



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Email: [erminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:erminfo@power.ece.ntua.gr)

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# **ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ**

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Αραποστάθη Βασίλη

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ**

ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΗΜΜΥ - Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021





## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – Τηλ. 210-7723655, Email: [erminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:erminfo@power.ece.ntua.gr)

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ

ΑΡΑΠΟΣΤΑΘΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

### ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΗΜΜΥ - Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2021.

.....  
Χατζηαργυρίου Ν.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κορρές Γ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

.....  
Παπαθανασίου Σ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αραποστάθης Βασίλειος

Διπλωματούχος ΔΠΜΣ Παραγωγή και Διαχείριση της Ενέργειας

Copyright © Αραποστάθης Βασίλειος, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βραχυκυκλώματα που είναι συνδεδεμένες με ηλεκτρονικά ισχύος σε ένα δίκτυο Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε πρόγραμμα σε μορφή κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab, στο οποίο αναπαραστήθηκαν μονάδες με ηλεκτρονικά ισχύος, ενώ επίσης σχεδιάστηκαν και αξιολογήθηκαν μέθοδοι ελέγχου των αντιστροφών, οι οποίες έχουν ως στόχο την υποστήριξη της τάσης του δικτύου και την παροχή ρεύματος βραχυκύκλωσης.

Αρχικά, παρουσιάστηκαν τα προβλήματα που προκύπτουν από την εκτεταμένη εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ, των οποίων η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Έπειτα, έγινε αναφορά στις απαιτήσεις που θέτουν οι σύγχρονοι διεθνείς Κώδικες Δικτύου, καθώς και ο Κώδικας Δικτύου στην Ελλάδα για την παροχή βοηθητικών ΑΠΕ στα ΣΗΕ.

Στη συνέχεια, έγινε αναλυτική περιγραφή της θεωρίας και των τεχνικών ελέγχου του αντιστροφέα που μοντελοποιήθηκαν. Οι τεχνικές που εφαρμόστηκαν ήταν η συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία και η Advanced Current Limitation, η οποία πραγματοποιεί έγχυση αέργου ρεύματος τόσο στη θετική ακολουθία όσο και στην αρνητική.

Για την επαλήθευση των υπολογισμών που προέκυψαν από τον αλγόριθμο και για να πραγματοποιηθούν δυναμικές προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε επίσης το πρόγραμμα PowerFactory.

Ο αλγόριθμος στο Matlab χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του συστήματος ΜΔΝ της Αστυπάλαιας και για διάφορα είδη σφαλμάτων, ενώ η αξιολόγηση των μεθόδων ελέγχου του αντιστροφέα έγινε με βάση την βελτίωση της τάσης του δικτύου και της αύξησης των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

## Λέξεις – κλειδιά :

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Κανόνες Κώδικα Δικτύου, Αντιστροφέα πηγής τάσης, PowerFactory, Matlab, ΜΔΝ, Αστυπάλαια, βύθιση τάσης, έγχυση ενεργού/αέργου ισχύος, περιορισμός ρεύματος



## **Abstract**

In this thesis was studied the behavior of distributed energy production units interfaced with power electronics in a network of Non-Interconnected Islands. More specifically, a program in code form was developed in the programming environment of Matlab, in which PE-interfaced units were simulated while the methods of control of the inverters were designed and evaluated, aiming for the support of the voltage of the network and providing short circuit current.

First of all, the problems arising from the extensive installation of the PE-interfaced units were presented. Then, the requirements set by modern International Grid Codes were mentioned, as well as the national Grid Code for supporting services of the RES in the electric power system.

A detailed description of the theory and control techniques of the inverter being modeled was given below. The strategies used were symmetric reactive injection in the positive sequence and Advanced Current Limitation, which uses reactive injection both in the positive and negative sequence.

The PowerFactory program was also used to verify calculations and simulate dynamic results.

The algorithm in Matlab was used for the study of the Astypalea NII PS and for different types of faults which are occurred. The evaluation of the control methods of the inverter was based on improvement of the grid voltage and the increase of short-circuit current.

## **Key Words :**

Renewable Energy Sources, Power System Stability, Grid Codes, Voltage source converter, PowerFactory, Matlab, NII, Astypalea, voltage drop, active/reactive power injection, current limitation





## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, ευχαριστώ πάρα πολύ τον ερευνητή Δημήτρη Λαγό για την αμέριστη στήριξη και καθοδήγησή του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, καθώς και επειδή έμαθα πολλά πράγματα κατα τη συνεργασία μας, η οποία ήταν άριστη.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου και την οικογένειά μου και πιο συγκεκριμένα την μητέρα μου και την αδερφή μου που με βοηθάνε και με στηρίζουν πάντα στις δύσκολες στιγμές.



# Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	15
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	15
1.2 Προβλήματα από την χρήση των ΑΠΕ .....	16
1.2.1 Επίδραση στην ευστάθεια του δικτύου .....	17
1.2.2 Επίδραση στην αξιοπιστία .....	21
1.2.3 Επίδραση στην ποιότητα της ισχύος .....	22
1.2.4 Επίδραση στην μορφολογία του δικτύου .....	22
1.3 Εφαρμογές έξυπνων νησιών.....	22
1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	23
Κεφάλαιο 2.....	25
2.1 Κανόνες Κώδικα Δικτύου για μονάδες ΑΠΕ σε διαταραχές βραχυκυκλωμάτων 25	
2.1.1 Ικανότητα Αδιάλειπτης Λειτουργίας (Fault Ride Through) .....	25
2.1.2 Απόκριση ενεργού και αέργου ισχύος μετα από διαταραχές.....	28
2.2 Κανόνες Κώδικα Δικτύου στην Ελλάδα .....	30
2.3 Τεχνικές συνεισφοράς μονάδας ηλεκτρονικών ισχύος στο βραχυκύκλωμα..	33
2.3.1 Περιορισμός του ρεύματος (Current Limitation).....	35
Κεφαλαιο 3.....	40
3.1 Υπολογισμός τάσεων και ρευμάτων .....	40
3.2 Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο δυναμικό μοντέλο 43	
3.3 Σύγκριση προτεραιότητας αέργου ισχύος και μεθόδου Advanced Current Limitation και συνεισφορά στην αρνητική ακολουθία .....	49
Κεφάλαιο 4.....	57
4.1 Διάγραμμα Ροής - Υπολογισμός τάσεων και ρευμάτων .....	57
4.2 Επαλήθευση υπολογισμών του αλγορίθμου στο PowerFactory .....	59

4.3	Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο στατικό μοντέλο	61
4.4	Σύγκριση προτεραιότητας αέργου ισχύος και μεθόδου Advanced Current Limitation και συνεισφορά στην αρνητική ακολουθία	71
	Συμπεράσματα	77
	Παράρτημα Πινάκων	78
	Βιβλιογραφία	82



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται στο κέντρο της ζωής του σύγχρονου ανθρώπου αφού καθίσταται απαραίτητη για την κάλυψη πολλών αναγκών του, από την θέρμανση μέχρι και την χρήση τεχνολογικών μέσων (Η/Υ, κινητά τηλέφωνα κλπ). Καθώς η ζήτησή της ολοένα και αυξάνεται εξαιτίας τόσο του αυξανόμενου πληθυσμού του πλανήτη όσο και της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών οι οποίες εξαρτώνται πλήρως από αυτήν, δημιουργείται η ανάγκη για αξιοποίηση περισσότερων πηγών ενέργειας πέρα των συμβατικών. Επιπρόσθετα, μεγάλη μερίδα των καταναλωτών πλέον στρέφεται στην λεγόμενη «πράσινη» ενέργεια, δηλαδή στην ενέργεια η οποία προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζεται η πηγή ενέργειας η οποία δεν είναι πεπερασμένη, δηλαδή τα αποθέματά της είναι ανεξάντλητα. Μερικά παραδείγματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική κ.ά. Υπάρχουν, όμως, και οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας – όπως είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο – των οποίων τα αποθέματα δεν αντικαθίστανται ή χρειάζονται πολλές χιλιάδες χρόνια για να συμβεί αυτό γι' αυτό και θεωρούνται πρακτικά μη ανανεώσιμες .

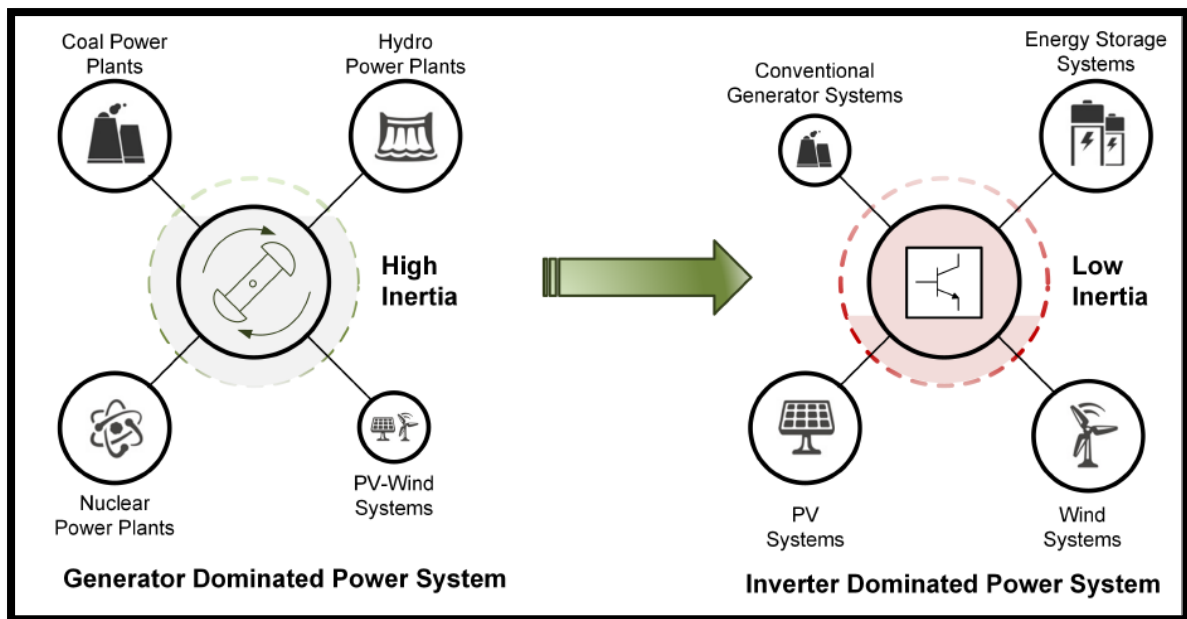
Τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως είναι αυτά που καίνε λιγνίτη ή φυσικό αέριο, πλεονεκτούν έναντι των ΑΠΕ διότι αποτελούν σίγουρη λύση στο πρόβλημα παραγωγής ενέργειας αφού οι πρώτες ύλες είναι σταθερά διαθέσιμες προς κατανάλωση. Το δεύτερο, και σημαντικότερο, προτέρημά τους είναι ότι έχουν την δυνατότητα να διατηρούν την ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καθώς έχουν τρόπο να κάνουν απόσβεση σε περιπτώσεις απότομης αλλαγής του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την χρήση των ορυκτών και άλλων συμβατικών καυσίμων είναι πολλά αφού παράγονται διάφορα επιβλαβή για το περιβάλλον αέρια (CO<sub>2</sub>, NO κλπ) αλλά ταυτοχρόνως εξαντλούνται και οι φυσικοί πόροι. Αντιθέτως, οι ΑΠΕ έχουν αρχίσει σταδιακά να κερδίζουν έδαφος έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας συμμετέχοντας όλο και περισσότερο στα ενεργειακά μίγματα επειδή τα αποθέματά τους δεν εξαντλούνται και δεν έχουν αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο [1, 2].

## 1.2 Προβλήματα από την χρήση των ΑΠΕ

Όσα προτερήματα κι αν έχουν οι ΑΠΕ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν παύουν να υπάρχουν και ορισμένα προβλήματα που προκύπτουν από την διείσδυσή τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία πρέπει να επιλυθούν.

Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη επειδή οι ίδιες οι πηγές ενέργειας (ήλιος, αέρας κλπ) δεν είναι διαθέσιμες καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου και στον ίδιο βαθμό. Η ενεργειακή διαθεσιμότητα που προκύπτει από τις ΑΠΕ μπορεί να υπολογιστεί μόνο προσεγγιστικά βάσει προβλέψεων, όπως για παράδειγμα με την βοήθεια μοντέλων πρόβλεψης καιρού. Στον αντίποδα αυτού, η παραγωγή ενέργειας από συμβατικές μονάδες ελέγχεται πλήρως από τον ίδιο τον άνθρωπο καθώς τα συμβατικά καύσιμα είναι σταθερά διαθέσιμα. Το δεύτερο πρόβλημα που προκύπτει απορρέει από τον διαφορετικό τρόπο σύνδεσης των δύο συστημάτων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, μια συμβατική μονάδα συνδέεται μέσω μια σύγχρονης γεννήτριας στο στο δίκτυο και η στρεφόμενη μάζα του λειτουργεί ως αποθήκη της κινητικής ενέργειας και συμμετέχει στην αδράνεια του συστήματος όταν υπάρξει απότομη μεταβολή στο ισοζύγιο ενεργούς ισχύος του δικτύου. Με αυτόν τρόπο επιτυγχάνεται η ομαλοποίηση των μεταβολών και τελικά, η επίτευξη της ευστάθειας του δικτύου. Παράλληλα, οι σύγχρονες γεννήτριες κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων δύνανται να παράγουν ρεύμα πολλαπλάσιο του ονομαστικού τους. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συνδέονται στο σύστημα μέσω αντιστροφών, δηλαδή ηλεκτρονικών ισχύος, κάτι το οποίο προκαλεί αστάθεια στο δίκτυο εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν συνεισφέρουν στην συνολική αδράνεια του συστήματος [1, 2, 3]. Παράλληλα, για λόγους προστασίας των διακοπτικών τους στοιχείων ο έλεγχος που εφαρμόζεται στα ηλεκτρονικά ισχύος αυτών των μονάδων περιορίζει την συνεισφορά με ρεύμα στο βραχυκύκλωμα σε 1-1.5 του ονομαστικού τους μεγέθους. Έτσι, εκτεταμένη διείσδυση αυτών των μονάδων περιορίζει και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην **Εικόνα 1** φαίνεται η μετάβαση από ένα συμβατικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας προς ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπου κυριαρχούν τα ηλεκτρονικά ισχύος [1, 2, 3].





**Εικόνα 1 : Αριστερά, τα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και δεξιά, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία κυριαρχούν τα ηλεκτρονικά ισχύος [4]**

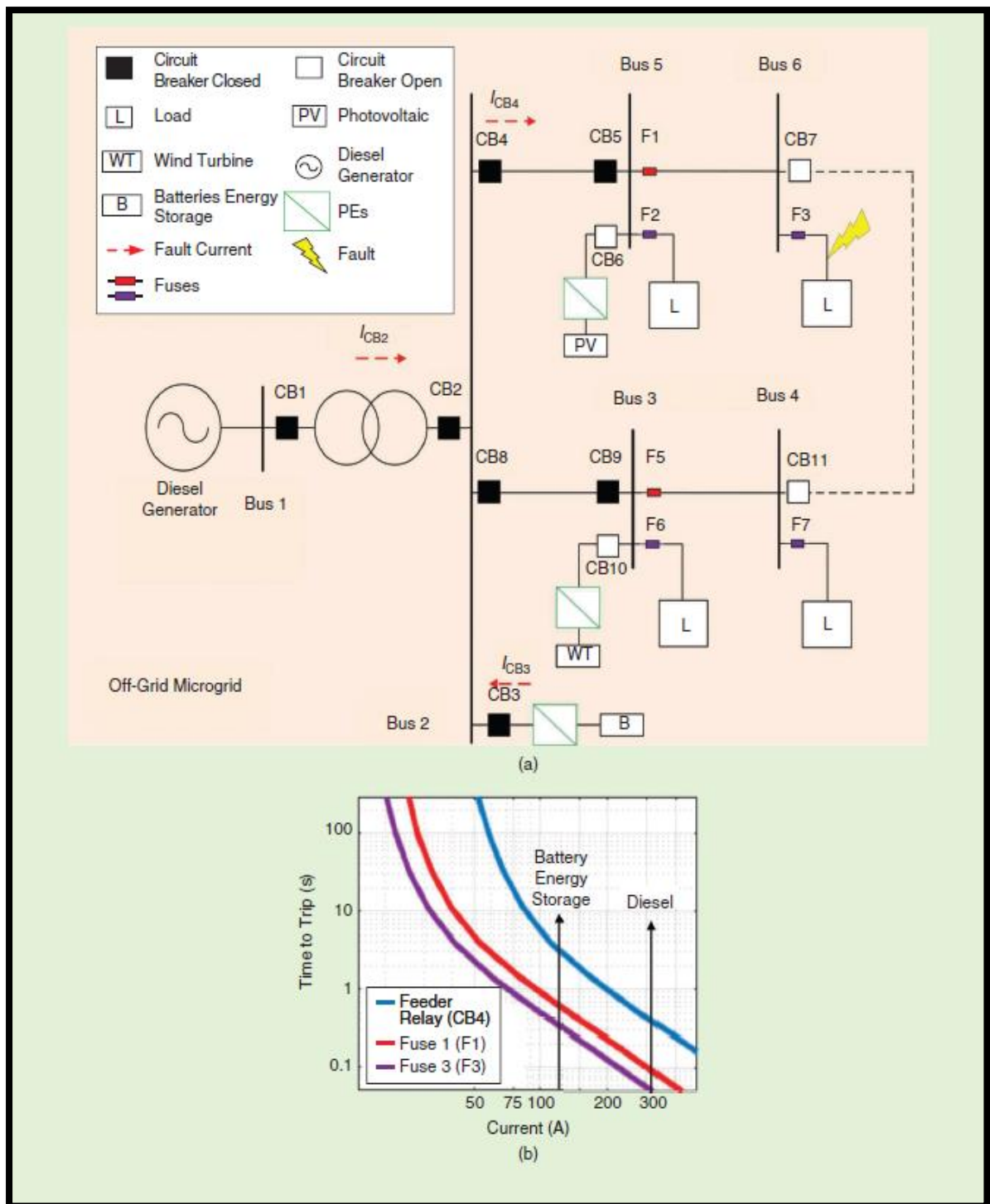
Για τους παραπάνω λόγους, είναι ιδιαίτερος σημαντικό να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα προκειμένου να αξιοποιηθούν στο έπακρο οι ΑΠΕ. Κατ' επέκταση, τώρα η έρευνα εστιάζεται στην εύρεση τρόπων διατήρησης της ευστάθειας του δικτύου σε τέτοιου είδους συστήματα με μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ [1].

### 1.2.1 Επίδραση στην ευστάθεια του δικτύου

Κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων, ορισμένες φορές σε ένα σύστημα μπορεί η τάση να πέσει κάτω από ένα αποδεκτό κατώφλι για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια η τιμή της να επανέλθει (βύθιση τάσης). Κατά την διάρκεια αυτή, οι ανεμογεννήτριες αποσυνδέονται από το δίκτυο μέχρι να εκκαθαριστούν τα σφάλματα και να επανέλθει η τάση στην ονομαστική της τιμή όταν και επανασυνδέονται. Όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας τόσο αυξάνεται η απώλεια παραγωγής ισχύος και μειώνεται η ευστάθειά του. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό να οδηγήσει ακόμα και σε black out [1, 3].

Ένα σοβαρό πρόβλημα στη λειτουργία ενός συστήματος ΜΔΝ είναι η επίδραση της τοπολογίας του δικτύου στα ρεύματα βραχυκύκλωσης και ο συντονισμός των απαιτήσεων για

την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας με το σύστημα προστασίας του συστήματος. Το σύστημα προστασίας μπορεί να είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική σταθερότητα του δικτύου, ειδικά στην περίπτωση ΜΔΝ. Τα ΜΔΝ, όντας απομονωμένα από το υπόλοιπο δίκτυο, έχουν υψηλό κόστος παραγωγής που βασίζεται σε μονάδες Diesel, κάνοντας τα ιδανικές περιπτώσεις για αυτόνομα συστήματα με υψηλή διείσδυση μονάδων ΑΠΕ.



Εικόνα 2 : (α) Διάταξη ενός συστήματος ΜΔΝ με υψηλή διεύθυνση ΑΠΕ (β) Η επίδραση της τοπολογίας στο σύστημα προστασίας [5]

Η διάταξη ενός τυπικού ΜΔΝ με υψηλή διεύθυνση ΑΠΕ (κυρίως φωτοβολταϊκά και αιολικές γεννήτριες) παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2 (α)**. Για να επιτευχθεί υψηλή διεύθυνση ΑΠΕ, απαιτούνται μονάδες αποθήκευσης με μπαταρίες. Όλες αυτές οι μονάδες (δηλαδή, οι

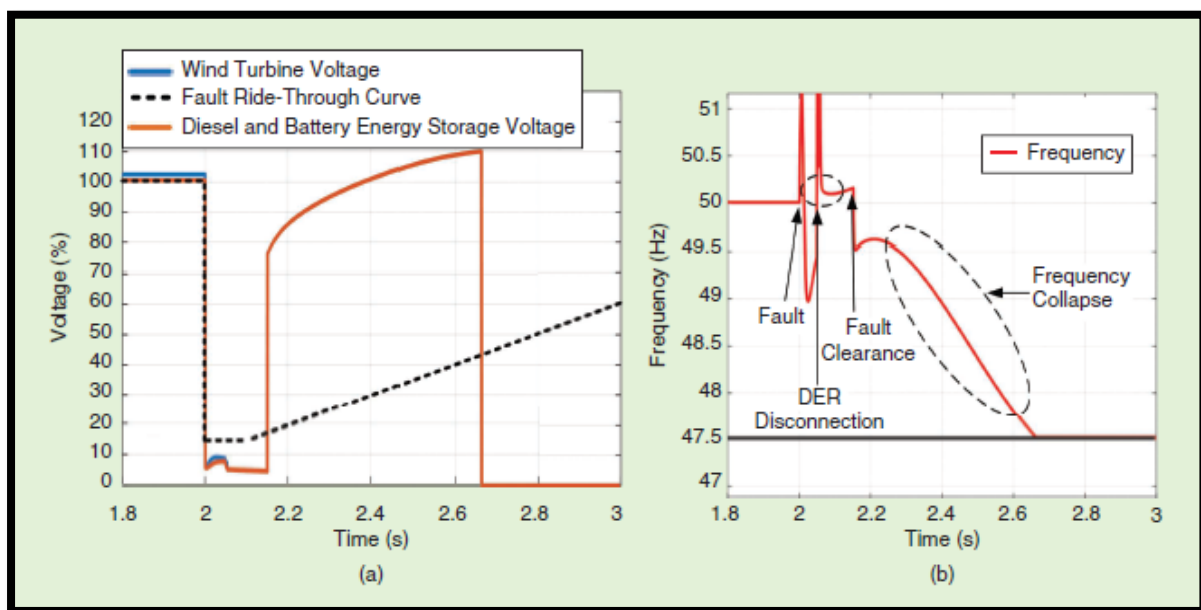
ΑΠΕ και οι μπαταρίες) είναι συνδεδεμένες με ηλεκτρονικά ισχύος. Στα παραδοσιακά νησιωτικά συστήματα, οι γεννήτριες diesel είναι υπεύθυνες για τη συνεισφορά του ρεύματος σφάλματος και οι προστατευτικές διατάξεις ρυθμίζονται ανάλογα για να επιτυγχάνουν γρήγορους χρόνους εκκαθάρισης βλαβών. Τα τυπικά υπάρχοντα συστήματα προστασίας αποτελούνται από ρελέ στους τροφοδότες (έλεγχος CB4 και CB12) και ασφάλειες στις πλευρικές γραμμές.

Ωστόσο, η υψηλή διείσδυση των μονάδων που είναι συνδεδεμένες με ηλεκτρονικά ισχύος μειώνει σημαντικά τα διαθέσιμα ρεύματα σφάλματος. Στην **Εικόνα 2 (b)**, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρευμάτων των προστατευτικών συσκευών καθώς και η συνεισφορά της μονάδας μπαταριών και της γεννήτριας diesel του νησιωτικού συστήματος στο ρεύμα βραχυκύκλωσης της **Εικόνας 2 (a)**. Φαίνεται ότι όταν οι γεννήτριες diesel δεν λειτουργούν, οι τυπικές ρυθμίσεις ρελέ και οι ασφάλειες οδηγούν σε πολύ αργή απόκριση προστασίας. Επιπλέον, οι αλλαγές στην τοπολογία του ΜΔΝ μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα επίπεδα ρεύματος σφάλματος λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς των μονάδων.

Παράλληλα, ακόμη και με τη γεννήτρια diesel συνδεδεμένη, ο συντονισμός μεταξύ των ρυθμίσεων προστασίας και της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας των μονάδων που είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικά ισχύος προκαλεί σοβαρούς προβληματισμούς. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, όλες οι μονάδες παραγωγής αντιμετωπίζουν κρίσιμες πτώσεις τάσης λόγω του μικρού μήκους των γραμμών σε ένα νησί. Θα πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη καμπύλη αδιάλειπτης λειτουργίας ώστε να αποτραπεί η άμεση αποσύνδεση των μονάδων με ηλεκτρονικά ισχύος, ενώ οι ρυθμίσεις προστασίας θα πρέπει να διασφαλίζουν ότι το σφάλμα επιδιορθώνεται πριν από την υπέρβαση του χρονικού ορίου της αδιάλειπτης λειτουργίας. Ο εσφαλμένος συντονισμός μπορεί να οδηγήσει σε αποσυνδέσεις μονάδων, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη συνολική ασφάλεια του συστήματος.

Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στην **Εικόνα 3**. Ένα συμμετρικό σφάλμα συμβαίνει στο σύστημα του νησιού που λειτουργεί με υψηλή διείσδυση μονάδων με ηλεκτρονικά ισχύος. Πριν από τη βλάβη, το σύστημα λειτουργεί με μονάδες με ηλεκτρονικά ισχύος (ανεμογεννήτρια και μπαταρίες) σε επίπεδο διείσδυσης άνω του 60%, ενώ η γεννήτρια diesel καλύπτει την υπόλοιπη ζήτηση ενέργειας. Όταν συμβεί το σφάλμα, όλες οι μονάδες παραγωγής παρουσιάζουν μια μεγάλη πτώση τάσης (**Εικόνα 3**), η οποία καταλήγει σε τιμή κάτω από τις απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας έπειτα από σφάλμα που επιβάλλει ο

ελληνικός ΜΔΝ κώδικας για μονάδες με ηλεκτρονικά ισχύος. Ως εκ τούτου, τόσο οι μπαταρίες όσο και ανεμογεννήτρια αποσυνδέονται σχεδόν αμέσως, πριν προλάβει να αντιμετωπιστεί το σφάλμα. Μετά την επιδιόρθωση του σφάλματος, η γεννήτρια diesel παραμένει η μόνη λειτουργική μονάδα, η οποία δεν μπορεί να καλύψει το συνολικό φορτίο. Ως αποτέλεσμα, η συχνότητα πέφτει (Εικόνα 3 (a)), προκαλώντας αποβολή φορτίου ή ακόμη και black out. Το παράδειγμα αυτό αποδεικνύει τη σημασία του συντονισμού μεταξύ των ρυθμίσεων προστασίας και της ικανότητας αδιάλειπτης λειτουργίας των μονάδων με ηλεκτρονικά ισχύος [5].



Εικόνα 3 : (a) Πτώση τάσης για μονάδες σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ενός τριφασικού σφάλματος και οι απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας, σύμφωνα με τον ελληνικό ΜΔΝ κώδικα (b) Η απόκριση συχνότητας του συστήματος [5]

### 1.2.2 Επίδραση στην αξιοπιστία

Οι ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από χαμηλή αξιοπιστία. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ είναι διακοπτόμενη διότι οι πηγές ενέργειας δεν είναι πάντα διαθέσιμες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό είναι κάτι που γίνεται αντιληπτό κυρίως σε υψηλά επίπεδα διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο - αφού σε χαμηλά επίπεδα διείσδυσης η μη σταθερή

παραγωγή μεταφράζεται ως απλές διακυμάνσεις στο φορτίο και την κατανάλωση - και οδηγεί σε αμφιβολία αναφορικά με την εφεδρεία παραγωγής στο δίκτυο [1].

### 1.2.3 Επίδραση στην ποιότητα της ισχύος

Με τον όρο ποιότητα ισχύος εννοούμε την διατήρηση ή μη της τάσης και της συχνότητας στις ονομαστικές τους τιμές και την παρουσία θορύβου στο δίκτυο. Η κακή ποιότητα ισχύος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στα συστήματα μεταφοράς και διανομής αλλά και βλάβες στο ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό των καταναλωτών [1].

### 1.2.4 Επίδραση στην μορφολογία του δικτύου

Για την μεταφορά και διανομή της ενέργειας από το σημείο παραγωγής της προς τα σημεία κατανάλωσής της απαιτείται η δημιουργία γραμμών μεταφοράς της ενέργειας. Μελλοντικά, όμως, αναμένεται να υπάρχουν πολλά μικροδίκτυα (microgrids) όπου η ενέργεια θα καταναλώνεται εκεί που παράγεται (τοπικά) άρα δεν θα υπάρχουν απώλειες ισχύος από την μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [1, 3].

## 1.3 Εφαρμογές έξυπνων νησιών

Με δεδομένο το εξαιρετικό αιολικό και ηλιακό δυναμικό στα νησιά του Αιγαίου Πελάγους, ένας απαιτητικός στόχος παραμένει η επίτευξη πολύ υψηλών επιπέδων διείσδυσης της ενέργειας από ΑΠΕ, ενδεικτικά πέρα από το 60% της ετήσιας ζήτησης φορτίου. Για το σκοπό αυτό, η εισαγωγή νέων και προηγμένων μεθόδων ελέγχου θεωρείται απαραίτητη προϋπόθεση, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής της αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες. Καινοτόμες λύσεις για πολύ υψηλή διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε νησιωτικά συστήματα έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στο μικροδίκτυο της Κύθνου, που περιλαμβάνει την εγκατάσταση 12 κατοικιών που τροφοδοτούνται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά και μπαταρίες με μια εφεδρική μονάδα diesel. Σε μεγαλύτερες εφαρμογές υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ αποσκοπεί ο ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), μέσω του Smart Island Project, ενώ ολοκληρωμένη εφαρμογή, αλλά όχι ακόμα σε λειτουργία αποτελεί το νησί της Ικαρίας, η οποία θα επιτυγχάνει την αποθήκευση

ενέργειας με υδραντλητικό σταθμό. Σε παγκόσμιο επίπεδο, έργα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ βασισμένα σε μπαταρίες είναι στο King Island (45% ετήσια διείσδυση ΑΠΕ), στο Graciosa Island (δεν λειτουργεί ακόμα), ενώ με τη χρήση αντλητικής αποθήκευσης πετυχαίνει υψηλή διείσδυση ΑΠΕ το υβριδικό έργο στο μικρότερο νησί από τις Κανάριες Νήσους, το El Hierro.

Η αποθήκευση ενέργειας παραμένει μια δαπανηρή τεχνολογία και έτσι διερευνώνται λύσεις που απαιτούν το μειωμένο μέγεθος των μπαταριών, όπως η εγκατάσταση ΑΠΕ μεγάλης χωρητικότητας που υποστηρίζεται από σχετικά μικρή αποθήκευση μπαταριών, που χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση της μεταβλητότητας των ΑΠΕ και την παροχή ρυθμιστικών υπηρεσιών. Μια σημαντική τεχνική πρόκληση είναι η λειτουργία του συστήματος αποκλειστικά με ΑΠΕ και ισχύ μπαταριών για το μεγαλύτερο μέρος του έτους. Το αν είναι εφικτό να εφαρμοστεί και οι επιπτώσεις αυτής της προσέγγισης διερευνώνται στο πλαίσιο του Smart Island Project. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της έννοιας.

Αρχικά, η προτεινόμενη λύση δεν θα πρέπει να επηρεάσει αρνητικά το συνολικό κόστος παραγωγής στα νησιά. Οι υπολογισμοί του κόστους θα πρέπει να λαμβάνουν δεόντως υπόψη το σταθερό και μεταβλητό κόστος των θερμικών μονάδων που παραμένουν σε λειτουργία, καθώς και το κόστος κεφαλαίου και τα διάφορα λειτουργικά έξοδα των ΑΠΕ και των μονάδων αποθήκευσης.

Επιπρόσθετα, εγκατάσταση υπερμεγέθων μονάδων ΑΠΕ θα μπορούσε να έχει αρνητικό αντίκτυπο στη λειτουργία των κινητήρων diesel, ιδίως αν απαιτούνται πολλαπλές λειτουργίες εκκίνησης ή διακοπής ή αν οι κινητήρες diesel είναι αναγκασμένοι να αντισταθμίζουν τις μεγάλες διακυμάνσεις της παραγωγής ΑΠΕ. Έτσι, το μέγεθος των μπαταριών θα πρέπει να μην εμποδίζει με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία των θερμικών μονάδων [6].

## 1.4 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη της συμπεριφοράς μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βραχυκυκλώματα που είναι συνδεδεμένες με ηλεκτρονικά ισχύος σε ένα δίκτυο Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων (ΜΔΝ). Ο στόχος της μελέτης είναι η αξιολόγηση διάφορων τεχνικών καθώς και η δημιουργία ενός εργαλείου για την αναπαράσταση μονάδων

με ηλεκτρονικά ισχύος (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες) για στατικές μελέτες βραχυκυκλωμάτων σε ένα δίκτυο με υψηλή διείσδυσή τους.

Τα νέα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν ΑΠΕ είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν σε συνθήκες βύθισης της τάσης για ορισμένο χρονικό διάστημα (Fault Ride Through), αλλά και να πραγματοποιούν έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο που έχει ως στόχο την υποστήριξη της τάσης του συστήματος. Δύο μεθοδολογίες ελέγχου του αντιστροφέα πηγής τάσης είναι υπο διερεύνηση, η συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία και μία τεχνική που προτείνεται ερευνητικά και πραγματοποιεί έγχυση αέργου ρεύματος τόσο στη θετική ακολουθία, όσο και στην αρνητική. Η αξιολόγηση των μεθόδων γίνεται με βάση τη βελτίωση της τάσης που επιτυγχάνουν και την αύξηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο σύστημα.



## Κεφάλαιο 2

# Διαταραχές του δικτύου σε βραχυκυκλώματα και στρατηγικές αντιμετώπισής τους

## 2.1 Κανόνες Κώδικα Δικτύου για μονάδες ΑΠΕ σε διαταραχές βραχυκυκλωμάτων

Όσο το ποσοστό διείσδυσης των μονάδων ΑΠΕ παρέμενε μικρό σε σχέση με αυτό των συμβατικών μονάδων, οι ΑΠΕ είχαν μικρή επίδραση στο δίκτυο. Τις τελευταίες δεκαετίες, η ραγδαία αύξηση στη συνολική εγκατεστημένη ισχύ από ΑΠΕ μπορεί να επηρεάσει την ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Καθώς η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ δημιουργεί αρκετά προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου, καλούνται οι διαχειριστές του δικτύου να τα επιλύσουν. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη να τεθούν συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις, τις οποίες θα πρέπει να πληρούν οι μονάδες ΑΠΕ (κυρίως αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα), ώστε όχι μόνο να μην επιδρούν αρνητικά στο δίκτυο, αλλά και να συμβάλλουν ενεργά στη διατήρηση της ευστάθειάς του κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων. Οι τεχνικές αυτές απαιτήσεις περιλαμβάνονται στους Κώδικες Δικτύου κάθε χώρας.

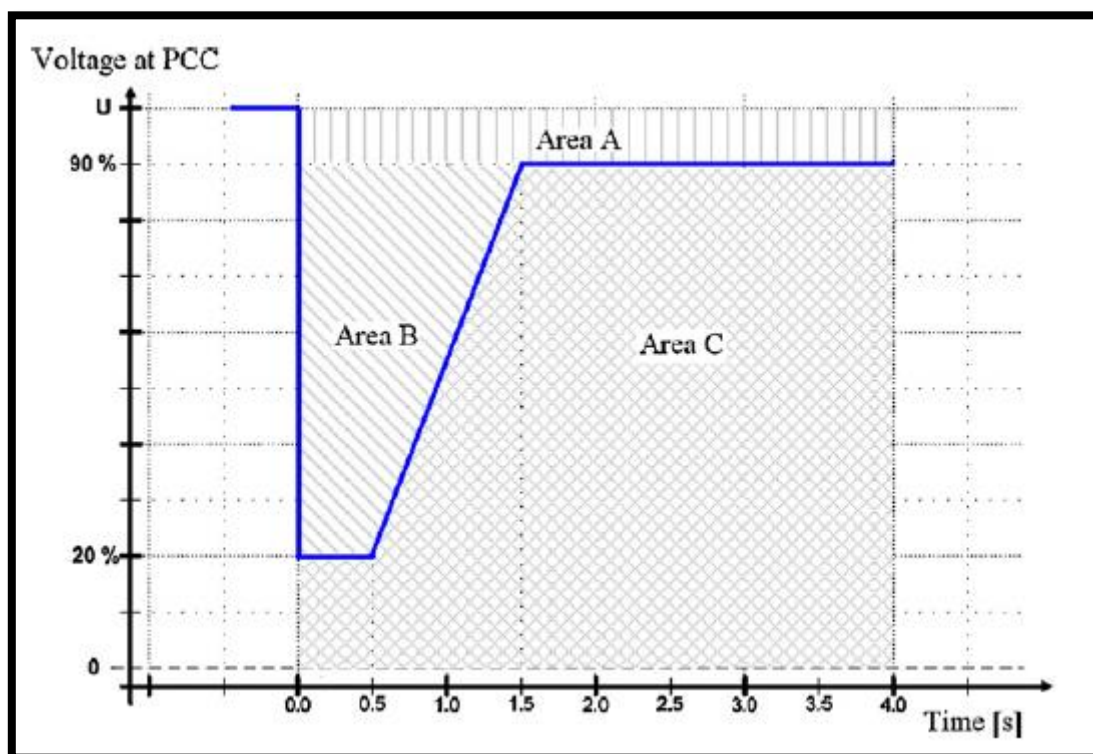
Οι κύριες συνεισφορές αυτών των μονάδων σε βραχυκυκλώματα είναι η αδιάλειπτη λειτουργία και η υποστήριξη της τάσης, και κατ' επέκταση συνεισφορά με ρεύμα στο βραχυκύκλωμα [7].

### 2.1.1 Ικανότητα Αδιάλειπτης Λειτουργίας (Fault Ride Through)

Αφού συμβεί μια διαταραχή στο δίκτυο, η τάση βυθίζεται μέχρι μία κατώτατη τιμή, μέχρι να ανιχνευθεί το βραχυκύκλωμα και να απομονωθεί μέσω των συστημάτων προστασίας από το υπόλοιπο δίκτυο. Έτσι, οι ανεμογεννήτριες παρουσιάζουν και αυτές με τη σειρά τους μείωση στην τάση των ακροδεκτών τους, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνδεσή

τους. Η αποσύνδεση αυτή είναι μη αποδεκτή και σχεδόν απαγορευτική όταν το αιολικό πάρκο αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής παραγόμενης ενέργειας του δικτύου, κάτι το οποίο μπορεί να είναι συχνό φαινόμενο ιδιαίτερα σε ένα ΜΔΝ με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Έτσι, οι Κώδικες Δικτύου έχουν ως απαίτηση από τις ανεμογεννήτριες να συνεχίζουν να λειτουργούν αδιάλειπτα υπό χαμηλή τάση λόγω σφάλματος, για ένα συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, γεγονός το οποίο ορίζεται ως ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπο χαμηλή τάση (Low Voltage Ride Through-LVRT).

Ένα παράδειγμα όπου εφαρμόζεται η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας είναι η Δανία, στην οποία οι Κώδικες Δικτύου ορίζουν την καμπύλη LVRT όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 1**. Πιο συγκεκριμένα, ένα αιολικό πάρκο παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο υπό συνθήκες σφάλματος, όταν η τάση στους ακροδέκτες Υψηλής Τάσης του μετασχηματιστή που συνδέεται στο δίκτυο, βρίσκεται στην περιοχή Β, ενώ άμα βρεθεί στην περιοχή C, τότε επιτρέπεται να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Στο **Πίνακα 1** παρουσιάζονται οι LVRT απαιτήσεις για διάφορους διεθνείς Κώδικες Δικτύου.

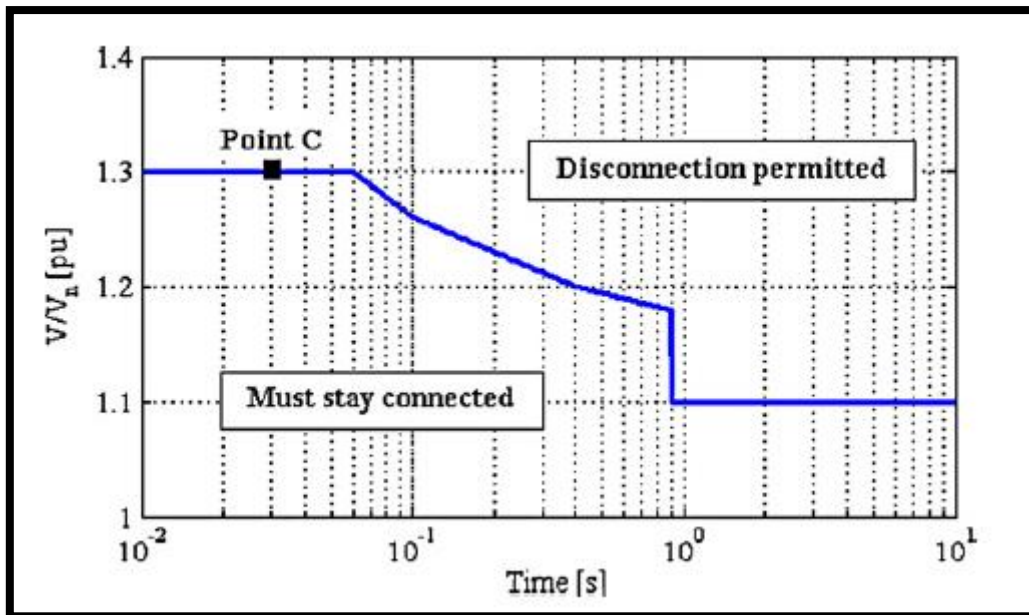


Διάγραμμα 1 : Η LVRT απαίτηση των ανεμογεννητριών στη Δανία [7]

**Πίνακας 1 : Οι LVRT απαιτήσεις των ανεμογεννητριών για διάφορους διεθνείς Κώδικες Δικτύου [7]**

Grid code country	During fault		Fault clearance	
	$V_{\min}$ (PU)	$T_{\max}$ (s)	$V_{\min}$ (PU)	$T_{\max}$ (s)
Australia	0.0	0.1	0.7	2
Canada	0.0	0.15	0.85	1
Denmark	0.2	0.5	0.9	1.5
Germany	0.0	0.15	0.9	1.5
Ireland	0.15	0.625	0.9	3
New Zealand	0	0.2	0.6	1
Spain	0.0	0.15	0.85	1
UK	0.15	0.14	0.8	1.2
USA (FERC)	0.15	0.625	0.9	3
USA (WECC)	0.0	0.15	0.9	1.75

Σε περιπτώσεις αποσύνδεσης μεγάλων φορτίων ή ασύμμετρων σφαλμάτων στο δίκτυο (μονοφασικών, διφασικών), μπορεί να παρατηρηθεί ανύψωση της τάσης. Για το λόγο αυτό, αντίστοιχα με την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπο χαμηλή τάση, πολλές χώρες, όπως η Αυστραλία, η Δανία, η Ισπανία, η Γερμανία και οι ΗΠΑ, απαιτούν από τις ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αδιάλειπτα και υπό υψηλή τάση (High Voltage Ride Through). Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 2**, για την περίπτωση της Αυστραλίας, η καμπύλη HVRT οριοθετεί την επιτρεπτή τάση στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή της ανεμογεννήτριας, με τιμές κάτω από την καμπύλη να σηματοδοτούν την παραμονή της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, ενώ οι τιμές πάνω από την καμπύλη υποδηλώνουν ότι είναι επιτρεπτή η αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας. Στον **Πίνακα 2** παρουσιάζονται οι HVRT απαιτήσεις για διάφορους διεθνείς Κώδικες Δικτύου [7].



Διάγραμμα 2 : Η HVRT απαίτηση των ανεμογεννητριών στην Αυστραλία [7]

Πίνακας 2 : Οι HRVT απαιτήσεις των ανεμογεννητριών για διάφορους διεθνείς Κώδικες Δικτύου [7]

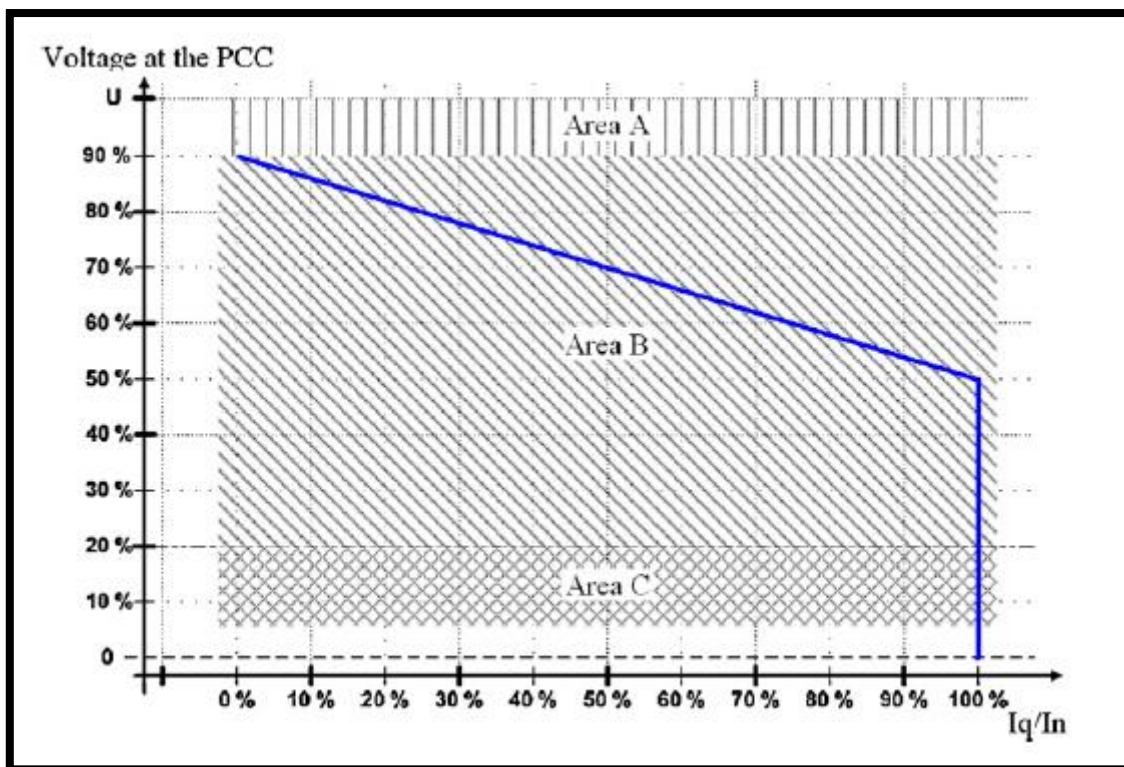
Country	During swell	
	$V_{max}$ (PU)	$T_{max}$ (s)
Australia	1.3	0.06
Denmark	1.2	0.1
Germany	1.2	0.1
Spain	1.3	0.25
USA (WECC)	1.2	1

### 2.1.2 Απόκριση ενεργού και αέργου ισχύος μετα από διαταραχές

Κάποιοι κώδικες απαιτούν από τα αιολικά πάρκα να υποστηρίξουν ενεργά την ευστάθεια του δικτύου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η τάση στους ακροδέκτες τους, άρα και τον χρόνο που οφείλουν να είναι συνδεδεμένες, ενώ παράλληλα αυξάνει και τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που επιτρέπουν πιο γρήγορη ανίχνευση των βραχυκυκλωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με το να ζητούν οι κώδικες δικτύου από τις

μονάδες ΑΠΕ να συνεισφέρουν με άεργο ρεύμα στο σύστημα κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων. Παράλληλα υπάρχει και η απαίτηση να αποκαθιστούν γρήγορα την ενεργό ισχύ τους, κατά την επαναφορά της τάσης στην ονομαστική της τιμή, ώστε να μειωθούν οι διαταραχές στο ισοζύγιο ισχύος.

Στο **Διάγραμμα 3** φαίνεται η απαίτηση προσφοράς άεργου ρεύματος στο δίκτυο όσον αφορά τα αιολικά πάρκα, σύμφωνα με τον Κώδικα Δικτύου της Δανίας. Πιο συγκεκριμένα, καθώς έχουμε βύθιση τάσης της τάξεως του 10%, το άεργο ρεύμα που προσφέρει το αιολικό πάρκο στο σύστημα πρέπει να ακολουθεί την καμπύλη του σχήματος.



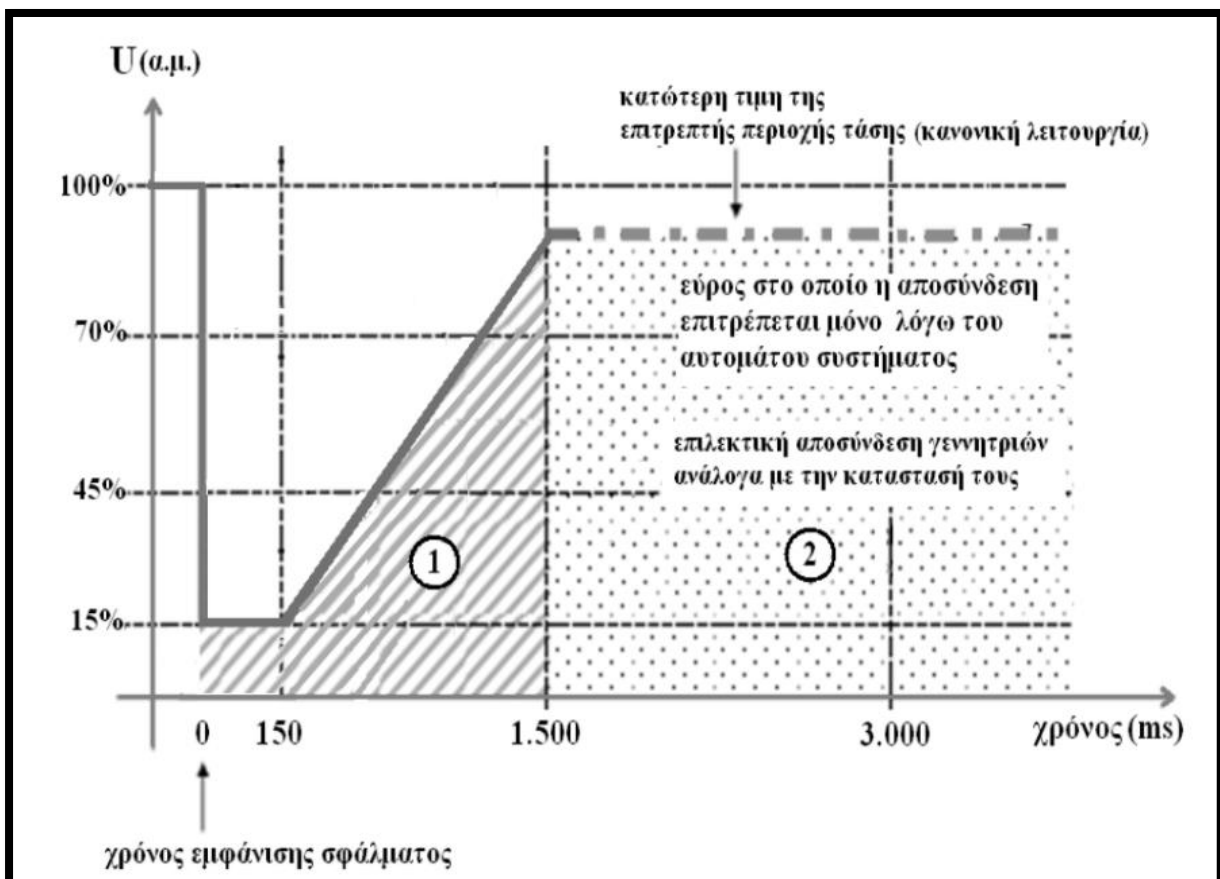
**Διάγραμμα 3 : Απαιτήσεις παροχής άεργου ισχύος σύμφωνα με τον Κώδικα Δικτύου της Δανίας [7]**

Πολλές φορές όμως για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του Κώδικα Δικτύου σε ενεργό και άεργο ρεύμα, απαιτείται η υπερφόρτιση του αιολικού πάρκου, κάτι το οποίο είναι μη αποδεκτό. Σε αυτές τις περιπτώσεις, λοιπόν, πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στην ενεργό ή άεργο συνιστώσα του ρεύματος έναντι της άλλης ώστε η τιμή του ρεύματος εξόδου των ανεμογεννητριών να μην ξεπεράσει την ονομαστική της. Σύμφωνα με τους Κώδικες Δικτύου τους, η Αυστραλία και η Γερμανία είναι παραδείγματα χωρών που δίνουν προτεραιότητα στην

άεργο συνιστώσα του ρεύματος κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος, ενώ η Ιρλανδία, η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο δίνουν προτεραιότητα στην ενεργό συνιστώσα [7].

## 2.2 Κανόνες Κώδικα Δικτύου στην Ελλάδα

Σύμφωνα με το άρθρο 3 του ν. 39/2014, οι ανεμογεννήτριες όλων των αιολικών σταθμών που συνδέονται στο σύστημα Μη Διασυνδεδεμένων Νήσων (ΜΔΝ), ακόμα κι αυτοί που αποτελούν τμήμα υβριδικών σταθμών, θα πρέπει να εξασφαλίζουν την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλματα του δικτύου (low voltage ride through capability), όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 4**. Οι παρακάτω τεχνικές απαιτήσεις αφορούν τη συνιστώσα θετικής ακολουθίας της τάσης στο σημείο σύνδεσης του σταθμού.



Διάγραμμα 4 : Καμπύλη τάσης για αδιάλειπτη λειτουργία ανεμογεννήτριας [8]

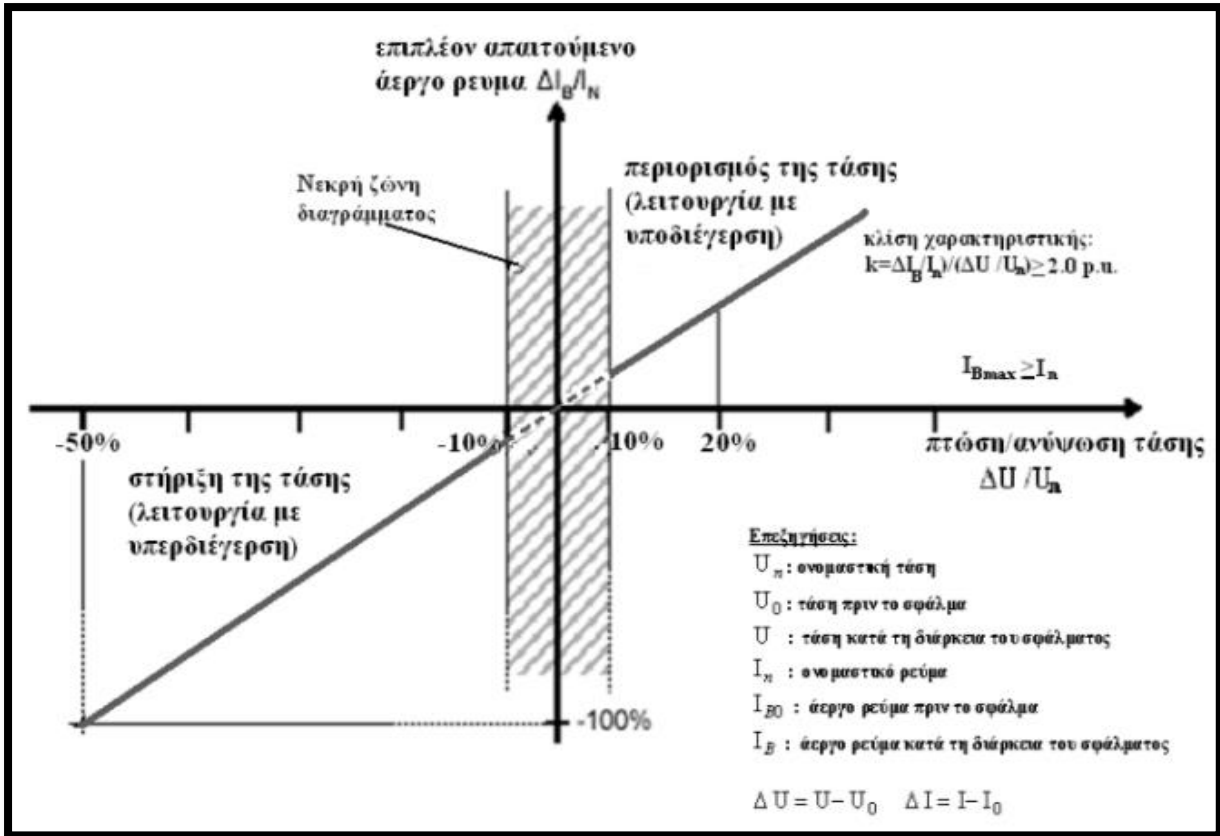
Όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης του αιολικού σταθμού παίρνει τιμές στην περιοχή πάνω από τη γραμμή που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα τότε συμμετρικές ή ασύμμετρες βυθίσεις τάσης λόγω σφαλμάτων ή διαταραχών του συστήματος ΜΔΝ δεν πρέπει να οδηγούν σε αστάθεια ή αποσύνδεση του αιολικού σταθμού απ' το σύστημα ΜΔΝ.

Η περιοχή 1 αναφέρεται σε τάσεις για τις οποίες η σύντομη αποσύνδεση από το σύστημα ΜΔΝ είναι επιτρεπτή. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να επανασυγχρονίζονται σε λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα και με ρυθμό ανάληψης ισχύος από 10 μέχρι 20% της ονομαστικής τους ισχύος ανά δευτερόλεπτο. Εάν ο διαχειριστής ΜΔΝ το εγκρίνει βέβαια, δύναται ο χρόνος επανασυγχρονισμού να είναι μεγαλύτερος των 2 δευτερολέπτων και ο ρυθμός ανάληψης ενεργού ισχύος μικρότερος του 10% της ονομαστικής ισχύος ανά δευτερόλεπτο.

Επιπλέον, η αυτόματη αποσύνδεση ανεμογεννητριών του αιολικού σταθμού επιτρέπεται στην περιοχή 2 (προστασία απόζευξης), η οποία είναι η περιοχή όπου η κατάσταση δικτύου με χαμηλή τάση παραμένει για χρονική διάρκεια μεγαλύτερη του 1,5 δευτερολέπτου είτε λόγω μόνιμου σφάλματος είτε λόγω άλλης διαταραχής. Αυτή η αποσύνδεση πρέπει να γίνεται σε 4 στάδια. Καθένα από τα στάδια πρέπει να απέχει 0,3 s από το προηγούμενό του και το 25% των ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία να αποσυνδέεται εντός αυτού του χρονικού διαστήματος. Ο επανασυγχρονισμός του αιολικού σταθμού επιτρέπεται όταν η τάση στο σημείο σύνδεσης με το σύστημα ΜΔΝ έχει επανέλθει σε τιμές μεγαλύτερες των κατώτερων ορίων κανονικής λειτουργίας του συστήματος ΜΔΝ.

Όσον αφορά τους αιολικούς σταθμούς που δεν αποσυνδέονται από το σύστημα ΜΔΝ κατά την διάρκεια βυθίσεων τάσης, θα πρέπει να συνεχίζουν να παράγουν ενεργό ισχύ, μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων, με ρυθμό ανάληψης ισχύος μεταξύ 10% και 20% της ονομαστικής τους ισχύος ανά δευτερόλεπτο.

Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 5**, κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών της τάσης, οι αιολικοί σταθμοί πρέπει να υποστηρίζουν την τάση του συστήματος ΜΔΝ με έγχυση ή απορρόφηση αέργου ρεύματος.



**Διάγραμμα 5 : Αέργο ρεύμα εξόδου κατά τη διάρκεια μεγάλων μεταβολών της τάσης [8]**

Εάν η τάση μεταβληθεί κατά +/- 10% της ονομαστικής της τιμής (βύθιση ή ανύψωση αντίστοιχα) τότε πρέπει να ενεργοποιηθεί ο έλεγχος του αέργου ρεύματος. Κατόπιν αναγνώρισης του σφάλματος, θα πρέπει να πραγματοποιείται η στήριξη της τάσης εντός 20ms με την παροχή αέργου ρεύματος στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή της γεννήτριας εντάσεως τουλάχιστον 2% της ονομαστικής έντασης ρεύματος για κάθε 1% μεταβολή της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Για βυθίσεις τάσης μεγαλύτερες του 50%, πρέπει να είναι δυνατή η παροχή έργου ρεύματος τουλάχιστον 100% του ονομαστικού ρεύματος της γεννήτριας και μάλιστα, αυτό να έχει πραγματοποιηθεί εντός 70ms μετά την αναγνώριση του σφάλματος.

Αφού γίνει επαναφορά της τάσης στη νεκρή ζώνη, η υποστήριξη της τάσης θα πρέπει να συνεχιστεί για χρονικό διάστημα 500ms (παραγωγή / απορρόφηση αέργου ρεύματος σύμφωνα με τη διακεκομμένη ευθεία του διαγράμματος εντός της νεκρής ζώνης) [8].



## 2.3 Τεχνικές συνεισφοράς μονάδας ηλεκτρονικών ισχύος στο βραχυκύκλωμα

Στους περισσότερους κώδικες δικτύου, αυτές οι απαιτήσεις αναφέρονται σε συμμετρικά σφάλματα και στην έγχυση αέργου ισχύος στις τρεις φάσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις σφαλμάτων δικτύου όμως, τα σφάλματα που κυριαρχούν είναι κυρίως ασύμμετρα, έχοντας ως συνέπεια την ασύμμετρη βύθιση της τάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκύπτουν ρεύματα και τάσεις αρνητικής ακολουθίας στο δίκτυο.

Έτσι στην έρευνα έχουν προταθεί για την συμπεριφορά ηλεκτρονικών ισχύος στα βραχυκυκλώματα τεχνικές ελέγχου του αντιστροφέα των μονάδων ΑΠΕ, οι οποίες παρουσιάζονται στο **Σχήμα 1**.

<b>Τεχνικές ελέγχου</b>	<b>Χαρακτηριστικά</b>
<b>1. Αποσύνδεση της μονάδας</b> ( $P^*=0, Q^*=0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Αποφυγή νησιδοποίησης</li> <li>- Δεν επιδρά στην βελτίωση της τάσης του δικτύου</li> </ul>
<b>2. Έγχυση Ενεργού Ισχύος στην θετική ακολουθία</b> ( $Q^*=0, P^-*=0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Κατάλληλη για ΣΗΕ με υψηλών αντιστάσεων φορτία και γραμμές</li> <li>- Αποφυγή υπερφόρτισης του μετασχηματιστή</li> <li>- Η ισχύς εξόδου της μονάδας ΑΠΕ μειώνεται ανάλογα με την εγχυόμενη ισχύ στο δίκτυο</li> </ul>
<b>3. Έγχυση Αέργου Ισχύος στην θετική ακολουθία</b> ( $P^*=0, Q^-*=0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Κατάλληλη για ΣΗΕ με υψηλά επαγωγικά φορτία και γραμμές</li> <li>- Η ισχύς εξόδου της μονάδας ΑΠΕ μηδενίζεται κατά την διάρκεια σφάλματος</li> <li>- Η μέγιστη τιμή εγχυόμενης αέργου ισχύος περιορίζεται από την ονομαστική τιμή ρεύματος του μετασχηματιστή</li> </ul>
<b>4. Έγχυση Ενεργού Ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία</b> ( $Q^*=0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Η εγχυόμενη ενεργός ισχύς υπολογίζεται σύμφωνα με τα ασύμμετρα πλάτη των τάσεων του δικτύου</li> <li>- Η ισχύς εξόδου της μονάδας ΑΠΕ προσαρμόζεται με βάση την εγχυόμενη στο δίκτυο ισχύ</li> </ul>
<b>5. Έγχυση Αέργου Ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία</b> ( $P^*=0$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Η ισχύς εξόδου της μονάδας ΑΠΕ μηδενίζεται κατά την διάρκεια σφάλματος</li> <li>- Ικανή να μειώσει την τάση της αρνητικής ακολουθίας του δικτύου</li> </ul>
<b>6. Έγχυση Ενεργού/Αέργου Ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Έλεγχος της υποβοήθησης της τάσης</li> <li>- Δυνατότητα ευέλικτου ελέγχου σύμφωνα με την σύνθετη αντίσταση και τις γραμμές του δικτύου</li> <li>- Η ονομαστική τιμή ρεύματος του μετασχηματιστή συμμετέχει στον υπολογισμό της εγχυόμενης στο σύστημα ενεργού/αέργου ισχύος</li> </ul>

**Εχήμα 1 : Τεχνικές ελέγχου αντιστροφέα με έγχυση ενεργού/αέργου ισχύος [9]**

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η πρώτη στρατηγική αφορά την αποσύνδεση της μονάδας ΑΠΕ από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ( $P^*=0, Q^*=0$ ) αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο της νησιδοποίησης αλλά χωρίς να προσφέρει υποστήριξη στην τάση του δικτύου. Η δεύτερη στρατηγική εστιάζει στην έγχυση ενεργού ισχύος στην θετική ακολουθία του συστήματος ( $Q^*=0, P^{-*}=0$ ), μια στρατηγική η οποία είναι κατάλληλη για ηλεκτρικά συστήματα με υψηλών αντιστάσεων φορτία και γραμμές. Η συγκεκριμένη στρατηγική είναι μία μέθοδος περιορισμού του ρεύματος (current limitation) που έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή της υπερφόρτισης του μετασχηματιστή. Σε αυτή την περίπτωση, η ισχύς εξόδου της μονάδας ΑΠΕ μειώνεται ανάλογα με την εγχυόμενη ισχύ στο δίκτυο. Η στρατηγική έγχυσης αέργου ισχύος στην θετική ακολουθία του δικτύου εφαρμόζεται κυρίως σε συστήματα με υψηλά επαγωγικά φορτία και γραμμές, με την ισχύ εξόδου από την ΑΠΕ να μηδενίζεται κατά την διάρκεια σφάλματος ( $P^*=0, Q^{-*}=0$ ). Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέγιστη εγχυόμενη ποσότητα αέργου ισχύος περιορίζεται από την ονομαστική τιμή ρεύματος του μετασχηματιστή. Μία άλλη στρατηγική είναι η έγχυση ενεργού ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία του συστήματος ( $Q^*=0$ ). Η ποσότητα ενεργού ισχύος που εγχέεται στην θετική/αρνητική ακολουθία υπολογίζεται σύμφωνα με τα ασύμμετρα πλάτη των τάσεων του δικτύου και η ισχύς εξόδου της μονάδας θα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με την εγχυόμενη ισχύ στο δίκτυο. Αντιθέτως, η ισχύς εξόδου από την μονάδα μηδενίζεται κατά την διάρκεια σφάλματος, εάν γίνει έγχυση αέργου ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία ( $P^*=0$ ), κι έτσι είναι εφικτό να μειωθεί η τάση της αρνητικής ακολουθίας του δικτύου. Τέλος, με την έγχυση ενεργού/αέργου ισχύος στην θετική/αρνητική ακολουθία του συστήματος επιτυγχάνεται ο έλεγχος της υποβοήθησης τάσης και η δυνατότητα ευέλικτου ελέγχου της σύνθετης αντίστασης καθώς και των γραμμών του δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, η ονομαστική τιμή ρεύματος του μετασχηματιστή συμμετέχει στον υπολογισμό της εγγεόμενης ενεργού/αέργου ισχύος [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

### 2.3.1 Περιορισμός του ρεύματος (Current Limitation)

Όπως προαναφέρθηκε νωρίτερα το να πληροί ο αντιστροφέας τις προδιαγραφές για άεργο ισχύ (σε θετική/αρνητική ακολουθία) μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτιση του.

Έτσι, στην περίπτωση συμμετρικού ελέγχου (ρεύμα θετικής ακολουθίας), αν ξεπεραστεί το πλάτος του αντιστροφέα το οποίο υπολογίζεται από την Σχέση (5), ο περιορισμός του ρεύματος γίνεται μέσω του τύπου

$$I_p^+ = \sqrt{I_{nominal}^2 - I_q^+{}^2} \quad (1)$$

για προτεραιότητα στην άεργο ισχύ και τις σχέσεις :

$$I_q^+ = \sqrt{I_{nominal}^2 - I_p^+{}^2} \quad (2)$$

για προτεραιότητα στην ενεργό[19, 20, 21].

Για τον περιορισμό του ρεύματος όταν ο αντιστροφέας συνεισφέρει και με ρεύμα αρνητικής ακολουθίας είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία. Στα πλαίσια της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που έχει προταθεί στην αναφορά [22]. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσδίδει στο σύστημα μεγαλύτερη ευστάθεια και καλύτερη υποστήριξη της τάσης μετά από ασύμμετρο βραχυκύκλωμα, καθώς πραγματοποιεί έγχυση αέργου ρεύματος τόσο στη θετική ακολουθία όσο και στην αρνητική υποστηρίζοντας έτσι την τάση του δικτύου σε ασύμμετρα σφάλματα.

Οι αρχικές συνιστώσες ενεργού ρεύματος στη θετική και αρνητική ακολουθία υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$I_p^+ = \frac{P_{nominal}}{V_j^+} \quad (3)$$

$$I_p^- = 0 \quad (4)$$

Όπου  $V_j^+$  η μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας στους ακροδέκτες του αντιστροφέα και  $V_j^-$  η αντίστοιχη της αρνητικής ακολουθίας.

Οι αρχικές συνιστώσες αέργου ρεύματος σε θετική και αρνητική ακολουθία παίρνουν τις τιμές τους σύμφωνα με το **Διάγραμμα 5**, με το  $\Delta V$  να εκφράζεται ως  $|1 - V_j^+|$ , ενώ στην αρνητική ακολουθία ως  $|0 - V_j^-|$ .

Αυτοί οι υπολογισμοί για τα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας μπορεί να οδηγήσουν σε υπερφόρτιση του αντιστροφέα. Έτσι, υπολογίζεται αν ξεπεραστεί το ονομαστικό ρεύμα σε κάποια φάση και αναπροσαρμόζονται αυτές οι τιμές.

Τα πλάτη των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας υπολογίζονται από τις σχέσεις :

$$I_1^{ref} = \sqrt{I_p^{+2} + I_q^{+2}} \quad (5)$$

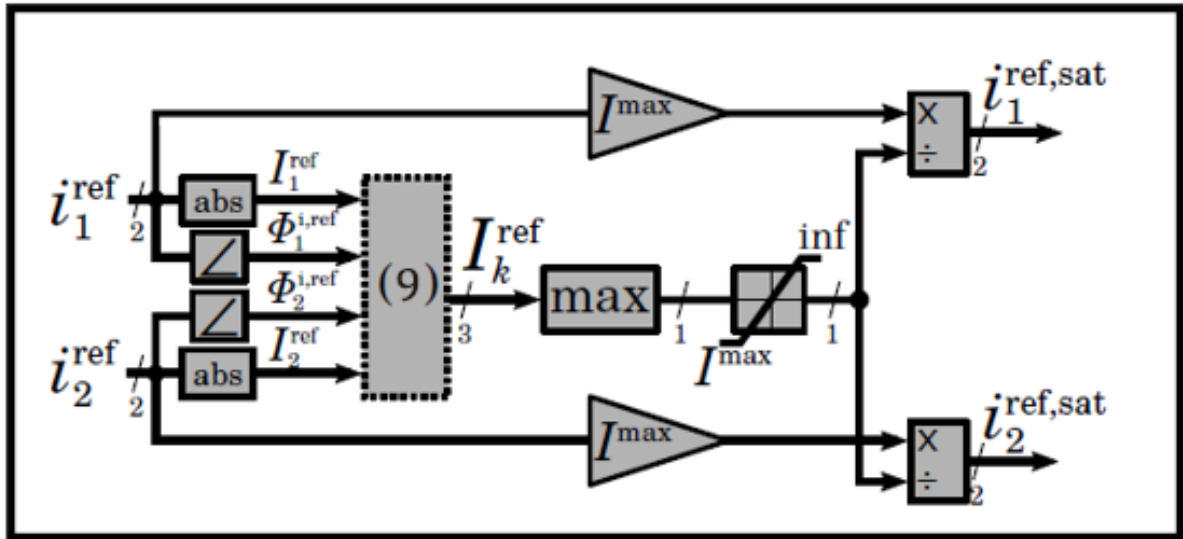
$$I_2^{ref} = \sqrt{I_p^{-2} + I_q^{-2}} \quad (6)$$

Και οι γωνίες των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας από τις σχέσεις :

$$\Phi_1^{i,ref} = \tan^{-1} \left( \frac{I_q^+}{I_p^+} \right) \quad (7)$$

$$\Phi_2^{i,ref} = \tan^{-1} \left( \frac{I_q^-}{I_p^-} \right) \quad (8)$$

Η λογική του περιορισμού ρεύματος (Advanced Current Limitation) παρουσιάζεται αναλυτικά στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2 : Η μέθοδος Advanced Current Limitation

Το ρεύμα  $i_1^{ref}$  είναι το ρεύμα της θετικής ακολουθίας με γωνία  $\Phi_1^{i,ref}$  και μέτρο  $I_1^{ref}$ , ενώ αντίστοιχα το ρεύμα  $i_2^{ref}$  αποτελεί το ρεύμα της αρνητικής ακολουθίας με γωνία  $\Phi_2^{i,ref}$  και μέτρο  $I_2^{ref}$ . Τα μέτρα και οι γωνίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μέτρου των φασικών ρευμάτων μέσω της Σχέσης (9).

$$(9) \quad \begin{cases} I_a^{ref} = \sqrt{I_1^{ref2} + I_2^{ref2} + 2I_1^{ref} I_2^{ref} \cos \varepsilon} \\ I_b^{ref} = \sqrt{I_1^{ref2} + I_2^{ref2} + 2I_1^{ref} I_2^{ref} \cos (\varepsilon + \frac{4\pi}{3})} \\ I_c^{ref} = \sqrt{I_1^{ref2} + I_2^{ref2} + 2I_1^{ref} I_2^{ref} \cos (\varepsilon - \frac{4\pi}{3})} \end{cases}$$

Όπου  $\varepsilon = \Phi_2^{i,ref} - \Phi_1^{i,ref}$  είναι η διαφορά φάσης των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Έπειτα, λαμβάνεται ρεύμα  $I_m = \max(I_{nominal}, \max(I_a^{ref}, I_b^{ref}, I_c^{ref}))$  και επανυπολογίζονται οι συνιστώσες του ενεργού και αέργου ρεύματος της θετικής και αρνητικής ακολουθίας ως εξής :

$$I_p^+ = I_p^+ \times \frac{I_{nominal}}{I_m} \quad (10)$$

$$I_q^+ = I_q^+ \times \frac{I_{nominal}}{I_m} \quad (11)$$

$$I_p^- = I_p^- \times \frac{I_{nominal}}{I_m} \quad (12)$$

$$I_q^- = I_q^- \times \frac{I_{nominal}}{I_m} \quad (13)$$

Από αυτές τις συνιστώσες ρευμάτων υπολογίζονται τα νέα ρεύματα τα οποία εγχέονται στη θετική και αρνητική ακολουθία.

## Κεφάλαιο 3

# Δυναμικές προσομοιώσεις του δικτύου της Αστυπάλαιας με τη χρήση του PowerFactory

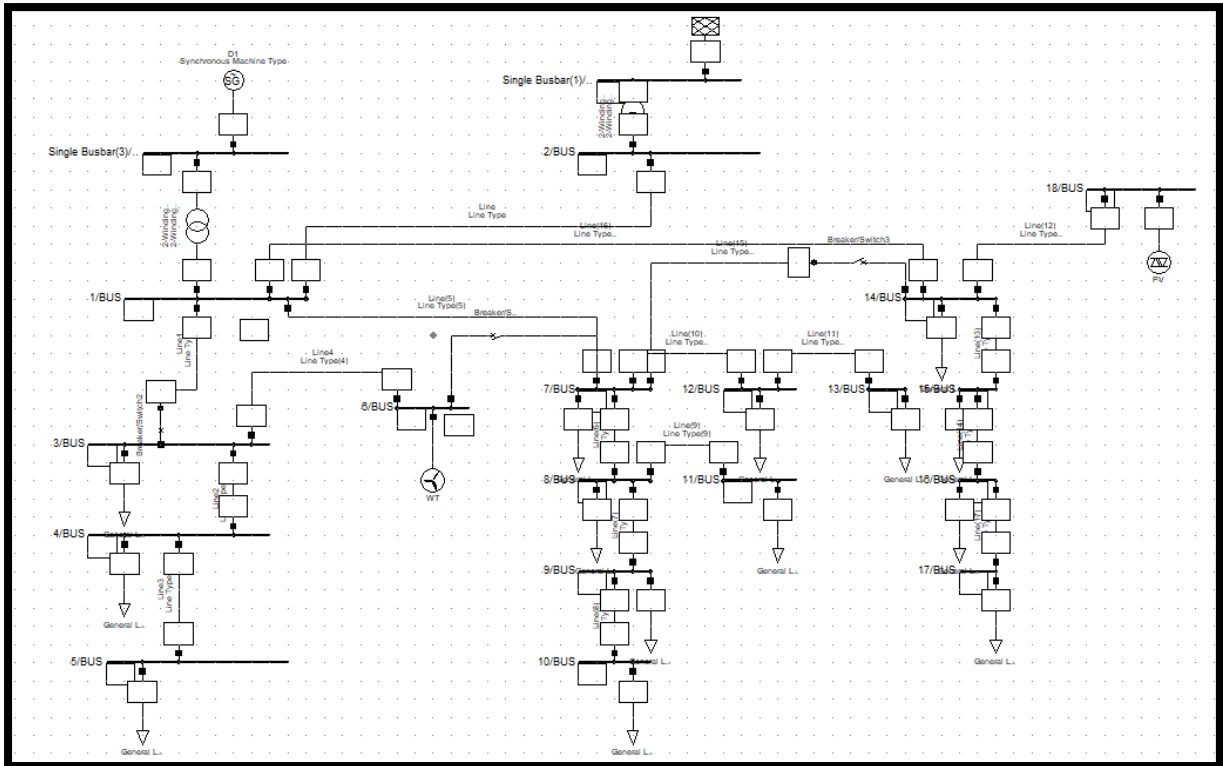
### 3.1 Υπολογισμός τάσεων και ρευμάτων

Για την ακρίβεια των υπολογισμών του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PowerFactory. Σε αυτό, σχεδιάστηκε και προσομοιώθηκε το σύστημα ΜΔΝ της Αστυπάλαιας, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος και στον αλγόριθμο. Στο PowerFactory μελετήθηκαν διάφορα είδη σφάλματος (τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση), υπολογίζοντας τις τάσεις των ζυγών και τα ρεύματα των γραμμών και αφού έγινε η επαλήθευση των υπολογισμών του αλγορίθμου, σχεδιάστηκαν οι τεχνικές συνεισφορές στο βραχυκύκλωμα.

Τα χαρακτηριστικά του δικτύου της Αστυπάλαιας παρουσιάζονται στους πίνακες 1-4 του Παραρτήματος Πινάκων και πιο συγκεκριμένα εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά της Diesel γεννήτριας (**Παράρτημα – Πίνακας i**), των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής (**Παράρτημα – Πίνακας ii**), των μετασχηματιστών της γεννήτριας και της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας (**Παράρτημα – Πίνακας iii**) και των γραμμών του δικτύου του νησιού (**Παράρτημα – Πίνακας iv**).

Για την επαλήθευση των υπολογισμών του κώδικα, το δίκτυο της Αστυπάλαιας μοντελοποιήθηκε στο πρόγραμμα PowerFactory όπως εμφανίζεται στην **Εικόνα 4**.



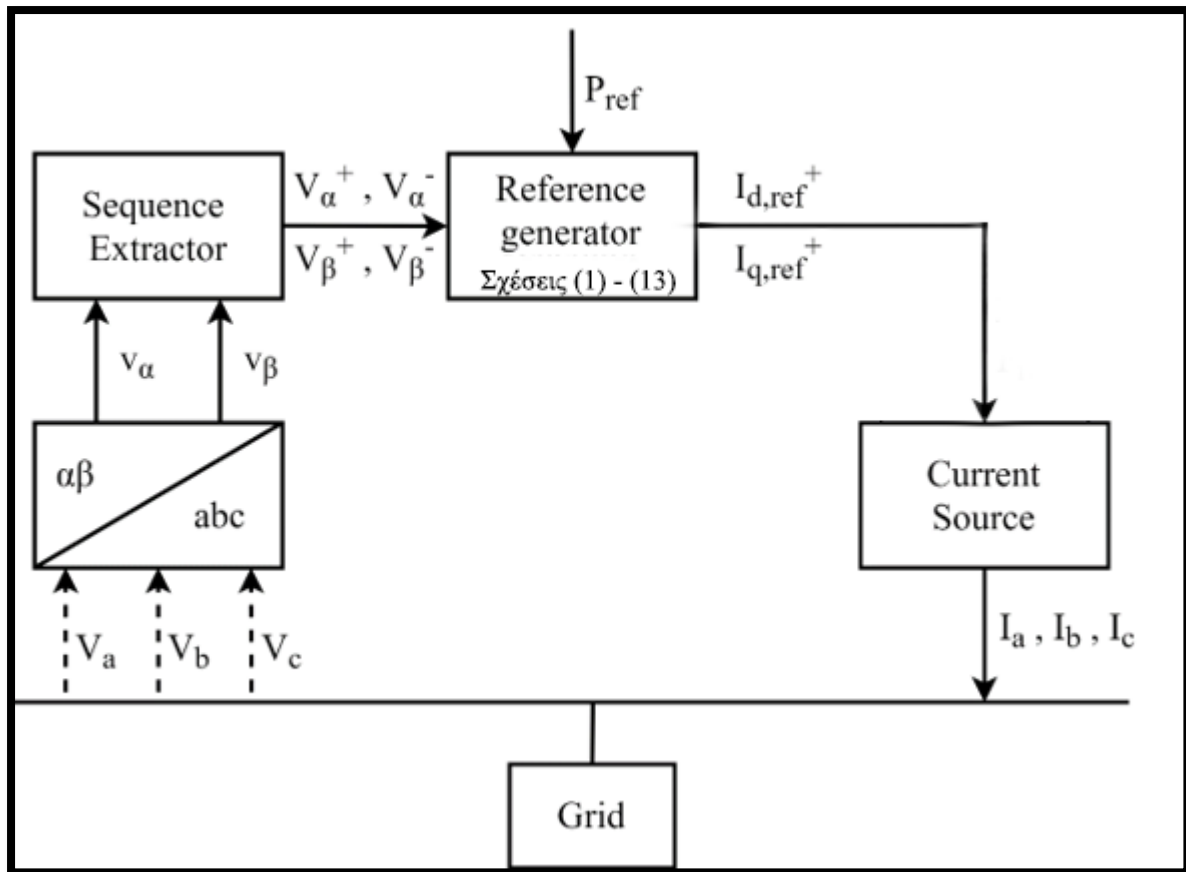


Εικόνα 4 : Το δίκτυο της Αστυπάλαιας μοντελοποιημένο στο PowerFactory

Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν βάσεις συστήματος  $S_{base} = 2 \text{ MVA}$  και  $V_{base} = 15 \text{ kV}$ . Τα χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν για τη θετική και την αρνητική ακολουθία, ενώ για τη μηδενική ακολουθία χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές πολλαπλασιασμένες επί 1,5 και διαμορφώθηκαν όπως φαίνονται στον **Πίνακα ν (Παράρτημα Πινάκων)**.

Στο μοντέλο του PowerFactory οι μονάδες ΑΠΕ προσομοιώνονται με μία πηγή ρεύματος η οποία περιλαμβάνει την λογική για την υποστήριξη της τάσης του δικτύου με έγχυση ή απορρόφηση ρεύματος. Δηλαδή, ένας μετατροπέας ισχύος προς την πλευρά του δικτύου μιας μονάδας ΑΠΕ είναι ισοδύναμος με μία πηγή. Πιο αναλυτικά, η αναφορά του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα σε συνθήκες σφάλματος είναι συνάρτηση της τάσης του δικτύου στο σημείο σύνδεσης και της παραγόμενης ισχύος της συνδεδεμένης μονάδας την στιγμή πριν το σφάλμα.

Το προτεινόμενο μοντέλο για τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος στην πλευρά του δικτύου με ικανότητα στήριξης της τάσης σε σφάλματα παρουσιάζεται στο **Σχήμα 3**. Ο έλεγχος του ρεύματος τροποποιούταν αναλόγως με τον έλεγχο υπό εξέταση (**Σχέσεις (1)-(13)**).



**Σχήμα 3 : Μοντέλο για τον έλεγχο του μετατροπέα ισχύος στο PowerFactory**

Με αυτά τα δεδομένα, για σφάλμα στο ζυγό 5 του δικτύου και για αντίσταση σφάλματος  $Z_{\text{fault}} = 10 \Omega$ , και θεωρώντας ότι οι μονάδες παραγωγής τροφοδοτούν το δίκτυο με την ονομαστική ισχύ τους, υπολογίστηκαν οι τάσεις των ζυγών και τα ρεύματα των γραμμών του δικτύου. Οι υπολογισμοί αυτοί επαλήθευσαν τον αλγόριθμο (παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα στο υποκεφάλαιο 4.2) και για τα 12 σενάρια (ανάλογα με το ποιες μονάδες λειτουργούν ή είναι εκτός λειτουργίας), όπως αυτά φαίνονται στον **Πίνακα 8**.

**Πίνακας 3 : Τα 12 σενάρια μελέτης, όπου 0 η μονάδα λειτουργεί, όπου 1 η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας**

Case	Diesel	W/T	BES	PV
1	0	1	1	1
2	0	0	1	1
3	0	1	0	1
4	0	0	0	1
5	0	1	1	0
6	0	0	1	0
7	0	1	0	0
8	0	0	0	0
9	1	1	0	1
10	1	0	0	1
11	1	1	0	0
12	1	0	0	0
0 = on				
1 = off				

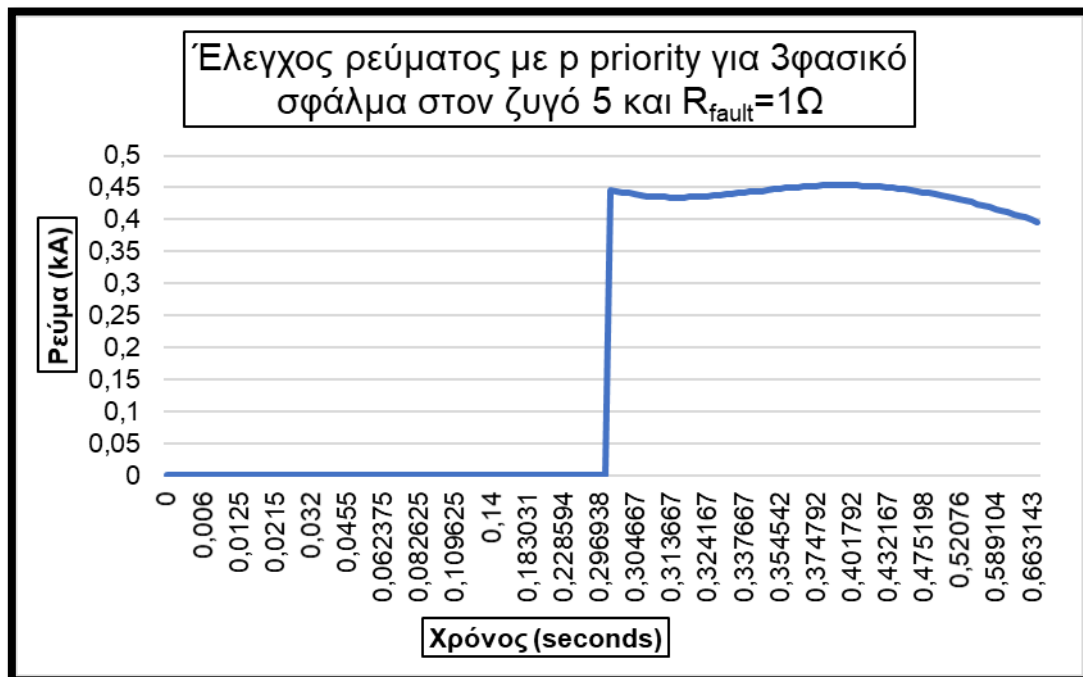
### 3.2 Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο δυναμικό μοντέλο

Η μέθοδος αυτή διεκπεραιώνεται πραγματοποιώντας συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία του συστήματος και επιτυγχάνει την υποστήριξη της τάσης του δικτύου σε ασύμμετρα σφάλματα.

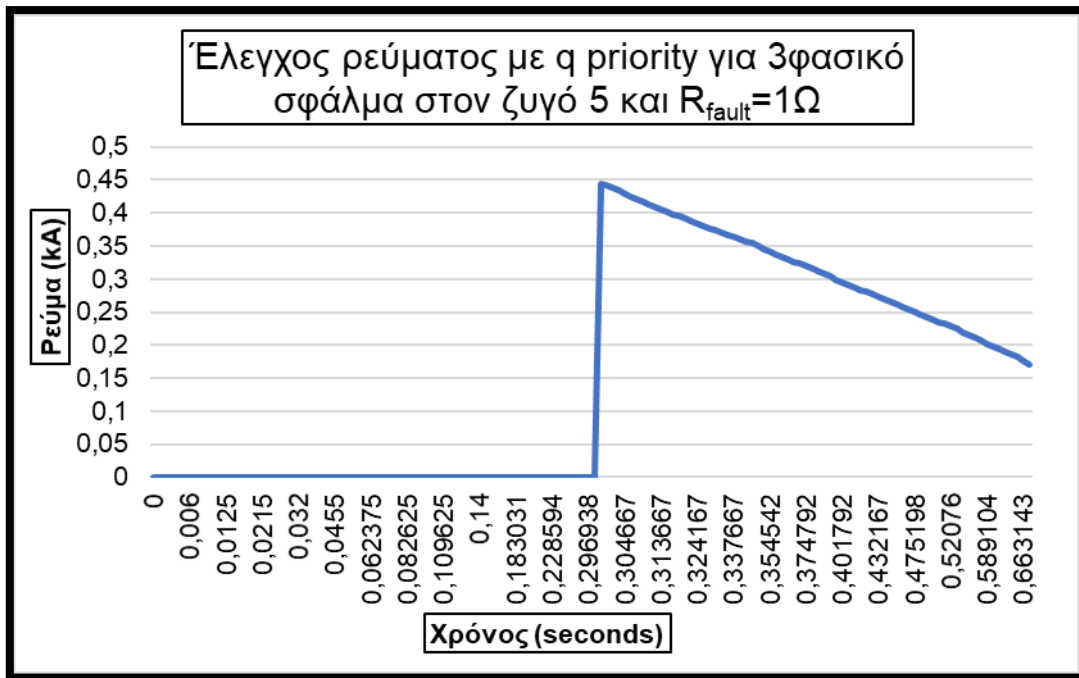
Στον έλεγχο των μονάδων στο PowerFactory χρησιμοποιήθηκε η τάση θετικής ακολουθίας στους ακροδέκτες των αντιστροφών του αιολικού πάρκου, του φωτοβολταϊκού πάρκου και των μπαταριών, όπου υπολογίζονται η ενεργός και άεργος συνιστώσα του ρεύματος, με το οποίο η κάθε μονάδα τροφοδοτεί το δίκτυο. Δοκιμάστηκαν δύο σενάρια, στο ένα δόθηκε προτεραιότητα στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος ( $I_p$ ) και στο άλλο στην άεργο συνιστώσα ( $I_q$ ), σε περίπτωση που το πλάτος του ρεύματος ξεπερνούσε το ονομαστικό.

Η σύγκριση των δύο μεθόδων έγινε για όλα τα είδη σφαλμάτων που εξετάστηκαν, δηλαδή για τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση, με διαφορετικό συνδυασμό μονάδων ηλεκτροπαραγωγής να βρίσκονται σε λειτουργία σε κάθε σενάριο.

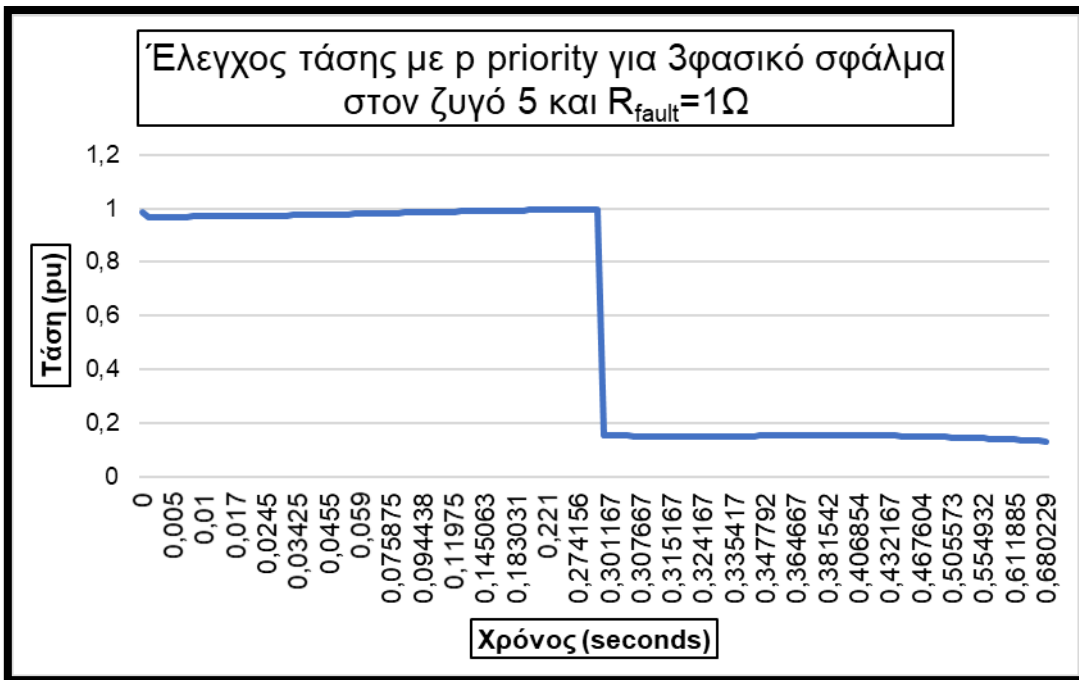
Επιπλέον, έγιναν δυναμικές προσομοιώσεις του ελέγχου ρεύματος και τάσης των αντιστροφένων. Η πρώτη προσομοίωση αφορά τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 5 και για αντίσταση σφάλματος  $R_{\text{fault}} = 1 \Omega$ , με όλες τις μονάδες σε λειτουργία (Diesel γεννήτρια, αιολικό πάρκο, φωτοβολταϊκό πάρκο, μπαταρίες). Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου ρεύματος και τάσης για τις μεθόδους προτεραιότητας ενεργού (P priority) και αέργου ισχύος (Q priority) συναρτήσει του χρόνου (Διαγράμματα 6-9). Οι τιμές των ρευμάτων είναι RMS τιμές.



Διάγραμμα 6 : Έλεγχος ρεύματος με P priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία



Διάγραμμα 7 : Έλεγχος ρεύματος με Q priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία

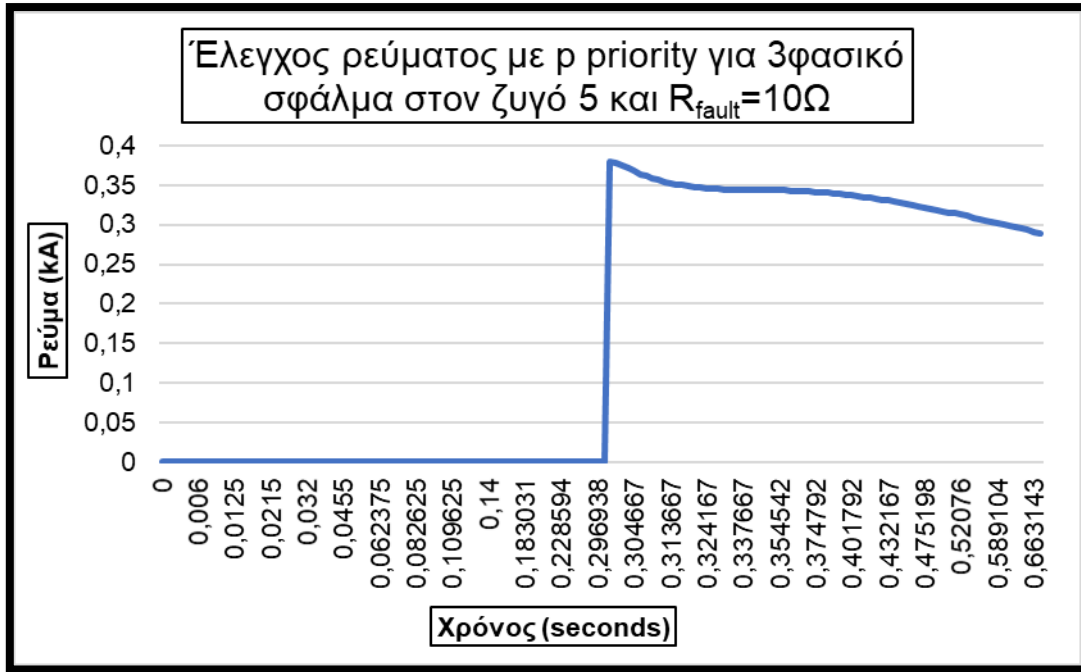


Διάγραμμα 8 : Έλεγχος τάσης με P priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία

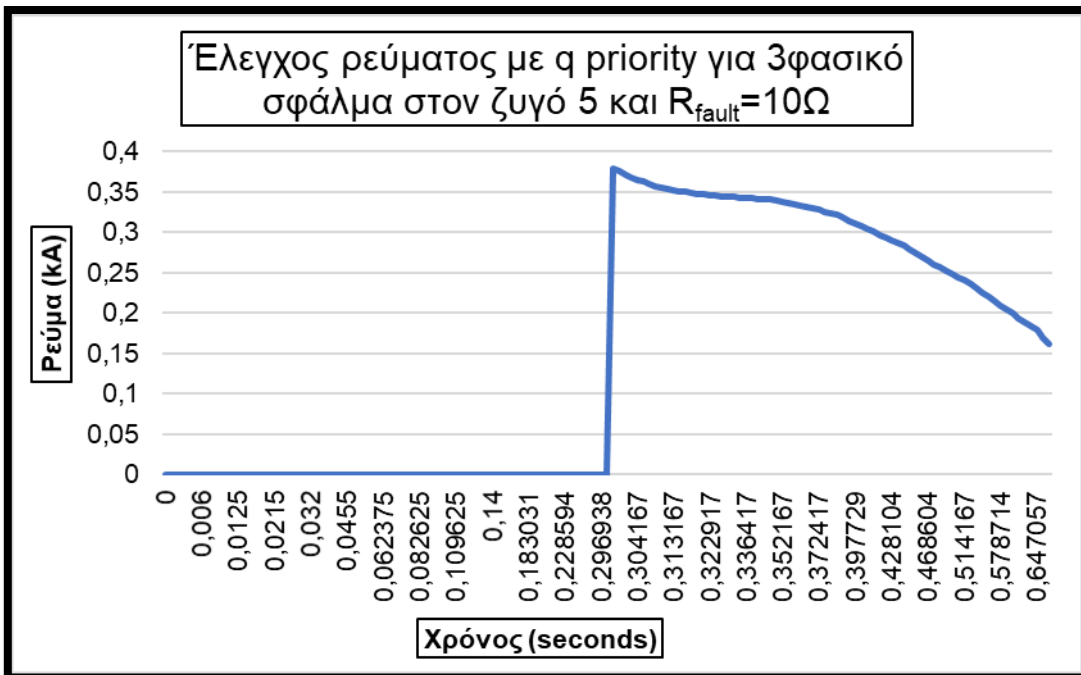


Διάγραμμα 9 : Έλεγχος τάσης με Q priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία

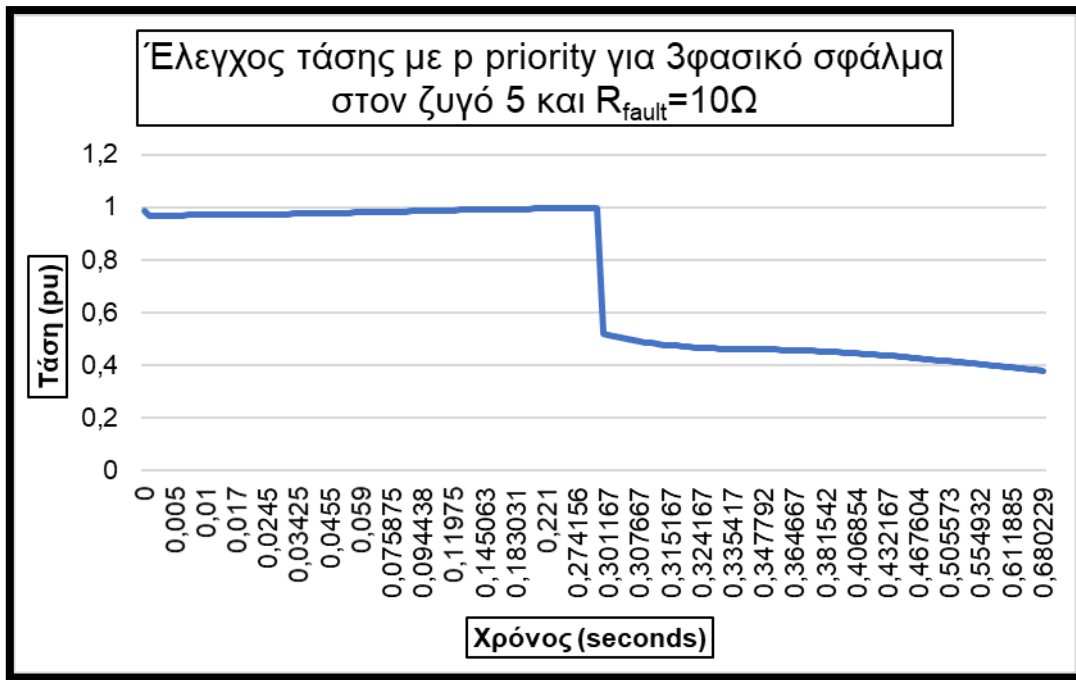
Η δεύτερη προσομοίωση αφορούσε επίσης τριφασικό σφάλμα στον ζυγό 5, αλλά αυτή τη φορά για αντίσταση σφάλματος  $R_{fault} = 10 \Omega$ , με όλες τις μονάδες σε λειτουργία (Diesel γεννήτρια, αιολικό πάρκο, φωτοβολταϊκό πάρκο, μπαταρίες). Τα διαγράμματα ελέγχου ρεύματος και τάσης για τις μεθόδους p και Q priority συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζονται παρακάτω (**Διαγράμματα 10-13**). Οι τιμές των ρευμάτων είναι RMS τιμές.



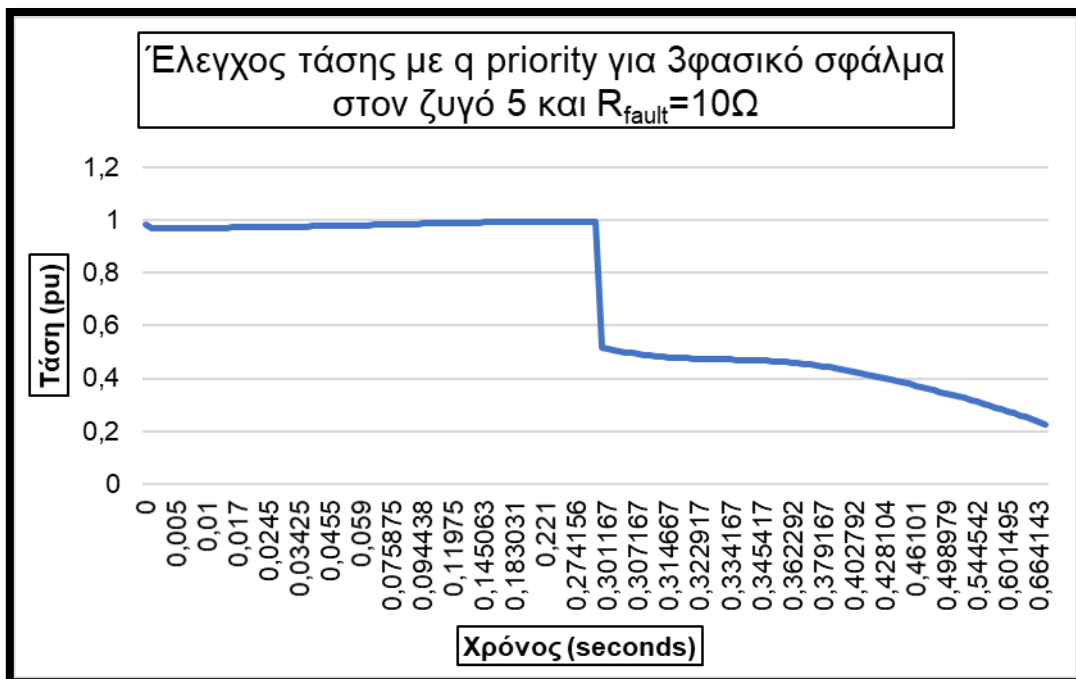
Διάγραμμα 10 : Έλεγχος ρεύματος με P priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία



Διάγραμμα 11 : Έλεγχος ρεύματος με Q priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία



Διάγραμμα 12 : Έλεγχος τάσης με P priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία



Διάγραμμα 13 : Έλεγχος τάσης με Q priority με όλες τις μονάδες σε λειτουργία

Όπως παρατηρείται και από τις δύο προσομοιώσεις, το P priority προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα καθώς επιφέρει μεγαλύτερη βελτίωση της τάσης του δικτύου και μεγαλύτερη



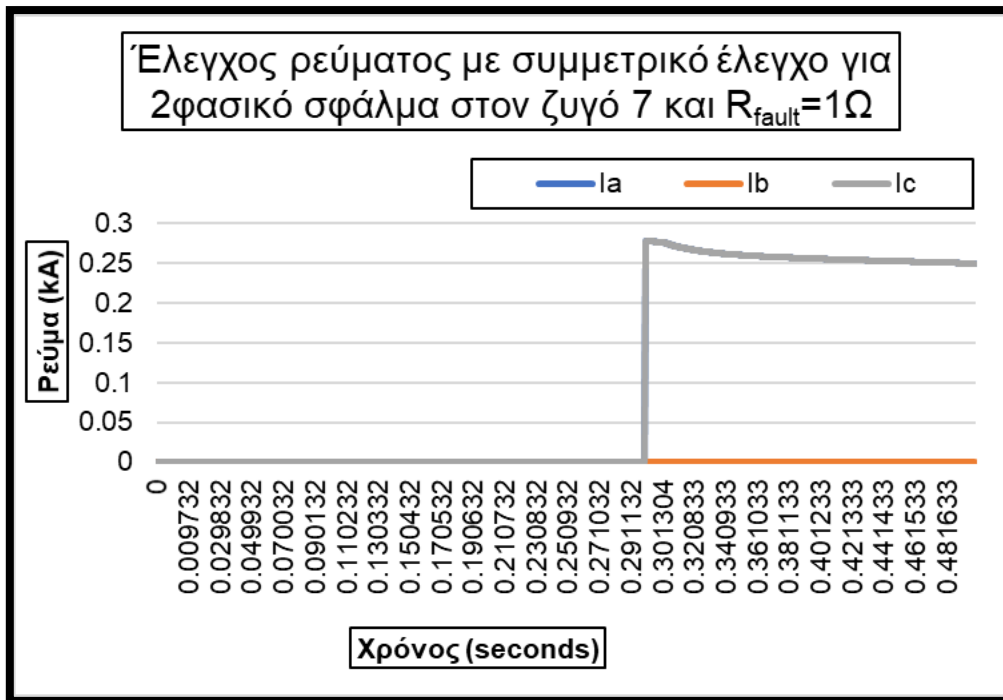
αύξηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μεγαλύτερου ωμικού χαρακτήρα των γραμμών σε σχέση με τον επαγωγικό ( $R \gg X$ ).

### 3.3 Σύγκριση προτεραιότητας αέργου ισχύος και μεθόδου Advanced Current Limitation και συνεισφορά στην αρνητική ακολουθία

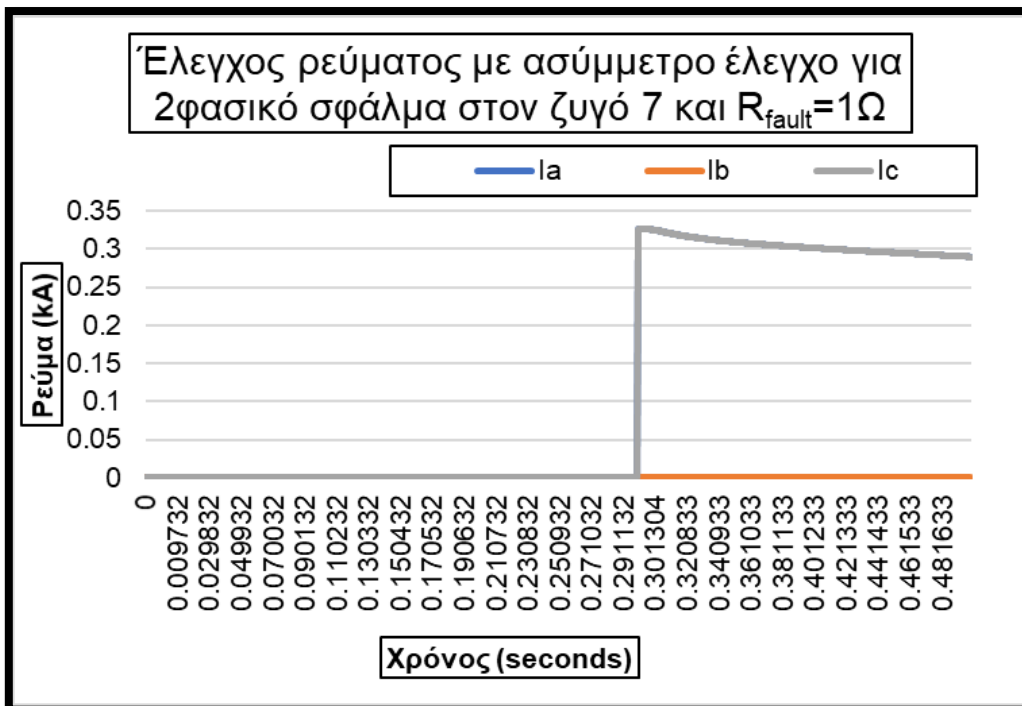
Η σύγκριση των δύο μεθόδων αφορούν την τακτική που ακολουθείται ώστε να πραγματοποιηθεί η έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο και έτσι να επιτευχθεί η υποστήριξη της τάσης του συστήματος. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία, ενώ η μέθοδος Advanced Current Limitation πραγματοποιεί έγχυση αέργου ρεύματος τόσο στη θετική, όσο και στην αρνητική ακολουθία του συστήματος.

Οι μέθοδοι Q priority (συμμετρικός έλεγχος) και Advanced Current Limitation (ασύμμετρος έλεγχος) εφαρμόστηκαν όπως περιγράφηκαν παραπάνω (βλ. 3.2 «Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο δυναμικό μοντέλο» και 2.3.1 «Περιορισμός του ρεύματος (Current Limitation» αντίστοιχα).

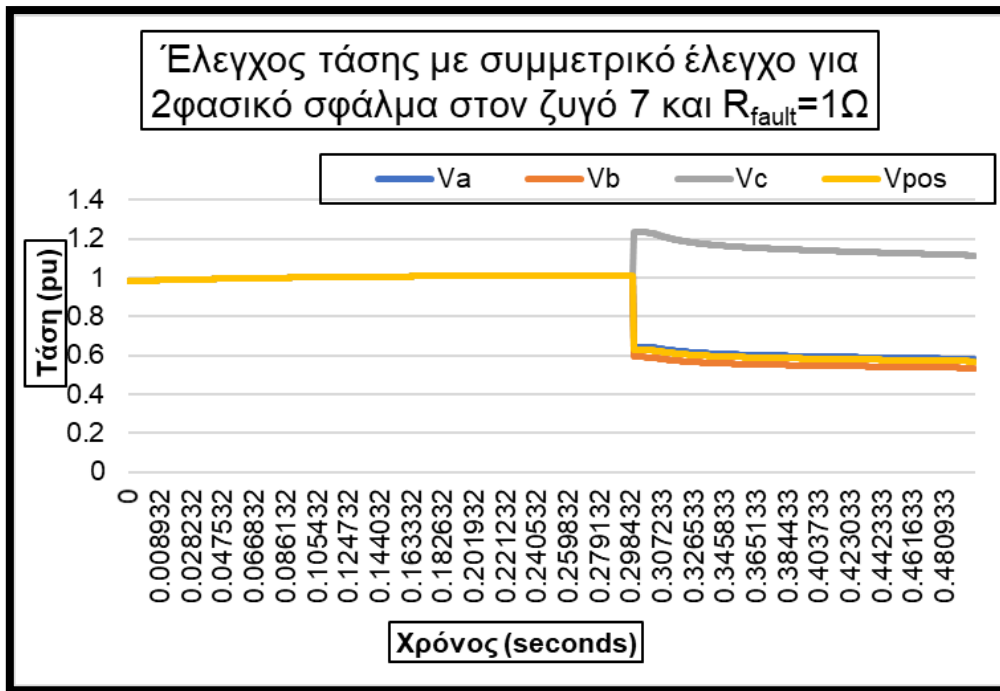
Το σενάριο το οποίο εξετάστηκε περιλαμβάνει την Diesel γεννήτρια και την μονάδα των μπαταριών, δηλαδή το αιολικό και το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι εκτός λειτουργίας. Μελετήθηκε το διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γη σφάλμα στον ζυγό 7 του δικτύου και για αντίσταση σφάλματος  $R_{\text{fault}} = 1 \Omega$ , αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στα **Διαγράμματα 14-25**.



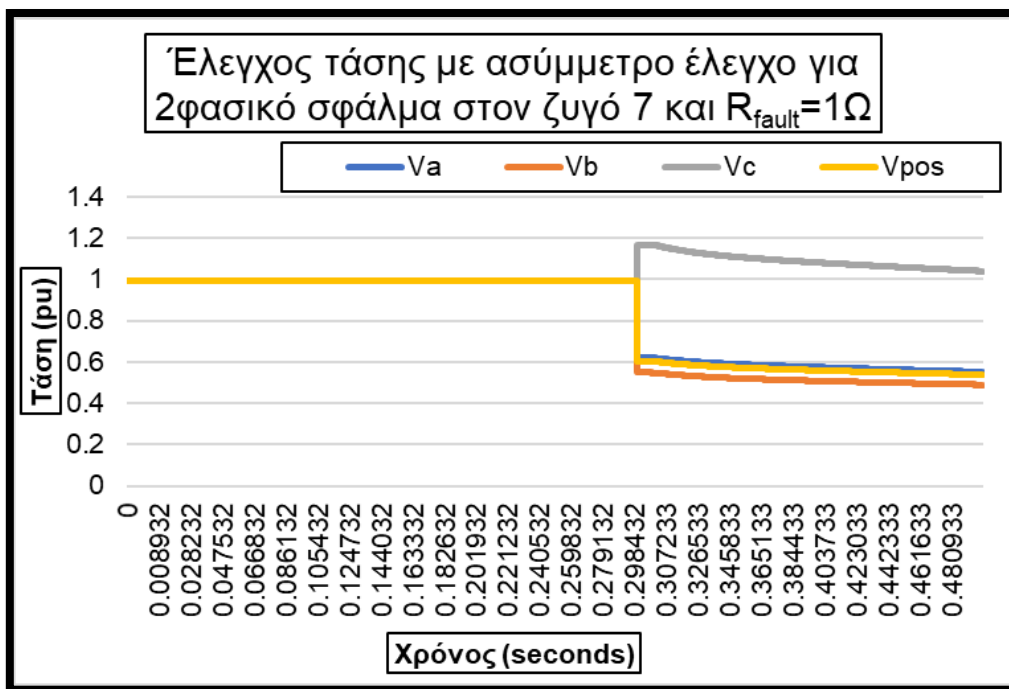
Διάγραμμα 14 : Έλεγχος ρεύματος με Q priority για διφασικό σφάλμα



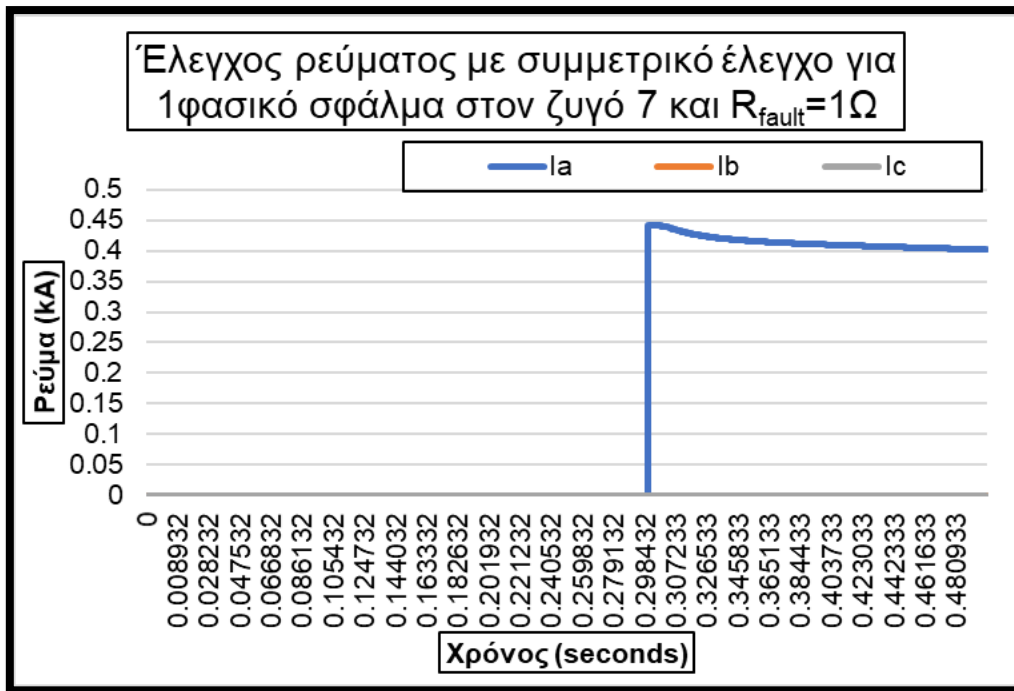
Διάγραμμα 15 : Έλεγχος ρεύματος με Advanced Current Limitation για διφασικό σφάλμα



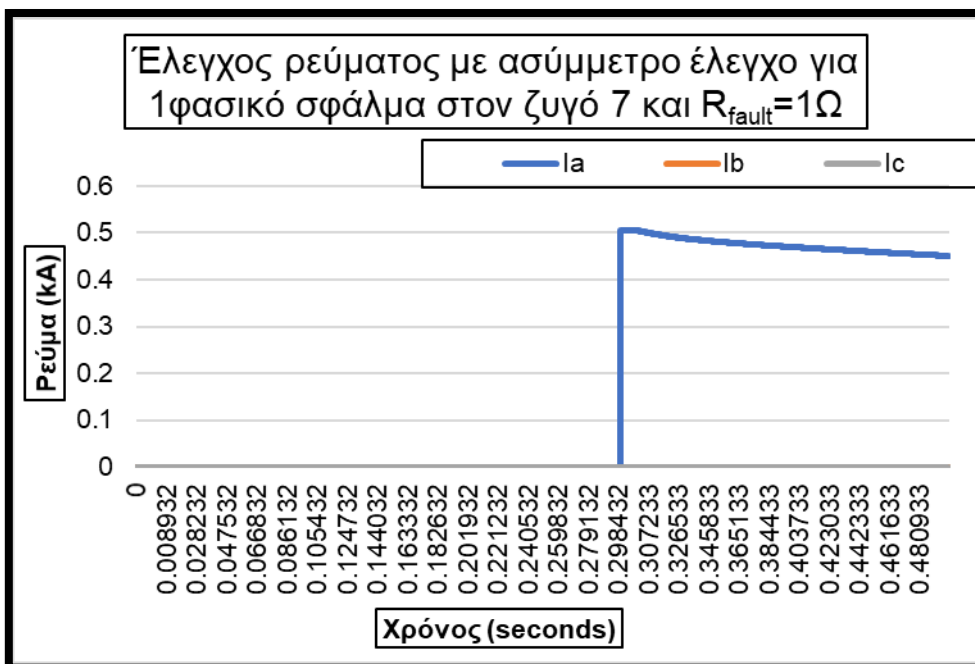
Διάγραμμα 16 : Έλεγχος τάσης με Q priority για διφασικό σφάλμα



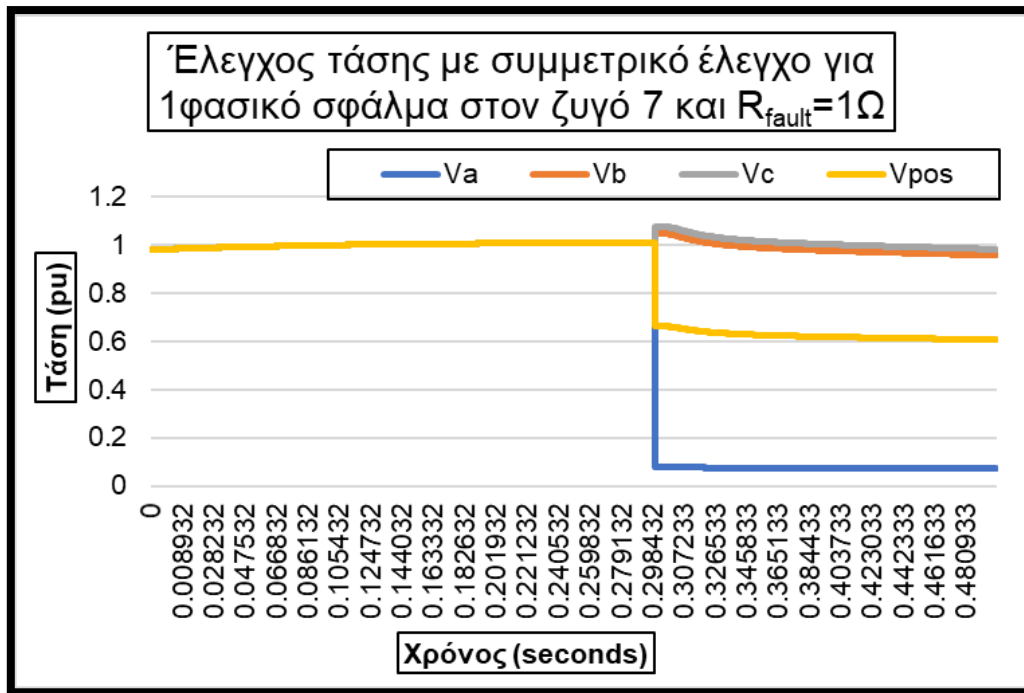
Διάγραμμα 17 : Έλεγχος τάσης με Advanced Current Limitation για διφασικό σφάλμα



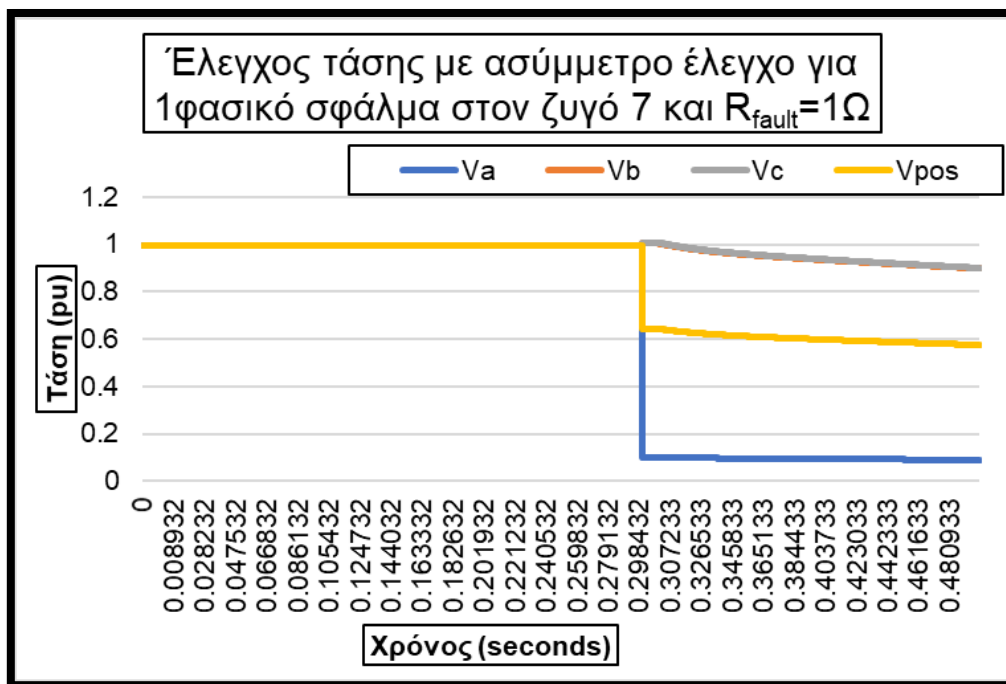
Διάγραμμα 18 : Έλεγχος ρεύματος με Q priority για μονοφασικό σφάλμα



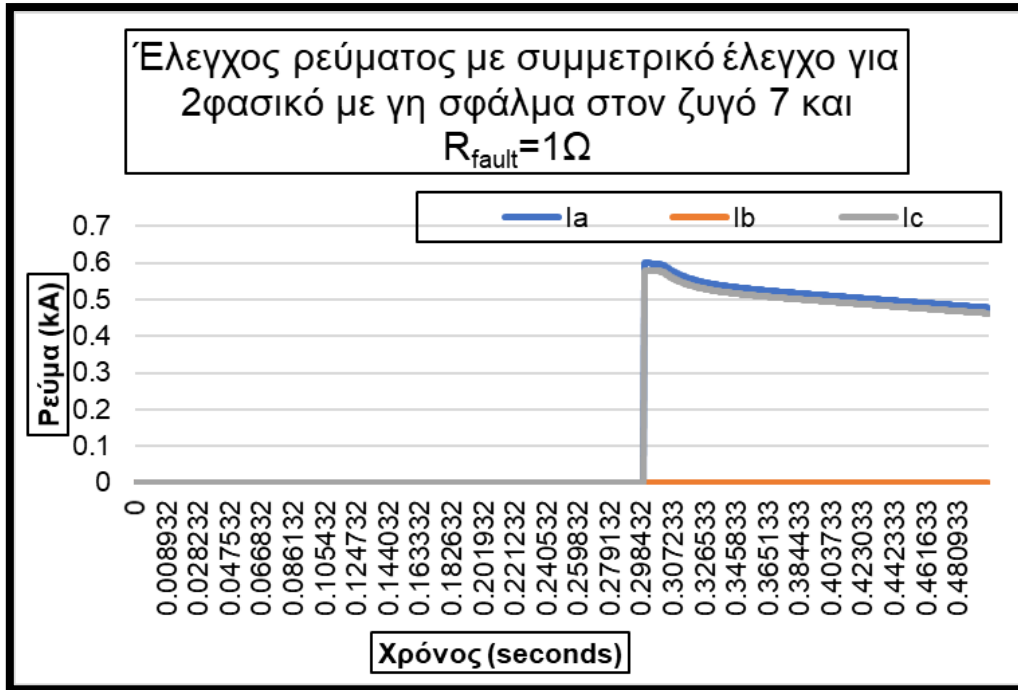
Διάγραμμα 19 : Έλεγχος ρεύματος με Advanced Current Limitation για μονοφασικό σφάλμα



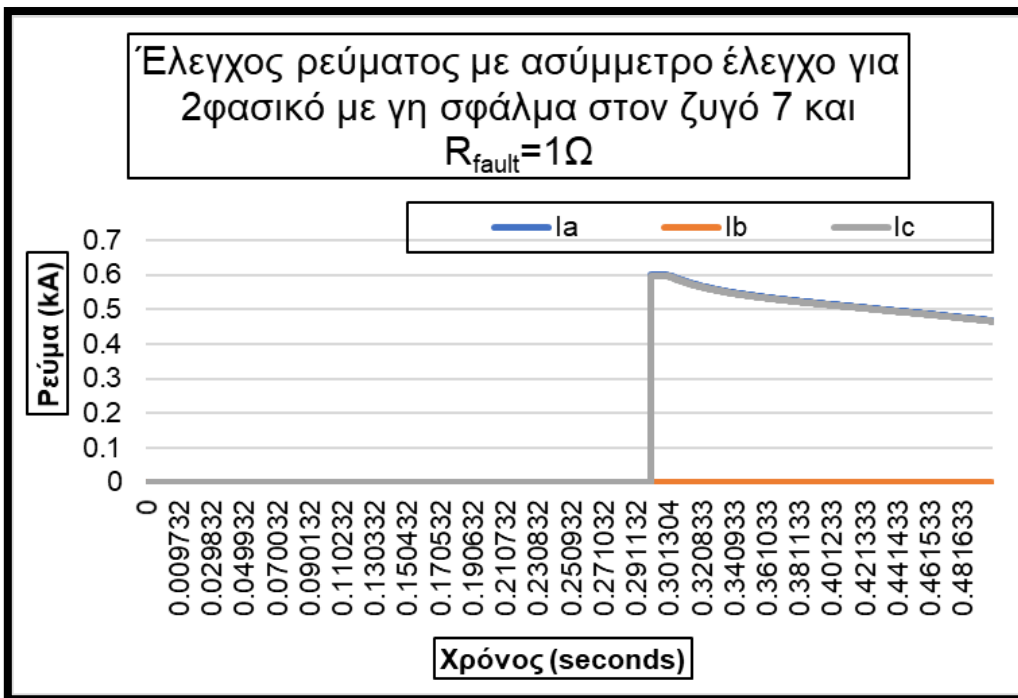
Διάγραμμα 20 : Έλεγχος τάσης με Q priority για μονοφασικό σφάλμα



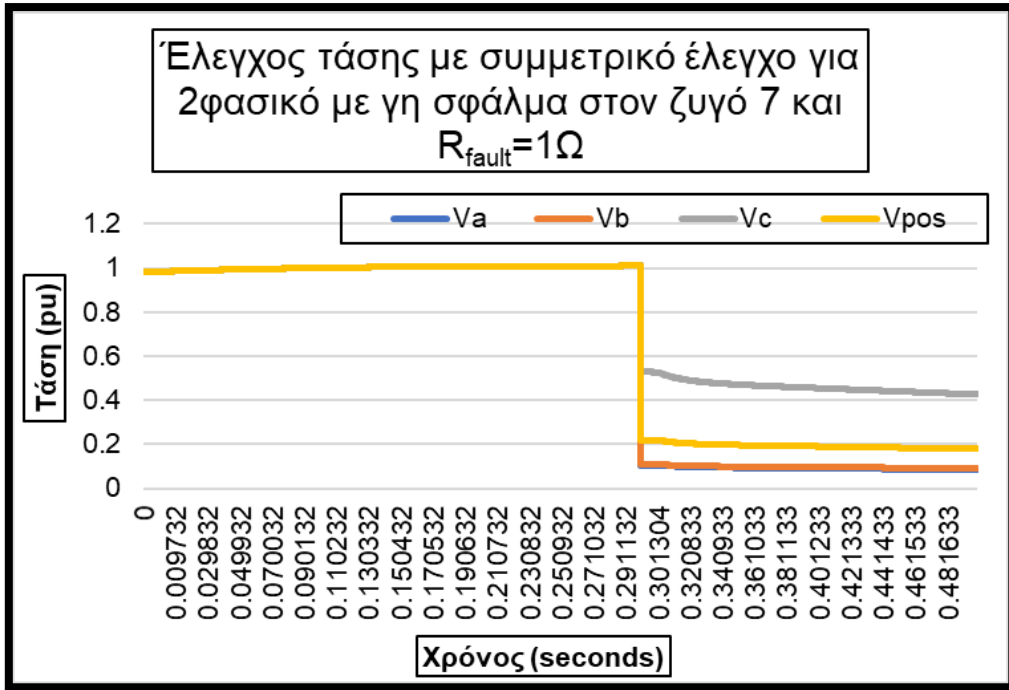
Διάγραμμα 21 : Έλεγχος τάσης με Advanced Current Limitation για μονοφασικό σφάλμα



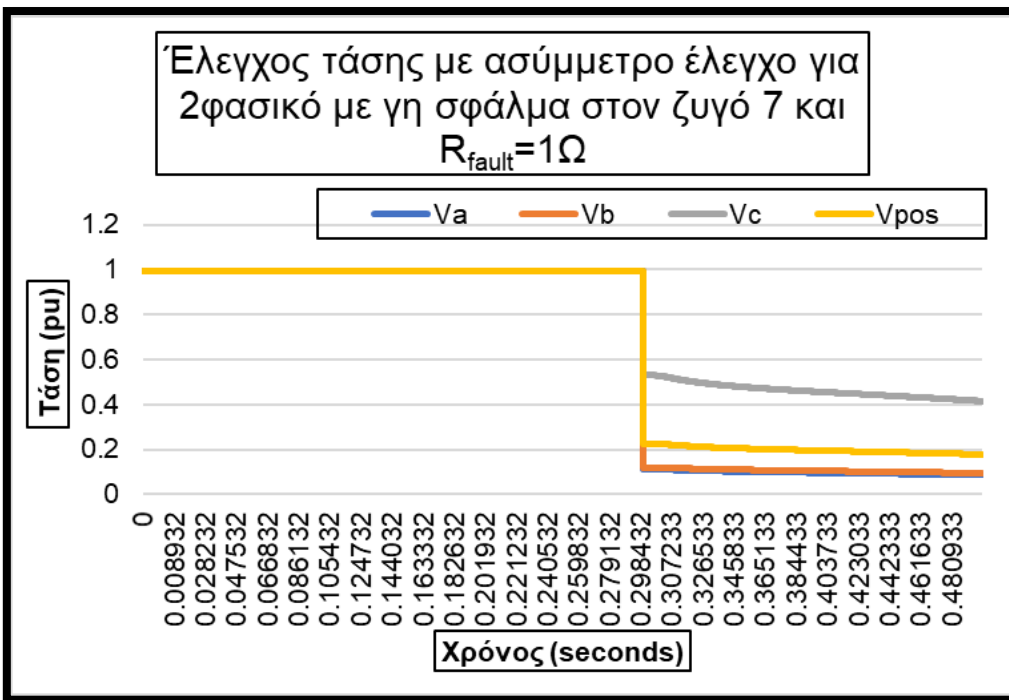
Διάγραμμα 22 : Έλεγχος ρεύματος με Q priority για διφασικό σφάλμα με γείωση



Διάγραμμα 23 : Έλεγχος ρεύματος με Advanced Current Limitation για διφασικό σφάλμα με γείωση



Διάγραμμα 24 : Έλεγχος τάσης με Q priority για διφασικό σφάλμα με γείωση



Διάγραμμα 25 : Έλεγχος τάσης με Advanced Current Limitation για διφασικό σφάλμα με γείωση

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα η μέθοδος Advanced Current Limitation επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα γιατί αυξάνει το ρεύμα σφάλματος ενώ δεν παρατηρείται όμοια ανύψωση τάσης που παρατηρείται στις φάσεις που δεν έχουν σφάλμα. Οι ανυψώσεις τάσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποσύνδεση της μονάδας αν για παράδειγμα υπερέβαιναν τις απαιτήσεις για HV-FRT. Παράλληλα όμως, οδηγεί σε μικρότερες τιμές στην τάση θετικής ακολουθίας σε σχέση με τον συμμετρικό έλεγχο οπότε θα οδηγήσει και σε μικρότερους χρόνους που πρέπει να μείνουν συνδεδεμένες οι μονάδες λόγω των FRT χαρακτηριστικών τους.



## Κεφάλαιο 4

# Στατικές προσομοιώσεις του δικτύου της Αστυπάλαιας με τη χρήση του αλγορίθμου Matlab

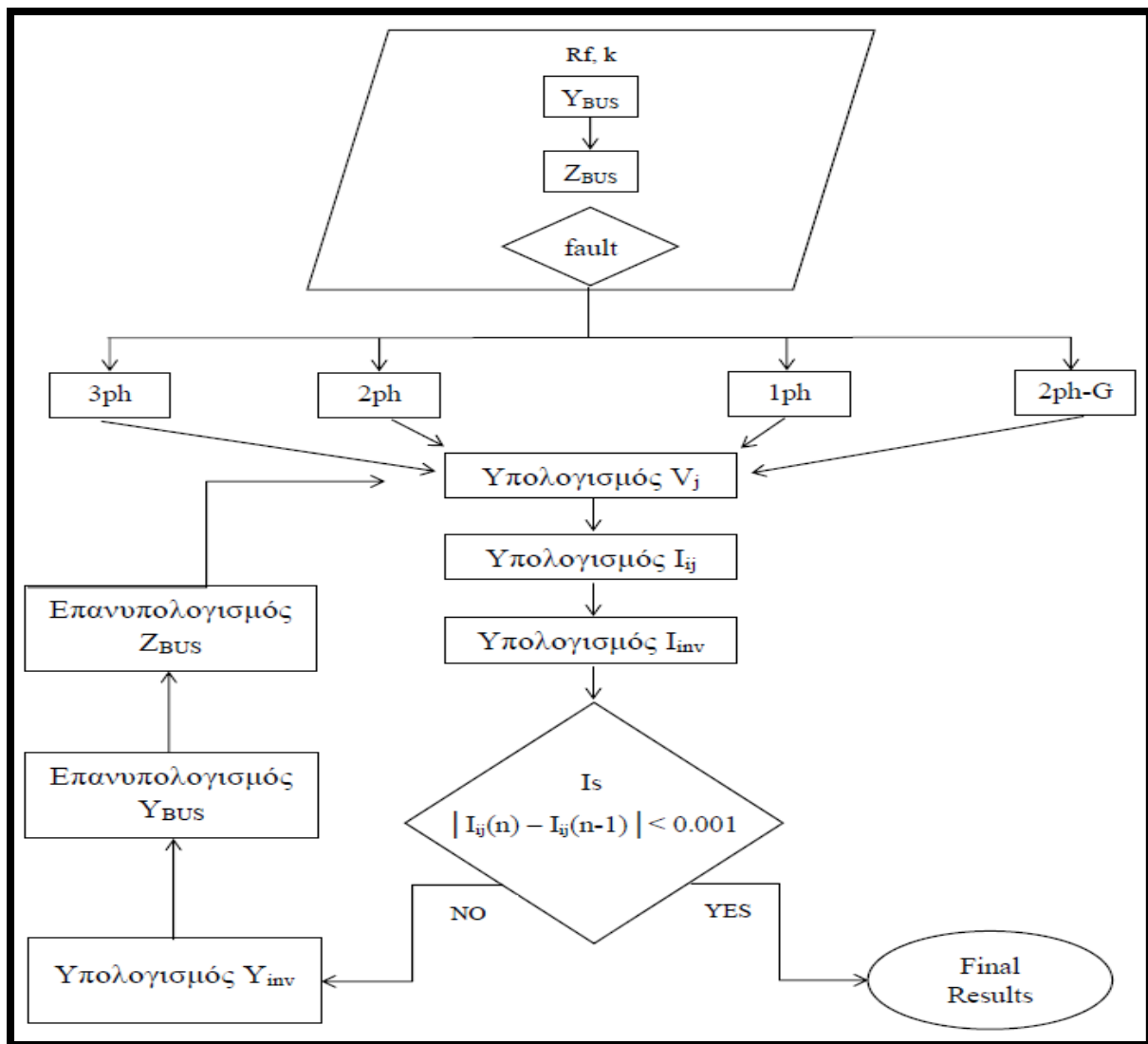
### 4.1 Διάγραμμα Ροής - Υπολογισμός τάσεων και ρευμάτων

Για την αξιολόγηση των μεθόδων ελέγχου του αντιστροφέα τάσης, αναπτύχθηκε αλγόριθμος με τη μορφή κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab, το οποίο με είσοδο συγκεκριμένο δίκτυο, τον τύπο του σφάλματος (τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση), το σημείο του δικτύου στο οποίο συνέβη το σφάλμα και την συμπεριφορά των μονάδων ηλεκτρονικών ισχύος υπολογίζει τις τάσεις και τα ρεύματα στο σύστημα. Τα αποτελέσματα του κώδικα επαληθεύτηκαν με τη χρήση του προγράμματος PowerFactory, στο οποίο σχεδιάστηκε το σύστημα ΜΔΝ της Αστυπάλαιας και οι συγκεκριμένες τεχνικές συνεισφορές στο βραχυκύκλωμα.

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζεται το υπόμνημα του διαγράμματος ροής του αλγορίθμου.

**Πίνακας 4 : Πίνακας διαγράμματος ροής του αλγορίθμου**

$R_f$	Αντίσταση σφάλματος
k	Ζυγός σφάλματος
$Y_{BUS}$	Πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων
$Z_{BUS}$	Πίνακας σύνθετων αντιστάσεων
fault	Είδος σφάλματος
3ph	Τριφασικό σφάλμα
2ph	Διφασικό σφάλμα
1ph	Μονοφασικό σφάλμα
2ph-G	Διφασικό σφάλμα με γείωση
$V_i$	Τάσεις κόμβων
$I_{ij}$	Ρεύματα γραμμών
$I_{inv}$	Ρεύμα του μετασχηματιστή
$Y_{inv}$	Σύνθετη αγωγιμότητα του inverter



Σχήμα 4 : Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4**, αρχικά ο κώδικας παίρνει ως input την αντίσταση σφάλματος  $R_f$ , τον ζυγό  $k$  στον οποίο γίνεται το σφάλμα, την τοπολογία του δικτύου, από την οποία υπολογίζεται ο πίνακας σύνθετων αγωγιμοτήτων,  $Y_{BUS}$ , και έπειτα ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων  $Z_{BUS}$  και το προς εξέταση είδος σφάλματος. Η συνέχεια του κώδικα υλοποιήθηκε με τη χρήση επαναληπτικής διαδικασίας, έτσι ώστε σε κάθε επανάληψη να επανυπολογίζει τις τάσεις των ζυγών,  $V_j$  και τα ρεύματα των γραμμών,  $I_{ij}$ , του συστήματος, ανάλογα με το είδος του σφάλματος. Οι αντιστροφείς των μονάδων ΑΠΕ προσομοιώθηκαν σαν πηγές τάσης με μεταβλητή αντίσταση που αλλάζει σε κάθε επανάληψη ώστε να ελέγχεται το ρεύμα εξόδου τους. Χρησιμοποιώντας την τάση θετικής ακολουθίας στους ακροδέκτες των αντιστροφών του αιολικού πάρκου, του φωτοβολταϊκού πάρκου και των μπαταριών υπολογίζονται τα

ρεύματα,  $I_{inv}$  με τα οποία το δίκτυο τροφοδοτείται από τις μονάδες σύμφωνα με τους ελέγχους που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζει όταν όλα τα ρεύματα που υπολογίζονται από τις τάσεις στους ακροδέκτες των μονάδων λάβουν τιμή ίση με την ονομαστική της εκάστοτε μονάδας.

Με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, μελετήθηκε το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Αστυπάλαιας, καθώς αυτό χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος για τον κώδικα.

Για τις προσομοιώσεις θεωρήθηκαν βάσεις συστήματος  $S_{base} = 2 \text{ MVA}$  και  $V_{base} = 15 \text{ kV}$ . Τα χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν για τη θετική και την αρνητική ακολουθία, ενώ για τη μηδενική ακολουθία χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες τιμές πολλαπλασιασμένες επί 1,5 και διαμορφώθηκαν όπως φαίνονται στον **Πίνακα ν (Παράρτημα Πινάκων)**.

## 4.2 Επαλήθευση υπολογισμών του αλγορίθμου στο PowerFactory

Ο έλεγχος των υπολογισμών μεταξύ του προγράμματος στο Matlab και του PowerFactory πραγματοποιήθηκε για το σενάριο στο οποίο όλες οι μονάδες είναι σε λειτουργία (Diesel γεννήτρια, αιολικό πάρκο, φωτοβολταϊκό πάρκο, μπαταρίες). Εξετάστηκε η περίπτωση τριφασικού σφάλματος στον ζυγο 5 του δικτύου και για αντίσταση σφάλματος  $R_{fault}=10 \Omega$ , υπολογίστηκαν οι τάσεις των ζυγών και τα ρεύματα των γραμμών του δικτύου. Οι υπολογισμοί του PowerFactory επαλήθευσαν τον αλγόριθμο και για τα 12 σενάρια (ανάλογα με το ποιες μονάδες λειτουργούν ή είναι εκτός λειτουργίας), όπως αυτά φαίνονται στον **Πίνακα 5**.

**Πίνακας 5 : Τα 12 σενάρια μελέτης, όπου 0 η μονάδα λειτουργεί, όπου 1 η μονάδα είναι εκτός λειτουργίας**

Case	Diesel	W/T	BES	PV
1	0	1	1	1
2	0	0	1	1
3	0	1	0	1
4	0	0	0	1
5	0	1	1	0
6	0	0	1	0
7	0	1	0	0
8	0	0	0	0
9	1	1	0	1
10	1	0	0	1
11	1	1	0	0
12	1	0	0	0
0 = on				
1 = off				

Στους Πίνακες 6-7 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα του PowerFactory και του κώδικα στο Matlab για τις γραμμές 1-3, 3-4 και 4-5 του δικτύου.

**Πίνακας 6 : Αποτελέσματα PowerFactory**

Cases	I <sub>(1,3)</sub>	I <sub>(3,4)</sub>	I <sub>(4,5)</sub>
1	234.45	232.00	230.40
2	270.15	260.15	258.36
3	236.35	233.95	232.39
4	256.13	245.43	243.79
5	239.40	236.94	235.34
6	269.89	259.89	258.13
7	241.52	239.08	237.49
8	258.64	248.14	246.49
9	91.21	90.26	89.65
10	99.17	31.37	31.16
11	88.27	87.37	86.78
12	107.17	193.63	192.32

**Πίνακας 7 : Αποτελέσματα Matlab**

Cases	I <sub>(1,3)</sub>	I <sub>(3,4)</sub>	I <sub>(4,5)</sub>
1	233.93	231.76	229.95
2	268.32	258.62	255.43
3	234.89	231.74	229.17
4	253.48	241.66	239.13
5	235.72	233.87	231.91
6	267.80	257.22	256.03
7	239.35	238.09	236.35
8	256.26	245.59	243.76
9	89.71	88.61	87.40
10	96.45	30.47	30.10
11	87.49	86.39	85.42
12	106.94	190.80	190.01

Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου του Matlab κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά.

## 4.3 Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο στατικό μοντέλο

Η μέθοδος αυτή διεκπεραιώνεται πραγματοποιώντας συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία του συστήματος και επιτυγχάνει την υποστήριξη της τάσης του δικτύου σε ασύμμετρα σφάλματα.

Στον έλεγχο των μονάδων στο PowerFactory χρησιμοποιήθηκε η τάση θετικής ακολουθίας στους ακροδέκτες των αντιστροφέων του αιολικού πάρκου, του φωτοβολταϊκού πάρκου και των μπαταριών, όπου υπολογίζονται η ενεργός και άεργος συνιστώσα του ρεύματος, με το οποίο η κάθε μονάδα τροφοδοτεί το δίκτυο. Δοκιμάστηκαν δύο σενάρια, στο ένα δόθηκε προτεραιότητα στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος ( $I_p$ ) και στο άλλο στην άεργο συνιστώσα ( $I_q$ ), σε περίπτωση που το πλάτος του ρεύματος ξεπερνούσε το ονομαστικό.

Η σύγκριση των δύο μεθόδων έγινε για όλα τα είδη σφαλμάτων που εξετάστηκαν, δηλαδή για τριφασικό, διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση, με διαφορετικό συνδυασμό μονάδων ηλεκτροπαραγωγής να βρίσκονται σε λειτουργία σε κάθε σενάριο.

Σενάριο 1 : Όλες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είναι σε λειτουργία (Diesel γεννήτρια, αιολικό πάρκο, φωτοβολταϊκό πάρκο, μπαταρίες). Η μελέτη έγινε για τριφασικό σφάλμα σε κάθε ζυγό του δικτύου και για αντιστάσεις σφάλματος  $R_{\text{fault}} = 0.1 \Omega$  και  $R_{\text{fault}} = 10 \Omega$ . Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα στους ζυγούς 3, 6 και 18 με Q priority και P priority (**Πίνακας 8-19**).

**Πίνακας 8 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 3 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,0866	1-2	88,4556
2	0,0938	1-3	310,2806
3	0,0030	3-4	0
4	0,0030	4-5	0
5	0,0030	3-6	95,3196
6	0,0099	1-7	0
7	0,0866	7-8	0
8	0,0866	8-9	0
9	0,0866	9-10	0
10	0,0866	8-11	0
11	0,0866	7-12	0
12	0,0866	12-13	0
13	0,0866	1-14	24,0377
14	0,0881	14-15	0
15	0,0881	15-16	0
16	0,0881	16-17	0
17	0,0881	14-18	24,0377
18	0,0902		

**Πίνακας 9 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 3 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,0957	1-2	88,5763
2	0,1041	1-3	344,229
3	0,0030	3-4	0
4	0,0030	4-5	0
5	0,0030	3-6	96,8926
6	0,0097	1-7	0
7	0,0957	7-8	0
8	0,0957	8-9	0
9	0,0957	9-10	0
10	0,0957	8-11	0
11	0,0957	7-12	0
12	0,0957	12-13	0
13	0,0957	1-14	24,0695
14	0,0981	14-15	0
15	0,0981	15-16	0
16	0,0981	16-17	0
17	0,0981	14-18	24,0695
18	0,1005		

**Πίνακας 10 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 6 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,1274	1-2	88,527
2	0,1348	1-3	313,2235
3	0,0430	3-4	0
4	0,0430	4-5	0
5	0,0430	3-6	313,2235
6	0,0034	1-7	0
7	0,1274	7-8	0
8	0,1274	8-9	0
9	0,1274	9-10	0
10	0,1274	8-11	0
11	0,1274	7-12	0
12	0,1274	12-13	0
13	0,1274	1-14	24,0563
14	0,1290	14-15	0
15	0,1290	15-16	0
16	0,1290	16-17	0
17	0,1290	14-18	24,0563
18	0,1311		

**Πίνακας 11 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 6 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,1368	1-2	88,527
2	0,1453	1-3	331,7858
3	0,0474	3-4	0
4	0,0474	4-5	0
5	0,0474	3-6	331,7858
6	0,0049	1-7	0
7	0,1368	7-8	0
8	0,1368	8-9	0
9	0,1368	9-10	0
10	0,1368	8-11	0
11	0,1368	7-12	0
12	0,1368	12-13	0
13	0,1368	1-14	24,0563
14	0,1393	14-15	0
15	0,1393	15-16	0
16	0,1393	16-17	0
17	0,1393	14-18	24,0563
18	0,1416		

**Πίνακας 12 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 18 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,0764	1-2	88,527
2	0,0836	1-3	96,225
3	0,0846	3-4	0
4	0,0846	4-5	0
5	0,0846	3-6	96,225
6	0,0925	1-7	0
7	0,0764	7-8	0
8	0,0764	8-9	0
9	0,0764	9-10	0
10	0,0764	8-11	0
11	0,0764	7-12	0
12	0,0764	12-13	0
13	0,0764	1-14	288,6508
14	0,0403	14-15	0
15	0,0403	15-16	0
16	0,0403	16-17	0
17	0,0403	14-18	288,6508
18	0,0033		

**Πίνακας 13 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=0.1 \Omega$  στον ζυγό 18 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,0937	1-2	88,527
2	0,1021	1-3	96,225
3	0,1129	3-4	0
4	0,1129	4-5	0
5	0,1129	3-6	96,225
6	0,1220	1-7	0
7	0,0937	7-8	0
8	0,0937	8-9	0
9	0,0937	9-10	0
10	0,0937	8-11	0
11	0,0937	7-12	0
12	0,0937	12-13	0
13	0,0937	1-14	352,3574
14	0,0496	14-15	0
15	0,0496	15-16	0
16	0,0496	16-17	0
17	0,0496	14-18	352,3574
18	0,0043		



**Πίνακας 14 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 3 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,3459	1-2	88,5345
2	0,3535	1-3	276,9992
3	0,2965	3-4	0
4	0,2965	4-5	0
5	0,2965	3-6	96,2327
6	0,3047	1-7	0
7	0,3459	7-8	0
8	0,3459	8-9	0
9	0,3459	9-10	0
10	0,3459	8-11	0
11	0,3459	7-12	0
12	0,3459	12-13	0
13	0,3459	1-14	24,0583
14	0,3476	14-15	0
15	0,3476	15-16	0
16	0,3476	16-17	0
17	0,3476	14-18	24,0583
18	0,3496		

**Πίνακας 15 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 3 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,5592	1-2	88,5359
2	0,5678	1-3	323,0357
3	0,4842	3-4	0
4	0,4842	4-5	0
5	0,4842	3-6	96,2334
6	0,4935	1-7	0
7	0,5592	7-8	0
8	0,5592	8-9	0
9	0,5592	9-10	0
10	0,5592	8-11	0
11	0,5592	7-12	0
12	0,5592	12-13	0
13	0,5592	1-14	24,0586
14	0,5617	14-15	0
15	0,5617	15-16	0
16	0,5617	16-17	0
17	0,5617	14-18	24,0586
18	0,5640		

**Πίνακας 16 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 6 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,3765	1-2	88,527
2	0,3841	1-3	279,2717
3	0,3218	3-4	0
4	0,3218	4-5	0
5	0,3218	3-6	279,2717
6	0,3028	1-7	0
7	0,3765	7-8	0
8	0,3765	8-9	0
9	0,3765	9-10	0
10	0,3765	8-11	0
11	0,3765	7-12	0
12	0,3765	12-13	0
13	0,3765	1-14	24,0563
14	0,3781	14-15	0
15	0,3781	15-16	0
16	0,3781	16-17	0
17	0,3781	14-18	24,0563
18	0,3802		

**Πίνακας 17 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 6 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,5743	1-2	88,527
2	0,5830	1-3	310,1946
3	0,5005	3-4	0
4	0,5005	4-5	0
5	0,5005	3-6	310,1946
6	0,4694	1-7	0
7	0,5743	7-8	0
8	0,5743	8-9	0
9	0,5743	9-10	0
10	0,5743	8-11	0
11	0,5743	7-12	0
12	0,5743	12-13	0
13	0,5743	1-14	24,0563
14	0,5768	14-15	0
15	0,5768	15-16	0
16	0,5768	16-17	0
17	0,5768	14-18	24,0563
18	0,5792		

**Πίνακας 18 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 18 με Q priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,3534	1-2	88,527
2	0,3610	1-3	96,225
3	0,3665	3-4	0
4	0,3665	4-5	0
5	0,3665	3-6	96,225
6	0,3747	1-7	0
7	0,3534	7-8	0
8	0,3534	8-9	0
9	0,3534	9-10	0
10	0,3534	8-11	0
11	0,3534	7-12	0
12	0,3534	12-13	0
13	0,3534	1-14	261,9907
14	0,3258	14-15	0
15	0,3258	15-16	0
16	0,3258	16-17	0
17	0,3258	14-18	261,9907
18	0,3013		

**Πίνακας 19 : Αποτελέσματα για τριφασικό σφάλμα με  $R_{\text{fault}}=10 \Omega$  στον ζυγό 18 με P priority**

Ζυγός	V (pu)	Γραμμή	I (A)
1	0,5509	1-2	88,527
2	0,5595	1-3	96,225
3	0,5721	3-4	0
4	0,5721	4-5	0
5	0,5721	3-6	96,225
6	0,5815	1-7	0
7	0,5509	7-8	0
8	0,5509	8-9	0
9	0,5509	9-10	0
10	0,5509	8-11	0
11	0,5509	7-12	0
12	0,5509	12-13	0
13	0,5509	1-14	382,8798
14	0,5087	14-15	0
15	0,5087	15-16	0
16	0,5087	16-17	0
17	0,5087	14-18	382,8798
18	0,4699		

Από τα αποτελέσματα για όλους τους ζυγούς και για τις δύο τιμές αντιστάσεων σφάλματος συμπεραίνεται ότι το P priority δίνει καλύτερα αποτελέσματα από το Q priority για τριφασικό σφάλμα, καθώς προσφέρει μεγαλύτερα ρεύματα βραχυκύκλωσης και υποστηρίζει καλύτερα την τάση του δικτύου. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγαλύτερου ωμικού χαρακτήρα των γραμμών έναντι του επαγωγικού τους ( $R \gg X$ ).

Σενάριο 2 : Diesel γεννήτρια, φωτοβολταϊκό πάρκο και μπαταρίες είναι σε λειτουργία (δηλαδή εκτός του αιολικού πάρκου). Μελετήθηκε το διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση σφάλμα στον ζυγό 7 του δικτύου και για αντίσταση σφάλματος  $R_{\text{fault}} = 1 \Omega$  υπολογίστηκαν οι τάσεις θετικής ακολουθίας των ζυγών και τα φασικά ρεύματα των γραμμών. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για το κάθε σφάλμα με Q priority και P priority παρουσιάζονται στους Πίνακες 20-25.

**Πίνακας 20 : Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{fault}=1 \Omega$  με Q priority**

Ζυγός	$V_{pos}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.6362	1-2	88.531	88.5326	88.5389
2	0.6478	1-3	0	0	0
3	0.6362	3-4	0	0	0
4	0.6362	4-5	0	0	0
5	0.6362	3-6	0	0	0
6	0.6362	1-7	0	306.0395	306.0395
7	0.6296	7-8	0	0	0
8	0.6296	8-9	0	0	0
9	0.6296	9-10	0	0	0
10	0.6296	8-11	0	0	0
11	0.6296	7-12	0	0	0
12	0.6296	12-13	0	0	0
13	0.6296	1-14	24.0581	24.0581	24.0581
14	0.6391	14-15	0	0	0
15	0.6391	15-16	0	0	0
16	0.6391	16-17	0	0	0
17	0.6391	14-18	24.0581	24.0581	24.0581
18	0.6423				

**Πίνακας 21 : Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{fault}=1 \Omega$  με P priority**

Ζυγός	$V_{pos}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.4715	1-2	88.5149	88.52	88.5203
2	0.4801	1-3	0	0	0
3	0.4715	3-4	0	0	0
4	0.4715	4-5	0	0	0
5	0.4715	3-6	0	0	0
6	0.4715	1-7	0	226.8146	226.8146
7	0.4666	7-8	0	0	0
8	0.4666	8-9	0	0	0
9	0.4666	9-10	0	0	0
10	0.4666	8-11	0	0	0
11	0.4666	7-12	0	0	0
12	0.4666	12-13	0	0	0
13	0.4666	1-14	24.0541	24.0541	24.0541
14	0.4740	14-15	0	0	0
15	0.4740	15-16	0	0	0
16	0.4740	16-17	0	0	0
17	0.4740	14-18	24.0541	24.0541	24.0541
18	0.4763				

**Πίνακας 22 : Αποτελέσματα για μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με Q priority**

Ζυγός	$V_{\text{pos}}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.6663	1-2	88.5244	88.5228	88.5171
2	0.6779	1-3	0	0	0
3	0.6663	3-4	0	0	0
4	0.6663	4-5	0	0	0
5	0.6663	3-6	0	0	0
6	0.6663	1-7	490.4617	0	0
7	0.6594	7-8	0	0	0
8	0.6594	8-9	0	0	0
9	0.6594	9-10	0	0	0
10	0.6594	8-11	0	0	0
11	0.6594	7-12	0	0	0
12	0.6594	12-13	0	0	0
13	0.6594	1-14	24.0547	24.0547	24.0547
14	0.6693	14-15	0	0	0
15	0.6693	15-16	0	0	0
16	0.6693	16-17	0	0	0
17	0.6693	14-18	24.0547	24.0547	24.0547
18	0.6725				

**Πίνακας 23 : Αποτελέσματα για μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με P priority**

Ζυγός	$V_{\text{pos}}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.5078	1-2	88.525	88.5203	88.5196
2	0.5164	1-3	0	0	0
3	0.5078	3-4	0	0	0
4	0.5078	4-5	0	0	0
5	0.5078	3-6	0	0	0
6	0.5078	1-7	373.7732	0	0
7	0.5026	7-8	0	0	0
8	0.5026	8-9	0	0	0
9	0.5026	9-10	0	0	0
10	0.5026	8-11	0	0	0
11	0.5026	7-12	0	0	0
12	0.5026	12-13	0	0	0
13	0.5026	1-14	24.0547	24.0547	24.0547
14	0.5103	14-15	0	0	0
15	0.5103	15-16	0	0	0
16	0.5103	16-17	0	0	0
17	0.5103	14-18	24.0547	24.0547	24.0547
18	0.5126				

**Πίνακας 24 : Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα με γη στον ζυγό 7 με  $R_{fault}=1 \Omega$  με Q priority**

Ζυγός	$V_{pos}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.1980	1-2	88.534	88.5326	88.5349
2	0.2055	1-3	0	0	0
3	0.1980	3-4	0	0	0
4	0.1980	4-5	0	0	0
5	0.1980	3-6	0	0	0
6	0.1980	1-7	0	569.7183	474.0403
7	0.1761	7-8	0	0	0
8	0.1761	8-9	0	0	0
9	0.1761	9-10	0	0	0
10	0.1761	8-11	0	0	0
11	0.1761	7-12	0	0	0
12	0.1761	12-13	0	0	0
13	0.1761	1-14	24.058	24.058	24.058
14	0.1996	14-15	0	0	0
15	0.1996	15-16	0	0	0
16	0.1996	16-17	0	0	0
17	0.1996	14-18	24.058	24.058	24.058
18	0.2016				

**Πίνακας 25 : Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα με γη στον ζυγό 7 με  $R_{fault}=1 \Omega$  με P priority**

Ζυγός	$V_{pos}$ (pu)	Γραμμή	$I_a$ (A)	$I_b$ (A)	$I_c$ (A)
1	0.1810	1-2	88.5314	88.5332	88.5332
2	0.1895	1-3	0	0	0
3	0.1810	3-4	0	0	0
4	0.1810	4-5	0	0	0
5	0.1810	3-6	0	0	0
6	0.1810	1-7	0	520.7875	433.3269
7	0.1610	7-8	0	0	0
8	0.1610	8-9	0	0	0
9	0.1610	9-10	0	0	0
10	0.1610	8-11	0	0	0
11	0.1610	7-12	0	0	0
12	0.1610	12-13	0	0	0
13	0.1610	1-14	24.0576	24.0576	24.0576
14	0.1834	14-15	0	0	0
15	0.1834	15-16	0	0	0
16	0.1834	16-17	0	0	0
17	0.1834	14-18	24.0576	24.0576	24.0576
18	0.1858				

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα το Q priority ως μέθοδος επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα με μεγαλύτερα ρεύματα βραχυκύκλωσης και καλύτερη υποστήριξη της τάσης του συστήματος σε ασύμμετρα σφάλματα καθώς σε αυτές τις συνθήκες αυξάνονται οι απαιτήσεις σε άεργο ισχύ στο σύστημα.

#### 4.4 Σύγκριση προτεραιότητας αέργου ισχύος και μεθόδου Advanced Current Limitation και συνεισφορά στην αρνητική ακολουθία

Η σύγκριση των δύο μεθόδων αφορούν την τακτική που ακολουθείται ώστε να πραγματοποιηθεί η έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο και έτσι να επιτευχθεί η υποστήριξη της τάσης του συστήματος. Η πρώτη μέθοδος περιλαμβάνει συμμετρική έγχυση αέργου ρεύματος στη θετική ακολουθία, ενώ η μέθοδος Advanced Current Limitation πραγματοποιεί έγχυση αέργου ρεύματος τόσο στη θετική, όσο και στην αρνητική ακολουθία του συστήματος.

Η Q priority μέθοδος εφαρμόστηκε όπως περιγράφηκε παραπάνω (βλ. 4.3 “Σύγκριση προτεραιότητας ενεργού και αέργου ισχύος στο στατικό μοντέλο”). Η Advanced Current Limitation πραγματοποιήθηκε μέσα στην επαναληπτική διαδικασία όπου υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών και τα ρεύματα των γραμμών. Χρησιμοποιώντας την τάση θετικής ακολουθίας στους ακροδέκτες της μπαταρίας υπολογίζονται η ενεργός και άεργος συνιστώσα του ρεύματος, με το οποίο τροφοδοτεί η μπαταρία το δίκτυο, καθώς και η γωνία του ρεύματος αυτού. Στην αρνητική ακολουθία υπολογίζεται αντίστοιχα, με τη χρήση της τάσης αρνητικής ακολουθίας, η άεργος συνιστώσα του ρεύματος ενώ η ενεργός συνιστώσα λαμβάνεται ίση με μηδέν καθώς δεν εγχύει ενεργό ρεύμα. Με αυτά ως δεδομένα ακολουθείται η διαδικασία που αναλύθηκε στο 2.3.2 (“Μέθοδος Current Limitation”), με τον υπολογισμό των φασικών ρευμάτων (Σχέση (9)), των νέων ενεργών και αέργων συνιστωσών των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας (Σχέσεις (10) - (13)) και τέλος των ρευμάτων τα οποία εγχέονται αντίστοιχα στη θετική και αρνητική ακολουθία. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζει όταν οποιοδήποτε φασικό ρεύμα της Σχέσης (9) λάβει τιμή ίση της ονομαστικής των μπαταριών.

Το σενάριο το οποίο εξετάστηκε περιλαμβάνει την Diesel γεννήτρια και την μονάδα των μπαταριών, δηλαδή το αιολικό και το φωτοβολταϊκό πάρκο είναι εκτός λειτουργίας.

Μελετήθηκε το διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση σφάλμα στον ζυγό 7 του δικτύου και για αντίσταση σφάλματος  $R_{\text{fault}} = 1 \ \Omega$  υπολογίστηκαν οι τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας των ζυγών, οι τάσεις των τριών φάσεων και τα φασικά ρεύματα κάθε γραμμής. Τα συγκριτικά αποτελέσματα για το κάθε σφάλμα με Q priority και Advanced Current Limitation παρουσιάζονται στους **Πίνακες 26-31**.



**Πίνακας 26: Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με Q priority**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.67	0.65	1.28	0.67	0.61	1-2	87.00	87.10	87.20
2	0.68	0.65	1.29	0.68	0.61	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.66	0.64	1.28	0.67	0.60	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.66	0.64	1.27	0.67	0.60	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.66	0.64	1.27	0.67	0.60	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.66	0.64	1.28	0.67	0.60	1-7	18.20	301.70	289.20
7	0.66	0.65	1.28	0.66	0.62	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.66	0.65	1.28	0.66	0.62	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.66	0.65	1.28	0.65	0.62	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.65	0.65	1.28	0.65	0.62	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.66	0.65	1.28	0.66	0.62	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.66	0.65	1.28	0.66	0.62	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.66	0.65	1.28	0.66	0.62	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.66	0.65	1.28	0.67	0.61	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.66	0.65	1.28	0.67	0.61	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.66	0.65	1.28	0.67	0.60	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.66	0.64	1.28	0.67	0.60	14-18	0.00	0.00	0.00
18	0.66	0.65	1.27	0.67	0.61				

**Πίνακας 27: Αποτελέσματα για διφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με Advanced Current Limitation**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	1-2	11.00	89.40	86.60
2	0.61	0.57	1.13	0.60	0.53	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.60	0.57	1.12	0.60	0.53	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.60	0.57	1.12	0.60	0.53	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	1-7	16.20	333.30	324.00
7	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.59	0.58	1.26	0.58	0.55	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.59	0.58	1.13	0.58	0.55	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.60	0.57	1.12	0.60	0.53	14-18	0.00	0.00	0.00
18	0.60	0.57	1.13	0.60	0.53				

**Πίνακας 28: Αποτελέσματα για μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με Q priority**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.70	0.60	0.09	1.09	1.13	1-2	89.60	89.50	89.40
2	0.71	0.60	0.09	1.10	1.14	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.70	0.59	0.09	1.08	1.12	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.70	0.59	0.08	1.08	1.12	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12	1-7	471.80	15.20	15.90
7	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.69	0.60	0.05	1.09	1.12	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.70	0.59	0.09	1.08	1.12	14-18	0.00	0.00	0.00
18	0.70	0.59	0.09	1.09	1.12				

**Πίνακας 29: Αποτελέσματα για μονοφασικό σφάλμα στον ζυγό 7 με  $R_{\text{fault}}=1 \Omega$  με Advanced Current Limitation**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.64	0.51	0.09	0.97	0.97	1-2	89.40	43.80	47.00
2	0.64	0.51	0.10	0.97	0.97	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.63	0.51	0.09	0.97	0.97	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.63	0.51	0.09	0.96	0.96	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.63	0.51	0.09	0.96	0.96	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.63	0.51	0.09	0.97	0.97	1-7	507.10	13.60	14.10
7	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.63	0.52	0.06	0.97	0.97	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.64	0.51	0.09	0.97	0.97	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.64	0.51	0.09	0.97	0.97	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.64	0.51	0.09	0.97	0.97	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	14-18	0.00	0.00	0.00
18	0.64	0.63	0.63	0.63	0.63				

**Πίνακας 30: Αποτελέσματα για διφασικό με γη σφάλμα στον ζυγό 7 με Rfault=1 Ω με Q priority**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	1-2	88.00	88.00	88.00
2	0.23	0.17	0.50	0.11	0.11	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	1-7	5.20	503.20	487.40
7	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.19	0.17	0.49	0.07	0.06	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10	14-18	0.00	0.00	0.00
18	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10				

**Πίνακας 31: Αποτελέσματα για διφασικό με γη σφάλμα στον ζυγό 7 με Rfault=1 Ω με Advanced Current Limitation**

Ζυγός	V <sub>pos</sub> (pu)	V <sub>neg</sub> (pu)	V <sub>a</sub> (pu)	V <sub>b</sub> (pu)	V <sub>c</sub> (pu)	Γραμμή	I <sub>a</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	I <sub>c</sub> (A)
1	0.18	0.14	0.40	0.09	0.08	1-2	57.60	88.40	80.10
2	0.17	0.14	0.39	0.08	0.07	1-3	0.00	0.00	0.00
3	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	3-4	0.00	0.00	0.00
4	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	4-5	0.00	0.00	0.00
5	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	3-6	0.00	0.00	0.00
6	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	1-7	5.10	629.50	603.00
7	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	7-8	0.00	0.00	0.00
8	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	8-9	0.00	0.00	0.00
9	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	9-10	0.00	0.00	0.00
10	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	8-11	0.00	0.00	0.00
11	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	7-12	0.00	0.00	0.00
12	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	12-13	0.00	0.00	0.00
13	0.16	0.14	0.40	0.05	0.05	1-14	0.00	0.00	0.00
14	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	14-15	0.00	0.00	0.00
15	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	15-16	0.00	0.00	0.00
16	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	16-17	0.00	0.00	0.00
17	0.18	0.14	0.40	0.08	0.08	14-18	0.00	0.00	0.00

18	0.22	0.17	0.49	0.11	0.10				
----	------	------	------	------	------	--	--	--	--

Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα η μέθοδος Advanced Current Limitation επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα γιατί αυξάνει το ρεύμα σφάλματος ενώ δεν παρατηρείται όμοια ανύψωση τάσης που παρατηρείται στις φάσεις που δεν έχουν σφάλμα. Οι ανυψώσεις τάσης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποσύνδεση της μονάδας αν για παράδειγμα υπερέβαιναν τις απαιτήσεις για HV-FRT. Παράλληλα όμως, οδηγεί σε μικρότερες τιμές στην τάση θετικής ακολουθίας σε σχέση με τον συμμετρικό έλεγχο οπότε θα οδηγήσει και σε μικρότερους χρόνους που πρέπει να μείνουν συνδεδεμένες οι μονάδες λόγω των FRT χαρακτηριστικών τους.

# Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά τη συμπεριφορά μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής σε βραχυκυκλώματα που είναι συνδεδεμένες με ηλεκτρονικά ισχύος σε ένα Μη Διασυνδεδεμένο Νησί. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι απαιτήσεις των διεθνών προτύπων, τεχνικές που έχουν προταθεί ερευνητικά και σχεδιάστηκε αλγόριθμος που να τις εφαρμόζει στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα PowerFactory για την επαλήθευση των υπολογισμών του κώδικα και για να πραγματοποιηθούν δυναμικές προσομοιώσεις στο προς εξέταση σύστημα.

Παράλληλα με την αδιάλειπτη λειτουργία υπό χαμηλή τάση απαιτείται από τις μονάδες ΑΠΕ να εγγέουν άεργο ισχύ στο δίκτυο που έχει ως στόχο αφενός την υποστήριξη της τάσης του δικτύου, αφετέρου την παροχή ρεύματος βραχυκύκλωσης. Αρχικά εξετάστηκαν δύο μέθοδοι ελέγχου του αντιστροφέα πηγής τάσης, η Q priority, στην οποία δόθηκε προτεραιότητα στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος που προσδίδει η μονάδα ΑΠΕ στη θετική ακολουθία του δικτύου και η P priority, στην οποία δόθηκε προτεραιότητα στην ενεργό συνιστώσα του ρεύματος. Έπειτα, η Q priority συγκρίθηκε με τη μέθοδο Advanced Current Limitation, η οποία εγγεί άεργο ρεύμα και στην αρνητική ακολουθία εκτός της θετικής.

Η αξιολόγηση των μεθόδων έγινε με βάση τη βελτίωση της τάσης του δικτύου που επιτυγχάνουν και της αύξησης των ρευμάτων βραχυκύκλωσης του συστήματος που επιφέρουν. Έτσι, διαπιστώθηκε ότι η P priority αποτελεί καλύτερο μέθοδο ελέγχου του αντιστροφέα για τριφασικό σφάλμα, λόγω του μεγαλύτερου ωμικού χαρακτήρα των γραμμών έναντι του επαγωγικού τους, ενώ για διφασικό, μονοφασικό και διφασικό με γείωση εξήχθη το συμπέρασμα ότι η Q priority είναι καλύτερη τεχνική, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αυξημένες οι απαιτήσεις για άεργο ισχύ στο σύστημα. Για τη δεύτερη σύγκριση, διαπιστώθηκε ότι η Advanced Current Limitation αποτελεί καλύτερη μέθοδο από την Q priority, καθώς αυξάνει το ρεύμα σφάλματος ενώ παράλληλα δεν παρατηρείται όμοια ανύψωση τάσης που παρατηρείται στις φάσεις που δεν έχουν σφάλμα.

# Παράρτημα Πινάκων

Παράρτημα - Πίνακας ι : Τα χαρακτηριστικά της Diesel γεννήτριας της Αστυπάλαιας

Μονάδα Παραγωγής	Diesel
SN (MVA)	1.6
cosφ	0.8
VN (kV)	0.4
T'd0 (sec)	9.2
T''d0 (sec)	0.029
T'q0 (sec)	-
T''q0 (sec)	0.15
H (MWsec/MVA)	2
Xd (p.u.)	1.925
Xq (p.u.)	0.971
X'd (p.u.)	0.12
X''q (p.u.)	0.1
X''d (p.u.)	0.1
Xl (p.u.)	0.099

**Παράρτημα - Πίνακας ii : Τα χαρακτηριστικά των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής της Αστυπάλαιας**

Μονάδα Παραγωγής	Ζυγός	Ισχύς (MVA)	Μέγιστη Αποδιδόμενη ισχύς (MW)
Diesel	1	1.6	1
Αποθήκευσης με μπαταρίες	2	2.3	1.83
A/Π	6	2.5	2
Φ/Β	19	0.625	0.5

**Παράρτημα - Πίνακας iii : Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών του δικτύου της Αστυπάλαιας**

From	V(X.T.)	V(M.T.)	S (MVA)	R (p.u.)	X (p.u.)	Τύπος
Diesel	0.4	15	1.6	0.005	0.06	DYg
BES	0.434	15	2.4	0.005	0.06	DYg

Παράρτημα - Πίνακας iv : Τα χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου της Αστυπάλαιας

From	To	R( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )	B( $10^6$ S)
1	2	0.852	0.754	1.38
1	3	1.95	1.288	93.61
3	4	2.194	1.03	175.3
4	5	1.436	0.506	87.58
3	6	0.850	0.754	1.38
1	7	0.5834	0.28	13.82
7	8	1.397	0.798	1.38
8	9	2.419	1.018	7.14
9	10	1.41	0.4616	3.125
8	11	0.6812	0.449	3.37
7	12	3.413	1.117	7.4
12	13	1.706	1.125	8.47
6	7	0.001	-	-
1	14	0.906	0.5988	1.38
14	19	0.852	0.754	1.38
14	15	2.06	1.3415	0.94
15	16	1.365	0.8985	10.68
16	17	9.841	6.28	21.36
7	14	0.174	0.15	0.23



**Παράρτημα - Πίνακας ν : Χαρακτηριστικά των γραμμών της μηδενικής ακολουθίας**

<b>From</b>	<b>To</b>	<b>R</b>	<b>X</b>
1	2	1.278	1.131
1	3	2.925	1.932
3	4	3.291	1.545
4	5	2.154	0.759
3	6	1.275	1.131
1	7	0.8751	0.42
7	8	2.0955	1.197
8	9	3.6285	1.527
9	10	2.115	0.6924
8	11	1.0218	0.6735
7	12	5.1195	1.6755
12	13	2.559	1.6875
6	7	0.0015	0
1	14	1.359	0.8982
14	18	1.278	1.131
14	15	3.09	2.01225
15	16	2.0475	1.34775
16	17	14.7615	9.42
7	14	0.261	0.225

# Βιβλιογραφία

- [1] Άλκηστις – Χριστίνα Κοντού. *Σχεδίαση αλγορίθμου ελέγχου αντιστροφέα για εφαρμογή τεχνικών ρύθμισης συχνότητας και Control Hardware In The Loop προσομοίωση*. 2019.
- [2] Δημήτριος Μακρυκώστας. *Σύγκριση μεθόδων παροχής επικουρικών υπηρεσιών από μονάδες αποθήκευσης σε ΜΔΝ με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ και συνεργασία με προστασίες αντισυγχρονισμού σε περιβάλλον Control Hardware In The Loop*. 2020.
- [3] European Network of Transmission System Operators for Electricity and (ENTSO-E), “PowerFacts Europe 2019.”
- [4] M. Maharjan, R. Tonkoski, B. Bhattarai, U. Tamrakar, D. Shrestha, and T. Hansen, “Virtual Inertia: Current Trends and Future Directions,” *Appl. Sci.*, 2017.
- [5] D. Lagos, V. Papaspiliotopoulos, G. Korres, and N. Hatziargyriou, “Microgrid protection against internal faults. Challenges in islandic and interconnected operation,” *IEEE Power & Energy Magazine*, 2021.
- [6] N. Hatziargyriou, I. Margaris, I. Stavropoulou, S. Papathanassiou, and A. Dimeas, “Noninterconnected Island Systems,” *IEEE Electrification Magazine*. 2017.
- [7] M. Mohseni and S. M. Islam, “Review of international grid codes for wind power integration: Diversity, technology and a case for global standard,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012.
- [8] Κώδικας διαχείρισης ηλεκτρικών συστημάτων μη διασυνδεδεμένων νησιών (κώδικας ΜΔΝ), ΦΕΚ 304/τ.Β’/11-2-2014
- [9] H. D. Tafti, A. I. Maswood, Z. Lim, G. H. P. Ooi, and P. H. Raj, “A Review of Active/Reactive Power Control Strategies for PV Power Plants under Unbalanced Grid Faults,” *IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*. IEEE, 2015.
- [10] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, J. C. Vasquez, and E. Alarcon-Gallo, “Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1429–1441, 2013.
- [11] J. Miret, M. Castilla, A. Camacho, L. G. De Vicuña, and J. Matas, “Control scheme for photovoltaic three-phase inverters to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 10, pp. 4262–4271, 2012.

- [12] M. Mirhosseini, J. Pou, and V. G. Agelidis, "Single- and Two-Stage Inverter-Based Grid-Connected Photovoltaic Power Plants With RideThrough Capability Under Grid Faults," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 1150–1159, Jul. 2015.
- [13] F. Wang, J. L. Duarte, and M. A. M. Hendrix, "Design and analysis of active power control strategies for distributed generation inverters under unbalanced grid faults," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 4, no. 8, p. 905, 2010.
- [14] Y. Yongheng, F. Blaabjerg, and W. Huai, "Low-Voltage Ride-Through of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 3, pp. 1942–1952, 2014.
- [15] P. . Rodriguez, a. V. Timbus, R. . Teodorescu, M. . Liserre, and F. . Blaabjerg, "Flexible Active Power Control of Distributed Power Generation Systems During Grid Faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 5, pp. 2583–2592, 2007.
- [16] A. Camacho Santiago, M. Castilla Fernandez, J. Miret Tomas, R. Guzman Sola, and A. Borrell Sanz, "Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults," *IEEE Trans. power Electron.*, vol. PP, no. 99, pp. 6224–6234, 2014.
- [17] M. Castilla, J. Miret, A. Camacho, J. Matas, and L. G. De Vicuña, "Voltage support control strategies for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 2, pp. 808–820, 2014.
- [18] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, A. Borrell, and L. G. de Vicuna, "Active and Reactive Power Strategies With Peak Current Limitation for Distributed Generation Inverters During Unbalanced Grid Faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1515–1525, Mar. 2015.
- [19] J. Jia, G. Yang, and A. Hejde Nielsen, "A Review on Grid-connected Converter Control for Short Circuit Power Provision under Grid Unbalanced Faults," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016.
- [20] H. Hooshyar, L. Vanfretti, "Multiphase Unbalanced Power Flow and Fault Analysis of Distribution Networks with High Penetration of Inverter-Interfaced DERs", *IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies*, 2016
- [21] J. He, J. Hu, X. Wang, "A Control Strategy for an Island Operated LV Microgrid Under Unbalanced Faults", 2015

[22] K. Schöleber, E. Prieto-Araujo, S. Ratés-Palau, and O. Gomis-Bellmunt, “Extended Current Limitation for Unbalanced Faults in MMC–HVDC–connected Wind Power Plants,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.