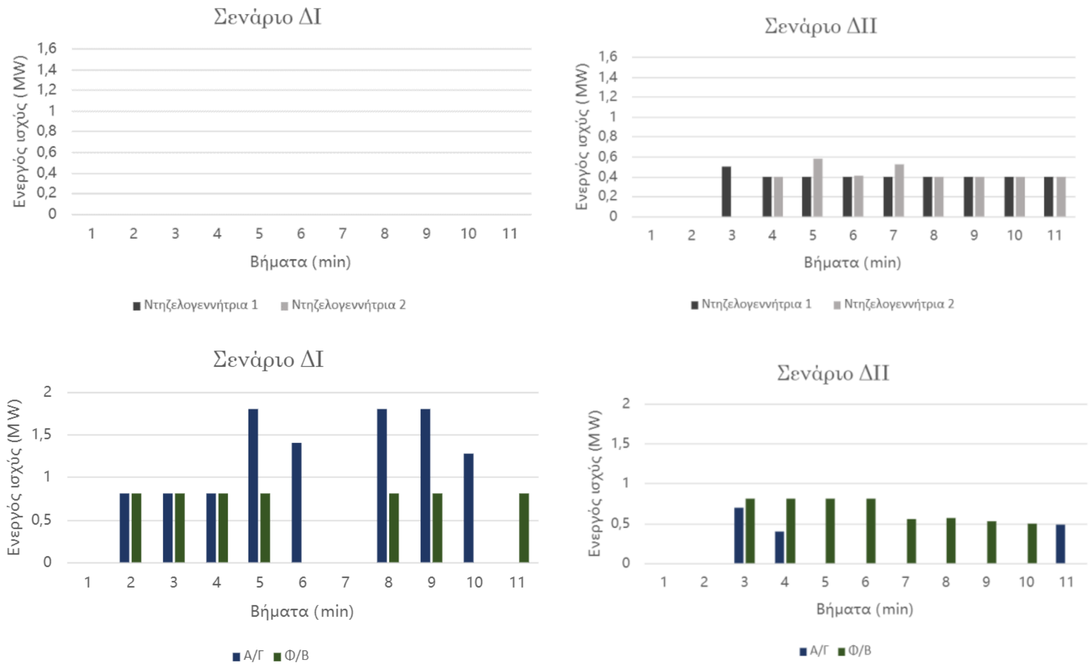
Στο Σενάριο ΔI, τα φορτία 4 και 5 συνδέθηκαν στο δίκτυο στο βήμα 1 ενώ το φορτίο 6 στο βήμα 2. Στο Σενάριο ΔII, τα φορτία 4, 5 και 6 συνδέθηκαν στο βήμα 3. Όλα τα φορτία επιστρέφουν σταδιακά σε κανονικά επίπεδα ζήτησης ισχύος σύμφωνα με το μοντέλο CLPU.

Στο Σχήμα 6.32, απεικονίζεται η φόρτιση του συστήματος μπαταριών στο Σενάρια ΔI. Η φόρτιση του BESS είναι ίδια με αυτήν του Σεναρίου ΓI.



Σχήμα 6.32 : Φόρτιση συστήματος μπαταριών (Soc), άνα βήμα, στο Σενάριο ΔI.

Στο Σενάριο ΔI, όπως προαναφέρθηκε και στο Σενάριο ΓI η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου εγχέει ισχύ στο βήμα 1 εώς το βήμα 4. Στα βήματα 5, 8 και 9 το BESS φορτίζει και αυξάνει το Soc. Οι DGs δεν συνδέονται σε κανένα βήμα της διαδικασίας αφού το φορτίο καλύπτεται από τις ΑΠΕ και το BESS. Στο Σενάριο ΔII η διαδικασία του Black-start ξεκινά στο βήμα 3 με παραγωγή από τις DGs και τις ΑΠΕ αφού δεν ενεργεί το BESS.

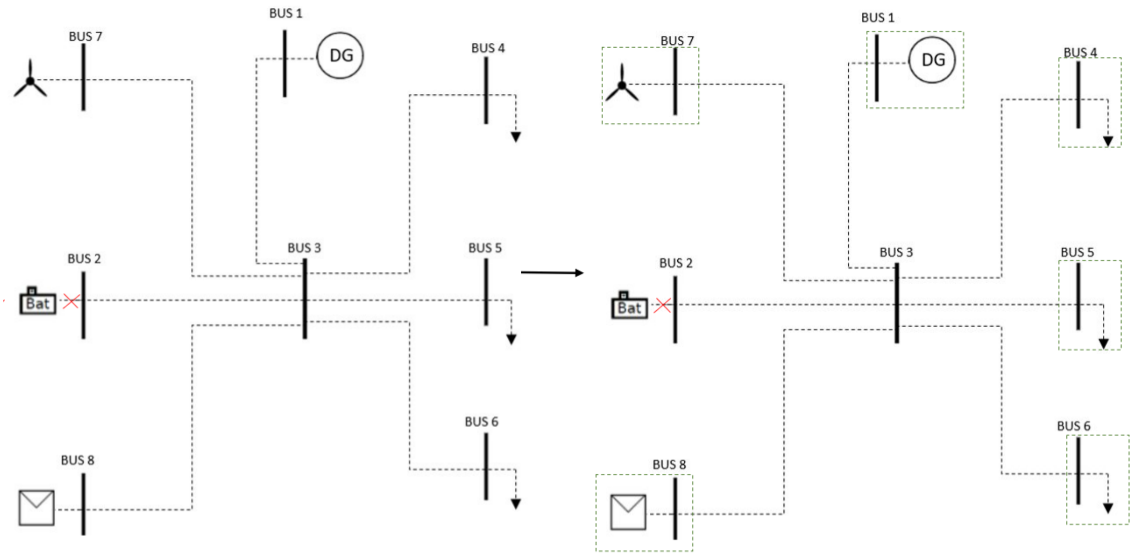


Σχήμα 6.33 : Παραγωγή ντηζελογεννητριών και ΑΠΕ, ανά βήμα, στα δυο Σενάρια.

Στο Σενάριο ΔΙ (όπως είχε αποτυπωθεί και στο Σενάριο ΓΙ) οι DGs δεν συνδέονται αφού η ζήτηση ισχύος των φορτίων καλύπτεται από τις ΑΠΕ και το BESS. Στο Σενάριο ΔΙΙ, δεν ενεργεί το BESS. Στο δίκτυο συνδέονται και οι δύο DGs προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση ισχύος των φορτίων. Σε κάθε βήμα τηρείται τόσο το $Pg < Pgmax$ και το $Pg,\mathrm{t} - Pg,\mathrm{t}-1 \leq Prampg$, όπως και σε όλα τα Σενάρια.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η διαδικασία επαναφοράς των φορτίων του Σεναριού ΔΙΙ (Αφού η διαδιασία επαναφοράς του Σενάριου ΔΙ είναι ίδια με αυτήν του Σεναριού ΓΙ :

<u>Σενάριο ΔΙΙ</u>



Σχήμα 6.34 : Διαδικασία επαναφοράς των φορτίων στο βήμα 1,2 και βήμα 3.

Στο Σενάριο ΔΙΙ το BESS δεν ενεργεί στο ΜΔΝ. Οι ΑΠΕ και η DG1 αρχίζουν να παραγούν ισχύ στο βήμα 3. Συγκεκριμένα, σε αυτό το βήμα η παραγωγή των Α/Γ είναι $Pwt = 0.698\ MW$ και των Φ/Β είναι $Ppv = 0.8\ MW$. Η DG1 παράγει $0.5\ MW$ ενώ η DG2 συνδέεται στο δίκτυο στο βήμα 4. Οι DGs συνεχίζουν την παραγωγή για τη κάλυψη του φορτίου εώς και το βήμα 11.

Από τη σύγκριση των δύο σεναριών αποτυπώθηκε πως στη πρώτη περίπτωση το φορτίο καλύπτεται από το BESS και τις ΑΠΕ χωρίς να συνδεθούν οι DGs, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, όπου το BESS δεν ενεργεί, το φορτίο καλύπτεται κυριώς από τις δύο DGs. Αυτό το δεδομένο, καθιστά το κόστος του Σεναρίου ΔΙΙ υψηλότερο από αυτό του Σεναρίου ΔΙ.

Στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος συνυπολογίζεται το κόστος παραγωγής των DGs, το οποίο είναι ίσο με $G\_cost = 0.6\,€/MWh$. Η συνολική παραγωγή των DGs είναι 7.1927 MW. Το διάστημα μεταξύ κάθε βήματος είναι $\Delta T = 1$ min, οπότε το κόστος παραγωγής είναι :

$$\frac{G\_cost * Pg}{60} = \frac{0.6\ (€/MWh) * 7.1927\ (\text{MW})}{60\ (\text{min})} = 0.071927$$

Στο Σενάριο ΔΙ, όπου ενεργεί το BESS, τα φορτία συνδέεονται γρηγορότερα στο δίκτυο σε σύγκριση με το Σενάριο ΔΙΙ . Συγκεκριμένα στο πρώτο σενάριο, η σύνδεση των φορτίων επιτυγχάνεται στο βήμα 1 για τα πρώτα δύο φορτία και στο βήμα 2 για το τρίτο φορτίο. Στο δεύτερο σενάριο τα φορτία συνδέεονται στο βήμα 3 με αποτέλεσμα η αποκατάσταση της ηλεκτροδότησης να καθυστερεί σε σύγκριση με το πρώτο σενάριο. Στο Σενάριο ΔΙ η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγαλύτερη του Σεναρίου ΔΙΙ (Πίνακας 6.10). Όπως έχει προαναφερθεί, η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου μεγιστοποιεί τη συνολική ενέργεια που είναι δυνατόν να αποκατασταθεί, με εκ νέου σύνδεση των φορτίων του δικτύου έπειτα από το blackout.

Πίνακας 6.10 : *Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε σενάριο.*

Σενάριο	**Τιμή αντικειμενικής συνάρτηση**
ΔΙ	81.136407375
ΔΙΙ	70.40200021

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική μελέτη

7.1 Συμπεράσματα

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, παρουσιάστηκε το ζήτημα της επαναφοράς ηλεκτροδότησης (Black-start) σε ένα ΜΔΝ, οι προκλήσεις κατά τη διαδικασία αυτή, οι ενεργειακοί πόροι που συμμετέχουν στην αποκατάσταση των φορτίων, έπειτα από το blackout, και ο αλγόριθμος που βελτιστοποιεί τη διαδικασία. Κύρια πρόκληση αυτής της διαδικασίας είναι τα ρεύματα μαγνήτισης κατά την ενεργοποίηση του δικτύου έπειτα από ολική σβέση.

Για την μελέτη της συνεισφοράς της μονάδας αποθήκευσης στην επανεκκίνηση του ΜΔΝ, αναλύθηκαν και μοντελοποιήθηκαν οι έλεγχοι του αντιστροφέα πηγής τάσης (VSC) ενός συστήματος μπαταριών (BESS), όπου σε ένα αυτόνομο δίκτυο λειτουργεί σαν grid-forming μοναδα, δηλαδή, μέσω των ελέγχων του διαμορφώνει τάση και συχνότητα καθώς και η μέθοδος για την μείωση του ρεύματος μαγνήτισης

Για την προσομοίωση των μεταβατικών κατά την επανεκκίνηση του συστήματος, μοντελοποιήθηκαν οι έλεγχοι αλγόριθμου ρεύματος και τάσης και το μη διασυνδεδεμένο δίκτυο στο λογισμικό του Matlab - Simulink. Έπειτα προσομοιώθηκαν τρία σενάρια επανεκκίνησης του ΜΔΝ και των ρευμάτων μαγνήτισης. Στο πρώτο σενάριο, στο δικτύο ενεργεί το BESS όπου παράγει τάση απευθείας ίση με την ονομαστική τιμή του, στο δεύτερο σενάριο ενεργεί στο δίκτυο μια ντηζελογεννήτρια (DG) 3.2 MVA ενώ στο τρίτο σενάριο, στο δικτύο ενεργεί το BESS όπου παράγει τάση όπου αυξάνεται σταδιακά μέχρι την ονομαστική τιμή.

Όσον αφορά, τις δυο περιπτώσεις με το BESS, η απόκριση στη μεταβολή της συχνότητας και τάσης, έπειτα από την είσοδο φορτιών 1.2 MW, ήταν ταχύτατη εξαιτίας του ελέγχου του VSC. Στην περίπτωση, με την τάση εξοδου να αυξάνεται σταδιακά, δεν παρατηρήθηκαν ρεύματα μαγνήτισης από την ενεργοποίηση του ΜΣ αφού στα άκρα του δεν εφαρμόστηκε απευθείας ονομαστική τάση, όπως αναλύθηκε και στη θεωρία. Επίσης, η αποκάσταση συχνότητας και τάσης ήταν ταχύτατη. Στο πρώτο σενάριο, η απευθείας φόρτιση του ΜΣ με ονομαστική τάσης 326,59 V δημιούργησε ρεύματα μαγνήτισης της τάξης των 17 kA, όπου σταδιακά μειώθηκαν και σταθεροποιήθηκαν στα 2700 A. Αυτό συνέβει και στο δεύτερο σενάριο όπου πάλι παρατηρήθηκαν ρεύματα μαγνήτισης (12 kA) κατά την ενεργοποιήση του ΜΣ του δικτύου μέσω της ντηζελογεννήτριας. Συνεπώς, η επανεκκίνηση ενός ΜΔΝ, έπειτα από ένα φαινόμενο ολικής σβέσης, μέσω σταδιακής αύξησης της τάσης είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για αντιμετώπιση των ρευμάτων μαγνήτισης, όταν δεν λειτουργεί μονάδα ντήζελ στο ΜΔΝ.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου Cold Load Pickup (CLPU) σχεδιάστηκε αλγόριθμος για τον υπολογισμό του βέλτιστου προγραμματισμού παραγωγής κατά τη διαδικασία του Black-start σε ΜΔΝ. Στο σκέλος του αλγόριθμου βελτιστοποιήσης του Black-start σε ένα ΜΔΝ, αφού έγινε η σύνθεση του, υλοποιήθηκε σαν ένα MILP μοντέλο και προσομοιώθηκαν τέσσερα σενάρια προκειμένου να παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου του Black-start.

Στο πρώτο σενάριο προσομοιώθηκαν οι επιμέρους σενάρια όπου το BESS έχει διαφορετική φόρτιση (Soc) (60% και 30% αντίστοιχα) και ίδιο φορτίο (1.2 MW). Από την προσομοίωση παρατηρήθηκε πως στη περίπτωση που το αρχικό $Soc = 60\%$, το BESS συμμετέχει πιο ενεργά στη διαδικασία του Black-start με έγχυση ισχύος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το BESS αρχίζει να φορτίζει στο βήμα 3 προκειμένου να ικανοποιεί τους περιορισμούς ελάχιστης φόρτισης.

Στο δεύτερο σενάριο, στα επιμέρους σενάρια το BESS ειχε ίδιο αρχικό $Soc = 92\%$ και διαφορετικό φορτίο (2.8 MW και 1.8 MW αντίστοιχα). Μετά την προσομοίωση παρατηρήθηκε πως, στο δεύτερο επιμέρους σενάριο η αποκατάσταση των φορτίων εγίνε γρηγορότερα ενώ η παραγωγή των ντηζελογεννητριών στο πρώτο σενάριο ήταν αρκετά μεγαλύτερη προκειμένου να καλυφθεί το αυξημένο φορτίο.

Στο τρίτο σενάριο, στα δύο επιμέρους σενάρια η παραγωγή των ΑΠΕ ήταν διαφορετική ($Pwt = 1.8\,MW$ και $Ppv = 0.8\,MW$ στο πρώτο σενάριο, και $Pwt = 0.5\,MW$ και $Ppv = 0.25\,MW$ στο δεύτερο σενάριο) ενώ το φορτίο ήταν ίδιο (1 MW). Στο πρώτο σενάριο η παραγωγή των ντηζελογεννητριών είναι μηδενική αφου η παραγωγή των ΑΠΕ είναι υψηλή και καλύπτει το φορτίο συνδυαστικά με το BESS. Στα βήματα 5, 8, 9 το BESS φορτίζει, οπότε το Soc αυξάνεται και αναλαμβάνουν το φορτίο οι ΑΠΕ. Στο δεύτερο σενάριο η διαδικασία του Black-start ξεκινά με το BESS, όπου εγχέει ισχύ από το βήμα 1 μέχρι και το βήμα 11, χώρις να φορτίσει αφού η παραγωγή των ΑΠΕ είναι χαμηλή. Το φορτίο καλύπτεται από την παραγωγή των ντηζελογεννητριών, όπου σε κάθε βήμα είναι η ελάχιστη δυνατή, δηλαδή $Pg = Pgmin$ και την έγχυση ισχύος του BESS. Οπότε όσο μεγαλύτερη η διείσδυση ΑΠΕ, ο αλγοριθμος μειώνει ή και εξαλείφει τη συμμετοχή των DGs στην επανεκκίνηση του ΜΔΝ επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη δυνατή διαδικασία Black-start.

Τέλος στο τέταρτο σενάριο, υπήρχε διαφοροποίηση των δύο επιμέρους σεναρίων ως προς τη συμμετοχή του BESS στη διαδικασία επανεκκίνησης του ΜΔΝ. Στη πρώτη περίπτωση, όπου το BESS ενεργεί κατά το Black-start, δεν συνδέονται οι DGs στο δίκτυο. Στην δεύτερη περίπτωση, όπου το BESS είναι σκόπιμα μη συνδεδεμένο στο δίκτυο, το φορτίο καλύπτεται από τις δυο DGs και τις ΑΠΕ για να δουμε την επίδραση του BESS στην επανεκκίνηση του συστήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποτυπώνουν πως στη δεύτερη περίπτωση τα φορτία καθυστερούν να συνδεθούν σε σύγκριση με την πρώτη περίπτωση. Επίσης, το κόστος της παραγωγής είναι υψηλότερο αφού στη πρώτη περίπτωση οι DGs δεν συνδέονται στο δίκτυο. Η τιμή της αντικειμενική συνάρτησης, η οποία μεγιστοποιεί την ενέργεια που είναι δυνατόν να αποκατασταθεί, είναι υψηλότερη στη περίπτωση που ενεργεί το BESS (81.14) σε σύγκριση με το σενάριο που ενεργούν οι DGs (70.4).

7.2 Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Μια μελλοντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής, όσον αφορά τους ελέγχους και τη λειτουργία του VSC, θα μπορούσε να αφορά έναν πιο λεπτομερή σχεδιασμό του μη διασυνδεδεμένου νησιωτικού δικτύου, για περαιτέρω εμβάθυνση στις τρέχουσες απαιτήσεις του ελέγχου και της τεχνολογίας του grid-forming αντιστροφέα σε ένα αυτόνομο σύστημα. Επίσης, η υλοποιήση των ελέγχων και της λειτουργίας του VSC κατά την εκκίνηση του ΜΔΝ θα μπορούσε να δοκιμαστεί με εργαστηριακό εξοπλισμό, στο εργαστήριο Σ.Η.Ε του ΕΜΠ, σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Μια μελλοντική επέκταση, όσον αφορά τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της διαδικασίας Black-start σε ΜΔΝ, θα μπορούσε να αφορά την υλοποίηση του σε εργαστηριακό περιβάλλον για επίτευξη πιο ρεαλιστικών προσομοιώσεων. Μια άλλη πρόταση για μελλοντική μελέτη, θα μπορούσε να αφορά την προσθήκη μεταβλητής παραγωγής από ΑΠΕ σύμφωνα με τον στοχαστικό χαρακτήρα της παραγωγής τους και κατά τη διάρκεια επανεκκίνησης. Επίσης, ο αλγόριθμος θα μπορούσε να υλοποιηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να τρέχει επαναληπτικά και να ανανεώνει συνεχώς τις τιμές των μεταβλητών του ανάλογα με την ισχύ των ΑΠΕ που μετρά. Τέλος, μια άλλη πρόταση για μελλοντική επέκταση, αφορά την προσθήκη νέων περιορισμών και μεταβλητών που συμπεριλαμβάνουν το επίπεδο τάσης στους κόμβους, την άεργο ισχύ καθώς και τα όρια των γραμμών ως προς την ισχύ που μεταφέρουν.

Βιβλιογραφία

[1] Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html

[2] Hydropower Basics. https://www.energy.gov/eere/water/hydropower-basics

[3] Biomass power plants. https://new.siemens.com/global/en/markets/chemical-industry/applications/green-refinery/biomass-power-plant.html

[4] Γεωθερμία : Μια τεράστια πηγή θέρμανσης κάτω από τα πόδια μας https://m.naftemporiki.gr/story/660886/geothermia-mia-terastia-pigi-thermansis-kato-apo-ta-podia-mas

[5] Νταβάλης Γεώργιος. Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό

[6] Σταύρος Αθ. Παπαθανασίου, Καθηγητής ΕΜΠ. Ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διεθνώς και στην Ελλάδα.

[7] Renewables to be the Primary Source of Energy by 2040 Surpassing Coal: BP Energy Outlook. https://mercomindia.com/renewables-primary-source-energy-2040/

[8] U. k. Nath and R. Sen, "A Comparative Review on Renewable Energy Application, Difficulties and Future Prospect," 2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources (52042), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEMRE52042.2021.9386520.

[9] Βουρνάς Κ, Παπαδιάς Β, Ντελκής Κ. : ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

[10] The Basic Components of a Home Solar Power System. https://www.dummies.com/article/home-auto-hobbies/garden-green-living/sustainability/green-building/the-basic-components-of-a-home-solar-power-system-188507/

[11] Βουρνάς Κ, Κονταξής Γ. : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

[12] P. Kundur et al., "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1387-1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.

[13] Άλκηστις – Χριστίνα Κοντού. Σχεδιάση αλγορίθμου ελέγχου αντιστροφέα για εφαρμογή τεχνικών ρύθμισης συχνότητας και Control Hardware In the Loop προσομοίωση. 2019.

[14] Bo Chen. Black start restoration for electric distribution systems and microgrids

[15] IEEE, "IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems," in *IEEE Std 1547.4-2011*, ed, pp. 1-54. 2011

[16] IEEE Power & Energy Society. Microgrid Stability Definitions, Analysis and Modeling

[17] C. Yuen, A. Oudalov, and A. Timbus, "The provision of frequency control reserves from multiple microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 173–183, Jan. 2011.

[18] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 52–62, Apr. 2009.

[19] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, May 2004.

[20] K. Christakou, J. Y. LeBoudec, M. Paolone, and D. C. Tomozei, "Efficient computation of sensitivity coefficients of node voltages and line currents in unbalanced radial electrical distribution networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 741–750, June 2013.

[21] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 2, pp. 613–625, Mar. 2007.

[22] R. Belkacemi, S. Zarrabian, A. Babalola, and R. Craven, “Experimental transient stability analysis of microgrid systems: Lessons learned,” *IEEE Trans. Power Del*., vol. 28, no. 4, pp. 2428 – 2436, Oct. 2013.

[23] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York, US: McGraw-hill Professional, 1994.

[24] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, “Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier,” *IEEE Trans. Ind. Appl*., vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, Sep. 2005.

[25] I. Lipuzhin, "Stability Issues for Modern Microgrids," 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), 2020, pp. 339-343, doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216279.

[26] A. Yazdani and R. Iravani. *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. 2010.

[27] Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. John Wiley & Sons, 2010.

[28] Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, Voltage-Sourced Converters in Power Systems, IEEE, WILEY publication, Canada, 2010.

[29] Nikos Hatziargyriou, Ioannis Margaris, Irene Stavropoulou, Stavros Papathanasiou, and Aris Dimeas. Noninterconnected Island Systems.

[30] Jürgen Marchgraber and Wolfgang Gawlik. Investigation of Black-Starting and Islanding Capabilities of a Battery Energy Storage System Supplying a Microgrid Consisting of Wind Turbines, Impedance - and Motor-Loads.

[31] E. Agneholm, *Cold Load Pick-up*. Chalmers University of Technology, 1999.

[32] Processes in biomass power plants https://new.siemens.com/global/en/markets/chemical-industry/applications/green-refinery/biomass-power-plant.html

[33] Ni C, Ma X. Prediction of Wave Power Generation Using a Convolutional Neural Network with Multiple Inputs. *Energies*. 2018; 11(8):2097. https://doi.org/10.3390/en11082097

[34] HSA (2018) Greece in Numbers. Hellenic Statistical Authority, Piraeus.

[35] Michele Fusero 1, Andrew Tuckey 2, Alessandro Rosini 3, Pietro Serra 1, Renato Procopio and Andrea Bonfiglio. A Comprehensive Inverter-BESS Primary Control for AC Microgrids

[36] Renewable Electricity. https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2021/renewable-electricity

[37] D. Ton and J. Reilly, “Microgrid controller initiatives: An overview of R&D by the U.S. Department of Energy,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 15, no. 4, pp. 24–31, July 2017.

[38] U.K. Power Networks. Transmission and distribution interface 2.0 (TDI). [Online]. Available: https://www.ofgem.gov.uk/ofgempublications/107804.

[39] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard.
R. Palma-Behnke, G. A. Jimenez-Estevez, and N. D. Hatziargyriou, “Trends in microgrid control,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, July 2014.

[40] Νίκος Χατζηαργυρίου. <<Μικροδίκτυα και ευφυλη δίκτυα – Παράλληλη λειτουργία σύγχρονων γεννητριών και διεσπαρμένης παραγωγής >> ΑΣΗΕ, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ.

[41] A spectrum of Microgrids. https://www.sandc.com/en/solutions/microgrids/

[42] Zheyuan Cheng, Jie Duan, and Mo-Yuen Chow. To Centralize or to Distribute: That is the Question.

[43] Haitham Abu-Rub, Mariusz Malinowski, Kamal Al-Haddad. Power Electronics for RES, Transportation and Industrial Applications.

[44] A. Arif, S. Ma, Z. Wang, J. Wang, S. M. Ryan and C. Chen, "Optimizing Service Restoration in Distribution Systems with Uncertain Repair Time and Demand," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 6, pp. 6828-6838, Nov. 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.28.

[45] Λαγός Δημήτριος. Μελέτη αλγορίθμων ελέγχου αντιστροφέα και Control Hardware in the Loop προσομοίωση.

[46] S. Kahrobaee, M. Algrain and S. Asgarpoor, "Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current during Black Start of an Independent Power Producer Plant," *Energy and Power Engineering*, Vol. 5 No. 1, 2013, pp. 1-7. doi: 10.4236/epe.2013.51001.

[47] Y. Wang, S. G. Abdulsalam and W. Xu, "Analytical Formula to Estimate the Maximum Inrush Current," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 1266-1268. doi:10.1109/TPWRD.2008.919153