



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Προσδιορισμός με χρήση ψευδοστατικής ανάλυσης της
μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης φωτοβολταϊκών
συστημάτων σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
χαμηλής τάσης**

Διπλωματική Εργασία

Δεληναούμης Δημήτριος

Επιβλέπων: Κόντης Ελευθέριος

Σεπτέμβριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

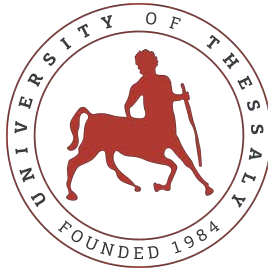
**Προσδιορισμός με χρήση ψευδοστατικής ανάλυσης της
μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης φωτοβολταϊκών
συστημάτων σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
χαμηλής τάσης**

Διπλωματική Εργασία

Δεληναούμης Δημήτριος

Επιβλέπων: Κόντης Ελευθέριος

Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Defining the maximum penetration limit of photovoltaic
systems on low voltage distribution networks using
quasi-static analysis**

Diploma Thesis

Delinaoumis Dimitrios

Supervisor: Kontis Eleftherios

September 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων **Κόντης Ελευθέριος**

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Μπαργιώτας Δημήτριος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο της εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κόντη Ελευθέριο για την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση και τη συγγραφή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους κοντινούς μου φίλους, οι οποίοι στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Δεληναούμης Δημήτριος

Διπλωματική Εργασία

Προσδιορισμός με χρήση ψευδοστατικής ανάλυσης της μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης

Δεληναούμης Δημήτριος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την εκτίμηση της μέγιστης διείσδυσης φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων σε δίκτυα χαμηλής τάσης μέσω ψευδοστατικής ανάλυσης. Συγκρίνονται η συμβατική μέθοδος στιγμιαίας ροής φορτίου, που θεωρεί μέγιστη παραγωγή και ελάχιστη ζήτηση, με μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει ημερήσιες αναλύσεις με ημερήσια προφίλ παραγωγής και ζήτησης. Επιπλέον, αξιολογούνται τρεις τεχνικές ελέγχου τάσης ($\cos\phi(P)$, $Q(V)$, $P(V)$), καθώς και η περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κάποιος έλεγχος τάσης στα Φ/Β συστήματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ημερήσια ανάλυση παρέχει ακριβέστερη εκτίμηση σε σχέση με τη στιγμιαία μέθοδο αναφορικά με τη μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση Φ/Β συστημάτων. Οι στρατηγικές ελέγχου φάνηκαν να βελτιώνουν σημαντικά τα προφίλ τάσης.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται, καταδεικνύουν ότι μέσω της ψευδοστατικής ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη πληρέστερα όλοι οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου, οδηγώντας σε ασφαλέστερα συμπεράσματα για τη μέγιστη διείσδυση Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Επίσης, γίνεται φανερό ότι η χρήση κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου της τάσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β συστημάτων. Τέλος, η χρήση των φασικών τάσεων ως μέτρο αξιολόγησης των επιπέδων τάσης, αν και περιορίζει σχετικά τη διείσδυση των Φ/Β στο δίκτυο σε σχέση με την περίπτωση όπου αυτές αξιολογούνται με βάση την τιμή θετικής ακολουθίας, εξασφαλίζει ότι η τάση σε όλα τα σημεία του δικτύου παραμένει εντός των ορίων.

Λέξεις-κλειδιά: Δίκτυα χαμηλής τάσης, Έλεγχος $\cos\phi(P)$, Έλεγχος $P(V)$, Έλεγχος $Q(V)$, Φωτοβολταϊκά συστήματα, Ψευδοστατική ανάλυση

Diploma Thesis

Defining the maximum penetration limit of photovoltaic systems on low voltage distribution networks using quasi-static analysis

Delinaoumis Dimitrios

Abstract

This thesis investigates the estimation of the maximum penetration of photovoltaic (PV) systems in low-voltage distribution networks through quasi-static analysis. The conventional single power flow method, which assumes maximum generation and minimum demand, is compared with a more realistic approach which includes daily analyses with generation and consumption profiles. Furthermore, three voltage control techniques ($\cos\phi(P)$, $Q(V)$, $P(V)$) are evaluated, along with the non-control benchmark case.

The analyses demonstrate that daily analysis provides a more accurate assessment compared to the simple method, while control strategies were found to significantly improve voltage profiles. Overall, it is concluded that the combination of suitable control strategies with daily simulations constitutes the most effective approach for determining the maximum penetration in low-voltage networks. Finally, the use of phase voltages as an evaluation metric for voltage levels, although it relatively restricts the penetration of PV systems into the grid compared to the case where they are assessed based on the positive-sequence value, ensures that the voltage at all points of the network remains within the prescribed limits.

Keywords: $\cos\phi(P)$ control, Low-Voltage networks, Photovoltaic systems, $P(V)$ control, Quasi-static analysis, $Q(V)$ control

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	ix
Περίληψη	xii
Abstract	xiii
Πίνακας περιεχομένων	xv
Κατάλογος σχημάτων	xvii
Κατάλογος πινάκων	xix
Συντομογραφίες	xxi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης	2
1.2 Παρουσίαση του προβλήματος και πιθανών λύσεων	4
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	6
1.4 Οργάνωση του τόμου	7
2 Τεχνικές Ελέγχου Τάσης σε Δίκτυα Διανομής	9
2.1 Σκοπός της χρήσης των μηχανισμών	9
2.2 Εξεταζόμενες τεχνικές ελέγχου τάσης	10
2.2.1 Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος (ΣΙ) - $\cos\phi(P)$ Control	10
2.2.2 Έλεγχος Αέργου Ισχύος - Τάσης - $Q(V)$ Control	11
2.2.3 Έλεγχος Ενεργού Ισχύος - Τάσης - $P(V)$ Control	13

3	Υπό Μελέτη Σύστημα	15
3.1	Περιγραφή του δικτύου	15
3.2	Παρουσίαση των προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης	17
3.3	Λογισμικά διεξαγωγής προσομοιώσεων	21
4	Μεθοδολογία	23
4.1	Βασική ιδέα	23
4.2	Σενάριο 1 - Κανένας Έλεγχος Τάσης	25
4.3	Σενάριο 2 - Έλεγχος $\cos\phi(P)$	26
4.4	Σενάριο 3 - Έλεγχος $Q(V)$	26
4.5	Σενάριο 4 - Έλεγχος $P(V)$	27
5	Αριθμητικά αποτελέσματα	29
5.1	Σενάριο 1 - Αποτελέσματα	30
5.2	Σενάριο 2 - Αποτελέσματα	34
5.3	Σενάριο 3 - Αποτελέσματα	41
5.4	Σενάριο 4 - Αποτελέσματα	48
6	Συμπεράσματα	59
6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	59
6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	60
	Βιβλιογραφία	63

Κατάλογος σχημάτων

2.1 Έλεγχος $\cos\phi(P)$	10
2.2 Έλεγχος $Q(V)$	12
2.3 Έλεγχος $P(V)$	14
3.1 Αρχική τοπολογία εξεταζόμενου δικτύου.	16
3.2 Προφίλ Παραγωγής.	20
3.3 Προφίλ Κατανάλωσης.	20
4.1 Κατηγοριοποίηση προσομοιώσεων	25
5.1 Σενάριο 1. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	31
5.2 Σενάριο 1. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	32
5.3 Σενάριο 1. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.	33
5.4 Σενάριο 1: Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.	34
5.5 Σενάριο 2. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	36
5.6 Σενάριο 2. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	37

5.7	Τάση σε ζυγό με υπέρταση και χρήση μηχανισμού $\cos\phi(P)$	38
5.8	Σενάριο 2. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.	40
5.9	Σενάριο 2. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.	40
5.10	Σενάριο 3. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	43
5.11	Σενάριο 3. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	44
5.12	Τάση σε ζυγό με υπέρταση και χρήση μηχανισμού $Q(V)$	45
5.13	Σενάριο 3. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.	46
5.14	Σενάριο 3. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L127.	47
5.15	Σενάριο 4. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	51
5.16	Σενάριο 4. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	51
5.17	Σενάριο 4. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.	56
5.18	Σενάριο 4. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.	57

Κατάλογος πινάκων

3.1	Φορτία ανά φάση.	17
3.2	Ισχύς Φ/Β Συστημάτων.	17
3.3	Εξεταζόμενες Τοπολογίες.	18
3.4	Παράγοντες που επηρεάζουν ζήτηση και παραγωγή Φ/Β.	19
5.1	Αποτελέσματα Σεναρίου 1. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	30
5.2	Αποτελέσματα Σεναρίου 1. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	31
5.3	Αποτελέσματα Σεναρίου 2. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	35
5.4	Αποτελέσματα Σεναρίου 2. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	36
5.5	Ποσοστιαία αύξηση εγκατεστημένης ισχύος στην περίπτωση ημερήσιας ανάλυσης ανάμεσα στα Σενάρια 1 και 2.	41
5.6	Αποτελέσματα Σεναρίου 3. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	42
5.7	Αποτελέσματα Σεναρίου 3. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	43
5.8	Αποτελέσματα Σεναρίου 4. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.	49
5.9	Αποτελέσματα Σεναρίου 4. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	50
5.10	Παραγόμενη Ενέργεια. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση φασικές τιμές. .	53

5.11 Παραγόμενη Ενέργεια. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.	54
---	----

Συντομογραφίες

Ελληνικά

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΣΙ	Συντελεστής Ισχύος
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Αγγλικά

ANSI	American National Standards Institute
DG	Distributed Generation
DSO	Distribution System Operator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IRENA	International Renewable Energy Agency
PV	Photovoltaic Systems
p.u.	Per Unit
RES	Renewable Energy Sources
std	Standard

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στη σημερινή εποχή, κρίνεται απαραίτητο να βρεθούν λύσεις σε καίρια ζητήματα που αφορούν το μέλλον της ενέργειας. Αφενός, η αλόγιστη χρήση των υδρογονανθράκων για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και αφετέρου οι πολιτικές που προωθούνται από διάφορους παγκόσμιους και κρατικούς φορείς, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών προς την πράσινη ενέργεια [1].

Υπάρχουν πολλές μορφές ενέργειας που ανήκουν στην κατηγορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Renewable Energy Sources), όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική, αλλά και η ενέργεια που προέρχεται από τη βιομάζα [2]. Όπως ήδη αναφέρθηκε πολλοί οργανισμοί έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους προς την πράσινη ενέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει υψηλούς στόχους για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) τα επόμενα χρόνια. Το αρχικό κατώτατο όριο που είχε τεθεί από την Επιτροπή ήταν η παραγωγή από ΑΠΕ να αποτελεί κατ' ελάχιστον το 32% της συνολικής παραγωγής ενέργειας έως το 2030. Στη συνέχεια, το όριο αυτό αναθεωρήθηκε και έχει ανέλθει στο 42,5%, ενώ ήδη από το 2020, περισσότερο από το 20% της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προέρχεται από μονάδες ΑΠΕ [3].

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται σε ζητήματα που αφορούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω φωτοβολταϊκών (Φ/Β) συστημάτων (PV systems), τα οποία συνδέονται απευθείας στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (XT). Αυτή η μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες πηγές πράσινης ενέργειας. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (International Renewable Energy Agency – IRENA), στην Ελλάδα, η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από Φ/Β ανέρχεται στο 44% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ [4].

Ωστόσο, αυτή η μορφή διεσπαρμένης παραγωγής (distributed generation - DG) ενέχει σημαντικές προκλήσεις για την εύρυθμη λειτουργία των δικτύων ΧΤ. Οι σημαντικότερες προκλήσεις της διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) σχετίζονται κυρίως με το σχεδιασμό των δικτύων διανομής, ο οποίος παραδοσιακά δεν προβλέπει αμφίδρομη ροή ισχύος. Πράγματι, παραδοσιακά η ροή ισχύος στα δίκτυα ΧΤ ήταν από το ανάντι δίκτυο μέσης τάσης (MT) προς τους επιμέρους καταναλωτές. Ωστόσο, λόγω της αυξημένης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα ΧΤ υπάρχουν στιγμές της ημέρας στις οποίες αυτή η ροή αντιστρέφεται. Αυτό αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, αφού συντελεί στην αύξηση της τάσης του δικτύου [5],[6].

Παρά τα τεχνικά προβλήματα που προκύπτουν για τη λειτουργία των δικτύων διανομής, τόσο οι κρατικοί φορείς όσο και οι ίδιοι οι καταναλωτές συνεχίζουν να επενδύουν χρήματα για τη δημιουργία νέων Φ/Β συστημάτων, ενισχύοντας έτσι περαιτέρω την ένταξή τους στα δίκτυα διανομής. Οι επενδύσεις αυτές πραγματοποιούνται, καθώς η παραγωγή ενέργειας μέσω Φ/Β συστημάτων αποδεικνύεται φθηνότερη σε σχέση με την παραδοσιακή ηλεκτροπαραγωγή, που στηρίζεται σε ορυκτά καύσιμα, καθώς και στο μειωμένο κόστος που παρουσιάζουν τα οικιακά Φ/Β συστήματα και τα συστήματα αποθήκευσης της πλεονάζουσας παραγόμενης ενέργειας (συστήματα αποθήκευσης μπαταριών) [7], [8].

1.1 Ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση στις εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων στέγης. Όπως παρουσιάζεται στην [9], η παραγωγή αυτών των συστημάτων είναι ικανή να καλύψει σε σημαντικό βαθμό τη μέγιστη ζήτηση (peak demand) σε τοπικό επίπεδο. Όπως αναλύεται στην [9], τα ΦΒ στέγης μπορούν να καλύψουν το 50% της τοπικής ζήτησης, ενώ σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μπορούν να καλύψουν (ή και ακόμα να ξεπεράσουν) το 100% αυτής.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται αναγκαίο να ορίσουμε τον όρο μέγιστη διείσδυση, που ουσιαστικά υποδεικνύει τη μέγιστη διείσδυση των Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο πριν αυτή γίνει επικίνδυνη για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου [10]. Η μέγιστη διείσδυση επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως: η τοπολογία του δικτύου, η ποικιλομορφία των φορτίων που περιέχονται σε αυτό, τα προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης, καθώς και η ικανότητα του ίδιου του δικτύου (κυρίως λόγω παλαιότητας των υποδομών, παρουσιάζονται σημαντι-

κές αδυναμίες) να υποστηρίξει την παραγόμενη ενέργεια [11].

Στη χώρα μας, αλλά και διεθνώς, πολλοί διαχειριστές επιλέγουν να αξιολογούν τη μέγιστη διείσδυση Φ/Β σε δίκτυα διανομής ΧΤ κάνοντας χρήση μιας απλής ροής φορτίου. Για τη ροή αυτή υποθέτουμε μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β συστήματα σε συνδυασμό με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας από τα φορτία που περιλαμβάνονται στο δίκτυο. Η τεχνική αυτή ουσιαστικά εξετάζει τη χειρότερη δυνατή περίπτωση που δυνητικά θα μπορούσε να εμφανιστεί, αλλά στην πράξη αποτελεί ένα μη ρεαλιστικό σενάριο λειτουργίας [12].

Με το πέρασμα των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για την εύρεση της μέγιστης δυνατής διείσδυσης των Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα χαμηλής τάσης. Μία προσέγγιση που χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια είναι η αξιολόγηση της μέγιστης διείσδυσης Φ/Β με τη βοήθεια προσομοιώσεων χρονοσειρών. Στην οικογένεια αυτών, συμπεριλαμβάνονται και οι ψευδοστατικές αναλύσεις, που αποτελούν τη βασική μέθοδο προσομοίωσης για αυτή την εργασία. Η ανάλυση αυτή μπορεί να γίνει σε ωριαία ή 15λεπτη βάση για μία μέρα ή έναν χρόνο [13]. Συνεχίζοντας, πολλοί ερευνητές έχουν κάνει χρήση στοχαστικών μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτοί εισάγουν τυχαιότητα σε διάφορες παραμέτρους που είναι ικανές να επηρεάσουν τη διείσδυση των Φ/Β στο δίκτυο. Τέτοιοι παράγοντες είναι η κυμαινόμενη παραγωγή ή/και η διαφοροποίηση της κατανάλωσης, το μέγεθος των Φ/Β συστημάτων ή/και η τοποθέτησή τους στο δίκτυο [14], [15]. Ωστόσο, τέτοιες μέθοδοι έχουν αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος και πολλές φορές είναι αρκετά σύνθετες για να υλοποιηθούν [16]. Τέλος, στη βιβλιογραφία έχουν αναπτυχθεί και υβριδικές μέθοδοι που συνδυάζουν τη χρήση ανάλυσης χρονοσειρών και στοχαστικών μεθόδων για τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα [17]. Μία παρόμοια μέθοδος θα εξεταστεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Παράλληλα με τη δημιουργία διαφορετικών προσεγγίσεων/μεθοδολογιών προσδιορισμού της μέγιστης δυνατής διείσδυσης Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο, πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρωθεί και στην επίλυση των ζητημάτων που προκαλούνται από τη διείσδυση των Φ/Β συστημάτων στην ασφαλή λειτουργία του δικτύου διανομής. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που ανακύπτουν είναι η εμφάνιση υπέρ-τάσεων (Overvoltage) κατά τις χρονικές στιγμές παραγωγής των Φ/Β. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να εισαγάγουμε μια έννοια η οποία θα μας απασχολήσει σε όλη τη διάρκεια της εργασίας: την έννοια της υπέρτασης. Οποιαδήποτε αύξηση της τάσης σε ποσοστό μεγαλύτερο από ένα προκαθορισμένο όριο θεωρείται υπέρταση. Αντίστοιχα, οποιαδήποτε μείωση της τάσης σε ποσοστό μεγαλύτερο

τερο από ένα προκαθορισμένο όριο θεωρείται υπόταση. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα αποδεκτά όρια της τάσης στα δίκτυα διανομής θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας. Η αντιμετώπιση των υπερτάσεων αποτελεί ένα από τα βασικά αντικείμενα που θα μελετηθούν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου (Over-voltage Mitigation Techniques). Κάποιοι από αυτούς στοχεύουν στην παροχή αέργου ισχύος στο δίκτυο για την αντιμετώπισή των ζητημάτων υπέρτασης, ενώ κάποιοι άλλοι στοχεύουν στον περιορισμό της παραγωγής σύμφωνα με τις τάσεις του δικτύου. Για παράδειγμα, στη [18] παρουσιάζονται δύο διαφορετικές μέθοδοι αντιμετώπισης των υπερτάσεων. Στην πρώτη έχουμε απευθείας ρύθμιση της καμπύλης στατισμού (droop) του μετατροπέα των Φ/Β συστημάτων, χωρίς καμία επικοινωνία και χρησιμοποιώντας ελάχιστες μετρήσεις. Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, με βάση πολλαπλές μετρήσεις της τάσης σε διαφορετικά σημεία του δικτύου, καθορίζεται η μέγιστη παραγωγή του κάθε συστήματος ώστε να μπορεί να διατηρηθεί η τάση μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Στην [19], πέρα από τις κλασικές μεθόδους περιορισμού της παραγωγής των συστημάτων, παρουσιάζονται μέθοδοι που περιλαμβάνουν τόσο την απορρόφηση ή την έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές συμπεριλαμβανομένων και των συστημάτων αποθήκευσης είναι αναγκαίο να μελετηθούν συστημικά πριν γίνει ευρεία η χρήση τους, καθώς μπορεί δημιουργήσουν κινδύνους στη λειτουργία του δικτύου. Όπως θα παρουσιαστεί και στα επόμενα κεφάλαια, τέτοιοι κίνδυνοι μπορεί να είναι η παρουσίαση λάθος εικόνας σχετικά με την μέγιστη διείσδυση ή τον περιορισμό του φαινομένου της υπέρτασης με χρήση μεγάλου όγκου αέργου ισχύος που οδηγεί στο αντίθετο άκρο, αυτό της υπότασης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τεχνικές που περιλαμβάνουν την ιδιοκατανάλωση της πλεονάζουσας ενέργειας ή την αποθήκευση της σε σύγχρονα συστήματα μπαταριών. Με την ανάπτυξη των σχετικών τεχνολογιών, οι μπαταρίες φαίνεται να κερδίζουν έδαφος σε σχέση με άλλες μεθόδους.

1.2 Παρουσίαση του προβλήματος και πιθανών λύσεων

Για την ομαλή ένταξη μεγαλύτερου αριθμού Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα ΧΤ, είναι αναγκαίο να ξεπεραστούν τα προβλήματα ρύθμισης τάσης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Τα όρια σύμφωνα με τα οποία κρίνεται οποιαδήποτε αύξηση της τάσης ως υπέρταση καταγράφονται σε διεθνή πρότυπα και στους κώδικες διαχείρισης των δικτύων. Ενδεικτικά

αναφέρεται ότι σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std 1159-2019 υπέρταση θεωρείται οποιαδήποτε αύξηση της τάσης πάνω από 10%. Αντίθετα, η ANSI, η οποία καθορίζει τα πρότυπα στις ΗΠΑ, θέτει δύο διαφορετικά όρια για την υπέρταση. Το πρώτο για κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι 5%, ενώ το δεύτερο αφορά μικρά χρονικά διαστήματα λειτουργίας και ορίζει ότι η τάση μπορεί να αυξηθεί σε αυτά τα μικρά χρονικά διαστήματα έως και 6% [20], [21]. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε διαχειριστής μπορεί να ορίσει δικά του όρια, τα οποία θα πρέπει και να προδιαγράφονται στον κώδικα διαχείρισης του δικτύου του. Στην παρούσα εργασία, τίθεται, χωρίς να επηρεάζεται η γενικότητα των αποτελεσμάτων, ως όριο για την αύξηση και τη μείωση της τάσης το 5%. Όλα τα ποσοστά που αναφέρονται παραπάνω, υπολογίζονται με βάση την ονομαστική τάση στο εκάστοτε τμήμα του δικτύου. Για τον λόγο αυτό στην εργασία χρησιμοποιείται η ανά μονάδα τιμή της τάσης (per unit - p.u.) για τον υπολογισμό της υπέρτασης.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι στις μέρες μας, ο τρόπος προσδιορισμού από τους Διαχειριστές Δικτύων Διανομής (Distribution System Operators – DSO) της μέγιστης δυνατής διείσδυσης των Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα ΧΤ, κρίνεται συντηρητικός. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εξετάζεται το χειρότερο δυνατό σενάριο, ακόμη και αν αυτό είναι σχεδόν απίθανο να συμβεί. Οι μέθοδοι αυτοί θα πρέπει σταδιακά να αντικατασταθούν με άλλες προσεγγίσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τους περιορισμούς που προτείνονται στα σύγχρονα πρότυπα, όπως για παράδειγμα το EN 50160:2010. Στο συγκεκριμένο πρότυπο αναφέρεται ότι όλες οι διακυμάνσεις της τάσης (συμπεριλαμβανομένου της υπέρτασης και της υπότασης) θα πρέπει να αξιολογούνται και να κρίνονται σε επίπεδο δεκαλέπτου. Αυτή η προσέγγιση θα αξιολογηθεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της στη μέγιστη ισχύ Φ/Β συστημάτων που μπορούν να εγκατασταθούν σε δίκτυα διανομής ΧΤ. Πραγματοποιώντας ημερήσιες αναλύσεις ο διαχειριστής του δικτύου διανομής μπορεί να αποκτήσει μια πιο σαφή εικόνα σχετικά με τη μέγιστη διείσδυση Φ/Β συστημάτων καθώς ζητήματα υπερτάσεων αξιολογούνται σε επίπεδο ημέρας (και δεκαλέπτου) και όχι με βάση μια μεμονωμένη ροή ισχύος.

Εκτός από την αξιολόγηση του αντίκτυπου της ημερήσιας ανάλυσης, έναντι της μεμονωμένης ροής ισχύος, στην μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αξιολογηθούν και τρεις διαφορετικές τεχνικές αντιμετώπισης των υπερτάσεων σε δίκτυα διανομής ΧΤ. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τόσο την απορρόφηση αέργου ισχύος από τους μετατροπείς των Φ/Β συστημάτων, όσο και τη ρύθμιση της

παραγωγής ενεργού ισχύος από τα Φ/Β συστήματα. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται αναλυτική περιγραφή όλων των μεθόδων ρύθμισης τάσης που θα εξεταστούν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα εξεταστούν και θα αξιολογηθούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη μέθοδο, η οποία αποτελείται την πιο διαδεδομένη προσέγγιση, υποθέτουμε μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β συστήματα του δικτύου και ελάχιστο φορτίο. Στη δεύτερη μέθοδο, θα πραγματοποιηθεί ανάλυση σε ημερήσια βάση, με τη χρήση τυπικών προφίλ παραγωγής και φορτίου. Στη συνέχεια, με βάση αυτά τα προφίλ και κάνοντας χρήση της τεχνικής Monte Carlo, θα εξεταστεί ένα πλήθος αντιπροσωπευτικών σεναρίων λειτουργίας του δικτύου διανομής. Σε κάθε σενάριο θα αξιολογούνται, με τη βοήθεια ψευδοστατικών αναλύσεων ροής ισχύος, προβλήματα υπερτάσεων σε επίπεδο ημέρας και ανάλυσης δεκαλέπτου. Η σύγκριση των δύο αυτών προσεγγίσεων αναμένεται να αναδείξει σημαντικές αδυναμίες της πρώτης, αποδεικνύοντας πρακτικά πως η μέθοδος αυτή, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως από τους διαχειριστές των δικτύων διανομής, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά εσφαλμένα αποτελέσματα για τη διείσδυση Φ/Β συστημάτων σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης.

Επιπλέον, στα πλαίσια της διπλωματικής θα αξιολογηθούν και τρεις διαφορετικές μέθοδοι ρύθμισης τάσης. Οι στρατηγικές αυτές βασίζονται στην ρύθμιση καμπυλών στατισμού και επιδρούν πάνω στην τάση του δικτύου. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν τρεις από τις πιο διαδεδομένες πρακτικές που συναντώνται στη βιβλιογραφία και τη βιομηχανία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για τον έλεγχο $\cos\phi(P)$, τον έλεγχο $Q(V)$ και τον έλεγχο $P(V)$. Για την καλύτερη αξιολόγηση αυτών των μεθόδων, θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα στην περίπτωση που το δίκτυο δεν περιλαμβάνει κανέναν έλεγχο. Τέλος, για την πληρέστερη αξιολόγηση των , οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν δύο φορές. Στην πρώτη περίπτωση, το φαινόμενο της υπέρτασης σε κάθε κόμβο του δικτύου αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τις φασικές τιμές τάσεων για τις τρεις φάσεις του δικτύου. Στη δεύτερη περίπτωση, οι υπερτάσεις αξιολογούνται με βάση τη θετική συνιστώσα της τάσης σε κάθε ζυγό του δικτύου.

1.4 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο (2) της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται οι τρεις μέθοδοι ελέγχου τάσης που αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας. Παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας τους, τα θετικά και τα αρνητικά στοιχεία τους, καθώς και διαγράμματα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους.

Στο Κεφάλαιο (3) θα γίνει η παρουσίαση του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες των προσομοιώσεων. Θα παρουσιαστούν οι διαφορετικές τοπολογίες που εξετάστηκαν, τα προφίλ παραγωγής Φ/Β συστημάτων, τα προφίλ κατανάλωσης των φορτίων, και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των προσομοιώσεων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο (5) θα παρουσιαστούν όλα τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνουν, την μέγιστη διείσδυση Φ/Β συστημάτων υπολογισμένη με βάση την στιγμιαία ροή φορτίου αλλά και την ημερήσια ανάλυση για κάθε εξεταζόμενο έλεγχο. Επιπλέον, όλες οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί για 2 τρόπους αξιολόγησης της υπέρτασης. Στην πρώτη, το κριτήριο είναι οι φασικές τάσεις, ενώ στην δεύτερη η τάση θετικής ακολουθίας. Τα αποτελέσματα αυτά σχολιάζονται και ερμηνεύονται τόσο σε επίπεδο σεναρίου, όσο και σε σύγκριση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα.

Κλείνοντας, στο Κεφάλαιο (6) θα γίνει μια ανασκόπηση και η παρουσίαση των σημαντικότερων συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα γίνει και μια σύντομη αναφορά σε μελλοντικές προεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Τεχνικές Ελέγχου Τάσης σε Δίκτυα Διανομής

2.1 Σκοπός της χρήσης των μηχανισμών

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υπέρτασης, η αύξηση της διείσδυσης Φ/B συστημάτων περιορίζεται σημαντικά, κυρίως λόγω της σημαντικής αύξησης της τάσης σε μη επιτρεπτά επίπεδα. Πράγματι, όταν δεν εφαρμόζεται κάποιος έλεγχος και η παραγωγή αυξηθεί σημαντικά, το δίκτυο οδηγείται σε πλεονάσματα ηλεκτρικής ισχύος, τα οποία δεν μπορούν να καταναλωθούν τοπικά εντός του δικτύου διανομής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων αντιστροφής ισχύος και ανάπτυξης ανεπιτρεπτών υπερτάσεων. Η αύξηση της τάσης διαταράσσει την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου, προκαλεί καταπόνηση του εξοπλισμού και μείωση της ποιότητας της παρεχόμενης ισχύος [22].

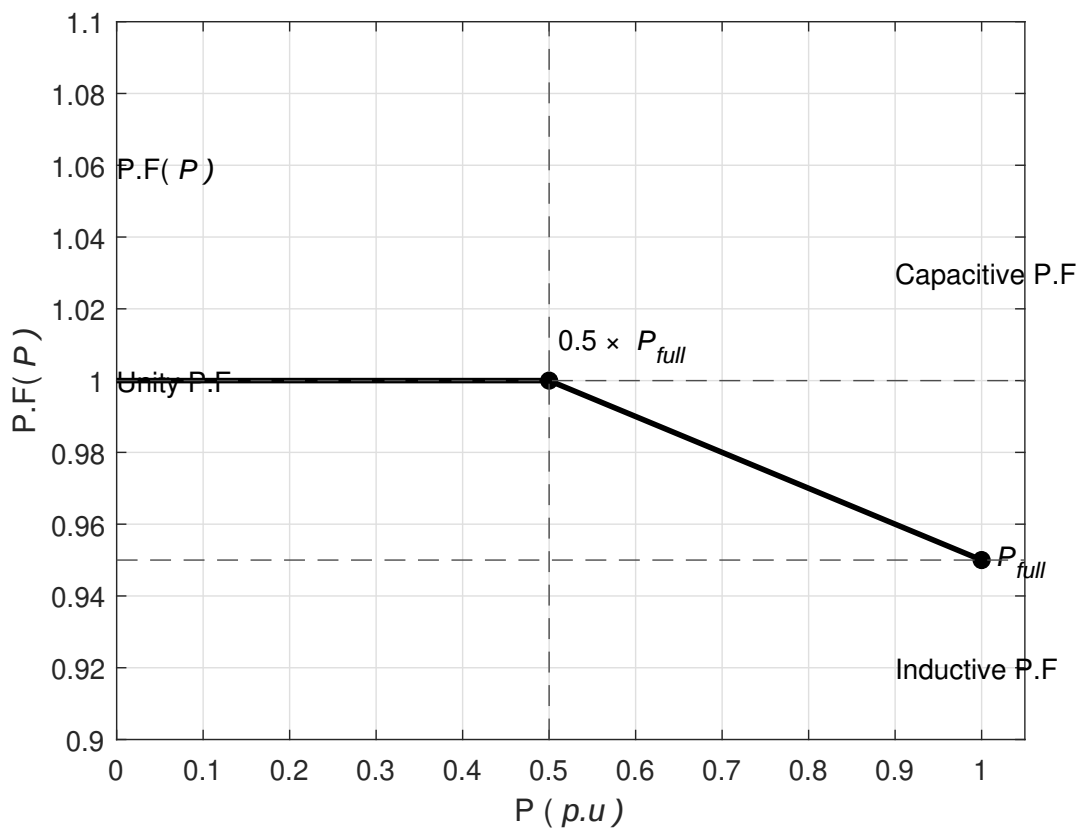
Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία θα εξεταστεί η επίδραση διαφορετικών μεθόδων ελέγχου στη δυνατότητα αύξησης της μέγιστης διείσδυσης Φ/B συστημάτων και στον έλεγχο της τάσης του δικτύου. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρεται και στην εισαγωγή, θα εφαρμοστούν οι εξής τεχνικές: έλεγχος συντελεστή ισχύος ($\cos\phi(P)$), έλεγχος αέργου ισχύος-τάσης ($Q(V)$) και έλεγχος ενεργού ισχύος-τάσης ($P(V)$).

2.2 Εξεταζόμενες τεχνικές ελέγχου τάσης

2.2.1 Έλεγχος Συντελεστή Ισχύος (ΣΙ) - $\cos\phi(P)$ Control

Ο πρώτος έλεγχος που υλοποιήθηκε και αξιολογήθηκε είναι ο έλεγχος του συντελεστή ισχύος (ΣΙ) – $\cos\phi(P)$ Control, όπως παρουσιάζεται στην [23]. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία του, ο έλεγχος αυτός επικεντρώνεται στον καθορισμό της τιμής του ΣΙ των Φ/Β συστημάτων.

Με τον συγκεκριμένο μηχανισμό, η τιμή του ΣΙ κάθε Φ/Β συστήματος υπολογίζεται δυναμικά, βάσει του προφίλ παραγωγής σε κάθε χρονική στιγμή. Ουσιαστικά, ο ΣΙ μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το ποσοστό της ονομαστικής ισχύος που παράγεται. Στον έλεγχο αυτό ακολουθείται η χαρακτηριστική καμπύλη του Σχήματος 2.1.



Σχήμα 2.1: Έλεγχος $\cos\phi(P)$.

Όπως φαίνεται, ο ΣΙ παραμένει ίσος με τη μονάδα όσο η παραγωγή δεν ξεπερνά το 50% της ονομαστικής ισχύος. Για μεγαλύτερα ποσοστά, ακολουθείται μια ευθεία που ορίζεται από τη μαθηματική σχέση:

$$PF(P) = -0.1 \cdot P + 1.05 \quad (2.1)$$

όπου PF είναι ο συντελεστής ισχύος και P το ποσοστό της ονομαστικής ισχύος που παράγεται τη δεδομένη χρονική στιγμή.

Έτσι, ο ΣΙ μπορεί να λάβει τιμές από 1 (ωμικός συντελεστής ισχύος) έως και 0.95 επαγωγικός για μέγιστη παραγωγή. Αυτό σημαίνει ότι, κάθε φορά που η παραγωγή υπερβαίνει το 50% της ονομαστικής ισχύος, το σύστημα απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο. Η ισχύς αυτή συμβάλλει στην εξισορρόπηση του φαινομένου της υπέρτασης και στην επαναφορά της τάσης στα ονομαστικά επίπεδα. Όπως θα παρουσιαστεί και στο Κεφάλαιο 5, η τεχνική αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποδοτική, αν και εμφανίζει ορισμένες ιδιαιτερότητες που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να επιτευχθούν τα βέλτιστα αποτελέσματα.

2.2.2 Έλεγχος Αέργου Ισχύος - Τάσης - $Q(V)$ Control

Η επόμενη στρατηγική ελέγχου τάσης είναι ο έλεγχος αέργου ισχύος-τάσης ($Q(V)$ control). Ο συγκεκριμένος έλεγχος ακολουθεί μια πιο σύνθετη χαρακτηριστική καμπύλη, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Η απορρόφηση αέργου ισχύος συμβάλλει ουσιαστικά στον περιορισμό του φαινομένου της υπέρτασης. Στον έλεγχο αυτό δεν επηρεάζεται η τιμή της παραγόμενης ενεργού ισχύος από το Φ/Β σύστημα, αλλά μόνο της αέργου.

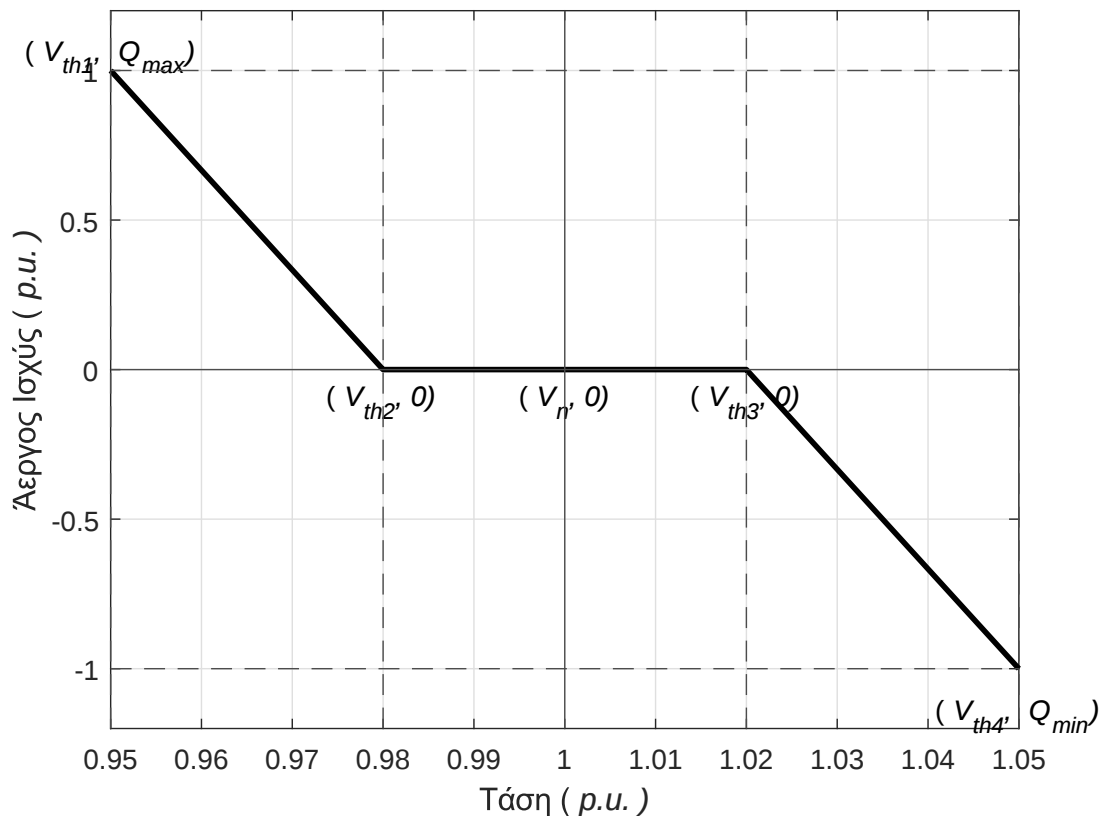
Υπάρχουν διάφορες υλοποιήσεις του μηχανισμού. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η προσέγγιση που παρουσιάζεται στην [24] και περιγράφεται από την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$Q(V) = \begin{cases} 1, & V \leq V_{th1} \\ \frac{V_{th2} - V}{V_{th2} - V_{th1}}, & V_{th1} < V \leq V_{th2} \\ 0, & V_{th2} < V < V_{th3} \\ -\frac{V - V_{th3}}{V_{th4} - V_{th3}}, & V_{th3} \leq V < V_{th4} \\ -1, & V \geq V_{th4} \end{cases}$$

όπου Q η άεργος ισχύς, V η τάση, ενώ τα όρια V_{th1} , V_{th2} , V_{th3} και V_{th4} χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις περιοχές λειτουργίας του μηχανισμού.

Στον συγκεκριμένο έλεγχο, η τιμή της αέργου ισχύος που θα εγχυθεί ή απορροφηθεί από το δίκτυο υπολογίζεται με βάση την τάση στο σημείο διασύνδεσης του Φ/Β συστήματος,

ώστε να μετριασθεί όσο περισσότερο γίνεται η απόκλιση της τάσης από την ονομαστική της τιμή. Για την υλοποίηση του ελέγχου $Q(V)$ μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε οι φασικές τάσεις του δικτύου είτε η τάση θετικής ακολουθίας. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις και αναλύονται οι διαφορές τους.



Σχήμα 2.2: Έλεγχος $Q(V)$.

Ο σημαντικότερος κίνδυνος που μπορεί να εμφανιστεί με την εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου είναι η εμφάνιση του φαινομένου της υπότασης σε ζυγούς οι οποίοι δεν έχουν παραγωγή από Φ/Β συστήματα. Πράγματι, σε περιπτώσεις υψηλής παραγωγής, τα Φ/Β σύστημα ενδέχεται να απορροφούν σημαντικά ποσά άεργου ισχύος τα οποία μπορεί να προκαλούν υποτάσεις σε γειτονικούς ζυγούς του δικτύου. Το φαινόμενο της υπότασης είναι εξίσου σοβαρό με αυτό της υπέρτασης, γεγονός που καθιστά την ανάλυση δικτύων που εφαρμόζουν τέτοιου είδους ελέγχους αρκετά πιο σύνθετη.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν με την εφαρμογή του μηχανισμού, η οποία παρουσιάζεται σε επόμενα κεφάλαια, αναμένεται να αναδείξει τόσο τις σημαντικές δυνατότητες όσο και τις αδυναμίες της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου.

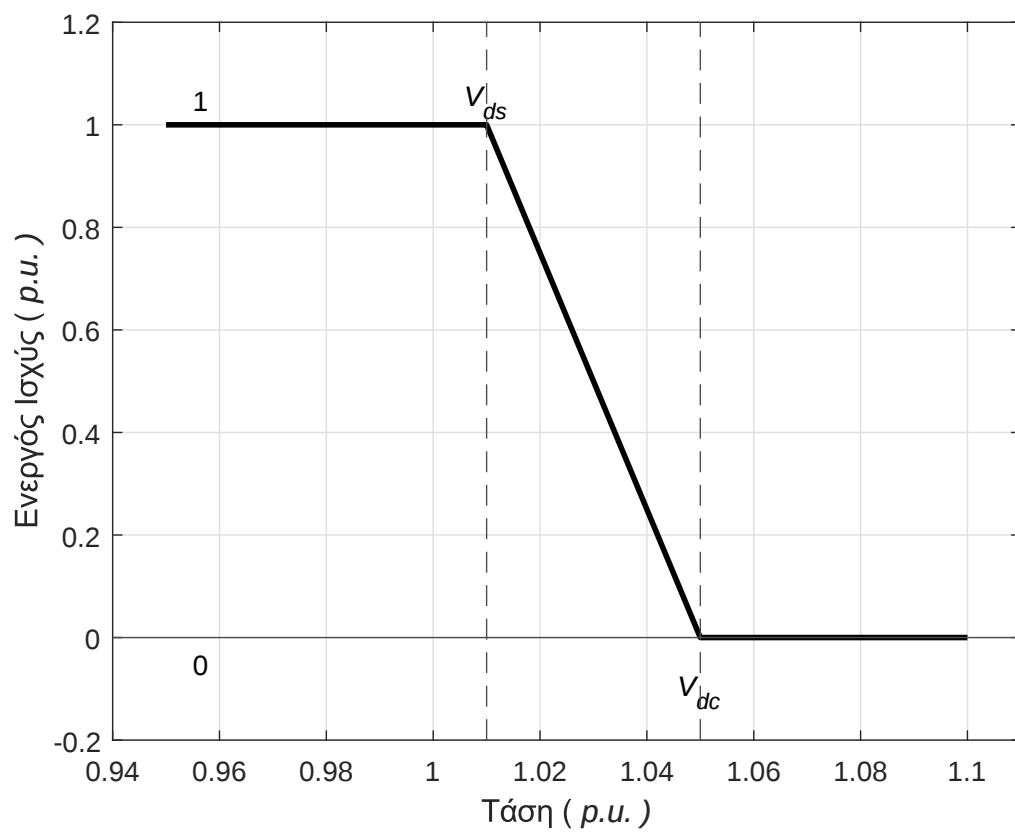
2.2.3 Έλεγχος Ενεργού Ισχύος - Τάσης - $P(V)$ Control

Η τελευταία εξεταζόμενη τεχνική είναι ο έλεγχος ενεργού ισχύος-τάσης ($P(V)$ control). Ο έλεγχος που υλοποιήθηκε και μελετήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αποτελεί παραλλαγή του μηχανισμού που προτείνεται στην [25].

Στόχος του ελέγχου $P(V)$ είναι ο περιορισμός της ενεργού ισχύος σε χρονικές στιγμές που οι τάσεις του δικτύου αυξάνονται. Ο περιορισμός πραγματοποιείται με βάση τοπικές τιμές τάσης (της τάσης, δηλαδή, που καταγράφεται στο σημείο σύνδεσης του Φ/B συστήματος). Η χαρακτηριστική καμπύλη που ακολουθείται για την εφαρμογή αυτού του ελέγχου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Η μαθηματική περιγραφή του ελέγχου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P(V) = \begin{cases} P_n, & V < V_{ds} \\ \left(\frac{V_{dc} - V}{(V_{dc} - V_{ds})} \right) P_n, & V_{ds} \leq V \leq V_{dc} \\ 0, & V > V_{dc} \end{cases}$$

όπου V είναι η τάση στο σημείο σύνδεσης και P_n η μέγιστη προσφερόμενη ισχύς του Φ/B συστήματος. V_{ds} είναι το όριο της τάσης για την ενεργοποίηση του μηχανισμού (1.02 p.u.) και V_{dc} είναι το όριο της τάσης πάνω από το οποίο η ενεργός ισχύς αποκόπτεται πλήρως. Το όριο V_{dc} είναι συνήθως ίσο με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της τάσης (1.05 p.u. στην παρούσα διπλωματική). Όπως και στην περίπτωση του ελέγχου $Q(V)$, έτσι και στον έλεγχο $P(V)$ η τάση μπορεί να είναι είτε η φασική είτε η τάση θετικής ακολουθίας. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αξιολογούνται και οι δύο προσεγγίσεις.

Σχήμα 2.3: Έλεγχος $P(V)$.

Κεφάλαιο 3

Υπό Μελέτη Σύστημα

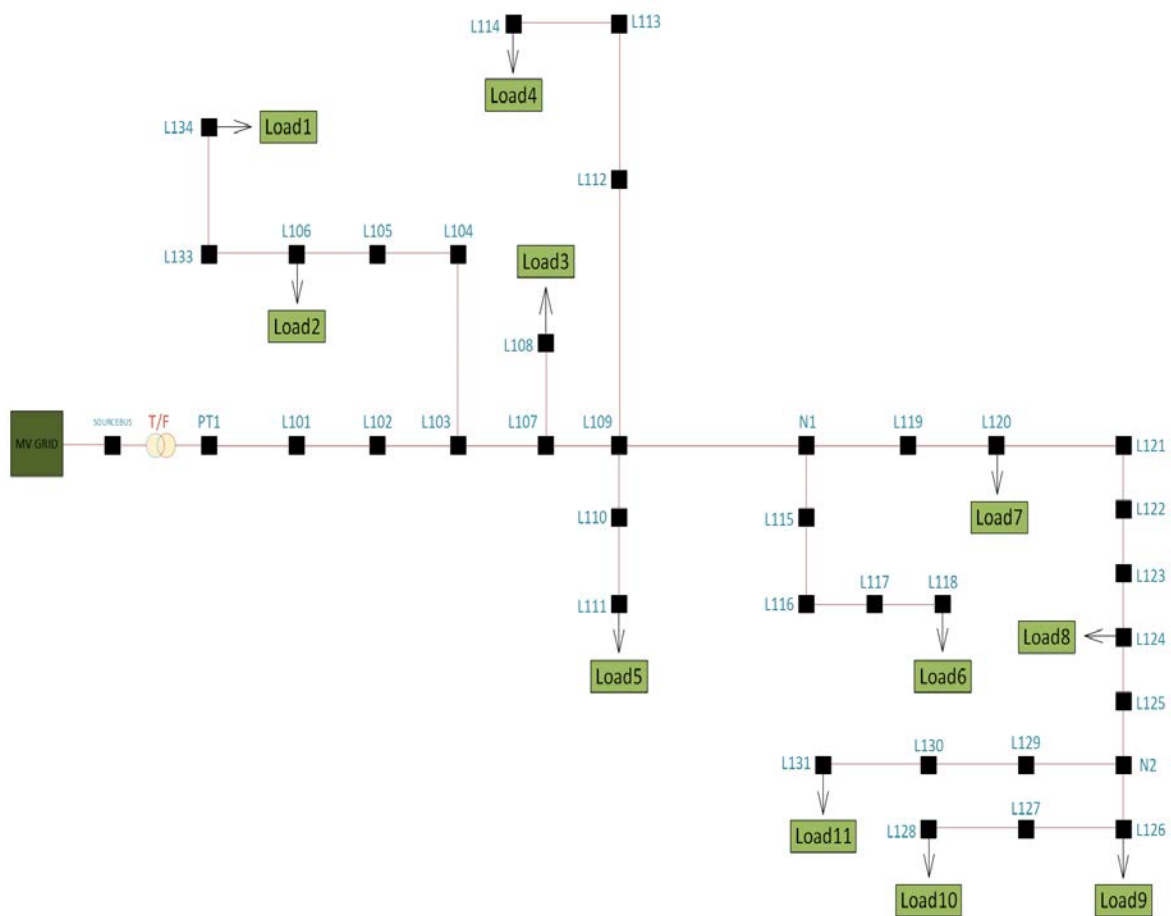
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το δίκτυο διανομής ΧΤ το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της μελέτης. Επίσης, παρουσιάζονται τα τυπικά προφίλ παραγωγής και φορτίου που υιοθετήθηκαν για τις ανάγκες των αναλύσεων και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των εξεταζόμενων ελέγχων και την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

3.1 Περιγραφή του δικτύου

Για όλες τις αναλύσεις και τα σενάρια που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο διανομής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Πρόκειται για ένα δίκτυο χαμηλής τάσης, το οποίο ακολουθεί τα πρότυπα λειτουργίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης και βρίσκεται στη Ρουμανία. Το δίκτυο αυτό περιλαμβάνει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η συχνότητα του δικτύου είναι 50 Hz.
- Αποτελείται από 36 ζυγούς.
- Περιλαμβάνει έναν τριφασικό μετασχηματιστή (Μ/Σ) υποβιβασμού 20 kV / 690 V, ισχύος 630 kVA. Τα τυλίγματα των Μ/Σ είναι συνδεδεμένα σε τρίγωνο στην πλευρά της υψηλής τάσης και σε γειωμένο αστέρα στην πλευρά της χαμηλής, ενώ η στροφή ανάμεσα στις τάσεις των δύο τυλιγμάτων είναι 330 μοίρες (συνδεσμολογία Dyn11).
- Οι γραμμές μεταφοράς του δικτύου είναι όλες του ίδιου τύπου και παρουσιάζουν λόγο $R/X = 0.215 / 0.334$ ανά χιλιόμετρο. Έτσι, η συνολική σύνθετη αντίσταση της κάθε γραμμής υπολογίζεται με βάση το μήκος της.

- Περιλαμβάνει 11 διαφορετικά φορτία, τα οποία παραμένουν σε σταθερές θέσεις σε όλα τα σενάρια που θα εξεταστούν. Η συνολική κατανάλωση κάθε φορτίου, καθώς και ο ζυγός στον οποίο συνδέεται, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Η θέση των φορτίων ταυτίζεται με αυτή που απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.1. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1, πρόκειται για ασύμμετρα τριφασικά φορτία. Οι τιμές που αναγράφονται είναι σε kW και kVA_r, για την πραγματική και την άεργο ισχύ αντίστοιχα.
- Περιλαμβάνει 7 διαφορετικά Φ/Β συστήματα. Η θέση των συστημάτων αυτών αλλάζει τυχαία σε κάθε διαφορετική τοπολογία που εξετάζεται. Η ονομαστική ισχύς τους δίνεται στον Πίνακα 3.2 (σε kW), ενώ οι 10 διαφορετικές τοπολογίες που θα εξεταστούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3. Τα Φ/Β συστήματα είναι τριφασικά και, σε αντίθεση με τα φορτία, συμμετρικά.



Σχήμα 3.1: Αρχική τοπολογία εξεταζόμενου δικτύου.

Πίνακας 3.1: Φορτία ανά φάση.

Φορτία	P_A (kW)	Q_A (kVAr)	P_B (kW)	Q_B (kVAr)	P_C (kW)	Q_C (kVAr)	Ζυγός
Load1	4.20	1.26	0.00	0.00	2.52	0.84	L134
Load2	5.88	1.68	2.52	0.84	5.04	1.68	L106
Load3	5.04	1.68	2.52	0.84	5.88	1.68	L108
Load4	5.04	1.68	4.20	1.26	5.04	1.68	L114
Load5	3.36	1.68	2.52	0.84	4.20	1.68	L111
Load6	2.52	0.84	0.84	0.42	3.36	1.68	L118
Load7	2.52	0.84	0.00	0.00	2.52	0.84	L120
Load8	2.52	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	L124
Load9	2.52	1.68	3.36	1.26	2.52	0.84	L126
Load10	2.52	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	L128
Load11	3.36	1.26	2.52	0.84	1.68	0.84	L131

Πίνακας 3.2: Ισχύς Φ/Β Συστημάτων.

PV	P (kW)
PV1	20.00
PV2	30.00
PV3	10.00
PV4	15.00
PV5	10.00
PV6	20.00
PV7	10.00

3.2 Παρουσίαση των προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης

Τόσο η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τα Φ/Β συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο, όσο και η κατανάλωσή της από τα φορτία που περιλαμβάνονται σε αυτό, είναι μεγέθη κυμαινόμενα τα οποία δεν παρουσιάζουν σταθερή τιμή. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το προφίλ παραγωγής που ακολουθείται από όλα τα Φ/Β συστήματα που περιέχονται στην εκάστοτε εξεταζόμενη τοπολογία. Με την ίδια λογική, στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το προφίλ κατανάλωσης που ακολουθείται από τα φορτία. Τα προφίλ αυτά ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν το

Πίνακας 3.3: Εξεταζόμενες Τοπολογίες.

Τοπολογία	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7
Grid 1	L129	L104	L121	L123	L125	L126	L127
Grid 2	L127	L129	L102	L128	L118	L101	L106
Grid 3	L117	L131	L130	L103	L129	L127	L112
Grid 4	L126	L102	L112	L128	L123	L127	L117
Grid 5	L121	L103	L122	N1	L106	L130	N2
Grid 6	N1	L127	L129	L120	L122	L121	L109
Grid 7	L127	L122	L108	L129	N1	L111	L119
Grid 8	L125	L107	L121	L119	L103	L101	L112
Grid 9	L133	L109	L117	L105	L122	L130	L113
Grid 10	L123	L129	L130	L116	L102	L133	L105

ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του εκάστοτε Φ/Β συστήματος ή φορτίου, που παράγεται ή καταναλώνεται αντίστοιχα. Συνεπώς, λαμβάνουν τιμές από 0 έως 1. Για παράδειγμα, εάν σε κάποια χρονική στιγμή το προφίλ παραγωγής είναι 1, τότε τα Φ/Β παράγουν ισχύ ίση με την ονομαστική τους, ενώ αν είναι 0.75, παράγουν το 75% αυτής.

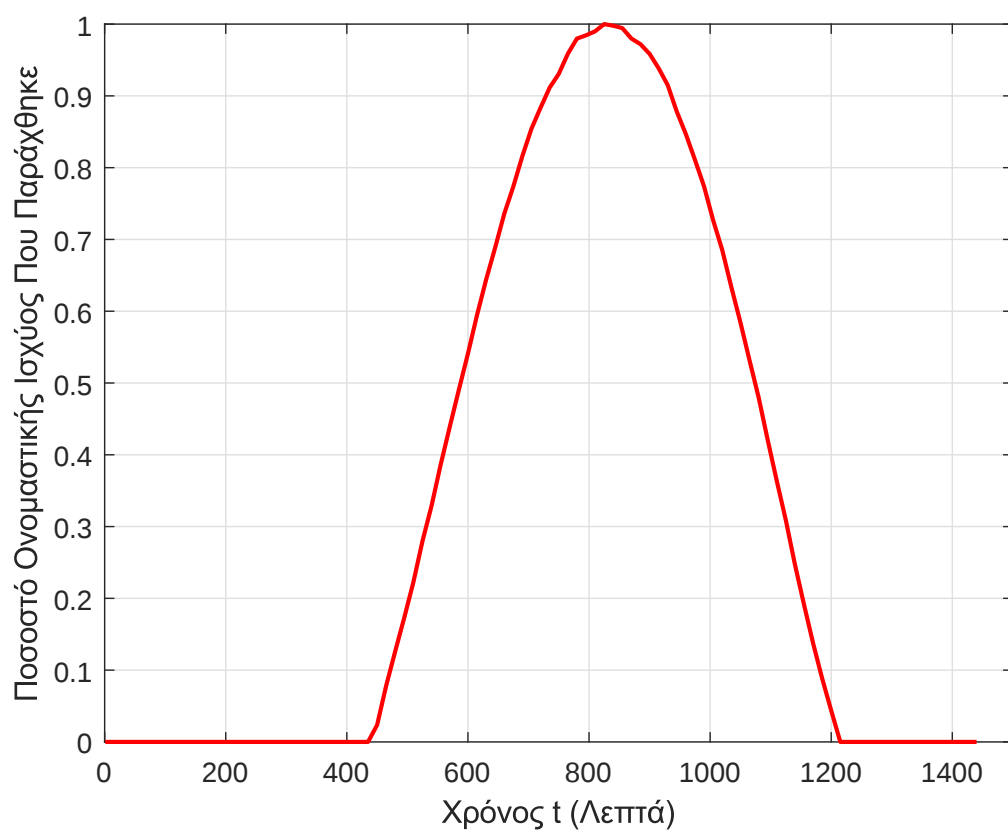
Τα προφίλ που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία είναι απλά, τυπικά προφίλ που συνιστώνται για ανάλογες μελέτες. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό τόσο την παραγωγή όσο και τη ζήτηση (συνοπτική παρουσίαση αυτών γίνεται στον Πίνακα 3.4). Ξεκινώντας από τη ζήτηση, η τιμή του προφίλ μπορεί να επηρεαστεί από οικονομικούς παράγοντες, όπως το είδος του καταναλωτή (στην παρούσα εργασία εξετάζονται οικιακοί καταναλωτές), αλλά και από τα καιρικά φαινόμενα, καθώς η κατανάλωση διαφέρει σε μία βροχερή ημέρα ή σε ημέρα με υψηλή θερμοκρασία. Επιπλέον, ο τύπος της ημέρας (καθημερινή ή Σαββατοκύριακο) και η εποχή παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση. Οι καταναλωτές λειτουργούν διαφορετικά στις εργάσιμες ημέρες σε σχέση με τα Σαββατοκύριακα, ενώ οι ανάγκες τους μεταβάλλονται τον χειμώνα και το καλοκαίρι. Τέλος, η ώρα της ημέρας αλλά και η τιμή της kWh μπορούν επίσης να επηρεάσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας [26].

Από την άλλη πλευρά, πολλοί παράγοντες επηρεάζουν και το προφίλ παραγωγής που ακολουθούν τα Φ/Β συστήματα. Η παραγωγή τους αποτελεί συνάρτηση της γεωγραφικής τοποθέτησης και του προσανατολισμού τους, της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, της

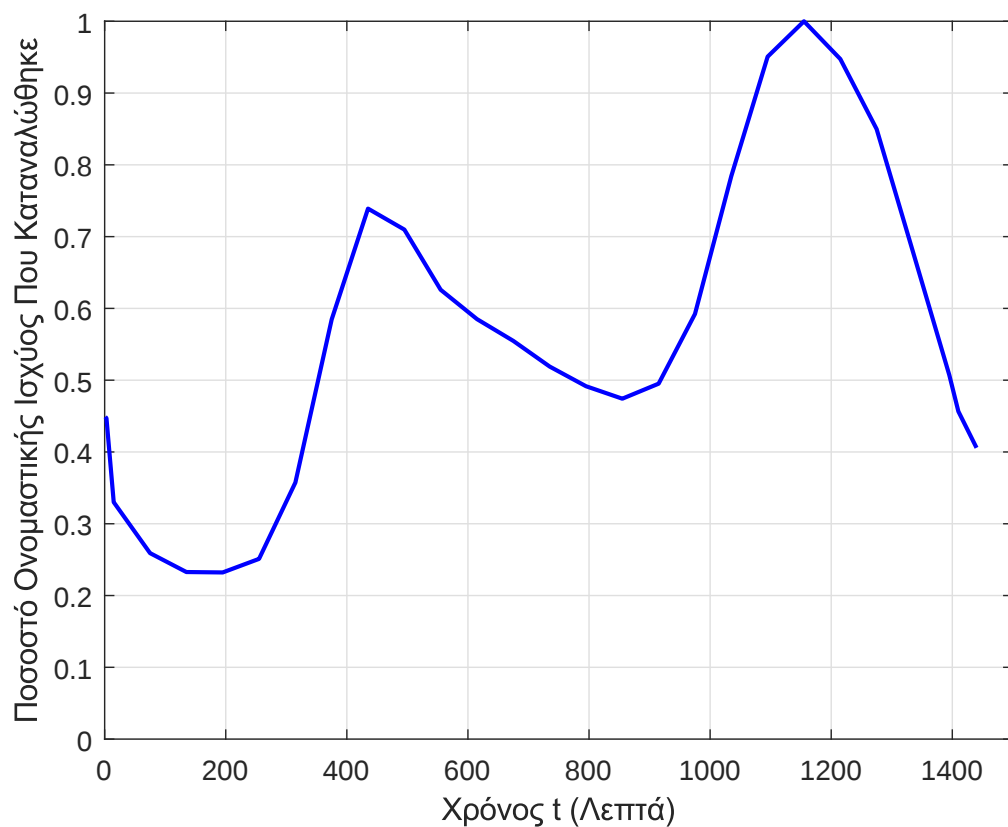
θερμοκρασίας του αέρα, καθώς και το πιο σημαντικό, των χαρακτηριστικών όλων των τμημάτων που αποτελούν το Φ/Β σύστημα (π.χ. πάνελ ή inverter) [27]. Όπως είναι λογικό, εκτός από αυτά, καθοριστικό ρόλο παίζουν η χρονική περίοδος της ημέρας ή η εποχή του έτους και τα καιρικά φαινόμενα, τα οποία επηρεάζουν άμεσα όλους τους παραπάνω παράγοντες. Ωστόσο, οι παράγοντες που προαναφέρθηκαν δεν λαμβάνονται υπόψη στην συγκεκριμένη εργασία.

Πίνακας 3.4: Παράγοντες που επηρεάζουν ζήτηση και παραγωγή Φ/Β.

Κατηγορία	Ζήτηση	Παραγωγή Φ/Β
Καιρικοί	Θερμοκρασία, βροχή, καύσωνας	Ηλιακή ακτινοβολία, νεφοκάλυψη, θερμοκρασία
Χρονικοί	Ώρα, τύπος ημέρας, εποχή	Διάρκεια ημέρας, εποχή
Οικονομικοί	Τιμή kWh, είδος καταναλωτή	Έμμεση επίδραση (διαστασιολόγηση)
Τεχνικοί	Ικανότητα δικτύου	Απόδοση πάνελ και inverter, προσανατολισμός



Σχήμα 3.2: Προφίλ Παραγωγής.



Σχήμα 3.3: Προφίλ Κατανάλωσης.

3.3 Λογισμικά διεξαγωγής προσομοιώσεων

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εφαρμογές: Open Distribution System Simulator (OpenDSS) και Matlab [28], [29]. Το OpenDSS αποτελεί ένα open-source λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται για προσομοιώσεις και αναλύσεις συστημάτων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση του καθίσταται ευκολότερη όταν συνδυάζεται, μέσω του COM interface, με άλλες γλώσσες προγραμματισμού και εφαρμογές, όπως το Matlab. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας το OpenDSS χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή αναλύσεων ροής ισχύος σε ασύμμετρα δίκτυα XT.

Η έκδοση του Matlab που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η R2023b. Το περιβάλλον του Matlab χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση όλων των ελέγχων τάσης, καθώς και για την "οδήγηση" του OpenDSS με διαφορετικές τιμές για τα φορτία και την παραγωγή.

Το Matlab, λοιπόν, αποστέλλει τα δεδομένα της τοπολογίας για κάθε εξεταζόμενη χρονική στιγμή στο OpenDSS, το οποίο με τη σειρά του αναλαμβάνει να επιλύσει τη ροή ισχύος. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής ισχύος επιστρέφονται από το OpenDSS στο Matlab, όπου επεξεργάζονται και αναλύονται.

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει με συνοπτικό τρόπο τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου τάσης και για τη μελέτη της επίδρασης αυτών στη μέγιστη διείσδυση Φ/Β συστημάτων σε δίκτυα διανομής ΧΤ.

4.1 Βασική ιδέα

Οι προσομοιώσεις έχουν χωριστεί σε 4 διαφορετικά σενάρια. Κριτήριο διαχωρισμού τους αποτελεί η ύπαρξη ή μη κάποιας στρατηγικής ελέγχου για τη ρύθμιση της τάσης. Έτσι, δημιουργούνται 4 διακριτά μεταξύ τους σενάρια. Πιο συγκεκριμένα:

- Σενάριο 1: στο πρώτο σενάριο δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος τάσης.
- Σενάριο 2: στο δεύτερο σενάριο υλοποιείται ο έλεγχος $P(\cos\phi)$.
- Σενάριο 3: στο τρίτο σενάριο εφαρμόζεται ο έλεγχος $Q(V)$.
- Σενάριο 4: στο τέταρτο σενάριο αξιοποιείται ο έλεγχος $P(V)$.

Κάθε διαφορετικό σενάριο αποτελείται από 40 προσομοιώσεις. Αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο αξιολόγησης του φαινομένου της υπέρτασης. Στις 20 πρώτες, η υπέρταση αξιολογείται σε επίπεδο φάσης, δηλαδή εξετάζεται κάθε φάση σε κάθε ζυγό ξεχωριστά μέχρι να εντοπιστεί υπέρταση. Στην δεύτερη υποκατηγορία, η αξιολόγηση γίνεται με βάση την τάση θετικής ακολουθίας σε κάθε ζυγό του δικτύου.

Κάθε κατηγορία όπως ήδη αναφέρθηκε περιλαμβάνει 20 προσομοιώσεις. Αυτές χωρίζονται περαιτέρω σε δύο υποκατηγορίες. Στην πρώτη υποκατηγορία η μέγιστη δυνατή διείσδυση Φ/Β συστημάτων αξιολογείται μέσω μιας μοναδικής ροής ισχύος. Όπως ήδη έχει αναλυθεί, σε αυτή την περίπτωση θεωρείται μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β συστήματα και ελάχιστο φορτίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο η μέγιστη τιμή για την παραγωγή, όσο και η ελάχιστη για το φορτίο, αντιπροσωπεύουν την μέγιστη και ελάχιστη τιμή των προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης, που χρησιμοποιούνται για την ημερήσια ανάλυση, αντίστοιχα. Στην δεύτερη υποκατηγορία η μέγιστη δυνατή διείσδυση Φ/Β συστημάτων αξιολογείται με τη βοήθεια ημερήσιων αναλύσεων ισχύος. Οι αναλύσεις αυτές πραγματοποιούνται σε επίπεδο λεπτού χρησιμοποιώντας τα τυπικά προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

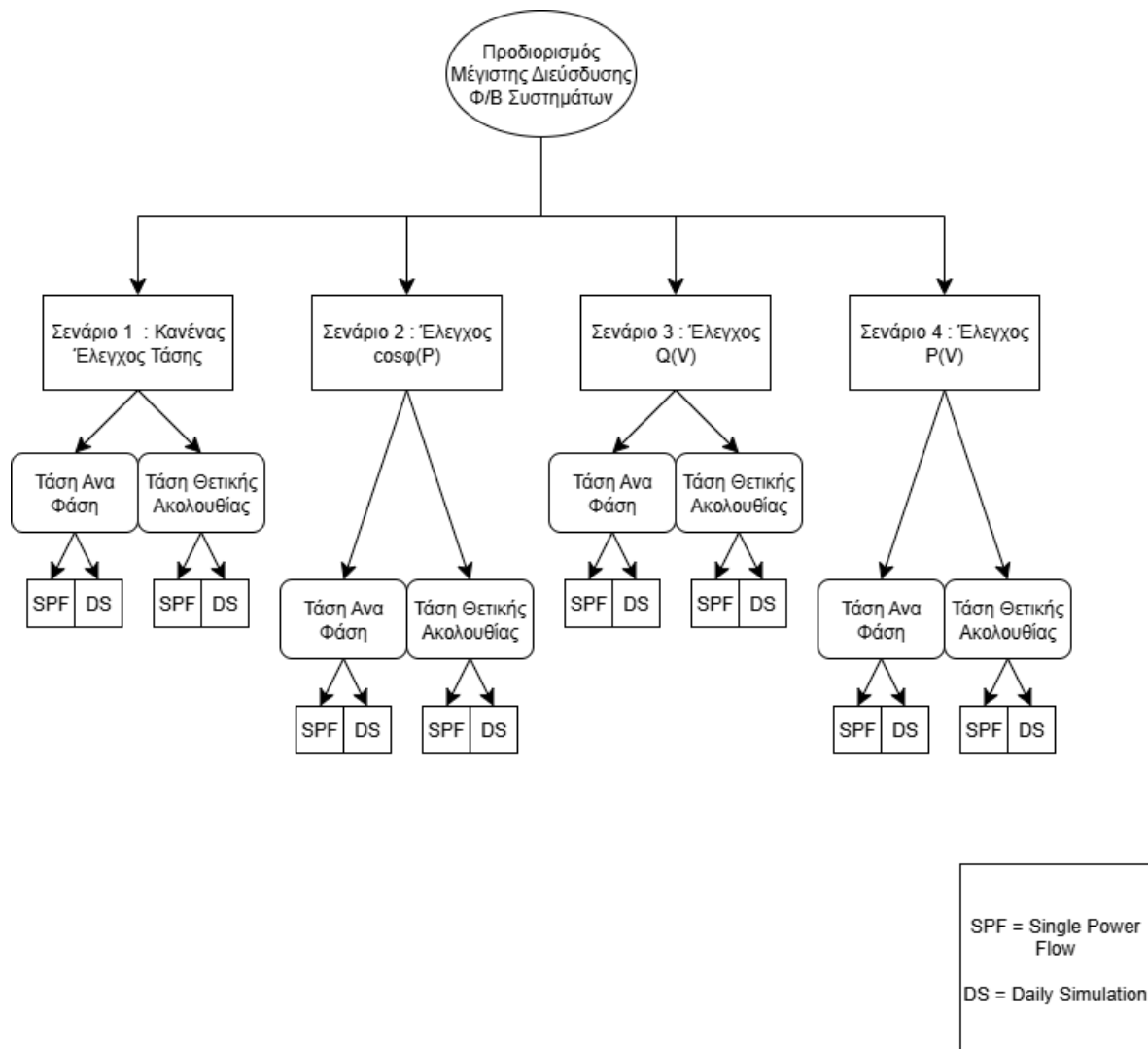
Συνοπτικά, όλα τα εξεταζόμενα σενάρια και οι προσομοιώσεις που διεξάγονται παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1.

Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων, ακολουθείται η διαδικασία που αναλύεται στις επόμενες παραγράφους. Οι ιδιαιτερότητες στην μοντελοποίηση των μηχανισμών ελέγχου τάσης αναλύονται στα υποκεφάλαια 4.2 - 4.4.

Στην αρχή κάθε προσομοίωσης θεωρείται για τα Φ/Β η ισχύς που δίνεται στον Πίνακα 3.2. Στην συνέχεια, ανάλογα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα, η ισχύς αυξάνεται, μειώνεται ή παραμένει σταθερή. Το κριτήριο για την αλλαγή της είναι η τιμή της τάσης. Εάν πρόκειται για την περίπτωση που η τάση αξιολογείται σε επίπεδο φάσης, εξετάζεται κάθε φασική τάση για κάθε ζυγό ξεχωριστά. Σε διαφορετική περίπτωση, υπολογίζεται η θετική ακολουθία της τάσης με βάση της φασικές τάσεις σε κάθε ζυγό και στην συνέχεια αξιολογείται.

Στην απλή ροή φορτίου, αν όλες οι τιμές βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων (>0.95 p.u. για το φαινόμενο της υπότασης και <1.05 για το φαινόμενο της υπέρτασης) η ισχύς των Φ/Β συστημάτων αυξάνεται. Αν έστω μια τιμή ξεπερνάει τα όρια τότε αυτή η ισχύς μειώνεται. Όταν ακριβώς μια τιμή ισούται με το όριο (άνω ή κάτω) και όλες οι υπόλοιπες είναι εντός του διαστήματος των επιτρεπόμενων τιμών, τότε η ισχύς μένει στάσιμη. Η ισχύς αυτή είναι και η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να εγκατασταθεί στο δίκτυο.

Στην ημερήσια ανάλυση οι τιμές της τάσης δεν αξιολογούνται στιγμιαία, αλλά στο σύνολο ολόκληρου του 24ώρου. Έτσι, για να θεωρηθεί απαγορευτική μια τιμή ισχύος, δεν αρκεί να προκαλεί στιγμιαία υπέρβαση των ορίων, αλλά πρέπει η τάση να ξεπερνά ή να ισούται με τα όρια για περισσότερα από 10 συνεχόμενα λεπτά μέσα στην μέρα. Συνεπώς, η μέγιστη



Σχήμα 4.1: Κατηγοριοποίηση προσομοιώσεων

δυνατή διείσδυση εντοπίζεται όταν η υπέρταση (ή η υπόταση) διατηρείται για ακριβώς 10 λεπτά.

Τα τελικά αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 5 δεν θα είναι οι απόλυτες τιμές ισχύος που υπολογίστηκαν, αλλά το ποσοστό της αρχικής ονομαστικής ισχύος που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2.

4.2 Σενάριο 1 - Κανένας Έλεγχος Τάσης

Στο Σενάριο 1 δεν εφαρμόζεται κάποια ιδιαίτερη μοντελοποίηση, αφού δεν εφαρμόζεται και καμία τεχνική ελέγχου τάσης. Το μόνο στοιχείο που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι σε όλα τα Φ/Β συστήματα οι μετατροπείς έχουν ΣΙ ίσο με την μονάδα.

4.3 Σενάριο 2 - Έλεγχος $\cos\phi(P)$

Στο Σενάριο 2 μοντελοποιείται ο μηχανισμός που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Πρόκειται για τον μηχανισμό $\cos\phi(P)$, ιδιαίτερη σημασία για την λειτουργία του μηχανισμού έχει κάθε στιγμή το προφίλ παραγωγής. Αυτό αποτελεί το βασικό κριτήριο για την ρύθμιση του ΣΙ και κατά συνέπεια τον υπολογισμό της αέργου ισχύος που θα απορροφάται από το δίκτυο.

Στο σενάριο αυτό, διατηρείται η απόλυτη συμμετρία στην ενεργό και την άεργο ισχύ που προσφέρουν στο δίκτυο τα Φ/Β συστήματα. Το γεγονός αυτό βασίζεται στον τρόπο λειτουργίας του μηχανισμού, αφού αυτός βασίζεται μόνο στο ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του συστήματος που παράγεται ανά πάσα στιγμή και όχι στην τάση του δικτύου.

4.4 Σενάριο 3 - Έλεγχος $Q(V)$

Στο Σενάριο 3 εφαρμόζεται ο έλεγχος $Q(V)$. Ο έλεγχος αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2. Η υλοποίηση του παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες λόγω του τρόπου λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, το ποσό της αέργου ισχύος που εγχέεται κάθε στιγμή στο δίκτυο εξαρτάται από την τάση σε εκείνο το σημείο του δικτύου. Ωστόσο, η τάση στο εκάστοτε σημείο του δικτύου εξαρτάται και από την άεργο ισχύ που απορροφάται. Για την υλοποίηση, λοιπόν, αυτού του ελέγχου εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία στο περιβάλλον του , όπου η απαιτούμενη άεργος ισχύς προσδιορίζεται επαναληπτικά με βάση τις τάσεις που υπολογίζονται σε διαδοχικές ροές ισχύος.

Επιπλέον σε αυτό το σενάριο ακολουθούνται δύο διαφορετικές υλοποιήσεις ανάλογα με το αν η υπέρταση αξιολογείται σε επίπεδο φάσης ή με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας. Και στις δύο περιπτώσεις η παραγωγή της ενεργού ισχύος από τα Φ/Β συστήματα παραμένει αμετάβλητη. Ωστόσο, η άεργος ισχύς που απορροφάται μεταβάλλεται σημαντικά καθώς διαφέρει η τάση με τη βοήθεια της οποίας αυτή προσδιορίζεται. Πιο συγκεκριμένα, ο μηχανισμός λειτουργεί με αναφορά την τάση του δικτύου στο σημείο διασύνδεσης του Φ/Β συστήματος. Λόγω των ασύμμετρων φορτίων, οι φασικές τάσεις παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους. Έτσι, όταν η αξιολόγηση γίνεται σε επίπεδο φάσης, ο μηχανισμός λαμβάνει υπόψη την τιμή της τάσης σε κάθε φάση ξεχωριστά, με αποτέλεσμα η άεργος ισχύς που απορροφάται σε κάθε φάση να διαφέρει. Αντίθετα, όταν η αξιολόγηση γίνεται με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας, ο μηχανισμός λειτουργεί με αναφορά σε αυτήν και η προκύπτουσα άεργος ισχύς κατανέμεται ισόποσα στις τρεις φάσεις.

4.5 Σενάριο 4 - Έλεγχος $P(V)$

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μηχανισμού ελέγχου τάσης γινόταν με βάση την μέγιστη δυνατή διείσδυση (τη μέγιστη τιμή εγκατεστημένης ισχύος). Στο Σενάριο 4, επειδή ο έλεγχος τάσης $P(V)$ επηρεάζει απ' ευθείας την τιμή της ενεργού ισχύος, κρίνεται σκόπιμο η αξιολόγηση του μηχανισμού να πραγματοποιηθεί με βάση τη συνολική παραγόμενη ενέργεια. Αυτό θα συμβεί διότι ακόμα και αν η ονομαστική ισχύς φαίνεται εξαιρετικά υψηλή, ο μηχανισμός μπορεί να έχει επηρεάσει σημαντικά την αξιοποίηση των διαθέσιμων συστημάτων.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, για την υλοποίηση του ελέγχου $P(V)$ εφαρμόζεται μια επαναληπτική διαδικασία στο περιβάλλον του , όπου η εγχεόμενη ενεργός ισχύς προσδιορίζεται επαναληπτικά με βάση τις τάσεις που υπολογίζονται σε διαδοχικές ροές ισχύος. Όταν η στρατηγική ελέγχου εφαρμόζεται με βάση τις φασικές τάσεις, τότε η παραγωγή των Φ/B συστημάτων παύει να είναι συμμετρική. Αντίθετα, στην περίπτωση που η στρατηγική ελέγχου εφαρμόζεται με βάση την τάση θετικής ακολουθίας, τότε η παραγωγή παραμένει απολύτως συμμετρική. Σε κάθε περίπτωση, η άεργος ισχύς των Φ/B συστημάτων είναι μηδενική.

Κεφάλαιο 5

Αριθμητικά αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα εξαγόμενα από τις προσομοιώσεις αποτελέσματα. Για κάθε διαφορετικό σενάριο θα υπάρχουν 2 ξεχωριστοί πίνακες. Ο πρώτος θα αφορά πάντα την αξιολόγηση της τάσης σε φασικό επίπεδο, ενώ ο δεύτερος την αξιολόγηση της σε επίπεδο θετικής ακολουθίας.

Αρχικά, για κάθε εξεταζόμενη τοπολογία θα παρουσιάζεται το ποσοστό της αρχικής ονομαστικής ισχύος που παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2, το οποίο αποτελεί την μέγιστη δυνατή ισχύ των Φ/Β συστημάτων για την συγκεκριμένη τοπολογία. Επιπλέον, θα παρουσιάζεται ο λόγος για τον οποίον θεωρείται αυτή η μέγιστη τιμή. Αυτός μπορεί να είναι η εμφάνιση υπέρτασης ή υπότασης σε κάποιο ζυγό του δικτύου ή εμφάνιση αστάθειας τάσης (μη δυνατότητα σύγκλισης της ροής ισχύος). Το ποσοστό αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη μαθηματική έκφραση

$$\text{Ποσοστό} = \frac{\text{Άθροισμα Νέων Ονομαστικών Ισχύων Φ/Β Συστημάτων}}{\text{Άθροισμα Αρχικών Ονομαστικών Ισχύων Φ/Β Συστημάτων}} * 100\%$$

Ακόμη έπειτα από την παρουσίαση των πινάκων τα ακολουθεί η σχηματική τους απεικόνιση με την μορφή ραβδοδιαγραμμάτων.

Επιπλέον, θα παρουσιάζονται τα προφίλ τάσης του δικτύου σε ζυγούς με υπέρταση ή υπόταση σε τυχαίες τοπολογίες, ώστε να δίνεται μία καλύτερη εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας των μηχανισμών ελέγχου τάσης που εξετάστηκαν. Θα παρουσιάζονται συγκεκριμένα οι φασικές τάσεις αλλά και η τάση θετικής ακολουθίας. Στην περίπτωση που ο ζυγός διαφοροποιείται ανάμεσα στην αξιολόγηση με βάση τις φασικές τάσεις και την τάση θετικής ακολουθίας θα παρουσιάζονται τα προφίλ και των 2 ζυγών.

Επίσης, για κάθε σενάριο παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που κρίνονται απαραίτητα για την αξιολόγηση των εξεταζόμενων ελέγχων. Επίσης, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση όλων των σεναρίων και των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου τάσης.

5.1 Σενάριο 1 - Αποτελέσματα

Το Σενάριο 1 αποτελεί το πιο απλό σενάριο, αφού σε αυτό δεν υλοποιείται καμία τεχνική ελέγχου τάσης. Σκοπός αυτού του σεναρίου είναι να συγκριθεί η μέθοδος ανάλυσης (στιγμιαία ανάλυση) που χρησιμοποιείται ευρέως από τους διαχειριστές των δικτύων διανομής για τον υπολογισμό της μέγιστης επιτρεπτής διείσδυσης Φ/Β στο δίκτυο, με την ημερήσια ανάλυση.

Επιπλέον, το σενάριο αυτό θα αποτελέσει τη βάση για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επόμενων σεναρίων. Στους Πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Σεναρίου 1.

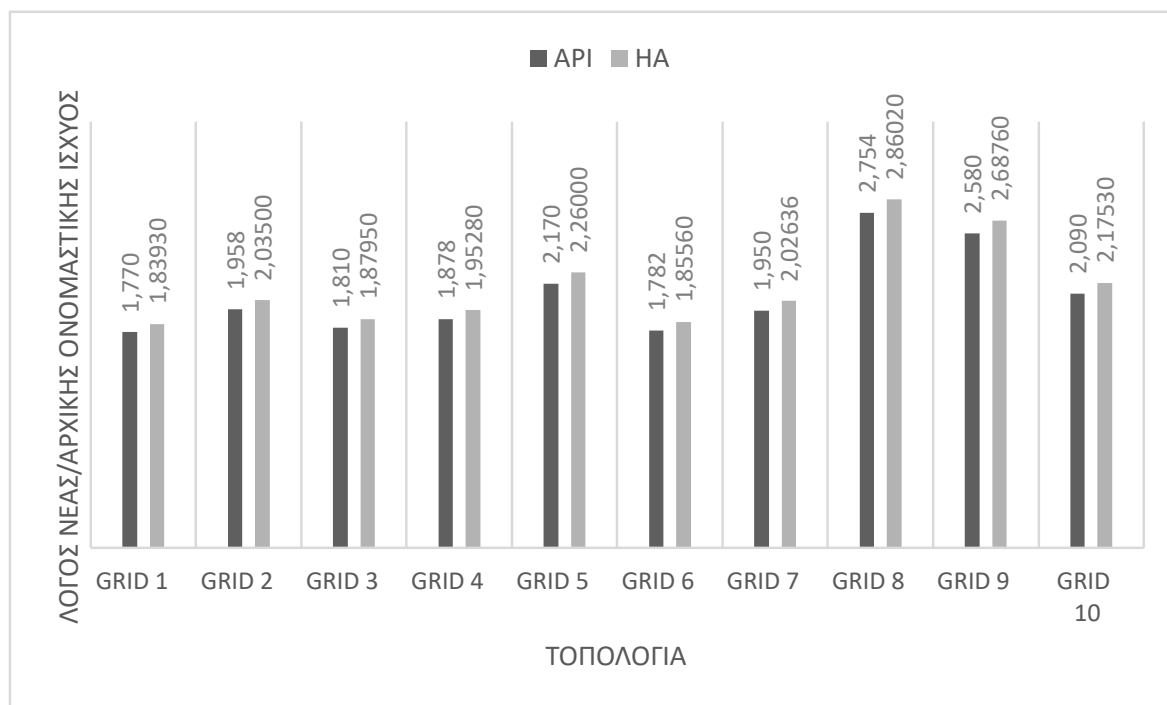
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα Σεναρίου 1. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	177	Υπέρταση	183.93	Υπέρταση
Grid 2	195.8	Υπέρταση	203.5	Υπέρταση
Grid 3	181	Υπέρταση	187.95	Υπέρταση
Grid 4	187.8	Υπέρταση	195.28	Υπέρταση
Grid 5	217	Υπέρταση	226	Υπέρταση
Grid 6	178.2	Υπέρταση	185.56	Υπέρταση
Grid 7	195	Υπέρταση	202.63	Υπέρταση
Grid 8	275.4	Υπέρταση	286.02	Υπέρταση
Grid 9	258	Υπέρταση	258.76	Υπέρταση
Grid 10	209	Υπέρταση	217.53	Υπέρταση

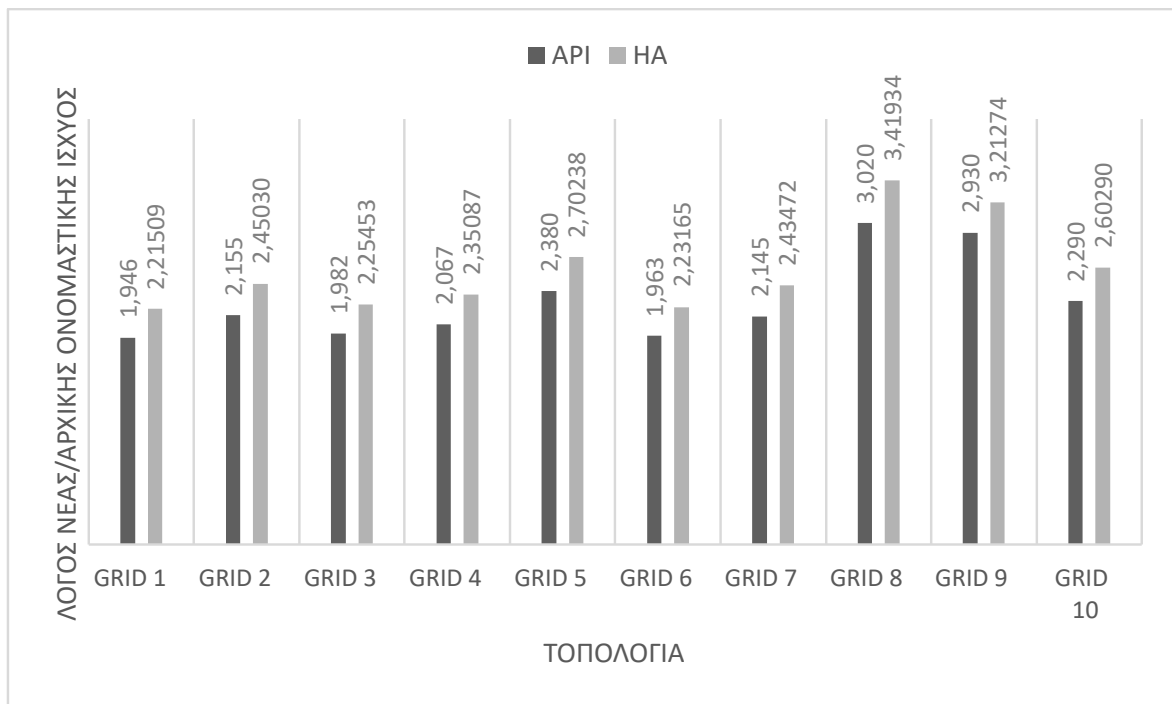
Πέρα από τα στοιχεία που απεικονίζονται στους πίνακες αξιοσημείωτα είναι και τα ακόλουθα αποτελέσματα: Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση της αξιολόγησης του

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα Σεναρίου 1. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	194.6	Υπέρταση	221.5	Υπέρταση
Grid 2	215.5	Υπέρταση	245.03	Υπέρταση
Grid 3	198.2	Υπέρταση	225.45	Υπέρταση
Grid 4	206.7	Υπέρταση	235.08	Υπέρταση
Grid 5	238	Υπέρταση	270.23	Υπέρταση
Grid 6	196.3	Υπέρταση	223.16	Υπέρταση
Grid 7	214.5	Υπέρταση	243.47	Υπέρταση
Grid 8	302	Υπέρταση	341.93	Υπέρταση
Grid 9	283	Υπέρταση	321.27	Υπέρταση
Grid 10	229	Υπέρταση	260.29	Υπέρταση



Σχήμα 5.1: Σενάριο 1. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και ΗΑ με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.



Σχήμα 5.2: Σενάριο 1. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

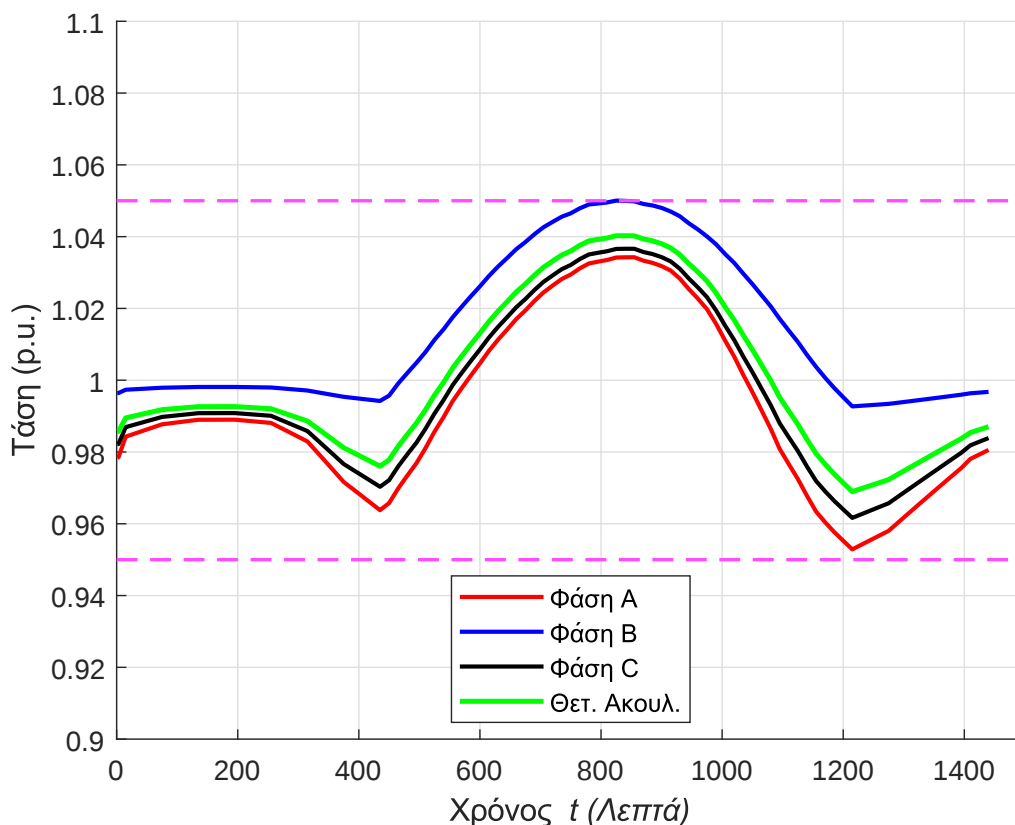
φαινομένου της υπέρτασης με βάση τις φασικές τάσεις, η υπέρταση παρουσιάστηκε πάντα στην φάση B. Το γεγονός αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τα φορτία του δικτύου, αφού όπως παρατηρείται στον Πίνακα 3.1 τα φορτία που συνδέονται στη φάση B καταναλώνουν την λιγότερη ενεργό ισχύ (συγκριτικά με τα φορτία των άλλων φάσεων). Επομένως, είναι λογικό η υπέρταση να εμφανίζεται στην φάση B.

Συνεχίζοντας, στις 6 από τις 10 εξεταζόμενες τοπολογίες η υπέρταση εμφανίστηκε στους ζυγούς L127 και L128, ενώ ακολουθούν οι ζυγοί L130 και L131 με 4 εμφανίσεις, ενώ παρατηρείται και μια εμφάνιση στο ζυγό L125. Το γεγονός αυτό βασίζεται στην τοπολογία του δικτύου και την τοποθέτηση των Φ/Β συστημάτων μέσα σε αυτό.

Όπως φαίνεται από τα ραβδοδιαγράμματα των Σχημάτων 5.1 και 5.2 τόσο όταν η αξιολόγηση γίνεται σε επίπεδο φάσης, όσο και όταν αυτή γίνεται σε επίπεδο θετικής ακολουθίας, η διείσδυση των Φ/Β συστημάτων παρατηρείται αυξημένη στην ημερήσια ανάλυση σε σχέση με την απλή ροή φορτίου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των φασικών τάσεων η μέση αύξηση μεταξύ στιγμιαίας ανάλυσης και ημερήσιας είναι κοντά στο 4%, ενώ στην περίπτωση της θετικής ακολουθίας και η τιμή φτάνει το 13.61%. Συνεπώς, ο αρχικός ισχυρισμός που πραγματοποιείται στην εισαγωγή σχετικά με την προσέγγιση που χρησιμοποιούν οι διαχειριστές των δικτύων για την εύρεση της μέγιστης δυνατής διείσδυσης των Φ/Β συστημάτων

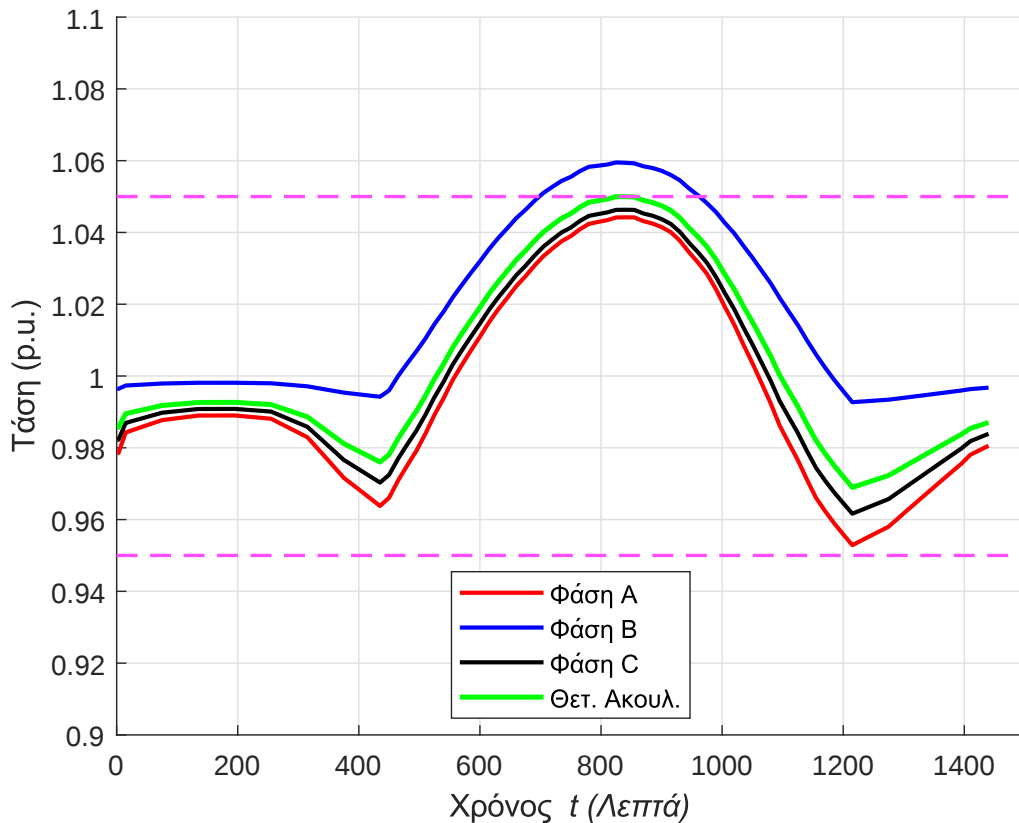
στο δίκτυο είναι σωστός. Πράγματι, όπως αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα, η συμβατική προσέγγιση που στηρίζεται σε μια απλή (μεμονωμένη) ροή ισχύος αποτελεί μια συντηρητική μέθοδο η οποία περιορίζει την εγκατεστημένη ισχύ Φ/B συστημάτων σε δίκτυα XT.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι φασικές τάσεις και η τάση θετικής ακολουθίας για τον ζυγό L128, της τοπολογίας 1. Στο Σχήμα 5.3 έχει προβλεφθεί εγκατεστημένη ισχύ ίση με αυτή που έχει υπολογιστεί με γνώμονα τις φασικές τάσεις, ενώ στο Σχήμα 5.4 αυτή που έχει υπολογιστεί με βάση την θετική ακολουθία της τάσης.



Σχήμα 5.3: Σενάριο 1. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.

Στην περίπτωση αξιολόγησης των επιπέδων τάσης με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας τα αποτελέσματα που περιγράφουν την μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ φαίνεται να είναι καλύτερα. Ωστόσο, παρατηρώντας προσεκτικά το δεύτερο σχήμα γίνεται εύκολα αντιληπτό πως ακόμα και αν η τιμή της θετικής ακολουθίας βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων, η τιμή της τάσης στην φάση Β βρίσκεται έξω από αυτά. Επομένως, η επιλογή ανάμεσα σε έλεγχο των φασικών τάσεων ή των τιμών της θετικής ακολουθίας έχει σημαντικό αντίκτυπο στη λειτουργία του δικτύου. Αφενός, η επιλογή τους επηρεάζει σημαντικά την μέγιστη



Σχήμα 5.4: Σενάριο 1: Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.

διείσδυση των Φ/Β συστημάτων, αφετέρου επιλέγοντας για παράδειγμα την περίπτωση του ελέγχου των τιμών της θετικής ακολουθίας φαίνεται να οδηγούμαστε σε σημαντικές φασικές υπερτάσεις.

5.2 Σενάριο 2 - Αποτελέσματα

Στο Σενάριο 2 έχουμε την εφαρμογή του πρώτου εξεταζόμενου ελέγχου, του ελέγχου $\cos\phi(P)$. Πρόκειται για τον ευκολότερο να προσομοιωθεί έλεγχο, ενώ τα αποτελέσματα του αναμένεται να αποδείξουν σημαντικές αδυναμίες της συμβατικής προσέγγισης υπολογισμού μέγιστης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων που στηρίζεται σε μια απλή ροή ισχύος, της συμβατικής δηλαδή προσέγγισης που χρησιμοποιείται σήμερα από τους περισσότερους διαχειριστές.

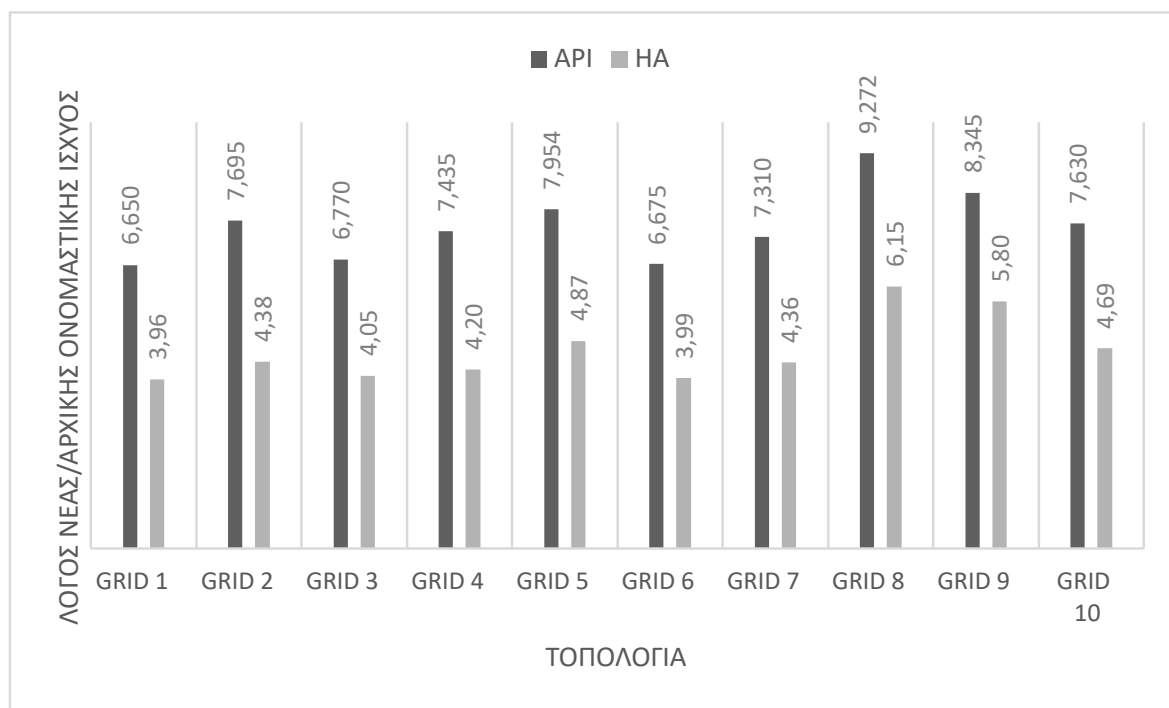
Στους Πίνακες 5.3 και 5.4 που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στην συνέχεια ακολουθεί η διαγραμματική απεικόνιση αυτών.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα Σεναρίου 2. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.

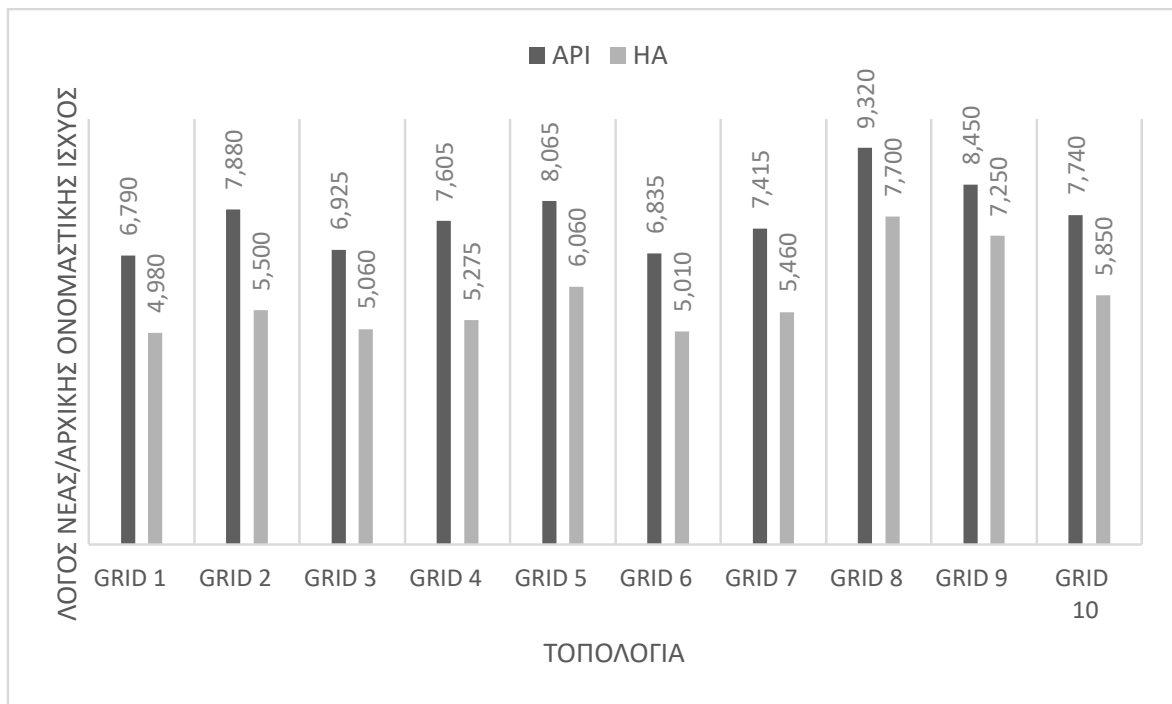
Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	665	Υπόταση	396	Υπέρταση
Grid 2	769.5	Υπόταση	438	Υπέρταση
Grid 3	677	Υπόταση	405	Υπέρταση
Grid 4	743.5	Υπόταση	420	Υπέρταση
Grid 5	795.4	Υπόταση	487	Υπέρταση
Grid 6	628	Υπόταση	399.2	Υπέρταση
Grid 7	731	Υπόταση	436	Υπέρταση
Grid 8	927.2	Υπόταση	615	Υπέρταση
Grid 9	843.5	Υπόταση	580	Υπέρταση
Grid 10	763	Υπόταση	469	Υπέρταση

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα Σεναρίου 2. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	679	Υπόταση	498	Υπέρταση
Grid 2	788	Υπόταση	550	Υπέρταση
Grid 3	692.5	Υπόταση	506	Υπέρταση
Grid 4	760.5	Υπόταση	527.5	Υπέρταση
Grid 5	806.5	Υπόταση	606	Υπέρταση
Grid 6	683.5	Υπόταση	501	Υπέρταση
Grid 7	741.5	Υπόταση	546	Υπέρταση
Grid 8	932	Υπόταση	770	Υπέρταση
Grid 9	845	Υπόταση	725	Υπέρταση
Grid 10	774	Υπόταση	585	Υπέρταση



Σχήμα 5.5: Σενάριο 2. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και ΗΑ με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.

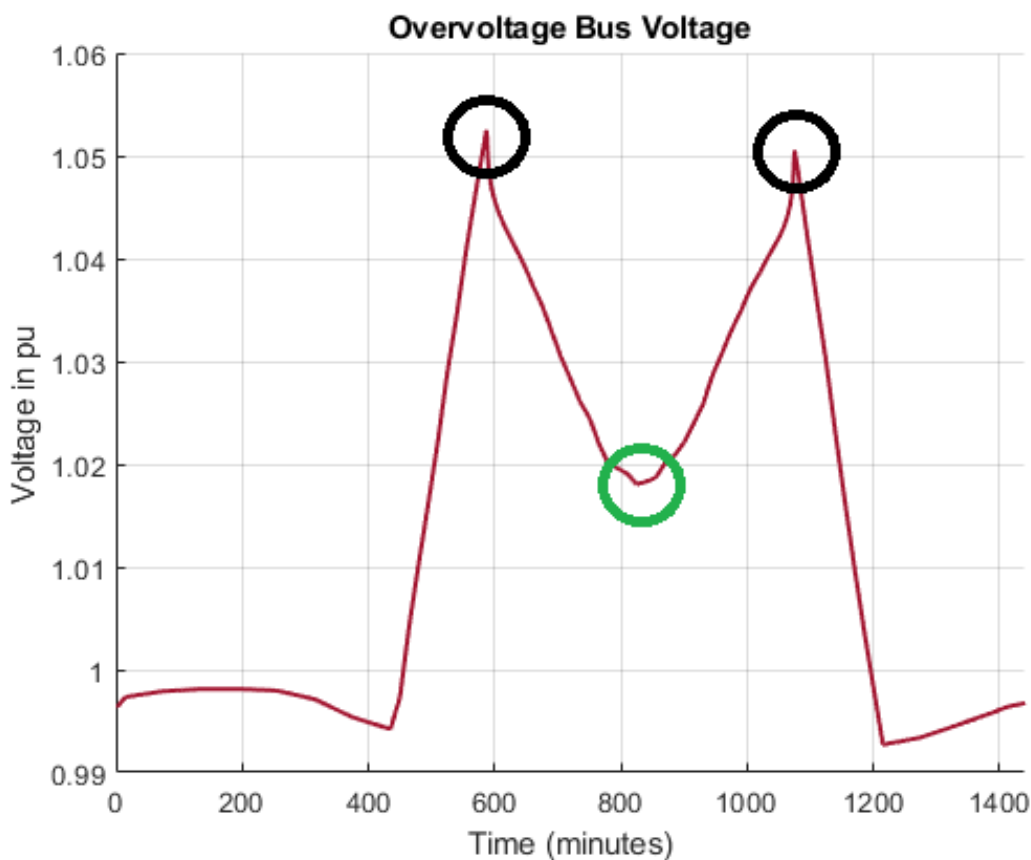


Σχήμα 5.6: Σενάριο 2. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι όπως και στο προηγούμενο σενάριο οι υπερτάσεις έλαβαν χώρα στην φάση Β, αντίθετα οι υποτάσεις συναντώνται στην φάση C. Το γεγονός αυτό παραμένει συνδεδεμένο με τα φορτία τα οποία χρησιμοποιούνται. Οι υπερτάσεις της φάσης Β οφείλονται στο γεγονός πως η ενεργός ισχύς των φορτίων στην συγκεκριμένη φάση είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την φάση Α ή φάση C. Αντίστοιχα, οι υποτάσεις της φάσης C βασίζονται στην επαγωγική συνιστώσα των φορτίων. Αν και η φάση Α παρουσιάζει μεγαλύτερο συνολικό επαγωγικό φορτίο, αυτό είναι κατανομημένο σχεδόν ομοιόμορφα ανάμεσα στα επιμέρους φορτία. Στην φάση C όμως που παρουσιάζονται οι υποτάσεις αν και το συνολικό επαγωγικό φορτίο είναι λίγο μικρότερο, αυτό δεν είναι το ίδιο ομοιόμορφα κατανομημένο. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να παρατηρούμε μεγαλύτερες τοπικές υποτάσεις, σε αντίθεση με την φάση Α στην οποία αναμένουμε πιο ήπιες μεταβολές στην τάση. Τα στοιχεία σχετικά με τα φορτία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Επιπλέον, δεν παρατηρείται αλλαγή στους ζυγούς που λαμβάνουν χώρα οι υπερτάσεις, αφού στην πλειοψηφία τους συμβαίνουν στον ζυγό L128. Παρόμοια είναι η κατάσταση που επικρατεί στις υποτάσεις. Αυτές φαίνονται να λαμβάνουν χώρα σε ζυγούς μακριά από τους ζυγούς που περιλαμβάνουν Φ/Β συστήματα, ενώ η πλειοψηφία αυτών συμβαίνει στους ζυγούς L101, L102 και PT1 που αποτελούν τους πιο κοντινούς στο Μ/Σ ζυγούς.

Ωστόσο, στα ραβδοδιαγράμματα των Σχημάτων 5.5 και 5.6 όπου οποία απεικονίζεται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. το σημαντικότερο στοιχείο, που πρέπει κανείς να παρατηρήσει, είναι η διαφορά που παρουσιάζεται ανάμεσα στην απλή ροή φορτίου και την ημερήσια ανάλυση. Σε όλες τις προσομοιώσεις, στην περίπτωση της απλής ροής φορτίου, η αύξηση της διείσδυσης των Φ/Β συστημάτων φαίνεται να σταματάει λόγω υπότασης. Αντίθετα, στην περίπτωση της ημερήσιας ανάλυσης αυτή διακόπτεται λόγω υπέρτασης. Επιπρόσθετα, η διείσδυση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, στην απλή ροή φορτίου σε σχέση με την ημερήσια ανάλυση. Για την εξήγηση του παραπάνω φαινομένου είναι ανάγκη να χρησιμοποιήσουμε το Σχήμα 5.7.

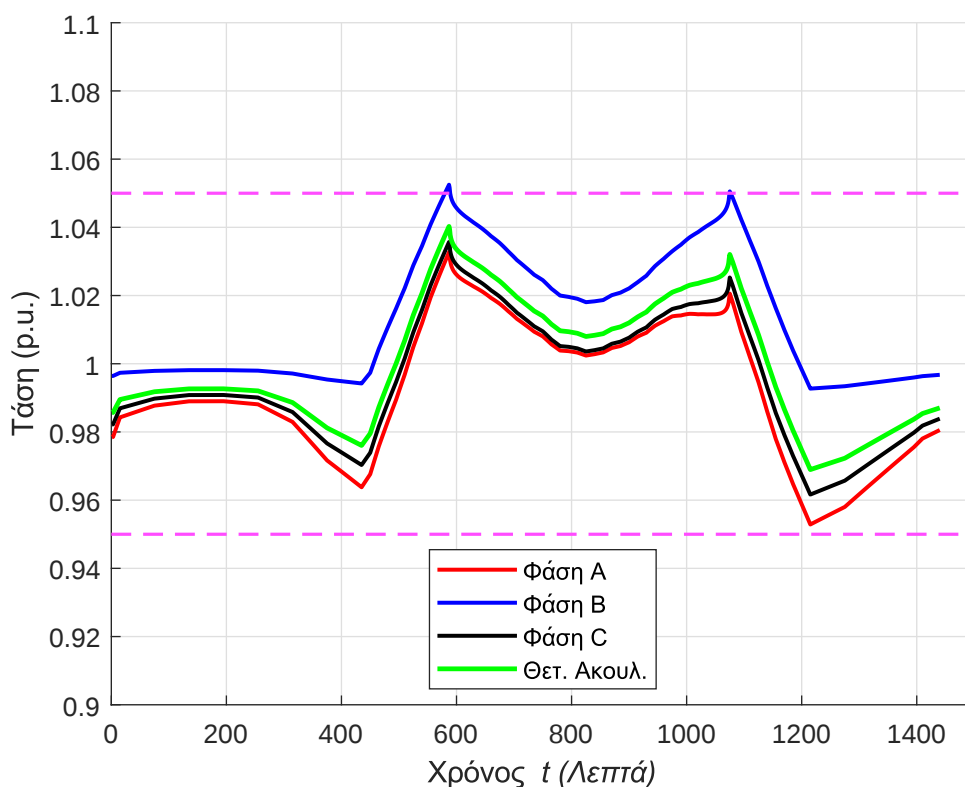


Σχήμα 5.7: Τάση σε ζυγό με υπέρταση και χρήση μηχανισμού $\cos\phi(P)$

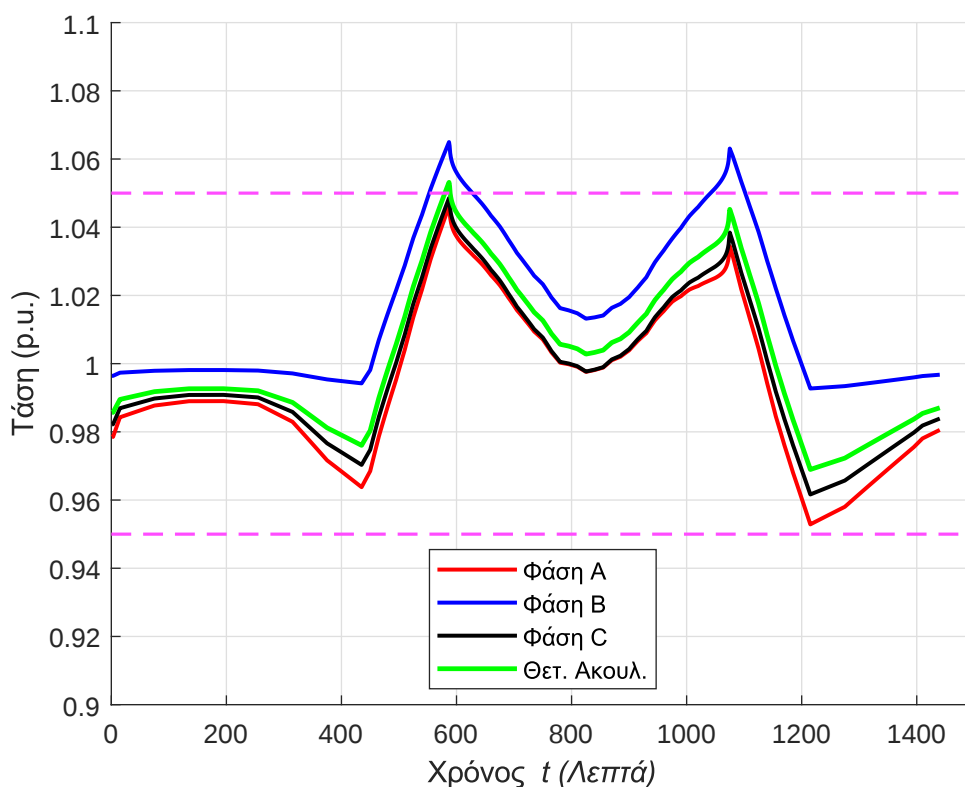
Το συγκεκριμένο στιγμιότυπο αποτελεί το διάγραμμα της τάσης του ζυγού που παρουσιάζει υπέρταση στην τοπολογία 1. Όπως φαίνεται το φαινόμενο της υπέρτασης λαμβάνει χώρα μέσα στους δύο μαύρους κύκλους. Στο σημείο εκείνο ο μηχανισμός δεν έχει τεθεί ακόμα σε λειτουργία, αφού η παραγωγή των Φ/Β συστημάτων δεν ξεπερνάει το 50% της ονομαστικής τους ισχύος (βλ. Σχήμα 3.2). Στο πράσινο κύκλο φαίνεται η στιγμή που ο μηχανισμός έχει τεθεί πλήρως σε λειτουργία. Στο σημείο εκείνο η υπέρταση έχει εξαλειφθεί και

τα Φ/Β έχουν την μέγιστη παραγωγή τους. Επομένως, είναι εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση της απλής ροής φορτίου, στην οποία χρησιμοποιείται η μέγιστη παραγωγή, έχουμε μελέτη για το σημείο εντός του πράσινου κύκλου. Έτσι, η τάση σε εκείνο το σημείο επιτρέπει φαινομενικά την αύξηση της ισχύος των Φ/Β συστημάτων, κάτι που όμως στην πραγματικότητα είναι απαγορευτικό, αφού όπως αποδεικνύεται από την ημερήσια ανάλυση η τάση στις χρονικές στιγμές που υποδεικνύονται από τους μαύρους κύκλους βρίσκεται ήδη εκτός επιτρεπόμενων ορίων. Καταλήγοντας, λοιπόν σε ένα πολύ βασικό συμπέρασμα: Η εκτίμηση της μέγιστης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα XT θα πρέπει να γίνεται αποκλειστικά με τη χρήση ημερήσιας ανάλυσης σε περιπτώσεις που ο έλεγχος τάσης που επιλέγεται είναι ο $\cos\phi(P)$. Πράγματι, η απλή ροή ισχύος μπορεί να παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν δεν χρησιμοποιείται κάποιος έλεγχος. Ωστόσο με την ύπαρξη ελέγχου $\cos\phi(P)$ η απλή ροή ισχύος μπορεί να οδηγήσει σε πολύ παραπλανητικά αποτελέσματα, δίνοντας την ψευδαίσθηση ότι το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερη διείσδυση Φ/Β συστημάτων, χωρίς αυτά να διαταράσσουν την εύρυθμη λειτουργία του, χωρίς αυτό να μπορεί να συμβεί στην πραγματικότητα.

Αξιολογώντας, τα αποτελέσματα με βάση τους Πίνακες 5.3 και 5.4 που παρουσιάζονται παραπάνω, καταλήγουμε πως ο υπολογισμός της θετικής ακολουθίας της τάσης και η χρήση του ως μέτρο αξιολόγησης για τα επίπεδα τάσης, επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο. Ωστόσο, όπως και στο Σενάριο 1, στα Σχήματα 5.8 και 5.9 που ακολουθούν τα οποία αφορούν τον ζυγό L128 για την τοπολογία 1, παρατηρείται ξανά το ίδιο φαινόμενο. Αν και η τάση θετικής ακολουθίας βρίσκεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων, η τάση της φάσης B τα ξεπερνάει για σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.8: Σενάριο 2. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.



Σχήμα 5.9: Σενάριο 2. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.

Τέλος συγκρίνοντας τους πίνακες των αποτελεσμάτων ανάμεσα στα Σενάρια 1 και 2, είναι εύκολα αντιληπτό το γεγονός πως η αξιοποίηση του ελέγχου $\cos\phi(P)$ επιτρέπει σημαντικά μεγαλύτερη διείσδυση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, κρίνοντας μόνο τα αποτελέσματα της ημερήσιας ανάλυσης αφού αυτά δίνουν την πραγματική εικόνα, υπάρχουν περιπτώσεις που με την αξιοποίηση του μηχανισμού επιτρέπεται ακόμα και διπλασιασμός της εγκατεστημένης ισχύος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και διπλασιασμό της παρεχόμενης, από τα συστήματα, ενέργειας στο δίκτυο. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η ποσοστιαία αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ανάμεσα στο Σενάριο 1, στο οποίο δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος και στο Σενάριο 2 στο οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος $\cos\phi(P)$. Οι τιμές αφορούν την ημερήσια ανάλυση. Ο μέσος όρος αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος είναι 215.36 % στην περίπτωση που η αξιολόγηση των επιπέδων τάσης γίνεται με βάση τις φασικές τιμές και 224.69% στην περίπτωση της θετικής ακολουθίας.

Πίνακας 5.5: Ποσοστιαία αύξηση εγκατεστημένης ισχύος στην περίπτωση ημερήσιας ανάλυσης ανάμεσα στα Σενάρια 1 και 2.

Τοπολογία	Ποσοστιαία αύξηση εγκατεστημένης ισχύος	
	Φασ. τάσεις	Τάση θετ. ακολούθ.
Grid 1	215,30	224,80
Grid 2	215,20	224,45
Grid 3	215,50	224,45
Grid 4	215,10	224,40
Grid 5	215,50	224,50
Grid 6	215,50	224,50
Grid 7	215,15	224,25
Grid 8	215,00	225,20
Grid 9	215,80	225,65
Grid 10	215,60	224,75

5.3 Σενάριο 3 - Αποτελέσματα

Στο Σενάριο 3 γίνεται χρήση του μηχανισμού $Q(V)$. Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 4. Στους Πίνακες 5.6 και 5.7 που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτε-

λέσματα των προσομοιώσεων που αφορούν το συγκεκριμένο σενάριο.

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα Σεναρίου 3. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για HA	Λόγος
Grid 1	218.5	Υπέρταση	185.3	Υπέρταση
Grid 2	217	Υπέρταση	204.9	Υπέρταση
Grid 3	215	Υπέρταση	189.35	Υπέρταση
Grid 4	189	Υπέρταση	196.6	Υπέρταση
Grid 5	218.5	Υπέρταση	227.5	Υπέρταση
Grid 6	186.2	Υπέρταση	186.8	Υπέρταση
Grid 7	196	Υπέρταση	204	Υπέρταση
Grid 8	276.5	Υπέρταση	287.9	Υπέρταση
Grid 9	305	Υπέρταση	270.75	Υπέρταση
Grid 10	234.5	Υπέρταση	219.1	Υπέρταση

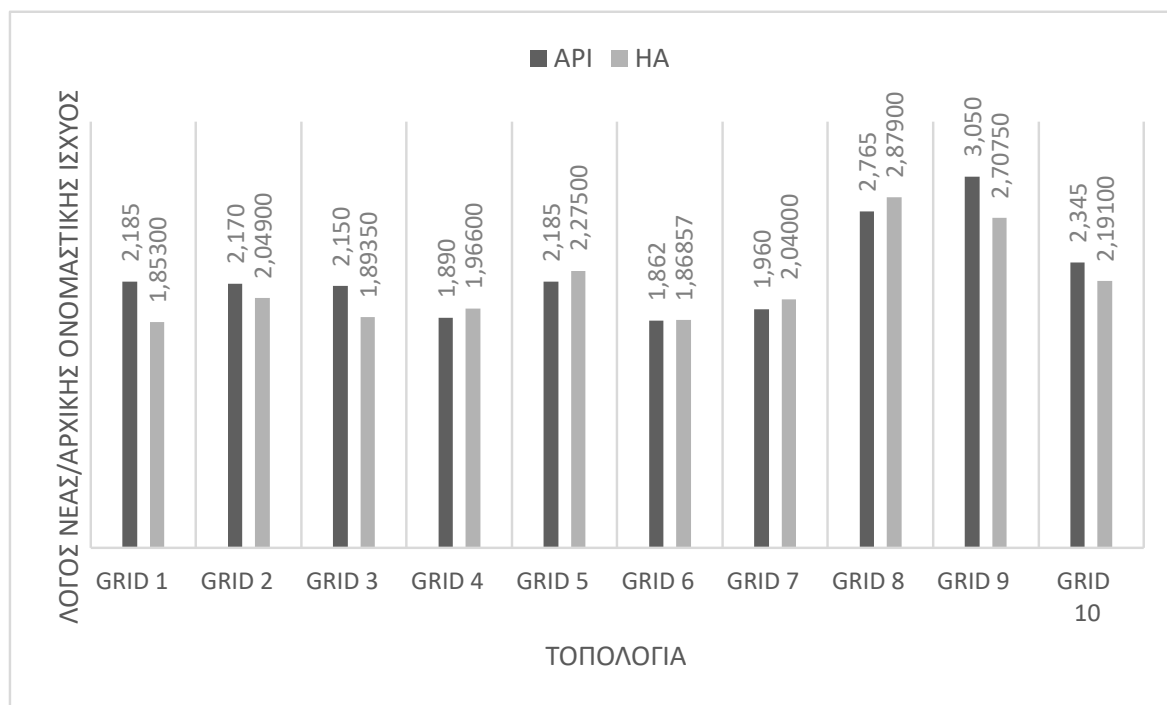
Όπως και στα υπόλοιπα σενάρια έτσι και σε αυτό, οι υπερτάσεις εμφανίζονται κατά πλειοψηφία στους ζυγούς L127 και L128, ενώ το φαινόμενο της υπότασης παρουσιάζεται πιο κοντά στο Μ/Σ που βρίσκεται στο σημείο διασύνδεσης του δικτύου χαμηλής τάσης, με αυτό της μέσης τάσης και συγκεκριμένα στους ζυγούς PT1, L101 και L102.

Συγκρίνοντας τις στήλες των ραβδοδιαγραμμάτων των Σχημάτων 5.10 και 5.11 που παρουσιάζονται παραπάνω, παρατηρείται πως οι τιμές της ημερήσιας ανάλυσης είναι πολύ κοντά με αυτές της απλής ροής φορτίου. Ωστόσο, υπάρχουν και πάλι περιπτώσεις όπως αυτή της ένατης τοπολογίας που για ακόμη μία φορά αποδεικνύεται πόσο σημαντικό είναι η αξιολόγηση να γίνεται σε ημερήσιο επίπεδο και όχι σε στιγμιαίο.

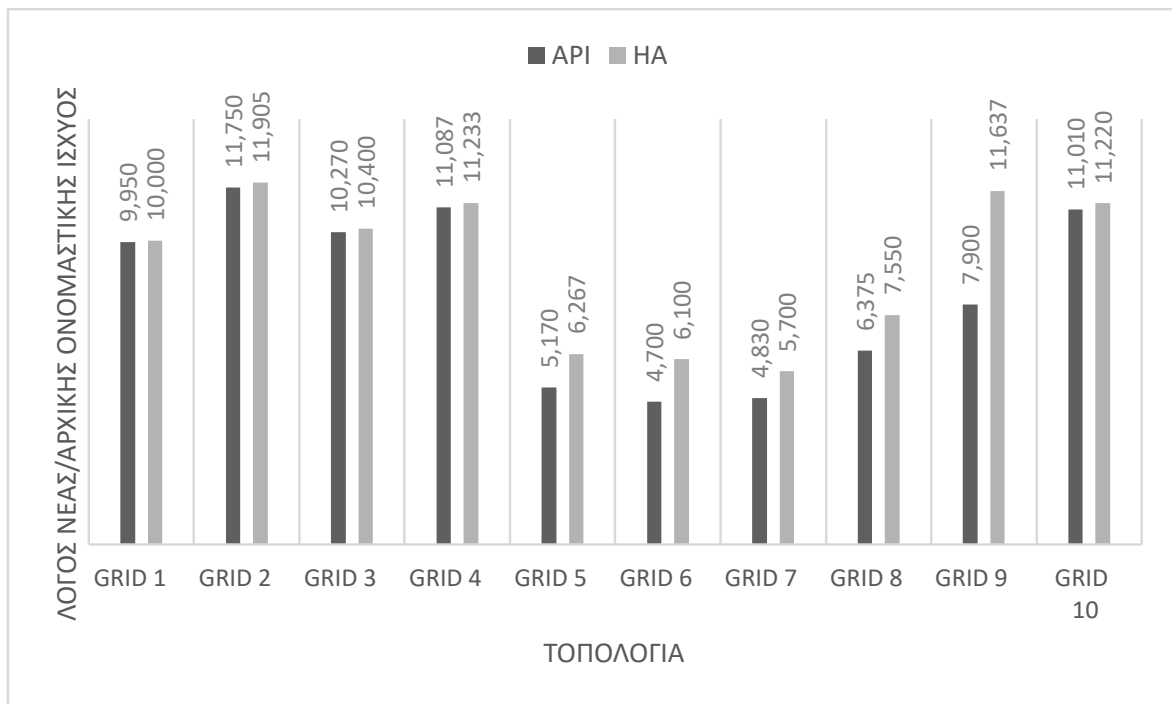
Για την εξήγηση του παραπάνω φαινομένου παρουσιάζεται το Σχήμα 5.12. Όπως παρατηρείται εντός του μαύρου πλαισίου η ανοδική πορεία της τάσης, εκφυλλίζεται σταδιακά σε ευθεία. Αυτό συμβαίνει στα χρονικά διαστήματα στα οποία η παραγωγή (βλ. Σχήμα 3.2) έχει τις μέγιστες τιμές της. Ως αποτέλεσμα αυτού, σύμφωνα με την λειτουργία του μηχανισμού, θα υπάρχει και η μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο. Γενικότερα, για διάφορες τιμές (μικρότερες ή μεγαλύτερες) της εγκατεστημένης ισχύος, κοντά στην τιμή που

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα Σεναρίου 3. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	995	Υπόταση	1000	Υπόταση
Grid 2	1175	Υπόταση	1190.5	Υπόταση
Grid 3	1027	Υπόταση	1040	Υπόταση
Grid 4	1108.7	Υπόταση	1123.3	Υπόταση
Grid 5	517	Υπέρταση	626.7	Υπέρταση
Grid 6	470	Υπέρταση	610	Υπέρταση
Grid 7	483	Υπέρταση	570	Υπέρταση
Grid 8	637.5	Υπόταση	755	Υπέρταση
Grid 9	790	Υπέρταση	1163.7	Υπόταση
Grid 10	1101	Υπόταση	1122	Υπόταση



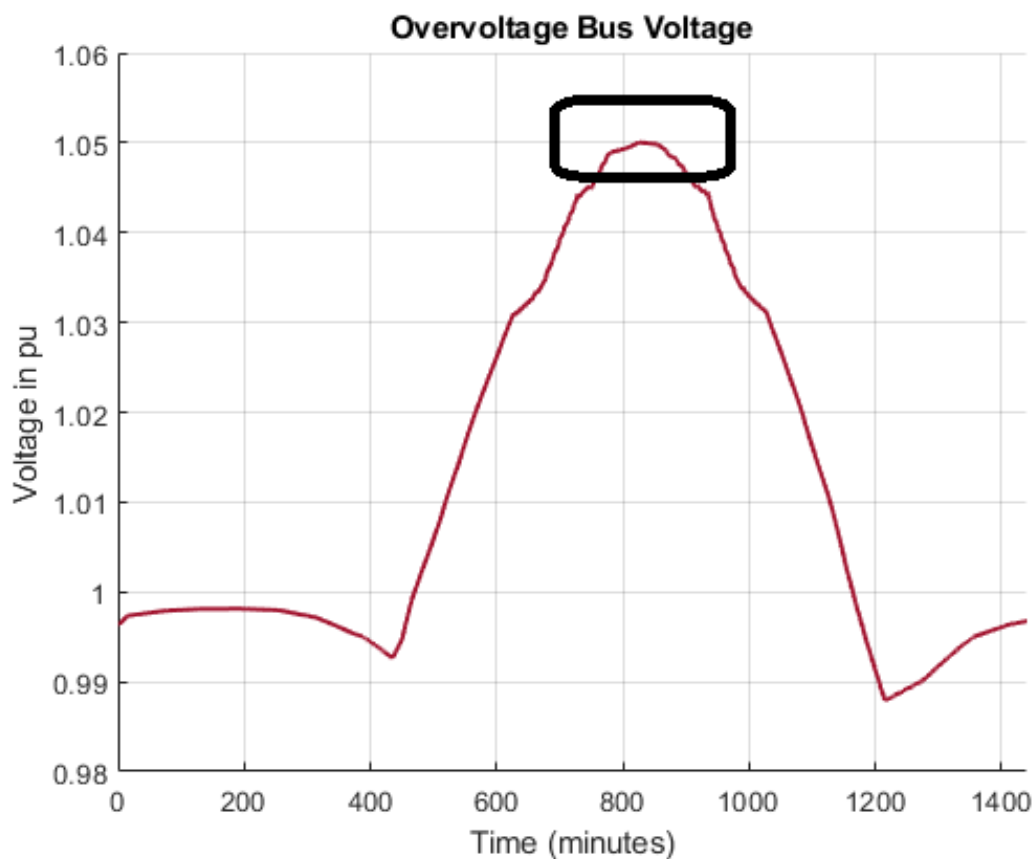
Σχήμα 5.10: Σενάριο 3. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και ΗΑ με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.



Σχήμα 5.11: Σενάριο 3. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

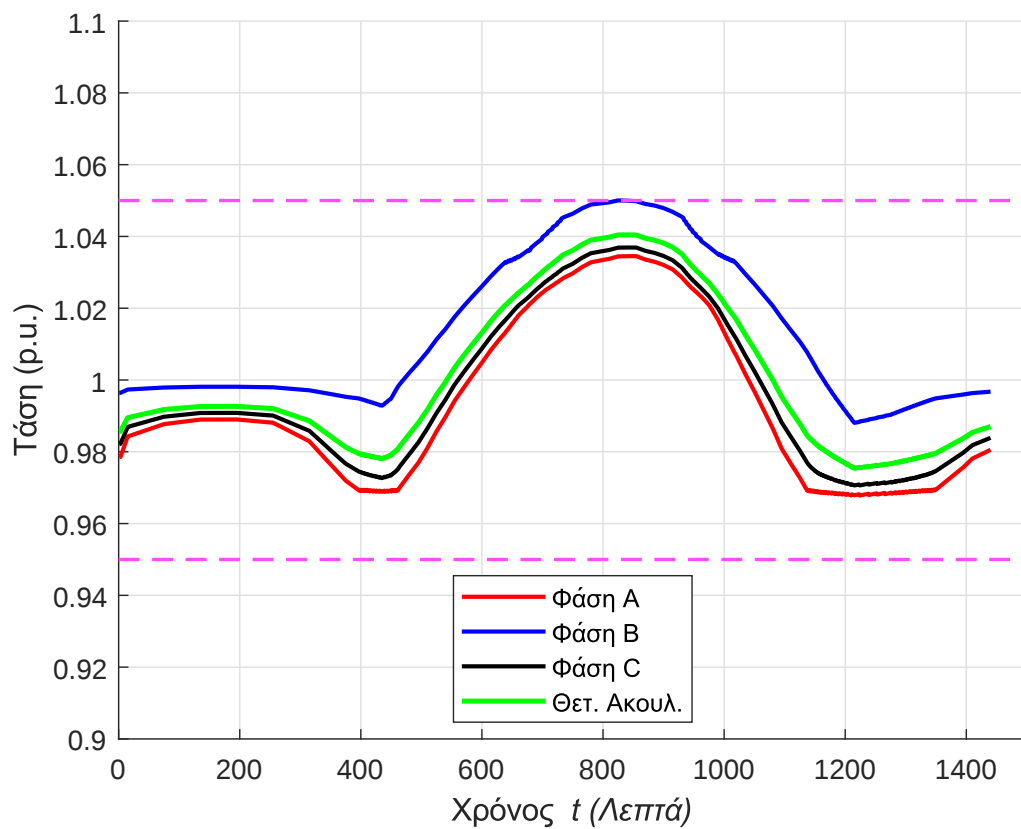
υπολογίζεται με βάση την ημερήσια ανάλυση, η μέγιστη τάση στο ζυγό της υπέρτασης θα είναι 1.05 p.u. Ωστόσο, στην περίπτωση της απλής ροής φορτίου στην οποία η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται με μοναδικό κριτήριο την μέγιστη τιμή της τάσης, δεν λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια του φαινομένου. Έτσι, για την τοπολογία 9 αν και η εγκατεστημένη ισχύς που υπολογίζεται με βάση την απλή ροή φορτίου είναι φαινομενικά μεγαλύτερη στην πραγματικότητα δεν μπορεί να υποστηριχθεί από το δίκτυο.

Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ Πινάκων 5.6 και 5.7, είναι εύκολα αντιληπτό ότι στην περίπτωση που η αξιολόγηση των επιπέδων τάσης, γίνεται σε επίπεδο φάσης και όχι με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας οι τιμές για την μέγιστη διείσδυση είναι πολύ μικρότερες. Το γεγονός αυτό πιθανόν βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο έχει επιλεγεί να μοντελοποιηθεί ο μηχανισμός ελέγχου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην πρώτη περίπτωση η απορρόφηση της αέργου ισχύος γίνεται ασύμμετρα, σε αντίθεση με την δεύτερη στην οποία διατηρείται η συμμετρία. Ωστόσο, όπως παρατηρείται για ακόμη μια φορά στην περίπτωση που η αξιολόγηση γίνεται με βάση τις φασικές τιμές της τάσης, όλες οι τάσεις παραμένουν εντός ορίων, αντίθετα στην περίπτωση της θετικής ακολουθίας όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα, η φάση B ξεπερνά για ακόμη μια φορά τα επιτρεπτά όρια. Το πρώτο σχήμα αποτελείται από τα προφίλ τάσης του ζυγού L128, ενώ το δεύτερο από αυτά του ζυγού L127. Και

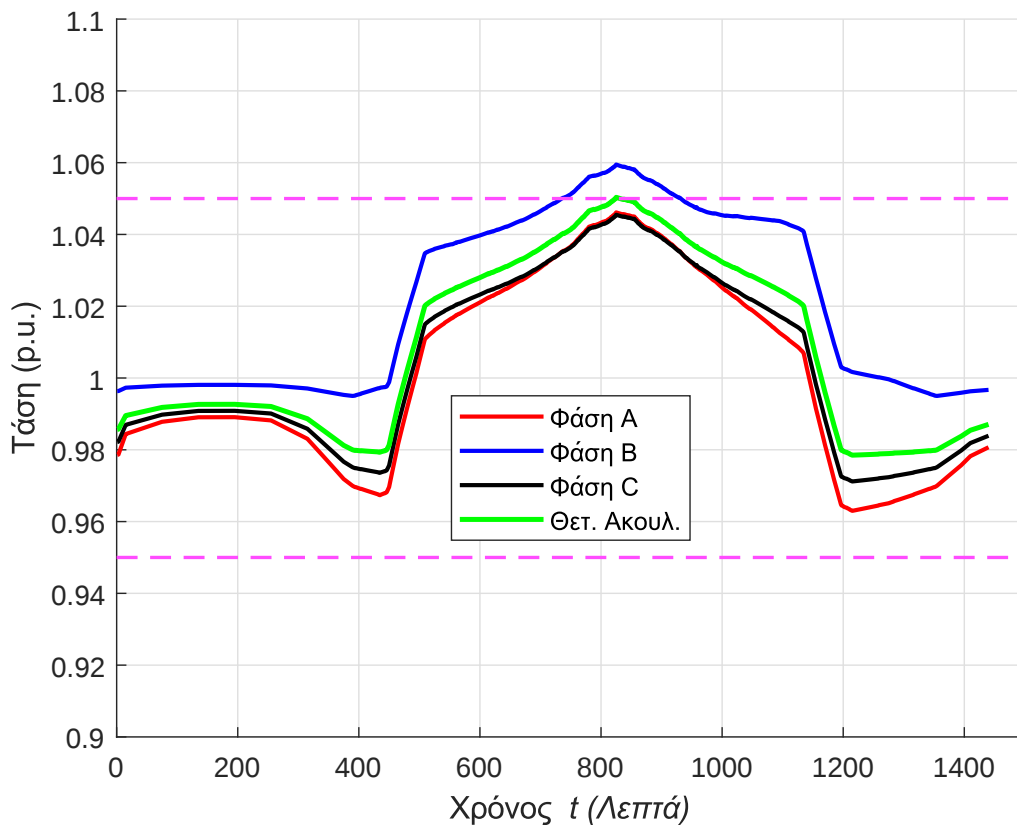


Σχήμα 5.12: Τάση σε ζυγό με υπέρταση και χρήση μηχανισμού $Q(V)$

τα δύο Σχήματα 5.13 και 5.14 προκύπτουν από την τοπολογία 6 με μέγιστη διείσδυση όπως αυτή είναι υπολογισμένη στους πίνακες παραπάνω.



Σχήμα 5.13: Σενάριο 3. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.



Σχήμα 5.14: Σενάριο 3. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L127.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με βάση τα Σενάριο 1, παρατηρούμε πως ειδικά στην περίπτωση της αξιολόγησης της τάσης με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας, η διείσδυση αυξάνεται σημαντικά αφού σε ορισμένες φορές φτάνει και να πενταπλασιαστεί. Και στην περίπτωση των φασικών τάσεων παρατηρείται αύξηση ωστόσο αυτή είναι σημαντικά μικρότερη και οριακά ίδια με αυτή που προκύπτει όταν δεν εφαρμόζεται κανένας έλεγχος.

Σε σχέση με το Σενάριο 2, στην περίπτωση των φασικών τάσεων το Σενάριο 2 φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο η σύγκριση των 2 σεναρίων σε αυτή την περίπτωση θα ήταν λανθασμένη, αφού στο Σενάριο 2 η άεργος ισχύς απορροφάται από το δίκτυο από τα Φ/Β συστήματα συμμετρικά σε αντίθεση με το Σενάριο 3. Στην περίπτωση της αξιολόγησης της τάσης με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας και στις 2 περιπτώσεις η άεργος απορροφάται από το δίκτυο συμμετρικά. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα του Σεναρίου 3 φαίνεται να είναι σημαντικά καλύτερα. Συγκεκριμένα, η ισχύς των Φ/Β συστημάτων φαίνεται να διπλασιάζεται σε σχέση με το Σενάριο 2.

5.4 Σενάριο 4 - Αποτελέσματα

Το τέταρτο και τελευταίο εξεταζόμενο σενάριο χρήζει ιδιαίτερης αντιμετώπισης ως προς την αξιολόγηση του. Πρόκειται για το σενάριο στο οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος $P(V)$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μηχανισμός αυτός περιορίζει την παραγωγή των Φ/Β συστημάτων, σύμφωνα με την τάση στον εκάστοτε ζυγό στον οποίο διασυνδέεται το Φ/Β σύστημα.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατηρείται συχνά η φράση "Ασταθής Περίπτωση" στο κελί που αφορά τον λόγο για τον οποίο διακόπτεται η προσομοίωση. Αυτό σημαίνει πως παρουσιάστηκε αστάθεια στις τάσεις με αποτέλεσμα η ροή ισχύος να μην συγκλίνει σε κάποια τιμή. Στο σημείο αυτό το OpenDSS διακόπτει την προσομοίωση χωρίς να εξάγονται αποτελέσματα.

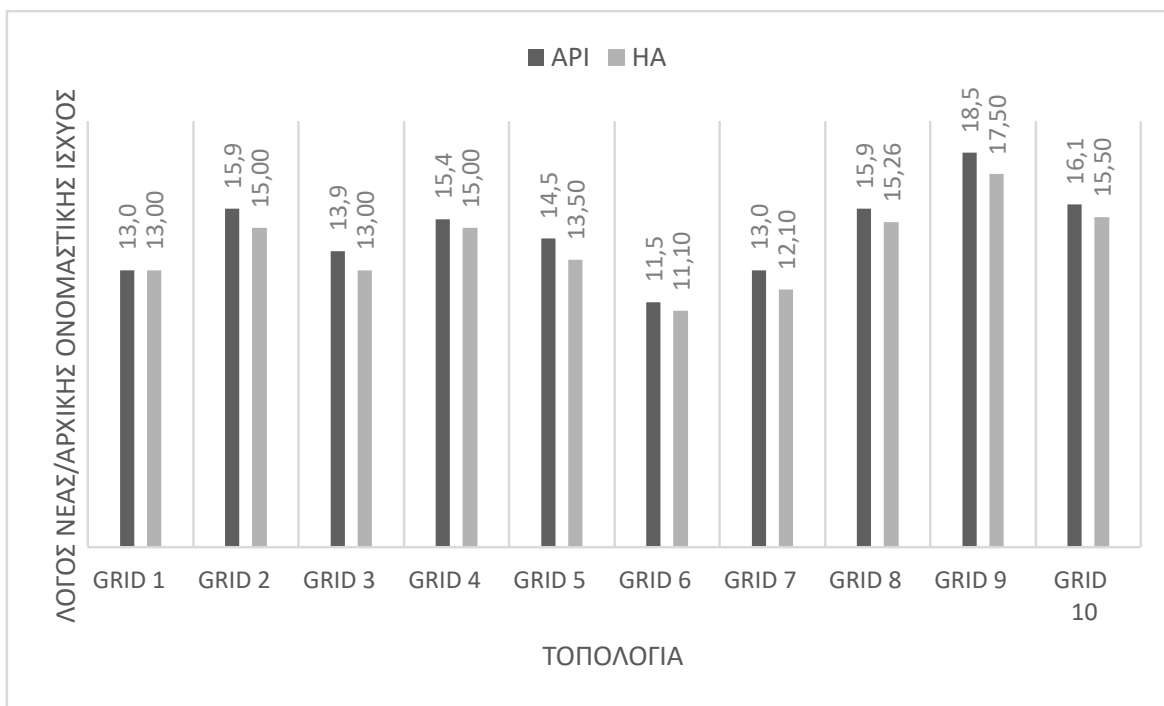
Για την αξιολόγηση του μηχανισμού θα χρησιμοποιηθεί μια διαφορετική μέθοδος. Μετά τους 2 συνηθισμένους πίνακες ακολουθούν οι Πίνακες 5.8 και 5.9 που περιλαμβάνουν την ενέργεια που παράχθηκε όταν δεν υπήρχε κανένας μηχανισμός ελέγχου για το φαινόμενο της υπέρτασης και όταν χρησιμοποιήθηκε ο έλεγχος $P(V)$. Αυτή η ενέργεια είναι υπολογισμένη για όλο το 24ώρο. Αυτή η μέθοδος αξιολόγησης ακολουθείται καθώς η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β συστημάτων μπορεί να παρουσιάζει σημαντική αύξηση, ωστόσο η πραγματική εγγεόμενη ενέργεια να μην παρουσιάζει ιδιαίτερη βελτίωση.

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα Σεναρίου 4. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.

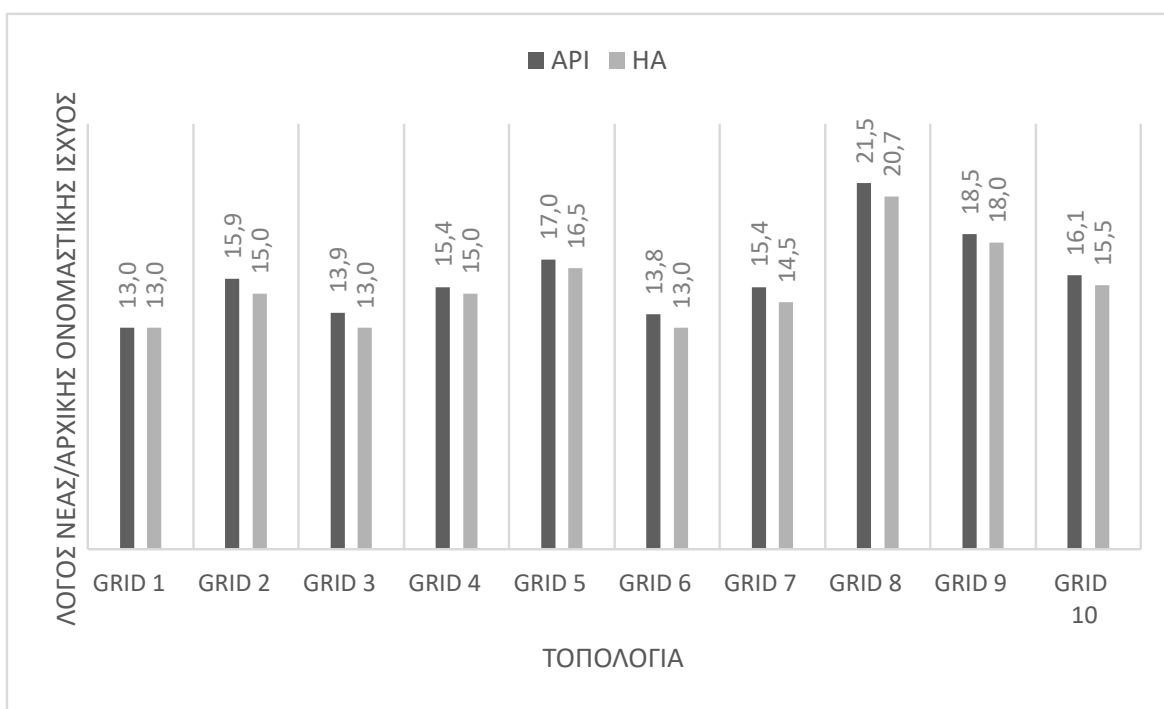
Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	1300	Ασταθής Περίπτωση	1300	Ασταθής Περίπτωση
Grid 2	1590	Ασταθής Περίπτωση	1500	Ασταθής Περίπτωση
Grid 3	1390	Ασταθής Περίπτωση	1300	Ασταθής Περίπτωση
Grid 4	1540	Ασταθής Περίπτωση	1500	Ασταθής Περίπτωση
Grid 5	1450	Υπέρταση	1350	Υπέρταση
Grid 6	1150	Υπέρταση	1110	Υπέρταση
Grid 7	1300	Υπέρταση	1210	Υπέρταση
Grid 8	1590	Υπέρταση	1526	Υπέρταση
Grid 9	1850	Ασταθής Περίπτωση	1750	Υπέρταση
Grid 10	1610	Ασταθής Περίπτωση	1550	Ασταθής Περίπτωση

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα Σεναρίου 4. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Τοπολογία	Ποσοστό για API	Λόγος	Ποσοστό για ΗΑ	Λόγος
Grid 1	1300	Ασταθής Περίπτωση	1300	Ασταθής Περίπτωση
Grid 2	1590	Ασταθής Περίπτωση	1500	Ασταθής Περίπτωση
Grid 3	1390	Ασταθής Περίπτωση	1300	Ασταθής Περίπτωση
Grid 4	1540	Ασταθής Περίπτωση	1500	Ασταθής Περίπτωση
Grid 5	1700	Ασταθής Περίπτωση	1650	Ασταθής Περίπτωση
Grid 6	1380	Ασταθής Περίπτωση	1300	Ασταθής Περίπτωση
Grid 7	1540	Ασταθής Περίπτωση	1450	Ασταθής Περίπτωση
Grid 8	2150	Ασταθής Περίπτωση	2070	Ασταθής Περίπτωση
Grid 9	1850	Ασταθής Περίπτωση	1800	Ασταθής Περίπτωση
Grid 10	1610	Ασταθής Περίπτωση	1550	Ασταθής Περίπτωση



Σχήμα 5.15: Σενάριο 4. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση τις φασικές τιμές της τάσης.



Σχήμα 5.16: Σενάριο 4. Λόγος νέας προς αρχικής ονομαστικής ισχύος Φ/Β συστημάτων για API και HA με υπολογισμό υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι Πίνακες 5.10 και 5.11, στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή ενέργειας μετρημένη σε kWh, τόσο για την απλή ροή ισχύος, όσο και για την ημερήσια ανάλυση. Ο Πίνακας 5.10 αφορά την περίπτωση που η αξιολόγηση της τάσης γίνεται με βάση τις φασικές της τιμές, ενώ στον Πίνακα 5.11 που ακολουθεί παρουσιάζεται η παραγωγή ενέργειας, στην περίπτωση που η τάση αξιολογείται με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας.

Πριν προχωρήσουμε στους πίνακες αξίζει να αναφερθεί ένα παράδειγμα το οποίο αναδεικνύει μια σημαντική αδυναμία του μηχανισμού. Σύμφωνα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα σχετικά με την αύξηση της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος που παρουσιάζονται στα ραβδοδιαγράμματα των Σχημάτων 5.15 και 5.16, για την τοπολογία 1, η εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται 13 φορές σε σχέση με την αρχική. Ωστόσο, στην περίπτωση της απλής ροής φορτίου, κατά την οποία το σύνολο των Φ/Β συστημάτων παράγει το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας για 1 λεπτό, έχουμε παραγωγή μόλις 5.46 kWh ενέργειας. Για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ, η οποία ανέρχεται στα 1495 kW, στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται ο έλεγχος θα είχαμε παραγωγή 24.92 kWh ενέργειας. Συγκρίνοντας, τα δύο αυτά αποτελέσματα γίνεται κατανοητό πως η παραγόμενη ενέργεια περιορίστηκε κοντά στις 5 φορές, ακόμα και αν φαινομενικά η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε.

Πίνακας 5.10: Παραγόμενη Ενέργεια. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση φασικές τιμές.

Τοπολογία	Παραγόμενη Ενέργεια	
	- (kWh)	$P(V)$ (kWh)
Grid 1	1657.47	3686.50
Grid 2	1833.84	5544.27
Grid 3	1693.69	3822.73
Grid 4	1759.75	4824.84
Grid 5	2036.61	4459.43
Grid 6	1672.16	3383.67
Grid 7	1826.05	3822.20
Grid 8	2577.53	5970.50
Grid 9	2421.98	4702.53
Grid 10	1657.47	4488.96

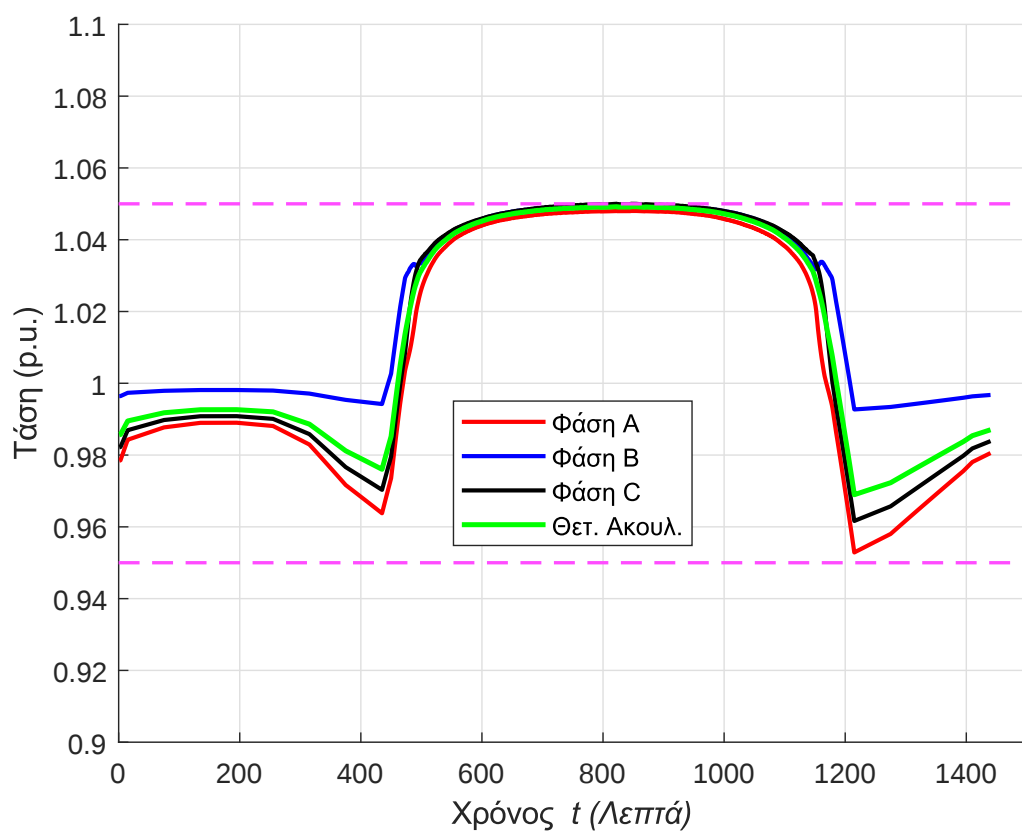
Πίνακας 5.11: Παραγόμενη Ενέργεια. Υπολογισμός υπερτάσεων με βάση την τάση θετικής ακολουθίας.

Τοπολογία	Παραγόμενη Ενέργεια	
	- (kWh)	$P(V)$ (kWh)
Grid 1	1996.14	4263.98
Grid 2	2208.12	5549.04
Grid 3	2031.68	3823.38
Grid 4	2118.51	4824.30
Grid 5	2435.30	4725.97
Grid 6	2083.16	3527.43
Grid 7	2194.08	4013.13
Grid 8	3081.45	6716.86
Grid 9	2895.25	4737.05
Grid 10	1996.14	4492.58

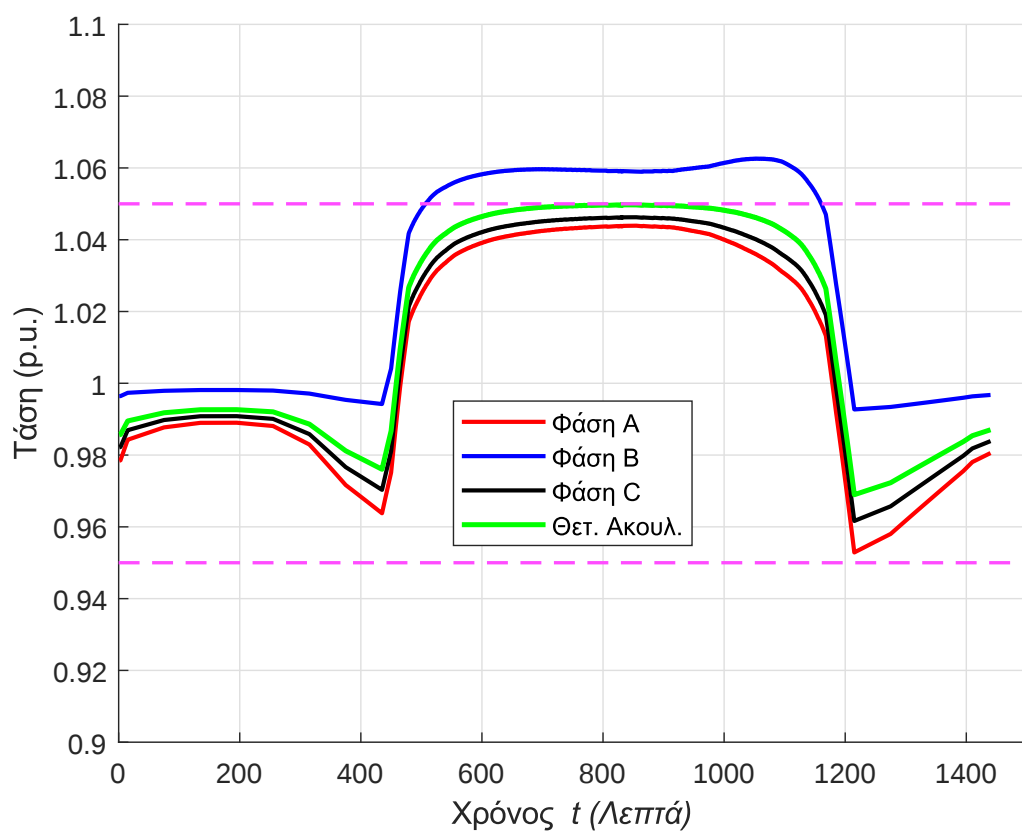
Όπως φαίνεται παραπάνω η χρήση του μηχανισμού επέτρεψε την παραγωγή διπλάσιας ενέργειας σε σχέση με την περίπτωση που δεν εφαρμοζόταν ο έλεγχος. Ωστόσο, η παραγωγική ικανότητα του δικτύου έχει αυξηθεί σε όλες τις τοπολογίες πάνω από 6 φορές. Αυτό σημαίνει πως η εγκατάσταση της 6-πλάσιας παραγωγικής ικανότητας δεν χρησιμοποιήθηκε στο μέγιστο της. Συγκεκριμένα, η εγγεόμενη ενέργεια αυξήθηκε μόλις στο διπλάσιο. Έτσι, μια τέτοια αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος δεν θα ήταν καλή επιλογή, αφού στην πραγματικότητα η συγκεκριμένη εγκατάσταση θα αποσυνδεόταν συχνά από τον διαχειριστή του δικτύου με σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της υπέρτασης. Καθιστώντας μια τέτοια εγκατάσταση σε συνδυασμό με την χρήση του ελέγχου $P(V)$ οικονομικά ασύμφορη.

Συγκρίνοντας, τα αποτελέσματα ανάλογα με την μέθοδο αξιολόγησης της τάσης, είναι εύκολο να καταλήξει κανείς στο γεγονός πως η αξιολόγηση της με βάση τις φασικές τιμές περιορίζει για ακόμη μια φορά την διείσδυση Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στα σχεδιαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω για τον ζυγό L127 της τοπολογίας 6, ακόμα και αν οι τάσεις είναι πολύ κοντά στο όριο, στην περίπτωση της αξιολόγησης με βάση την θετική ακολουθία η φάση B βρίσκεται εκτός των επιτρεπόμενων ορίων.

Παρ' όλα αυτά ο μηχανισμός φαίνεται να αποδίδει αφού το φαινόμενο της υπέρτασης περιορίστηκε σημαντικά, ενώ η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος σε συνδυασμό με έναν έλεγχο όπως αυτός θα είχε θετικά αποτελέσματα. Επιπλέον, αυτός ο μηχανισμός δεν είναι σε καμία περίπτωση καλύτερος από αυτούς στα Σενάρια 2 και 3. Στα σενάρια αυτά, η παραγωγή της ενεργούς ισχύς δεν περιορίζεται, έτσι η ενέργεια που παράγεται είναι ανάλογη της ισχύος των Φ/Β συστημάτων. Άρα διπλασιασμός της ονομαστικής ισχύος των Φ/Β συστημάτων, για εκείνα τα σενάρια, συνεπάγεται διπλασιασμό της παραγόμενης ενέργειας κάτι που όπως αποδείχθηκε παραπάνω δεν ισχύει στην περίπτωση του Σεναρίου 4.



Σχήμα 5.17: Σενάριο 4. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση τις φασικές τάσεις, ζυγός L128.



Σχήμα 5.18: Σενάριο 4. Τάση σε ζυγό με υπέρταση με μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ υπολογισμένη με βάση την θετική ακολουθία της τάσης, ζυγός L128.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Φτάνοντας στο τέλος της εργασίας θα ήταν καλό να γίνει μια ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και μια παρουσίαση των συμπερασμάτων. Ο σκοπός της εργασίας ήταν τόσο η αξιολόγηση της μεθόδου που χρησιμοποιείται σήμερα για τον υπολογισμό της μέγιστης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα χαμηλής τάσης σε σύγκριση με την μέθοδο της ημερήσιας ανάλυσης, όσο και της αξιολόγησης της απόδοσης ορισμένων μηχανισμών ελέγχου του φαινομένου της υπέρτασης. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να λυθούν πριν αυξηθεί σημαντικά η παραγωγική ισχύς των συστημάτων.

Αρχικά, η στιγμιαία ανάλυση με μέγιστη παραγωγή και ελάχιστη ζήτηση αποδείχθηκε συντηρητική σε σχέση με την ημερήσια ανάλυση. Τόσο σε επίπεδο φασικής ανάλυσης, όσο και στο επίπεδο της θετικής ακολουθίας, η διείσδυση των Φ/Β παρουσιάστηκε αυξημένη στην περίπτωση της ημερήσιας ανάλυσης.

Ακόμη, η ανάλυση του ελέγχου $\cos\phi(P)$ ανέδειξε σημαντικές αδυναμίες της στιγμιαίας ανάλυσης. Συγκεκριμένα, σε όλες τις εξεταζόμενες τοπολογίες η χρήση της στιγμιαίας ανάλυσης έδωσε την ψευδαίσθηση ότι το δίκτυο μπορούσε να υποστηρίξει σημαντικά μεγαλύτερη διείσδυση Φ/Β συστημάτων σε σχέση με αυτή που μπορούσε να υποστηρίξει στην πραγματικότητα.

Επιπλέον όλοι οι εξεταζόμενοι έλεγχοι φαίνεται να αποδίδουν και να οδηγούν σε αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο, όταν η αξιολόγηση των επιπέδων τάσης γίνεται σε φασικό επίπεδο, πιο αποδοτικός φαίνεται να είναι ο έλεγχος $\cos\phi(P)$, διαφορετικά ο έλεγχος

$Q(V)$ φάνηκε να αποδίδει καλύτερα. Τέλος, την χειρότερη απόδοση και στις 2 περιπτώσεις φαίνεται να έχει ο έλεγχος $P(V)$, αφού ενώ αυξάνει περισσότερο από όλους τους ελέγχους την εγκατεστημένη ενεργό ισχύ των Φ/Β δεν την εκμεταλλεύεται παράγοντας ελάχιστη ενέργεια σε σχέση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει πως στο συγκεκριμένο δίκτυο οι έλεγχοι που περιείχαν έλεγχο αέργου ισχύος απέδωσαν καλύτερα.

Σημαντικό είναι να τονιστεί πως η αξιολόγηση της τάσης με βάση τις φασικές τιμές αποτελεί την πιο αυστηρή περίπτωση αξιολόγησης, αφού η διείσδυση των Φ/Β συστημάτων περιορίζεται σε μικρές σχετικά τιμές. Ωστόσο, σε αυτή όλες οι φασικές τάσεις του δικτύου βρίσκονται εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Αντίθετα, όταν ακολουθείτε η αξιολόγηση των επιπέδων τάσης με βάση την τιμή της θετικής ακολουθίας, η διείσδυση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, συχνά όμως υπάρχουν φασικές τάσεις οι οποίες βρίσκονται εκτός των επιτρεπόμενων ορίων.

Η διεξοδική έρευνα που έγινε στα πλαίσια της εργασίας ανέδειξε σημαντικές δυνατότητες και αδυναμίες τόσο του τρόπου εκτίμησης της μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης Φ/Β συστημάτων στο δίκτυο, όσο και των εξεταζόμενων μηχανισμών ελέγχου του φαινομένου της υπέρτασης. Τα ευρήματα της εργασίας μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την αναλυτικότερη διερεύνηση των μηχανισμών ελέγχου τάσης σε δίκτυα διανομής XT και του αντίκτυπου αυτών στη διείσδυση Φ/Β συστημάτων.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Η αύξηση της διείσδυσης των Φ/Β συστημάτων στα δίκτυα διανομής θα συντελούσε στη μείωση της εξάρτησης της ανθρωπότητας για την ηλεκτροπαραγωγή από ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Κρίνεται, λοιπόν, σκόπιμο, να διερευνηθούν μελλοντικά και άλλες προσεγγίσεις (μηχανισμοί ελέγχου) που θα επέτρεπαν την περαιτέρω διείσδυση Φ/Β συστημάτων.

Για παράδειγμα, μια νέα τάση στον τομέα αυτό είναι η ένταξη των συστημάτων αποθήκευσης στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, η μελέτη της επίδρασης των μπαταριών σε συνδυασμό με τους εξεταζόμενους ελέγχους πιθανότατα θα είχε σημαντικά αποτελέσματα στην αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β συστημάτων των δικτύων χαμηλής τάσης.

Επιπρόσθετα, στην παραπάνω προοπτική μπορούν να προστεθούν συνδυασμένοι έλεγχοι που θα περιέχουν συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), ελέγχους σε επίπεδο πηγής/μετατροπέα και μέσα αντιστάθμισης.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι για τους ελέγχους που εξετάστηκαν, αξίζει να γίνει μια ανάλυση ευαισθησίας της αποτελεσματικότητας τους ως προς το λόγο R/X των γραμμών του δικτύου.

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων θα μπορούσε να αυξηθεί, εισάγοντας νέες έννοιες, όπως η τυχαιότητα των προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης, επειδή αυτά δεν παραμένουν σταθερά σε όλη την διάρκεια του χρόνου, καθώς και η τυχαιότητα στην τοποθέτηση των Φ/Β συστημάτων. Για αυτό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης με στοχαστική μεταβλητότητα και επίσης να ελεγχθεί με τεχνικές πιθανοτικής ανάλυσης ο αντίκτυπος της θέσης των Φ/Β στα τελικά αποτελέσματα. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί πως σε μελλοντικές προσομοιώσεις θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη και το θερμικό ρεύμα των γραμμών, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τον αντίκτυπο των ελέγχων στη λειτουργία του δικτύου.

Τέλος, αυξάνοντας σημαντικά τον αριθμό των εξεταζόμενων προσομοιώσεων και εντάσσοντας την τυχαιότητα στα προφίλ κατανάλωσης και παραγωγής θα μπορούσε να δημιουργηθεί μια πιθανοτική συνάρτηση για τον υπολογισμό της πιθανότητας να συμβεί υπέρταση σε συνάρτηση με την ισχύ των Φ/Β συστημάτων των δικτύων.

Βιβλιογραφία

- [1] Francis Muhire, Dickson Turyareeba, Muiyiwa S. Adaramola, Mary Nantongo, Ronnette Atukunda, and Anthony M. Olyanga. Drivers of green energy transition: A review. *Green Energy and Resources*, 2(4):100–105, 2024.
- [2] Javid Mohtasham. Review article-renewable energies. *Energy Procedia*, 74:1289–1297, 2015. The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability –TMREES15.
- [3] European Commission. Renewable energy targets, n.d. Accessed: 2025-07-19.
- [4] International Renewable Energy Agency (IRENA). Energy Profile: Greece — Renewable Energy Statistical Profile. Statistical Profile, IRENA, Abu Dhabi, United Arab Emirates, July 2024. Accessed July 2025.
- [5] Shubh Lakshmi and Sanjib Ganguly. Modelling and allocation planning of voltage-sourced converters to improve the rooftop pv hosting capacity and energy efficiency of distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 12(20):4462–4471, October 2018.
- [6] Pisitpol Chirapongsananurak and Naebboon Hoonchareon. Grid code for pv integration in distribution circuits considering overvoltage and voltage variation. In *TENCON 2017 - 2017 IEEE Region 10 Conference*, pages 1936–1941, 2017.
- [7] Tariq Aziz and Nipon Ketjoy. Pv penetration limits in low voltage networks and voltage variations. *IEEE Access*, 5:16784–16792, 2017.
- [8] Negash Teklebrhan, A.A. Solomon, Fredric Ottermo, Erik Möllerström, István Seres, and István Farkas. Strategies for integrating residential pv and wind energy in eritrea’s

- electricity grid by imposing feed-in constraints in low voltage network. *Solar Energy*, 286:113140, 2025.
- [9] Samar Fatima, Verner Püvi, and Matti Lehtonen. Review on the pv hosting capacity in distribution networks. *Energies*, 13:4756, 09 2020.
- [10] Mikka Kisuule, Mike Brian Ndawula, Chenghong Gu, and Ignacio Hernando-Gil. Pv hosting capacity in lv networks by combining customer voltage sensitivity and reliability analysis. *Energies*, 16(16), 2023.
- [11] Anamika Dubey, Surya Santoso, and Arindam Maitra. Understanding photovoltaic hosting capacity of distribution circuits. In *2015 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, 2015.
- [12] Sherif M. Ismael, Shady H.E. Abdel Aleem, Almoataz Y. Abdelaziz, and Ahmed F. Zobaa. State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Renewable Energy*, 130:1002–1020, 2019.
- [13] Gioacchino Tricarico, Francisco Gonzalez-Longatt, Francesca Marasciuolo, Oleksandra Ishchenko, Maria Dicorato, and Giuseppe Forte. A time-series hosting capacity assessment of the maximum distributed energy resource production. In *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, pages 1–6, 2023.
- [14] Sai Munikoti, Mohammad Abujobbeh, Kumarsinh Jhala, and Balasubramaniam Natara-jan. A novel framework for hosting capacity analysis with spatio-temporal probabilistic voltage sensitivity analysis. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 134:107426, 2022.
- [15] Ammar Arshad and Matti Lehtonen. A stochastic assessment of pv hosting capacity enhancement in distribution network utilizing voltage support techniques. *IEEE Access*, 7:46461–46471, 2019.
- [16] Enock Mulenga, Math H.J. Bollen, and Nicholas Etherden. A review of hosting capacity quantification methods for photovoltaics in low-voltage distribution grids. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 115:105445, 2020.

- [17] Ezequiel Junio Lima and Luiz Carlos Gomes Freitas. Hosting capacity calculation deploying a hybrid methodology: A case study concerning the intermittent nature of photovoltaic distributed generation and the variable nature of energy consumption in a medium voltage distribution network. *Energies*, 15(3), 2022.
- [18] Viyathukattuva M. A. M. Mansoor, Phuong. H. Nguyen, and W. L. Kling. An integrated control for overvoltage mitigation in the distribution network. In *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, pages 1–6, 2014.
- [19] Fernando M. Camilo, Rui Castro, Maria Eduarda Almeida, and Victor Fernão Pires. Assessment of overvoltage mitigation techniques in low-voltage distribution networks with high penetration of photovoltaic microgeneration. *IET Renewable Power Generation*, 12(6):649–656, 2018.
- [20] Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)*, pages 1–98, 2019.
- [21] American National Standards Institute. ANSI C84.1 2020: Electric Power Systems and Equipment—Voltage Ratings (60 Hz). ANSI Standards Blog, September 2020. “ANSI C84.1 2020 provides ... establishing nominal voltage ratings and operating tolerances for 60 Hz systems...”.
- [22] K.A. Makinde and G. Lacey. Over-voltage problem in distribution network with dg: A review of mitigation techniques. In *2021 IEEE 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- [23] Ahmed M.M. Nour, Ahmed Y. Hatata, Ahmed A. Helal, and Magdi M. El-Saadawi. Review on voltage-violation mitigation techniques of distribution networks with distributed rooftop pv systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(3):349–361, 2020.
- [24] Severin Nowak, Malcolm S. Metcalfe, Wilson Eberle, and Liwei Wang. Comparison of voltage control methods in distribution systems using q-v based pi and droop controls of solar inverters. In *2017 IEEE Power Energy Society General Meeting*, pages 1–5, 2017.

- [25] H. Sekhavatmanesh, G. Ferrari-Trecate, and S. Mastellone. Optimal control configuration in distribution network via an exact opf relaxation method. In *2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 5698–5704, 2022.
- [26] Girraj Singh, D. S. Chauhan, Aseem Chandel, and Deepak. Factor affecting elements and short term load forecasting based on multiple linear regression method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(12):–, 2014. Peer reviewed open access journal.
- [27] Angelos I. Nousedilis, Andreas I. Chrysochos, Grigoris K. Papagiannis, and Georgios C. Christoforidis. The impact of photovoltaic self-consumption rate on voltage levels in lv distribution grids. In *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pages 650–655, 2017.
- [28] R.C. Dugan. Reference guide: The open distribution system simulator (openss). *Electric Power Research Institute, Inc.*, 2012.
- [29] The MathWorks, Inc. Matlab 8.6.0. *The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States*, 2015.