



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

Ανάλυση Δικτύου Διανομής με Κινητήρες Επαγωγής και Επίδραση στην Ευστάθεια Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διονύσιος Τσουκαλάς

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020



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

Ανάλυση Δικτύου Διανομής με Κινητήρες Επαγωγής και Επίδραση στην Ευστάθεια Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διονύσιος Τσουκαλάς

Επιβλέπων Καθηγητής : Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

.....
Διονύσιος Τσουκαλάς

Copyright © Διονύσιος Τσουκαλάς, 2020

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη συμπεριφορά μιας γραμμής διανομής με συνδεδεμένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, η εξέταση των μηχανισμών αστάθειας και των μεθόδων ελέγχου της τάσης της γραμμής. Ερευνάται επίσης η δράση του Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) του μετασχηματιστή καθώς και η παραγωγή αέργου ισχύος από τις ΑΠΕ ως παράγοντες ευστάθειας του συστήματος καθώς και μηχανισμού άεργης υποστήριξης υπό διαφορετικά σενάρια και συνδεσμολογίες.

Για την παραπάνω εξέταση αρχικά αναπτύσσεται λογισμικό προσομοίωσης του δικτύου διανομής στο υπολογιστικό πρόγραμμα MATLAB. Η αναπαράσταση της ροής φορτίου πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου ο οποίος χρησιμοποιεί την επαναληπτική αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson για το κάθε εξεταζόμενο σενάριο.

Στο πρώτο σκέλος της εργασίας, γίνεται ανάλυση του για στατικά σενάρια παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και κατανάλωσης από τα φορτία και παρατηρείται η συμπεριφορά του, παρουσιάζεται ένας τρόπος μοντελοποίησης φορτίων σταθερής αγωγιμότητας και συγκρίνονται διαφορετικά μοντέλα φορτίων εξαρτώμενων της τάσης. Έπειτα πραγματοποιείται χρονική προσομοίωση του συστήματος εντάσσοντας παράλληλα διαταραχές στο σύστημα και παρατηρείται ο τρόπος αντιμετώπισης τους από το ΣΑΤΥΦ.

Ακόμη, εξετάζεται η συμπεριφορά της γραμμής διανομής με την ένταξη και παράσταση κινητήρων επαγωγής αντικαθιστώντας ορισμένα φορτία, και προσομοιώνεται ξανά η λειτουργία του συστήματος. Πραγματοποιείται μοντελοποίηση των κινητήρων για την ενσωμάτωσή τους στο πρόγραμμα επίλυσης ροής φορτίου και εξάγονται αποτελέσματα που συγκρίνονται με εκείνα πριν την προσθήκη τους.

Τέλος προσομοιώνεται η σύνδεση της γραμμής διανομής με ένα ακτινικό σύστημα μεταφοράς, καθώς και το όριο φόρτισης του συστήματος, η ικανότητα προσφοράς αέργου ισχύος από το διεσπαρμένη παραγωγή. Ακόμη υπολογίζεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και τις επιπτώσεις που έχει σε αυτή η ύπαρξη κινητήρων επαγωγής ως φορτία της γραμμής διανομής. Επιπλέον ερευνώνται τρόποι αύξησης της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για τη γραμμή διανομής με και χωρίς κινητήρες επαγωγής.

Λέξεις Κλειδιά:

Δίκτυο Διανομής, Σύστημα μεταφοράς, Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), Κινητήρες Επαγωγής, Ευστάθεια Τάσης, Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, Άεργος Υποστήριξη, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Φωτοβολταϊκά Συστήματα.

Abstract

The present dissertation examines the behavior of a distribution line with connected dispersed generation units, the instability mechanisms and methods of controlling the line voltage. The action of the Load Tap Changer (LTC) of the transformer is also investigated as well as the production of reactive power from Renewable Energy Sources (RES) as factors of system stability as well as a passive support mechanism under different scenarios and connections.

For the above examination, first the distribution network simulation software is developed in the MATLAB computer program. The representation of the load flow is performed using an algorithm that uses the iterative arithmetic method Newton-Raphson for each scenario under consideration.

In the first part of the work, static distribution network analysis is performed for static scenarios of energy production from RES and consumption from loads and its behavior is observed, a way of modeling constant conductivity loads is presented and comparing different voltage-dependent load models. Then a temporal simulation of the system is performed while including disturbances in the system and the way of dealing with them by the LTC is observed.

Furthermore, the behavior of the distribution line with the integration and representation of induction motors replacing certain loads is examined, and the operation of the system is simulated again. The motors are modeled to be integrated into the load flow solution and results are compared with those before they are added.

Finally, the connection of the distribution line to a radial transmission system is simulated, as well as the load limit of the system, the ability to supply reactive power from the distributed production, while the Maximum Power Transfer is also calculated and the effects on this existence of induction motors as loads of the distribution line are modeled. In addition, ways to increase the maximum transmitted power for the distribution line with and without induction motors are being investigated.

Keywords:

Distribution Network, Transmission System, Load Tap Changer (LTC), Induction Motors, Voltage Stability, Maximum Power Transfer, Reactive Power Support, Distributed Production, Photovoltaic Systems.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου, κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που προσέφερε σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Θεόδωρο Σουζέ και Γεώργιο Πριονιστή, για την εξαιρετική συνεργασία, τη βοήθεια που προσέφεραν και τον χρόνο που αφιέρωσαν για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για την συνεχή υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	1
1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	1
1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς.....	2
1.1.3 Δίκτυο Διανομής.....	2
1.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....	3
1.2.1 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί Παραγωγής.....	4
1.2.2 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στο Δίκτυο.....	5
1.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ.....	7
1.3.1 DC – DC μετατροπείς ισχύος.....	7
1.3.2 DC – AC μετατροπείς ισχύος (αντιστροφείς).....	8
1.3.3 Τρόποι Λειτουργίας Μετατροπέων Ηλεκτρονικών Ισχύος.....	9
1.4 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ – ΕΚΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	11
1.4.1 Επαγωγικοί κινητήρες.....	12
1.4.2 Ταξινόμηση Φαινομένων Ευστάθειας.....	14
1.4.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV.....	15
1.5 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ.....	20
1.5.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ.....	20
1.5.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης.....	21
1.5.2.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	21
1.5.2.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	23
1.6 ΟΙΟΝΕΙ ΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	23
1.7 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	24
2. ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	29
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	29
2.1.1 Περιγραφή.....	29
2.1.2 Επίπεδα Τάσης.....	31
2.1.3 Λειτουργία ΣΑΤΥΦ.....	31
2.1.4 Επαγωγική/Ωμική Συμπεριφορά Γραμμών Διανομής.....	32
2.1.5 Προσεγγιστικός Τύπος Υπολογισμού Πτώσης Τάσης.....	35
2.2 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ.....	35
2.2.1 Δομή Συστήματος και Παρουσίαση Δεδομένων Γραμμής Διανομής.....	35
2.2.2 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ).....	36
2.2.3 Κλάδοι Εξεταζόμενης Γραμμής Διανομής.....	37
2.2.4 Φορτία – Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	38
2.3 ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΥΨΩΣΗ ΤΑΣΗΣ.....	39
2.3.1 Προσεγγιστική Μέθοδος Υπολογισμού.....	40
2.3.1.1 Μοντέλο δύο ζυγών.....	40
2.3.1.2 Προσεγγιστικό Μοντέλο 9 Ζυγών.....	42
2.3.2 Ακριβής Μέθοδος Υπολογισμού.....	43
2.3.2.1 Μοντέλο δύο ζυγών.....	43

2.3.2.2 Απλοποιημένο Μοντέλο 9 Ζυγών	44
2.3.3 Συμπέρασμα	44
2.4 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	44
3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	47
3.1 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	47
3.2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	50
3.2.1 Εισαγωγή Δεδομένων	50
3.2.2 Διαμόρφωση πίνακα αγωγιμοτήτων	51
3.2.3 Σχηματισμός Ιακωβιανού Πίνακα / Υπολογισμός Σφαλμάτων ΔΡ/ΔQ.....	52
3.2.4 Υπολογισμός Ροής Κλάδων	53
3.2.5 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο	54
3.2.6 Μακροπρόθεσμη Προσομοίωση	55
4. ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΩΝ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ	57
4.1 ΦΟΡΤΙΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	57
4.1.1 Μεθοδολογία.....	58
4.1.2 Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή Φωτοβολταϊκών	59
4.1.3 Μέγιστο Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή Φωτοβολταϊκών.....	60
4.1.4 Μέγιστο Φορτίο / Μηδενική αντίστροφη ροή	61
4.1.5 Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή	61
4.2 ΦΟΡΤΙΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ	63
4.2.1 Μεθοδολογία.....	63
4.2.2 Ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή.....	64
4.2.3 Ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή	65
4.2.4 Διπλάσιο ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή.....	67
4.2.5 Διπλάσιο Ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή	68
5. ΞΕΝΤΑΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	71
5.1 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	71
5.2: ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	72
5.2.1 Παραδοχές και Δεδομένα.....	72
5.2.2 Εύρεση Ολίσθησης	73
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	74
5.3.1 Ένας οικιακός κινητήρας στον ζυγό 8	74
5.3.2 Ένας Ισοδύναμος Επαγγελματικός Κινητήρας στον ζυγό 8	77
5.3.3 Σύστημα με δύο Κινητήρες επαγγελματικών και οικιακών φορτίων στους ζυγούς 5 και 8 αντίστοιχα	78
6. ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	81
6.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ ΤΑΣΕΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΑΤΥΦ	81
6.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΑΠΟΦΥΓΗ ΥΠΕΡΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΤΑΣΕΩΝ.....	82
6.2.1 Μηδενική παραγωγή από τα Φ/Β και μέγιστα φορτία σταθερής ισχύος για επαγγελματικό (commercial) κινητήρα στον ζυγό 5.....	82
6.2.2 Μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος 2MW από κάθε Φ/Β και ελάχιστα φορτία σταθερής ισχύος για επαγγελματικό (commercial) κινητήρα.....	83
6.3 ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΣΕΝΑΡΙΑ	84
6.3.1 Περιγραφή μεθόδου.....	85
6.3.2 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, μέγιστα φορτία σταθερής ισχύος και μηδενική παραγωγή Φ/Β.....	86

6.3.3 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, ελάχιστα φορτία σταθερής ισχύος και μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β	87
6.3.4 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, μέγιστα φορτία σταθερής αγωγιμότητας και μηδενική παραγωγή Φ/Β.....	88
6.3.5 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, ελάχιστα φορτία σταθερής αγωγιμότητας και μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β	89
6.3.6 Μηδενική παραγωγή από Φ/Β και μέγιστα φορτία κατά 100% σταθερής αγωγιμότητας και κινητήρα οικιακών φορτίων	90
6.3.7 Μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος 2MW από κάθε Φ/Β και ελάχιστα φορτία κατά 100% σταθερής αγωγιμότητας και κινητήρα οικιακών φορτίων.....	91
6.3.8 Μηδενική παραγωγή από Φ/Β και μέγιστα φορτία κατά 100% σταθερής αγωγιμότητας με δύο κινητήρες.....	92
6.3.9 Μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος 2MW από κάθε Φ/Β και ελάχιστα φορτία κατά 100% σταθερής αγωγιμότητας με δύο κινητήρες	93
7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	95
7.1 ΑΚΤΙΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	95
7.2 ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ	97
7.3 ΚΑΜΠΥΛΕΣ P-V.....	98
7.4 ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΧΩΡΙΣ ΠΥΚΝΩΤΗ (Π.1).....	98
7.5 ΑΥΞΗΣΗ ΤΑΣΕΩΣ ΖΥΓΟΥ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΥΚΝΩΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ (Π.2)	101
7.6 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΟ Φ/Β (Π.3)	103
7.7 ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΜΕ ΔΥΟ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ (Π4)	105
7.7.1 Αρχικοποίηση Συστήματος με Κινητήρες	105
7.7.2 Δίκτυο Διανομής χωρίς Άεργο Υποστήριξη.....	106
7.7.2.1 Δίκτυο διανομής με δύο κινητήρες επαγωγής (Κ.1α).....	106
7.7.2.2 Δίκτυο διανομής με οικιακό κινητήρα στον ζυγό 9 (Κ.2α).....	109
7.7.2.3 Δίκτυο διανομής με επαγγελματικό κινητήρα στον ζυγό 6 (Κ.3α)....	111
7.7.3 Δίκτυο Διανομής με Άεργο Υποστήριξη	113
7.7.3.1 Δίκτυο διανομής με δύο κινητήρες επαγωγής (Κ.1β)	113
7.7.3.2 Δίκτυο διανομής με οικιακό κινητήρα στον ζυγό 9 (Κ.2β).....	115
7.7.3.3 Δίκτυο διανομής με επαγγελματικό κινητήρα στον ζυγό 6 (Κ.3β)....	116
7.8 ΕΞΕΤΑΣΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	118
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	123
8.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	123
8.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΈΡΕΥΝΑΣ	126
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	128

1. Εισαγωγή

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις για την καλή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι και το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή, και επειδή δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται [1].

1.1.1 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Παραγωγή ενέργειας ονομάζεται η διαδικασία που απαιτείται για τη μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας (π.χ. θερμική, υδροηλεκτρική, αιολική) αρχικά σε μηχανική (π.χ. κινητήρες, στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Στο σύστημα παραγωγής συμπεριλαμβάνονται και οι υποσταθμοί ανύψωσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή, προέρχεται από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς με την καύση ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο), από υδροηλεκτρικούς σταθμούς μέσω της μηχανικής ενέργειας των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων, από πυρηνικούς σταθμούς με την πυρηνική σχάση (ουράνιο, πλουτώνιο, θόριο), και τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η βιομάζα, τα θαλάσσια ρεύματα.

1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται με τις γραμμές υψηλής (ΥΤ) και υπερυψηλής (ΥΥΤ) τάσης οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς διανομής, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ). Εκείνα με τη σειρά τους διανέμουν την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές διαμέσου των σταθμών διανομής και των γραμμών μέσης τάσης. Επίσης, τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση (ΥΤ/ΜΤ) και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (ΧΤ), και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10MW. Το σύστημα μεταφοράς συμπεριλαμβάνει και τους υποσταθμούς ζεύξης των διαφορετικών δικτύων των γραμμών υψηλής τάσης.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τιμές τάσης μεταφοράς, αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταφοράς στα ΣΗΕ έχουν σήμερα τιμές 66kV, 110kV, 132kV, 138kV, 150kV, 220kV, 275kV, 345kV, 400kV, 500kV και 750kV. Η μορφή των δικτύων μεταφοράς μπορεί να είναι διαμήκης ή κυκλική, ανάλογα με την σχετική θέση των σταθμών παραγωγής. Ωστόσο η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφοράς είναι συνήθως οικονομικά εξαρτημένες μεταξύ τους και γι' αυτόν τον λόγο ο σχεδιασμός των σταθμών παραγωγής, των κυρίων γραμμών μεταφοράς και των κεντρικών υποσταθμών πρέπει να είναι ενιαίος με στόχο την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της κατανάλωσης με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τη βέλτιστη αξιοπιστία τροφοδότησης. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system).

1.1.3 Δίκτυο Διανομής

Με τον όρο *διανομή* ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει στους καταναλωτές, και από τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τις συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς.

Τα Δίκτυα Διανομής (ΔΔ) φτάνουν μέχρι τον μετρητή της παρεχόμενης ενέργειας του καταναλωτή. Τα τελευταία χρόνια ο όρος *σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας* καλύπτει τα δίκτυα διανομής και τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, καλύπτοντας όλη την δραστηριότητα της διανομής από τους υποσταθμούς μέσης τάσης έως την κατανάλωση.

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με την μορφολογία της περιοχής που τροφοδοτούν, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε υπόγεια και εναέρια. Λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας.

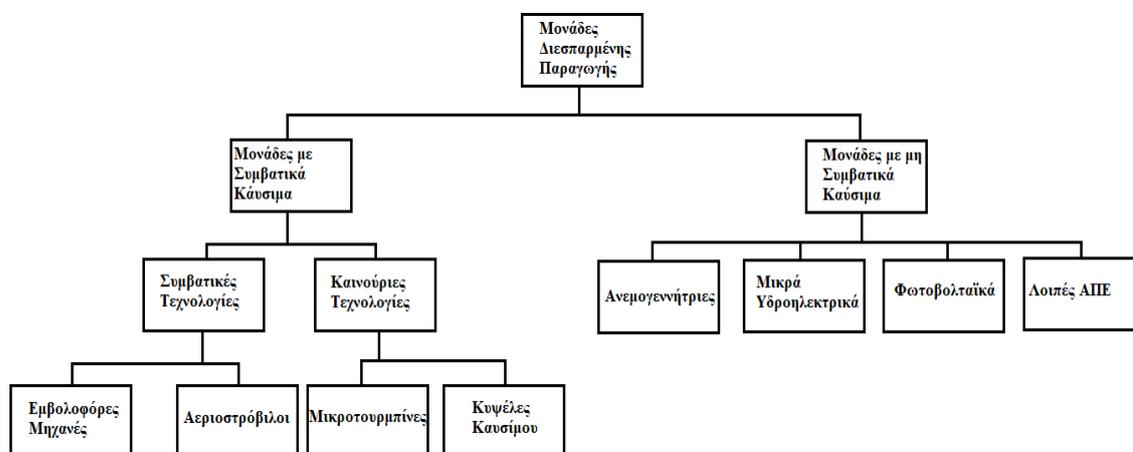
Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. Επιπροσθέτως, η ραγδαία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη διείσδυση παραγωγής στο δίκτυο διανομής σε μέση τάση MT αλλά και σε χαμηλή τάση XT. [2]

1.2 Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής

Ως διεσπαρμένη παραγωγή ορίζονται οι μονάδες παραγωγής με ονομαστική δυνατότητα παροχής ισχύος από 1kW έως 100 MW, που κατά κανόνα συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν σχεδιάζονται ή ελέγχονται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας.[3]

Η διεσπαρμένη παραγωγή συχνά αναφέρεται στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ), όπως είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, εξαιρουμένων ορισμένων υδροηλεκτρικών εργοστασίων μεγάλης κλίμακας ή μεγάλων παράκτιων αιολικών πάρκων. Ωστόσο, στην διεσπαρμένη παραγωγή, εκτός από ΑΠΕ εντάσσονται και σταθμοί παραγωγής οι οποίοι χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα.

Η διείσδυση της Διεσπαρμένης Παραγωγής, στα Δίκτυα Διανομής, η οποία ερευνάται σε αυτήν τη διπλωματική εργασία, γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη. Όταν η διεσπαρμένη παραγωγή φτάνει σε αυξημένα επίπεδα διείσδυσης, τότε επιδρά στην ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς. Ακόμα, αυξημένη έγχυση ισχύος στο Δίκτυο Διανομής μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις και αναστροφή ροής ισχύος με αποτέλεσμα να επηρεαστούν οι ρυθμίσεις προστασίας μέσα στο δίκτυο διανομής. Ένα δίκτυο διανομής με αυξημένη διείσδυση Διεσπαρμένης Παραγωγής ανταποκρίνεται δυναμικά σε διαταραχές του συστήματος και συνεπώς επηρεάζει τη συνολική ευστάθειά του και τη δυναμική του συμπεριφορά. Η Διεσπαρμένη Παραγωγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσφέρει υποστήριξη στο Δίκτυο Διανομής μεταβάλλοντας την προσφορά αέργου ισχύος στο δίκτυο, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου, χάρις στα ηλεκτρονικά ισχύος που διαθέτουν οι μονάδες παραγωγής. [3]



Σχήμα 1.1 Κύριες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]

Οι κύριες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής είναι μονάδες αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής. Στο δίκτυο μέσης τάσης μπορεί να είναι ολόκληρα πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ έως και κάποια MW ενώ στο δίκτυο χαμηλής τάσης και σε δευτερεύοντα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι φωτοβολταϊκά στέγης ή μικρές ανεμογεννήτριες. Το σημαντικό για τις παραπάνω μονάδες που αναφέρονται είναι ότι πρόκειται για μονάδες εξοπλισμένες με ηλεκτρονικά ισχύος και δυνατότητα ρύθμισης της αέργου ισχύος και του συντελεστή ισχύος τους.

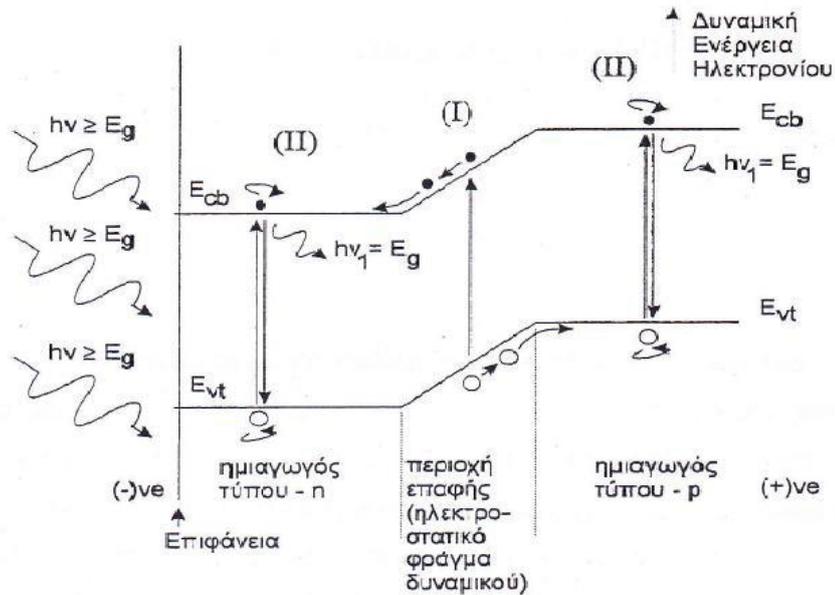
Η Διεσπαρμένη Παραγωγή όταν ελέγχεται μπορεί να παρέχει υποστήριξη στο ανάντη δίκτυο μεταφοράς στηρίζοντας τη ζήτηση άεργου ισχύος από τα φορτία του δικτύου διανομής και μείωση της ροής σε περίπτωση συμφόρησης. Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με την εκμετάλλευση των ηλεκτρονικών ισχύος και των αντιστροφών που υπάρχουν στις περισσότερες μονάδες παραγωγής ΔΠ. Η παροχή στήριξης στο Δίκτυο Μεταφοράς ήδη είναι απαραίτητη σε χώρες με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής.

1.2.1 Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί Παραγωγής

Ένας φωτοβολταϊκός σταθμός αποτελείται από ένα σύνολο φωτοβολταϊκών πλαισίων και ανάλογα με τη χρήση, μπορεί να περιλαμβάνει έναν μετατροπέα για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο, ρυθμιστές τάσης και ρεύματος, διατάξεις ελέγχου και συστοιχίες συσσωρευτών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε πλαίσιο περιλαμβάνει ένα πλήθος ηλιακών κυψελών (Solar Cells) που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, εκμεταλλευόμενες το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η ηλιακή κυψέλη αποτελείται από έναν ημιαγωγό μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου, συνήθως μια δίοδος επαφής p-n ή μία δίοδος Schottky, με διαστάσεις περίπου 100 cm^2 και με παραγωγή ισχύος ίση με 1 W . Ομάδες από πολλές ηλιακές κυψέλες συνθέτουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, με συνολική παραγόμενη ισχύ 30 με 120 W . Σειρές φωτοβολταϊκών πλαισίων αποτελούν το φωτοβολταϊκό σταθμό. [1]

Στο ηλιακό στοιχείο προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με ενέργεια τιμής $E = h \cdot \nu \leq E_g$. Όπου $E_g = E_{cb} - E_{vt}$ η τιμή του ενεργειακού διακένου, E_{cb} είναι ο πυθμένας της ζώνης αγωγιμότητας και E_{vt} η κορυφή ζώνης σθένους.

Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει το ρεύμα μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος παράγοντας με τον τρόπο αυτό ωφέλιμη ισχύ.



Σχήμα 1.2 Διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 1.2, το φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως εξής: Τα ηλεκτρόνια μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρονται σαν σφαίρες με μάζα όσο αυτής του ηλεκτρονίου, m_e οι οποίες έχουν την τάση να μετακινούνται στην όσο το δυνατόν χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την δυναμική τους ενέργεια. Αντίθετα, οι οπές, που μπορούν να περιγραφούν σαν θέσεις στις οποίες απουσιάζει ένα ηλεκτρόνιο, έχουν την τάση να ελαχιστοποιήσουν τη δυναμική τους ενέργεια, κινούμενες προς τα πάνω. Για παράδειγμα, σε μια δίοδο p-n όπως του σχήματος, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα του ημιαγωγού τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα του ημιαγωγού τύπου p, με αποτέλεσμα να συσσωρεύονται φορτία στις δύο απέναντι επιφάνειες και να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δυο τμημάτων του ηλιακού στοιχείου, το ηλεκτροστατικό φράγμα δυναμικού, για όσο διάστημα υπάρχει η οπτική διέγερση.

1.2.2 Σύνδεση Φωτοβολταϊκών Εγκαταστάσεων στο Δίκτυο

Οι φωτοβολταϊκές μονάδες λειτουργούν με συνεχές ρεύμα (DC). Συνεπώς για να συνδεθεί μια μονάδα παραγωγής σε ένα δίκτυο διανομής θα πρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο, με σταθερή τάση και συχνότητα. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και πιο συγκεκριμένα, αντιστροφών. Οι αντιστροφείς των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων διαφέρουν από τους αντιστροφείς των άλλων ηλεκτρονικών εφαρμογών καθώς μπορούν να ελέγχουν την έξοδο των φωτοβολταϊκών υποπεδίων, προκειμένου να δημιουργούν συνθήκες μέγιστης απόδοσης.

Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια τεχνολογία η οποία ασχολείται με τη διαδικασία της μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος από μία μορφή σε μία άλλη. Εξαιτίας της

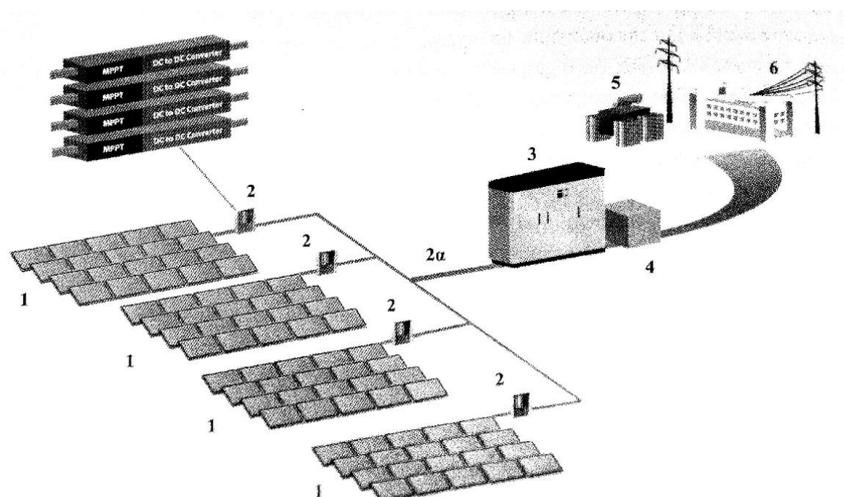
διαφορετικής φύσεως των επιπέδων και μορφών της τάσεως και της συχνότητας της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των μεταβλητών απαιτήσεων των σύγχρονων εφαρμογών, η παρέμβαση των ηλεκτρονικών ισχύος στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του συνολικού συστήματος. [5],[10].

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις βασικού τύπου, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εισόδου και της εξόδου του συστήματος:

- DC – DC μετατροπείς: Μετατρέπουν τη συνεχή τάση μιας ορισμένης τιμής και πολυπλοκότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και πολυπλοκότητας.
- AC – DC μετατροπείς (ανορθωτές): Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης σε ένα σύστημα συνεχούς.
- DC – AC μετατροπείς (αντιστροφείς): Μετατρέπουν την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη, όπου η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από ένα σύστημα συνεχούς τάσης σε ένα σύστημα εναλλασσόμενης.
- AC – AC μετατροπείς: Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής και πολυπλοκότητας σε εναλλασσόμενη τάση άλλης τιμής και πολυπλοκότητας.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκές μονάδες οι οποίες διαθέτουν κατά κανόνα μετατροπείς DC – AC (αντιστροφείς) καθώς και DC – DC μετατροπείς για προσαρμογή του επιπέδου της τάσης και αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται προοπτικά τα κυριότερα τμήματα μιας μεγάλης ΦΒ εγκατάστασης που βασίζει τη λειτουργία της σε διάταξη κεντρικού αντιστροφέα.



Σχήμα 1.3 Φωτοβολταϊκή Εγκατάσταση μεγάλης ισχύος που βασίζει τη λειτουργία της σε κεντρικό αντιστροφέα όπου 1) υποπεδίο, 2) MPPT και DC-DC μετατροπείς τάσης, 3) κεντρικός αντιστροφέας, 4) συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, 5) Μ/Σ ανύψωσης τάσης και διασύνδεση στο ΜΤ, 6) τοπική κατανάλωση και διασύνδεση στο δίκτυο

1.3 Μετατροπείς Ισχύος

Όπως ειπώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, τα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούν τη χρήση μετατροπέων ισχύος για τη σύνδεση τους στο δίκτυο.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια τεχνολογία η οποία παρεμβάλλεται στη διαδικασία της μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα στην πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και το φορτίο βασισμένη στη συνδυασμένη γνώση των συστημάτων ενέργειας, της ηλεκτρονικής και του ελέγχου. Εξαιτίας της διαφορετικής φύσεως των επιπέδων και μορφών της τάσεως και της συχνότητας της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των μεταβλητών απαιτήσεων των σύγχρονων εφαρμογών, η παρέμβαση των ηλεκτρονικών ισχύος στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του συνολικού συστήματος. [5]

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις βασικού τύπους, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της εισόδου και της εξόδου του συστήματος.

- DC – DC μετατροπείς
- AC – DC μετατροπείς (ανορθωτές)
- DC – AC μετατροπείς (αντιστροφείς)
- AC – AC μετατροπείς

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής, τα οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων εμπεριέχουν μετατροπείς DC – AC (αντιστροφείς) καθώς και DC – DC μετατροπείς για προσαρμογή του επιπέδου της τάσης.

1.3.1 DC – DC μετατροπείς ισχύος

Η βασική λειτουργία των μετατροπέων DC- DC είναι η διατήρηση μιας σταθερής τάσης εξόδου για μεταβαλλόμενη τιμή της τάσης εισόδου ή η οδήγηση της τάσεως/ ρεύματος εισόδου σε κάποια επιθυμητή τιμή. Οι βασικοί εκπρόσωποι των DC – DC μετατροπέων είναι :

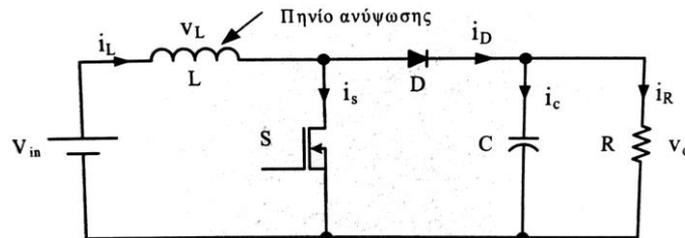
- Μετατροπέας υποβιβασμού τάσης
- Μετατροπέας ανύψωσης τάσης
- Μετατροπέας $\hat{C}uk$
- Μικτός Μετατροπέας
- Μετατροπέας με πλήρη γέφυρα

Από αυτούς τους πέντε μετατροπείς οι μετατροπείς υποβιβασμού και ανύψωσης τάσης θεωρούνται ως βασικές τοπολογίες.

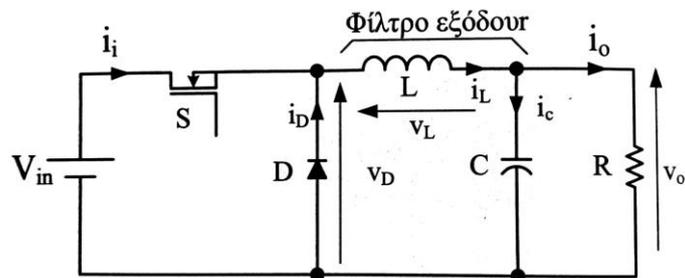
Στα Σχήματα 1.4 και 1.5, απεικονίζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα των βασικότερων DC – DC μετατροπέων. Μέσω του μετατροπέα ανύψωσης η τάση εξόδου, η οποία είναι επίσης συνεχής, μπορεί να πάρει τιμές πάνω από την τάση τροφοδοσίας έως και τέσσερις φορές ανάλογα με την τιμή του πηνίου εισόδου L και του βαθμού χρησιμοποίησης του διακόπτη. Η ελάχιστη τιμή τάσης εξόδου είναι ίση με την τάση εισόδου. Η λειτουργία του μετατροπέα ανύψωσης αποτελείται από τρεις φάσεις: την Φόρτιση του πηνίου (I), την Εκφόρτιση του πηνίου (II) και την Ασυνεχή Λειτουργία (III – όταν λειτουργεί με ασυνεχές ή μηδενικό ρεύμα πηνίου, κανένα ημιαγωγικό στοιχείο δεν άγει).

Όσον αφορά τον μετατροπέα υποβιβασμού, έχει την ικανότητα η έξοδος του να λαμβάνει τιμές από μηδέν έως την τιμή της τάσης εισόδου.

Στην παρούσα εργασία ο μετατροπέας DC – DC αναφέρεται απλά για λόγους πληρότητας καθώς εξετάζονται φωτοβολταϊκά συστήματα. Ωστόσο, η μελέτη αφορά κυρίως στην πλευρά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε το ενδιαφέρον της μελέτης ξεκινά από τον αντιστροφέα και μετά.



Σχήμα 1.4 Κύκλωμα DC-DC μετατροπέα ανύψωσης τάσης



Σχήμα 1.5 Κύκλωμα DC-DC μετατροπέα υποβιβασμού τάσης

1.3.2 DC – AC μετατροπείς ισχύος (αντιστροφείς)

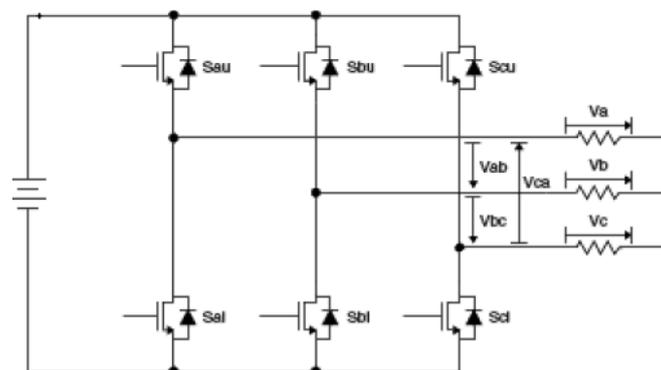
Οι αντιστροφείς είναι ένα είδος μετατροπέων με την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς ρεύματος ή τάσης σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και RMS τιμής.

Έτσι υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες αντιστροφέων:

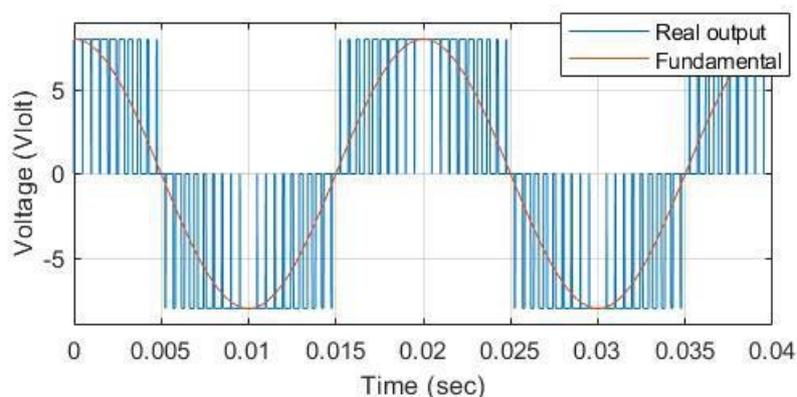
- Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (Voltage Source Inverters, VSI)

- Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (Current Source Inverter, CSI)

Στο σχήμα 1.6 παρουσιάζεται το κύκλωμα ενός τριφασικού Αντιστροφέα Πηγής Τάσης (VSI αντιστροφέας) ο οποίος χρησιμοποιεί για ημιαγώγιμα στοιχεία IGBTs, καθώς και η κυματομορφή της τάσης στην έξοδό του στο σχήμα 1.7. Η διαμόρφωση τους εύρους των παλμών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων πραγματοποιείται μέσω της τεχνικής Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM), όπου το ημιτονοειδές σήμα αναφοράς (Fundamental) συγκρίνεται με ένα υψίσυχο φέρων σήμα (Carrier) ώστε να προκύψουν οι παλμοί οδήγησης των IGBTs.



Σχήμα 1.6 Τριφασικός Αντιστροφέας Πηγής Τάσης



Σχήμα 1.7 Ημίτονο Αναφοράς και τάση εξόδου Αντιστροφέα

1.3.3 Τρόποι Λειτουργίας Μετατροπέων Ηλεκτρονικών Ισχύος

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να ελέγχουν ξεχωριστά την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχουν ή καταναλώνουν. Έτσι, μπορούν να ελέγχουν ρεύματα ή τάσεις προσαρμόζοντας κατάλληλα την έγχυση ισχύος. Επειδή οι μετατροπείς στην πραγματικότητα συνθέτουν την κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος ή τάσεως, έχουν πολύ γρήγορη αντίδραση, και μπορούν να ρυθμίσουν τάση, ρεύμα ή ισχύ εντός μια περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος (20ms για σύστημα 50Hz). Στην εργασία αυτή θα θεωρηθεί

ότι ο έλεγχος που ασκούν οι μετατροπείς είναι πρακτικά ακαριαίος και ότι περιλαμβάνεται στις αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου.

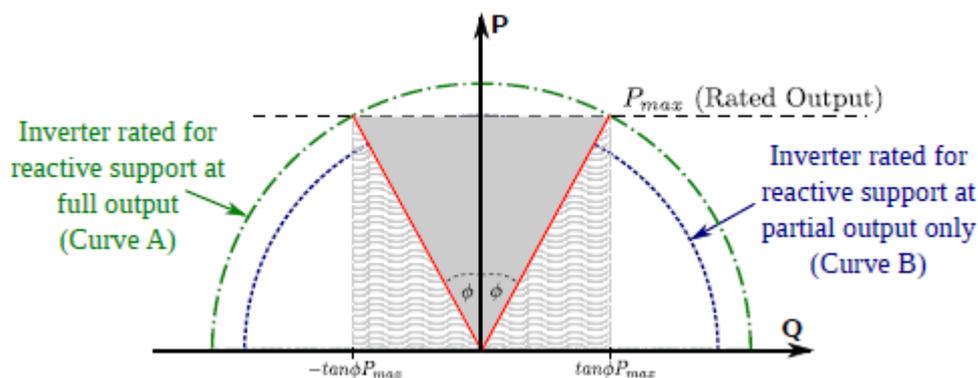
Οποσδήποτε, δεδομένου ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν συνεχές ρεύμα, η σύνδεσή τους στο δίκτυο γίνεται πάντοτε μέσω μετατροπέα DC/AC (Εν. 1.2.2) και κατάλληλων διατάξεων ζεύξεων και προστασίας.

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος δεν έχουν δυνατότητα ακόμα και χρονικά περιορισμένης υπερφόρτισης. Σε περίπτωση που ζητηθεί από το ρυθμιστή τιμή ρεύματος μεγαλύτερη από την ονομαστική, αυτή περιορίζεται αυτόματα. Ο περιορισμός σε αυτή την εργασία υλοποιείται μέσω της μείωσης της τάσης του μετατροπέα πηγής τάσης μέχρις ότου το ρεύμα επιστρέψει σε επιτρεπτή τιμή. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα τείνει να ξεπεράσει το επιτρεπόμενο όριο, ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος. Θεωρείται ότι η δράση του ελεγκτή ρεύματος γίνεται ακαριαία.

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος οφείλει να καλύπτει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ υπό ονομαστική τάση. Συνεπώς, θεωρώντας S_n ονομαστική φαινόμενη ισχύ και V_n ονομαστική τάση του μετατροπέα (στο ανά μονάδα σύστημα), το μέγιστο όριο του ρεύματος είναι:

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (1.1)$$

Η μέγιστη άεργος παραγωγή ή απορρόφηση Q_{max} και Q_{min} καθορίζεται από την ικανότητα κάθε μονάδας που φαίνεται και στο διάγραμμα P-Q του Σχήματος 2.4. Ανάλογα με τη λειτουργία, ορίζεται η μέγιστη άεργος ισχύς που δύναται να παραχθεί από μια μονάδα σε σχέση πάντα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ εκείνη τη στιγμή. Στο σχήμα παρουσιάζονται τρία διαγράμματα που ορίζουν διαφορετικές λειτουργίες για τους μετατροπείς. Το τριγωνικό διάγραμμα δημιουργείται όταν ο μετατροπέας λειτουργεί με σταθερό συντελεστή ισχύος. Το τετραγωνικό δίνει τη δυνατότητα μέγιστης άεργου ισχύος σε χαμηλές τιμές ενεργού ισχύος. Το ημικυκλικό διάγραμμα ικανότητας χρησιμοποιείται όταν οι μετατροπείς μπορούν να φτάνουν τη φαινόμενη ισχύ για πιθανές τιμές ενεργού και άεργου ισχύος. [8]



Σχήμα 1.8 Ικανότητα Φ/B υπό σταθερή τάση

1.4 Παράσταση Ηλεκτρικών Φορτίων – Εκθετικό Μοντέλο

Στην πραγματικότητα τα φορτία σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο μεταβάλλονται συνεχώς. Αυτό συμβαίνει επειδή η ανθρώπινη δραστηριότητα ακολουθεί ορισμένες ημερήσιες, εβδομαδιαίες ή και μηνιαίες κυκλικές μεταβολές. Κατά κανόνα η ζήτηση του φορτίου είναι υψηλότερη κατά τη διάρκεια της μέρας μέχρι νωρίς το απόγευμα. Κατά τη διάρκεια αυτών των ωρών τα βιομηχανικά και εμπορικά φορτία είναι υψηλά, ενώ αρχίζουν να μειώνονται όσο νυχτώνει, αγγίζοντας την χαμηλότερη κατανάλωση από αργά το βράδυ έως και νωρίς το πρωί. Ωστόσο τα οικιακά φορτία λειτουργούν περίπου αντίστροφα, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Τα φορτία ταξινομούνται σε κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος ή τη λειτουργία τους. Για παράδειγμα, οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες είναι τα οικιακά (residential), τα εμπορικά (commercial) και τα βιομηχανικά (industrial) φορτία. Στα οικιακά φορτία η αιχμή είναι συνήθως το βράδυ, ενώ στα εμπορικά φορτία είναι τις μεσημεριανές ώρες. Στη βιομηχανία, το φορτίο είναι σχετικά χαμηλό νωρίς το πρωί, στη συνέχεια αυξάνεται και διατηρείται σταθερό μέχρι το απόγευμα, όπου και μειώνεται σημαντικά αφού μειώνεται ή σταματά η βιομηχανική δραστηριότητα.

Η ισχύς που καταναλώνουν τα φορτία εξαρτάται από την τάση και τη συχνότητα. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά των φορτίων σε μεταβολές τάσης, συνεπώς η εξάρτηση από την συχνότητα δεν λαμβάνεται υπόψιν. Η ισχύς εξαρτάται από την τάση του ζυγού που βρίσκεται συνδεδεμένο και από μια αδιάστατη μεταβλητή ζήτησης z που εκφράζει το σύνολο του συνδεδεμένου εξοπλισμού.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του εκθετικού μοντέλου φορτίων είναι οι εξής [6]:

$$P = zP_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^a \quad (1.2a)$$

$$Q = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^b \quad (1.2b)$$

Όπου P_0 και Q_0 είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς, αντίστοιχα, που καταναλώνεται για μοναδιαία ζήτηση ($z = 1$ στην παρούσα εργασία) για τάση V ίση με την τάση αναφοράς V_0 .

Με βάση αυτές τις σχέσεις μπορούν να περιγραφούν τα τρία περισσότερο διαδεδομένα είδη φορτίων για συγκεκριμένες τιμές των a και b , ως ειδικές περιπτώσεις:

- Για $a=\beta=0$, φορτία σταθερής ισχύος
- Για $a=\beta=1$, φορτία σταθερού ρεύματος
- Για $a=\beta=2$, φορτία σταθερής αγωγιμότητας

Συνήθως στα δίκτυα διανομής τα φορτία μοντελοποιούνται ως φορτία σταθερού ρεύματος για την ενεργό κατανάλωση και ως φορτία σταθερής αγωγιμότητας για την άεργο κατανάλωση. [18]

1.4.1 Επαγωγικοί κινητήρες

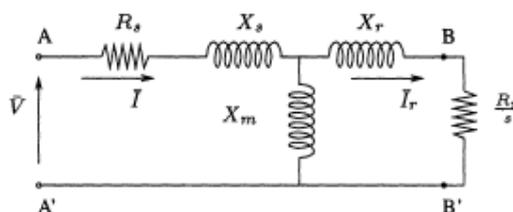
Υπάρχουν διάφοροι τύποι επαγωγικών κινητήρων οι οποίοι συναντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος. Κατά τη μελέτη των ΣΗΕ, οι επιμέρους κινητήρες συνήθως αναπαρίστανται ως ένα ισοδύναμο μοντέλο κινητήρα επαγωγής. Για παράδειγμα κάποιο πλήθος όμοιων κινητήρων το οποίο τροφοδοτείται από έναν κοινό ζυγό, μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένας μοναδικός κινητήρας με χαρακτηριστικά ισοδύναμα με όλων των όμοιων κινητήρων. Ωστόσο, αν στον ίδιο ζυγό συνδέονται κινητήρες με διαφορετικά χαρακτηριστικά, πιθανώς να είναι απαραίτητα περισσότερα ισοδύναμα μοντέλα. Η μοντελοποίηση διαφοροποιείται ανάλογα με το αν οι προς εξέταση κινητήρες είναι τριφασικοί ή μονοφασικοί, ή αν είναι τύπου τυλιγμένου δρομέα ή κλωβού. [6]

Τα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα του κινητήρα συνήθως θεωρούνται γρηγορότερα από τα μηχανικά μεταβατικά και αμελούνται χάριν απλότητας, όπως και γίνεται στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Έτσι, θεωρώντας ότι τα μεταβατικά ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα έχουν παρέλθει, ένας τριφασικός κινητήρας επαγωγής με σταθερή αντίσταση δρομέα, μπορεί να αναπαρασταθεί όπως στο Σχήμα 1.9, ενώ η ολίσθηση s προσεγγίζεται από τον τύπο:

$$s = \frac{(\omega_0 - \omega)}{\omega_0} \quad (1.3)$$

όπου $\omega_0 = 2\pi f$ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε ηλεκτρικά r/s.



Σχήμα 1.9 ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμου κατάστασης

Στο σχήμα 1.9, η αντίσταση και η αντίδραση του στάτη είναι αντίστοιχα R_s και X_s , η αντίδραση μαγνήτισης X_m και η αντίσταση και η αντίδραση του δρομέα είναι R_r και X_r . Το κύκλωμα ονομάζεται ισοδύναμο μόνιμης κατάστασης (steady state). Όλα τα μεγέθη είναι ανηγμένα στον στάτη και στο ανά μονάδα σύστημα.

Η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται από τον στάτη στον δρομέα μέσω του διακένου ονομάζεται ισχύς διακένου και υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_g = I_r^2 \left(\frac{R_r}{s} \right) \quad (1.4)$$

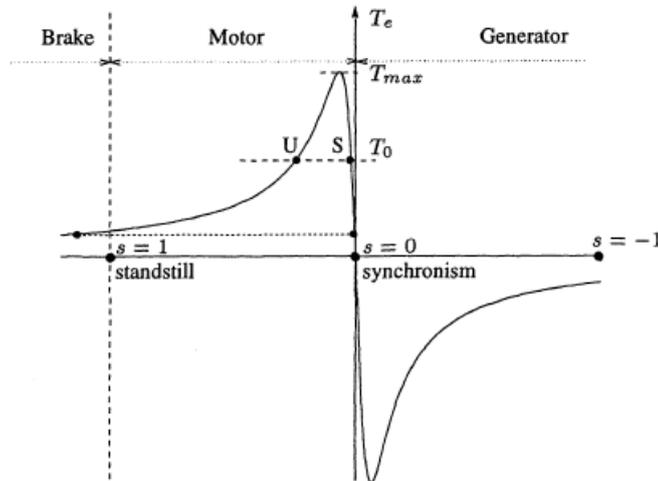
Αφαιρώντας τις ωμικές απώλειες του δρομέα προκύπτει η εσωτερική ισχύς που αντιστοιχεί στην ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$P_e = I_r^2 \left(\frac{R_r}{s} \right) (1 - s) = \omega_m \cdot T_e = (1 - s) \omega_s \cdot T_e \quad (1.5)$$

Η διαφορική εξίσωση επιτάχυνσης του δρομέα, συναρτήσει της ολίσθησης, μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση:

$$2H\dot{s} = T_m(s) - T_e(V, s) \quad (1.6)$$

Η ροπή εξόδου T_0 ισούται με την ισχύ του διακένου P_g και με την μηχανική ροπή T_m . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.10, η χαρακτηριστική της ροπής είναι μια ευθεία γραμμή η οποία τέμνει την χαρακτηριστική ολίσθησης-ροπής σε δύο σημεία, U και S, για λειτουργία κινητήρα και για $T_0 < T_{max}$.



Σχήμα 1.10: Χαρακτηριστική ολίσθησης-ροπής

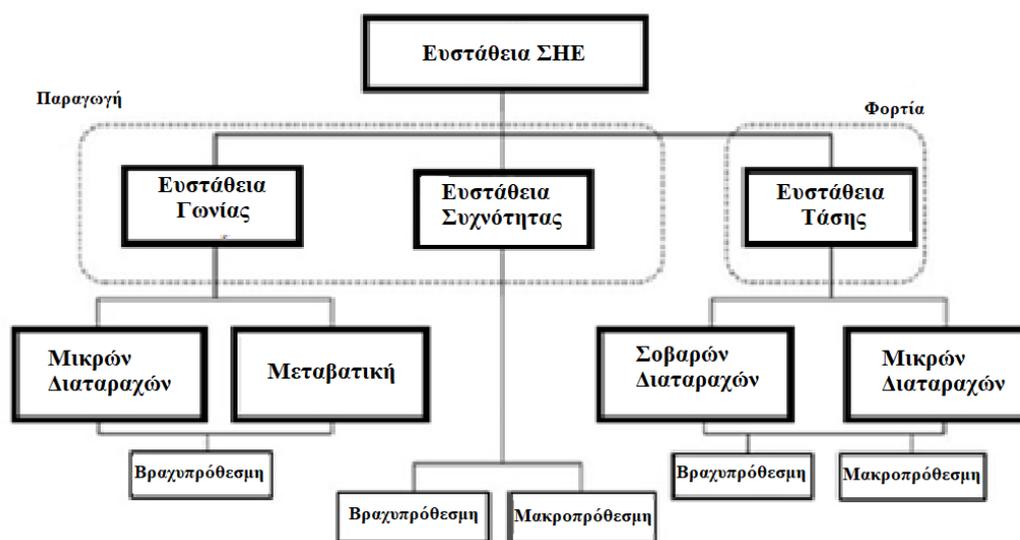
Τα δύο σημεία αυτά αντιστοιχούν στο ασταθές U (Unstable) και ευσταθές S (Stable) σημείο ισοροπίας. Αναφορικά με το σημείο S, μια μικρή αύξηση της ολίσθησης θα οδηγήσει σε πλεόνασμα ηλεκτρικής ροπής, το οποίο σύμφωνα με την εξίσωση (1.6), θα μειώσει ξανά την ολίσθηση, επαναφέροντάς την στο σημείο S. Αντίστοιχα, μια μικρή μείωση της ολίσθησης θα προκαλέσει την ανάπτυξη ροπής, οδηγώντας και πάλι την ολίσθηση στο σημείο S. Το αντίστροφο συμβαίνει στο σημείο U. Στην προκειμένη περίπτωση, μια μικρή αύξηση ολίσθησης θα οδηγήσει σε έλλειμμα ηλεκτρικής ροπής, επιβραδύνοντας τον δρομέα, με συνέπεια η ολίσθηση να αυξηθεί μέχρι να ακινητοποιηθεί ($s=1$). Σε αντίθετη περίπτωση μια μικρή μείωση της ολίσθησης θα οδηγήσει σε πλεόνασμα ηλεκτρικής ροπής, επιταχύνοντας τον δρομέα στο σημείο ευσταθούς ισοροπίας S.

1.4.2 Ταξινόμηση Φαινομένων Ευστάθειας

Ενώ η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ενιαίο πρόβλημα, θα ήταν δύσκολο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί με έναν ενιαίο τρόπο. Η ταξινόμηση της ευστάθειας ΣΗΕ σε διάφορες μορφές είναι αναγκαία, αφού η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που ο καθένας επιδρά με διαφορετικό τρόπο στο σύστημα και απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχήμα 1.12, ενώ ο διαχωρισμός τους γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια [7]:

- Η φύση της αστάθειας.
- Το μέγεθος της διαταραχής που προκαλεί την αστάθεια.
- Ο εξοπλισμός, οι μηχανισμοί, οι διαδικασίες και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να μελετηθεί η αστάθεια.
- Η καταλληλότερη μέθοδος αντιμετώπισης και πρόβλεψης της αστάθειας.

Όπως και τα υπόλοιπα είδη ευστάθειας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε κατηγορίες με βάση διαφορετικά κριτήρια. Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αποτελεί το μέγεθος της διαταραχής που προκάλεσε την απώλεια της ευστάθειας. Με βάση αυτό το κριτήριο, η ευστάθεια τάσης κατηγοριοποιείται σε ευστάθεια τάσης *μεγάλων διαταραχών* και *μικρών διαταραχών* [7]. Ο διαχωρισμός αυτός χρησιμοποιείται στην επιλογή της μεθόδου ανάλυσης των φαινομένων αστάθειας.



Σχήμα 1.11 Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας

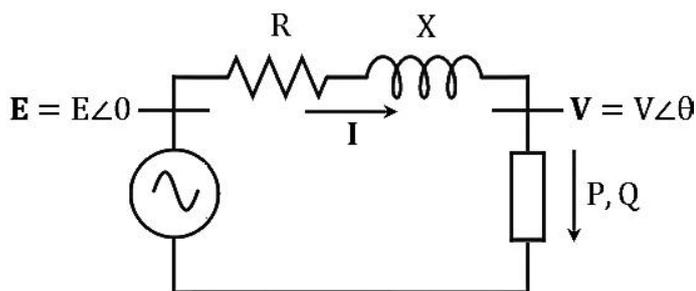
Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε περιπτώσεις εμφάνισης σημαντικών διαταραχών όπως σφάλματα συστήματος, απώλεια γεννήτριας ή απώλεια γραμμής μεταφοράς. Η ικανότητα αυτή καθορίζεται από το μέγεθος του φορτίου που καλείται να καλύψει το σύστημα, καθώς και από τη λειτουργία και αλληλεπίδραση διαφόρων συνεχών ή διακριτών διατάξεων, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ. Ο εντοπισμός της αστάθειας τάσης πραγματοποιείται συνήθως με μη γραμμική δυναμική ανάλυση του συστήματος για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να εντοπιστεί και η επίδραση τέτοιων διατάξεων.

Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε συνθήκες μικρών διαταραχών, όπως σταδιακή αύξηση του φορτίου. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από το καταναλισκόμενο φορτίο και τις αλληλεπιδράσεις διατάξεων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος για περιπτώσεις εμφάνισης μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση γύρω από ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο χαρακτηρίζεται ευσταθές ή ασταθές [7].

1.4.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV

Όπως έχει αναφερθεί, ένας βασικός παράγοντας στην εμφάνιση αστάθειας τάσης αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [6]. Το σύστημα έχει την ικανότητα να παρέχει μια μέγιστη ποσότητα ισχύος από το ζυγό A στο ζυγό B ή από μια περιοχή σε μια άλλη του δικτύου, η οποία αναφέρεται ως *μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς*. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ενός συστήματος προσδιορίζεται βάσει των διατάξεων και της τοπολογίας του. Η βασική ιδέα προκύπτει από την ανάλυση ενός ακτινικού δικτύου (Σχήμα 1.13), το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και ένα φορτίο.

Για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι η μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο γίνεται χωρίς ωμικές απώλειες ($R=0$) μέσω της αντίδρασης X . Επίσης, θεωρείται ότι η πηγή τάσης παρέχει σταθερή τάση E . Το μέτρο και η γωνία της τάσης του φορτίου είναι V και θ αντίστοιχα.



Σχήμα 1.12 Ακτινικό Δίκτυο

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.12 είναι :

$$V = E - jXI \quad (1.7)$$

Όπου με έντονα μαύρα γράμματα εμφανίζονται οι φασιθέτες. Άρα, η φαινόμενη ισχύς που καταναλώνει το φορτίο του ακτινικού δικτύου είναι:

$$S = P + jQ = VI = V \left(\frac{E-V}{jX} \right) = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (1.8)$$

Οπότε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (1.8) αναλύεται ως εξής:

$$P = \frac{-EV}{X} \sin \theta \quad (1.9)$$

$$Q = \frac{EV \cos \theta - V^2}{X} \quad (1.10)$$

Οι εξισώσεις (1.12) και (1.13) ονομάζονται εξισώσεις ροής ισχύος ή ροής φορτίου ενός δικτύου χωρίς απώλειες. Για δεδομένο φορτίο (P, Q) οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται ως προς V και θ , με χρήση των οποίων προσδιορίζονται και τα υπόλοιπα μεγέθη. Με την απαλοιφή του θ στις εξισώσεις (1.9) και (1.10) λαμβάνεται η διτετράγωνη εξίσωση:

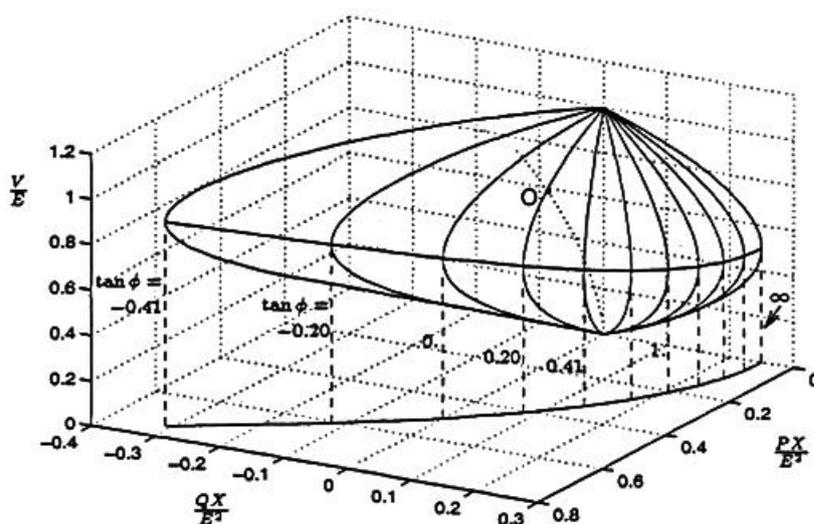
$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.11)$$

Για την ύπαρξη λύσης της εξίσωσης (1.11) πρέπει η διακρίνουσα να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.12)$$

Εφόσον η ανίσωση (1.12) ικανοποιείται, οι λύσεις της εξίσωσης (1.11) δίνονται από τον τύπο:

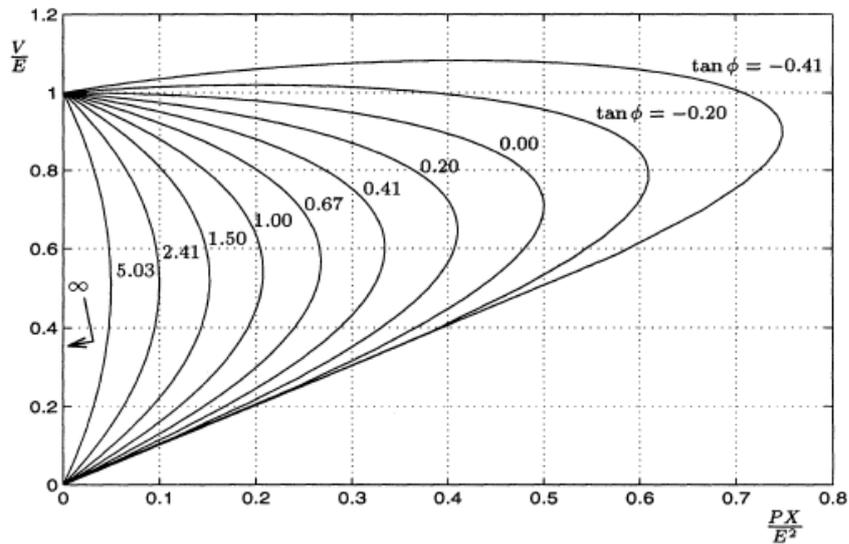
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q}} \quad (1.13)$$



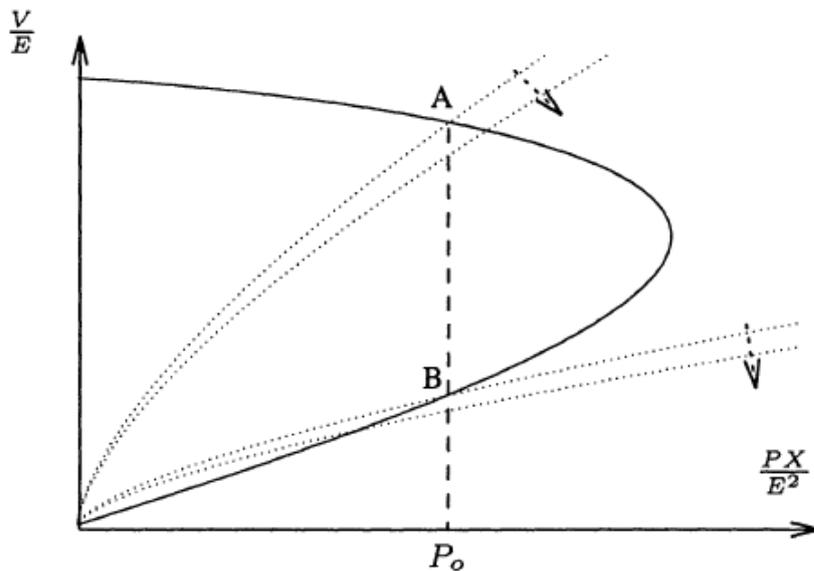
Σχήμα 1.13 Τάση Συναρτήσεσι Ενεργών και Άεργων Φορτίων

Στον τρισδιάστατο χώρο (P, Q, V) , η εξίσωση (1.16) ορίζει την επιφάνεια δύο διαστάσεων που φαίνεται στο Σχήμα 1.14. Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «+» στην εξίσωση (1.16), ή αλλιώς στη λύση υψηλής τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «-» στην εξίσωση (1.16), ή αλλιώς στη λύση χαμηλής τάσης. Ο «ισημερινός» της επιφάνειας, όπου οι δύο λύσεις είναι ίδιες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Οι «μεσημβρινοί» στο Σχήμα 1.14 αντιστοιχούν σε τομές της επιφάνειας με κατακόρυφο επίπεδο $Q = P \tan \phi$, με το ϕ να μεταβάλλεται μεταξύ $-\pi/8$ και $\pi/2$ με βήμα $\pi/16$. Η προβολή αυτών των μεσημβρινών στο επίπεδο P, V μας δίνει καμπύλες της τάσης V συναρτήσει της ενεργού ισχύος P , με μεταβλητό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες αυτές, οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 1.15, ονομάζονται *καμπύλες ισχύος-τάσης* (καμπύλες PV) και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και την ανάλυση της αστάθειας τάσης.



Σχήμα 1.14 Καμπύλες PV



Σχήμα 1.15 Καμπύλη PV

Από τις παραπάνω καμπύλες εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Για δεδομένη ενεργό ισχύ του φορτίου υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα. Η πρώτη αντιστοιχεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με τη τάση V σε πιο κοντινές τιμές με την τάση της γεννήτριας E . Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, διότι αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από το Σχήμα 1.16. Στο σχήμα αυτό, οι διακεκομμένες καμπύλες είναι καμπύλες ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου συναρτήσει της τάσης. Τα σημεία A και B αποτελούν δύο σημεία λειτουργίας τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ P_0 , αλλά από διαφορετική ζήτηση. Θεωρείται μια μικρή αύξηση της ζήτησης του φορτίου. Στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται στο σημείο A, η αυξημένη ζήτηση προκαλεί μια πτώση τάσης και οδηγεί σε υψηλότερη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Εμφανίζει δηλαδή, την αναμενόμενη απόκριση της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο B, παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ζήτηση συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου. Αν λοιπόν υποθεθεί ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που τείνει να αυξήσει την ισχύ του φορτίου προκειμένου να επιτύχει μια συγκεκριμένη κατανάλωση, το σημείο B καθίσταται ασταθές.
- Όσο αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρότερα $\tan\varphi$), αυξάνεται και η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνεται και η τιμή της τάσης, στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο. Αυτό είναι επικίνδυνο από την άποψη ότι, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς επιτυγχάνεται σε υψηλές τιμές τάσης και κοντά στην ονομαστική, δυσκολεύοντας έτσι την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.
- Για υπέρ-αντισταθμισμένα φορτία ($\tan\varphi < 0$), ένα τμήμα της καμπύλης PV δείχνει ότι η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι υπό αρνητικό $\tan\varphi$, όσο αυξάνεται η κατανάλωση της ενεργού ισχύος, τόσο αυξάνεται η παραγωγή αέργου ισχύος. Επομένως σε συνθήκες χαμηλής ισχύος φορτίου, η μείωση της τάσης που προκαλείται από την κατανάλωση της ενεργού ισχύος αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη παραγωγή της αέργου. Όσο πιο αρνητικό το $\tan\varphi$, τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της PV καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

Αν θεωρηθεί ότι το φορτίο συμπεριφέρεται ως σύνθετη αγωγιμότητα και ότι μεταβάλλεται με σταθερό συντελεστή ισχύος ($\cos\varphi = \text{σταθ}$), η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$P = P_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R+R_l)^2 + (X+R_l \tan\varphi)^2} \quad (1.14)$$

όπου $Z_l = R_l + jX_l = R_l(1 + j \tan\varphi)$ είναι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου

Για το υπολογισμό της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος θα πρέπει να βρεθεί το ακρότατο της (1.14). από την ακόλουθη αναγκαία συνθήκη:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (1.15)$$

Οπότε η παράγωγος της (1.14) ως προς R_l και αντικαθιστώντας στην αναγκαία συνθήκη ακρότατου προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$(R^2 + X^2) - R_l^2(1 + \tan^2\varphi) = 0 \Rightarrow (R^2 + X^2) = R_l^2(1 + \tan^2\varphi) \quad (1.16)$$

η οποία είναι ισοδύναμη με :

$$|Z_l| = |Z| \quad (1.17)$$

ενώ η δεύτερη παράγωγος της (1.14) είναι

$$\frac{\partial^2 P}{\partial^2 R_l^2} = -2R_l \quad (1.18)$$

Η οποία είναι πάντα αρνητική για επαγωγικό συντελεστή ισχύος υποδεικνύοντας ότι το ακρότατο που υπολογίστηκε προηγουμένως αντιστοιχεί σε μέγιστο.

Διατυπώνεται λοιπόν το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (με σταθερό συντελεστή ισχύος) που διακινείται σε μία γραμμή μεταφοράς:

Για σταθερό συντελεστή ισχύος, η ισχύς του φορτίου μεγιστοποιείται όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου και $R=0$, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς προκύπτει με την αντικατάσταση της συνθήκης μεγίστου (1.20) στη σχέση (1.17):

$$P_{max} = \frac{E^2}{4X} \quad (1.19)$$

Η σχέση (1.19) δίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου στο απλό ακτινικό δίκτυο στο Σχήμα 1.12.

1.5 Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

1.5.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ

Ένα συνεχές σύστημα το οποίο εμφανίζει δυναμική συμπεριφορά, μπορεί να αναλυθεί με ένα σύνολο N διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες συνήθως γράφονται στη μορφή:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.20)$$

όπου x είναι το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και κάθε f_i ($i=1, \dots, N$) είναι μια συνεχής μη γραμμική συνάρτηση όλων των x_i . Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με μία λύση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης (1.20) για μια αρχική συνθήκη, η οποία δίνει το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή $t=0$:

$$x(0) = x_0 \quad (1.21)$$

Η αρχική συνθήκη (1.21) και η διαφορική εξίσωση (1.20) συνιστούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών. Είναι αναμενόμενο ότι για κάθε αρχική συνθήκη υπάρχει μία λύση του μη γραμμικού συστήματος (1.20). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτός ο ισχυρισμός είναι σωστός, περιγράφονται στο θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης [9].

Ένα γενικό δυναμικό μοντέλο της μορφής που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται παρακάτω. Το μοντέλο περιγράφεται σε συμπυκνωμένη, διανυσματική μορφή, με πορεία από πιο τα γρήγορα προς τα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα.

1. *Ακαριαία απόκριση (Δίκτυο)*. Τα μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, είναι πολύ γρήγορα συγκριτικά με το χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας τάσης. Επομένως, θεωρούνται πρακτικά ακαριαία μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής ή αλλαγής στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Έτσι, για την παράσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υποτίθεται ακαριαία απόκριση και το δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων:

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (1.22)$$

όπου g είναι m ομαλές συναρτήσεις και y το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών. Τα διανύσματα g και y έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Τα διανύσματα x , z_c και z_d διευκρινίζονται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις (1.22) συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος.

2. *Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα*. Η βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των σύγχρονων γεννητριών και των ρυθμιστών τους, των επαγωγικών κινητήρων και των συνδέσμων συνεχούς ρεύματος. Τα δυναμικά φαινόμενα μετά από μια διαταραχή σ' αυτή την κλίμακα διαρκούν συνήθως από ένα έως μερικά

δευτερόλεπτα και συχνά αναφέρονται ως βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα. Τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα περιγράφονται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d) \quad (1.23)$$

όπου f είναι n ομαλές συναρτήσεις και x το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

3. *Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Η μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των φαινομένων, των ρυθμιστών και των διατάξεων προστασίας που δρουν συνήθως από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής. Οι σχετικοί μηχανισμοί σχεδιάζεται να δρουν μετά από την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, για την αποφυγή περιττών δράσεων ή ασταθών αλληλεπιδράσεων με τα δυναμικά φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Μερικά παραδείγματα μηχανισμών που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα ΣΑΤΥΦ, η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, η ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από συνεχείς διαφορικές εξισώσεις μεγάλης χρονικής σταθεράς και από διακριτές εξισώσεις διαφορών, και έχουν την μορφή:

$$\dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d) \quad (1.24)$$

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)) \quad (1.25)$$

όπου z_c και z_d είναι τα διανύσματα κατάστασης για τα συνεχή και τα διακριτά μακροπρόθεσμα φαινόμενα αντίστοιχα. Το k εκφράζει τη χρονική στιγμή $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

Το σύνολο των εξισώσεων (1.22)-(1.25) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

1.5.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού των μηχανισμών αστάθειας τάσης αποτελεί η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Με βάση αυτό το κριτήριο, η αστάθεια τάσης χωρίζεται σε *βραχυπρόθεσμη* και *μακροπρόθεσμη* [6].

1.5.2.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν έπειτα από μια διαταραχή. Στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, η συμπεριφορά αυτή εξελίσσεται εντός λίγων δευτερολέπτων, μια διάρκεια η οποία ταυτίζεται με το χρονικό διάστημα που εμφανίζεται το φαινόμενο της

αστάθειας γωνίας στις σύγχρονες γεννήτριες. Στο διάστημα αυτό εξελίσσονται και φαινόμενα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που αφορούν κυρίως τις γρήγορες προσπάθειες αποκατάστασης φορτίου από κινητήρες επαγωγής και λιγότερο συχνά συνδέσμους υψηλής τάσης-συνεχούς ρεύματος (HVDC links). Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι επίσης γνωστή ως *μεταβατική κατάρρευση τάσης* [8].

Οι μηχανές επαγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τους εξής κυρίως λόγους:

- Είναι φορτία με μικρή αδράνεια και γρήγορη επαναφορά (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Είτε λειτουργούν ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Γι' αυτό λοιπόν, η εγκατάσταση ασύγχρονων μηχανών στο δίκτυο συνοδεύεται συνήθως από κατάλληλες διατάξεις αέργου αντιστάθμισης.
- Κινδυνεύουν να παρουσιάσουν αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης (λειτουργία κινητήρα) ή υπερεπιτάχυνσης (λειτουργία γεννήτριας), όταν η τερματική τους τάση είναι χαμηλή ή η μηχανική τους ροπή αρκετά μεγάλη.

Για παράδειγμα στα καινούργια Αιολικά Πάρκα εγκαθίστανται συνήθως ανεμογεννήτριες επαγωγής μεταβλητών στροφών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τερματικής τάσης και επομένως της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος, μέσω κατάλληλων μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος. Πολλά Αιολικά Πάρκα, χρησιμοποιούσαν παλαιότερα γεννήτριες σταθερών στροφών. Οι τελευταίες, από πλευράς ευστάθειας τάσης, εμφανίζουν την ίδια σχεδόν συμπεριφορά με τους κινητήρες επαγωγής. Η διαφορά έγκειται στην επιτάχυνσή τους (αντί για επιβράδυνση), σε περίπτωση απώλειας σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια ενώ παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, μπορεί να συμπαρασύρει σε αστάθεια και γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση του συστήματος.

Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ένα σύγχρονο ζήτημα, το οποίο αναμένεται να πάρει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις λόγω:

- Της αυξημένης χρήσης κινητήρων επαγωγής, οι οποίοι εξοπλίζουν ευρέως τα συστήματα ψύξης και κλιματισμού.
- Της διεύδυσης φορτίων, των οποίων η κατανάλωση είναι ανεξάρτητη της τάσης και ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος.
- Της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
- Της αυξημένης χρήσης γραμμών συνεχούς ρεύματος (DC) στο επίπεδο Υψηλής Τάσης (HVDC).
- Της εντατικότερης χρήσης των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς.

1.5.2.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Έπειτα από μια διαταραχή, θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, όταν τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν αποσβεσθεί, όταν δηλαδή στην εξίσωση (1.22) ισχύει:

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.26)$$

Μετά τη βραχυπρόθεσμη ισορροπία, οι μακροπρόθεσμες αργές δυναμικές, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.24) και (1.25), καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος. Οι γρήγορες δυναμικές συνιστώσες του συστήματος θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται ευσταθώς στις αλλαγές των μακροπρόθεσμων και επομένως, οι εξισώσεις (1.23) μπορούν να αντικατασταθούν από αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας (1.26). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λογική πίσω από την οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που εμφανίζονται από την εξέλιξη των παραπάνω αργών δυναμικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσουν στην μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [9]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αυτού του είδους αστάθειας τάσης παίζουν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, τα οποία με τις ρυθμιστικές τους λειτουργίες επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος.

1.6 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

Η μελέτη των ΣΗΕ, από πλευράς αστάθειας τάσης, γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, κυρίως λόγω των σημαντικών προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσει. Οι αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις (1.23)-(1.25) αποτελούν ένα εργαλείο αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και η επίλυση τους δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς ανάλυσης των μηχανισμών αστάθειας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρά τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής δύναμης που μπορεί να προσφέρει σήμερα η τεχνολογία, για ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται κάποια απλοποίηση, προκειμένου να αναλυθεί το σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Αυτή η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (1.23)-(1.25), οδήγησε στο διαχωρισμό τους σε δύο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται. Τα δύο αυτά υποσυστήματα προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [6] και είναι το *βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα* και το *οιονεί στατικό σύστημα* στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι τα αργά δυναμικά φαινόμενα, λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξής τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όσο τα γρήγορα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με τα

παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές z_c και z_d των εξισώσεων (1.23) και (1.24) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνεται το απλοποιημένο βραχυπρόθεσμο μοντέλο:

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (1.27)$$

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d) \quad (1.28)$$

Από την άλλη, το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εφόσον το ενδιαφέρον στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν ήδη φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις διαφορικές εξισώσεις (1.20) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$g(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.29)$$

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.30)$$

$$z_c = h_c(x, y, z_c, z_d) \quad (1.31)$$

$$z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)) \quad (1.32)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι πιο συχνή από την βραχυπρόθεσμη, ορισμένα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης επιλέγουν αποκλειστικά το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την επίλυση των εξισώσεων. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης που προσφέρει, καθιστώντας έτσι δυνατή και την εκτίμηση ασφάλειας συστήματος πραγματικού χρόνου, που είναι πολύ σημαντική. Στην παρούσα εργασία μάλιστα, το οιονεί στατικό σύστημα αποτελεί την οιονεί στατική προσομοίωση που έχει υλοποιηθεί.

1.7 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Η συνεισφορά που μπορούν να έχουν οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής στη βελτίωση της ευστάθειας τάσης είναι ένα από τα βασικά εξεταζόμενα ζητήματα της παρούσας εργασίας. Το θέμα αυτό έχει εισαχθεί και μελετηθεί και από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες. Συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει βασιστεί στις [7], [20] και [21] οι οποίες εξετάζουν τα εξής ζητήματα:

Στην εργασία [7] μελετάται η επίδραση της άεργης υποστήριξης αιολικών πάρκων στο όριο φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Ειδικότερα, εκτιμάται η αύξηση του ορίου φόρτισης και κατ' επέκταση το όριο ευστάθειας της τάσης, που οφείλεται σε μια προτεινόμενη μέθοδο μέγιστης άεργης υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης αιολικών πάρκων, με παρουσία μεταβλητής αιολικής παραγωγής. Ακόμη διερευνώνται νέοι μηχανισμοί αστάθειας, που οφείλονται σε αδυναμία μεταφοράς της εγχεόμενης ισχύος από μετατροπείς Ηλεκτρονικών

Ισχύος και προτείνεται ένα σχήμα προστασίας για την έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπιση ανάλογης αστάθειας. Τα συστήματα που εξετάζονται αποτελούνται από γραμμές μεταφοράς στις οποίες συνδέονται μέσω αποκλειστικών γραμμών διανομής η αιολική παραγωγή. Η προσομοίωση της ικανότητας φόρτισης του συστήματος πραγματοποιείται με την χρήση χρονοσειρών, μέσω ενός μοντέλου προσομοίωσης και ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Για την εκτίμηση της συνεισφοράς κάθε αιολικού πάρκου υλοποιούνται τρεις στρατηγικές ελέγχου αέργου ισχύος του ηλεκτρονικού μετατροπέα, η ρύθμιση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, η ρύθμιση της τάσης του αιολικού πάρκου, και μια προτεινόμενη μέθοδος ευφυούς ελέγχου με εντολή μέγιστης άεργης υποστήριξης των αιολικών πάρκων σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης.

Στην εργασία [20], εξετάζεται η ενδεχόμενη αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, όσων αφορά στο κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει μέσω της άεργης υποστήριξης του συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές. Η μελέτη γίνεται μέσω κατάλληλης προσομοίωσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς, που διαθέτει τη δυνατότητα σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου μέσω γραμμής και υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ. Εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια ελέγχου, αρχικά χωρίς τη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής, στη συνέχεια με το αιολικό πάρκο συνδεδεμένο και συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης και τέλος με χρήση της Εντολής Άεργης Υποστήριξης. Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά των δυο αιολικών πάρκων σε συνεχή μεταβολή του φορτίου και αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος, η οποία συνδέεται με τη δυναμική του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο ζυγό σύνδεσης του φορτίου.

Στην εργασία [21] εξετάζεται ο αποκεντρωμένος έλεγχος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέονται σε κάποιο σύστημα διανομής, ώστε να βελτιωθεί η ευστάθεια τάσης του συστήματος μεταφοράς. Μια γραμμή διανομής μέσης τάσης η οποία περιέχει τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και φορτία εξαρτώμενα της τάσης, συνδέεται στο σύστημα μεταφοράς. Προτείνεται μία μέθοδος εξέτασης του συστήματος διανομής, ανεξάρτητα από το δίκτυο μεταφοράς, με ημερήσιες καμπύλες παραγωγής και φορτίου για υψηλή διεύθυνση από τη διεσπαρμένη παραγωγή και γίνεται ρύθμιση της τάσης των ζυγών διανομής ΜΤ.

Σε συνέχεια των εργασιών που προαναφέρθηκαν, ειδικότερος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς μιας γραμμής διανομής με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής όταν συνδέονται σε αυτήν διάφοροι τύποι φορτίων και ειδικότερα κινητήρες επαγωγής. Η εργασία εξετάζει τη μέθοδο ελέγχου της τάσης της γραμμής μέσω ενός μετασχηματιστή με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Ακόμη εξετάζονται οι συνέπειες ύπαρξης φορτίων εξαρτώμενων από την τάση και συγκρίνονται με τα φορτία σταθερής ισχύος και κινητήρες επαγωγής.

Για τον σκοπό αυτόν αναπτύχθηκε αλγόριθμος στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB όπου επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου της γραμμής διανομής μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson. Στα πλαίσια της εργασίας αναλύεται διεξοδικά η κατασκευή και ο τρόπος λειτουργίας του προγράμματος.

Με τη χρήση του προγράμματος πραγματοποιείται τόσο στατική ανάλυση χαρακτηριστικών στιγμιότυπων του δικτύου διανομής, όσο και μακροπρόθεσμη χρονική προσομοίωση. Κατά την μακροπρόθεσμη προσομοίωση εφαρμόζεται μια διαταραχή στο δίκτυο, όπως η μεταβολή της τιμής κάποιου φορτίου ή της τάσεως αναφοράς και της παραγωγής ισχύος από

τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Στην περίπτωση αυτή το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί δυναμικά και μεταβάλλει τη λήψη του ανάλογα με την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή

Βασική συνεισφορά της εργασίας είναι ότι πραγματοποιείται μελέτη σχετικά με την εισαγωγή κινητήρων επαγωγής στη γραμμή διανομής στη θέση φορτίων και την επίδραση που αυτοί έχουν στην ενίσχυση της ευστάθειας τάσης μέσω της γραμμής διανομής. Εξετάζονται δύο είδη κινητήρων επαγωγής από τη βιβλιογραφία, ένας οικιακής χρήσης (residential) και ένας επαγγελματικής (commercial). Πραγματοποιείται αρχικοποίηση των κινητήρων για την ενσωμάτωσή τους στο πρόγραμμα επίλυσης ροής φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάζεται το μονογραμμικό ισοδύναμο κύκλωμα των κινητήρων με το μοντέλο σταθερής ροπής, το οποίο εξαρτάται μόνο από την ολίσθηση, και πραγματοποιείται η αρχικοποίηση τους προκειμένου να μην αλλάξει η αρχική λύση της Ροής Φορτίου και να μπορεί να γίνει σωστά η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων φορτίων.

Ακόμη, υπολογίζονται οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις αναφοράς του ΣΑΤΥΦ κατά τις οποίες δεν προκαλούνται υπερτάσεις και υποτάσεις κατά μήκος της γραμμής διανομής, και προσομοιώνεται η δυναμική συμπεριφορά στην εφαρμογή αυτών των τάσεων αρχικά χωρίς την ένταξη κινητήρων, και έπειτα με αυτούς.

Επιπλέον, όπως και σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες, εξετάζεται η σύνδεση της γραμμής διανομής με ένα ακτινικό σύστημα μεταφοράς, η επίδραση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αλλά και των κινητήρων επαγωγής στην άεργο υποστήριξη του συστήματος και στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ (MMI). Ακόμα ερευνώνται τρόποι αύξησης της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για γραμμή διανομής με και χωρίς κινητήρες επαγωγής. Οι κύριοι τρόποι αύξησης της MMI είναι η προσφορά αέργου ισχύος από τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών και η μείωση της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Ακόμα πραγματοποιείται μελέτη για τα φωτοβολταϊκά, με σκοπό την διαπίστωση της ικανότητάς τους να προσφέρουν την μέγιστη άεργο ισχύ που παράγουν στο σύστημα, χωρίς να προκαλέσουν υπερτάσεις.

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

Το 1^ο Κεφάλαιο είναι εισαγωγικό σε θέματα σχετικά με την οργάνωση και τη δομή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Αρχικά γίνεται αναφορά στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και πιο συγκεκριμένα στα φωτοβολταϊκά συστήματα, στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β και στον τρόπο λειτουργίας τους, ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούν. Ακόμα αναφέρονται τρόποι παράστασης φορτίων σε ένα δίκτυο διανομής, που χρησιμοποιούνται στην διπλωματική αυτή. Συνοψίζονται οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης, και ορίζεται το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Για καλύτερη κατανόηση, αναλύονται τα όρια Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε συνδυασμό με τις καμπύλες PV του δικτύου και των φορτίων.

Στο 2^ο Κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζονται κάποιες γενικές πληροφορίες σχετικά με τα δίκτυα διανομής και τα επίπεδα τάσεων. Έπειτα, περιγράφεται αναλυτικά η ενδεικτική γραμμή διανομής και παρατίθενται όλα τα χαρακτηριστικά της.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται θεωρητικά η μέθοδος επίλυσης ροής φορτίου μέσω της μεθόδου Newton-Raphson και στην συνέχεια αναλύεται διεξοδικά ο τρόπος ανάπτυξης του προγράμματος επίλυσης ροής ισχύος που κατασκευάστηκε στο περιβάλλον MATLAB.

Παρουσιάζονται σε μορφή ψευδοκώδικα όλες οι επιμέρους ρουτίνες που πραγματοποιούνται, από την εισαγωγή των δεδομένων, στον υπολογισμό της μήτρας αγωγιμοτήτων, στην επίλυση της Newton-Raphson έως στην λειτουργία του ΣΑΤΥΦ.

Στο 4^ο Κεφάλαιο αρχίζει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Αρχικά πραγματοποιείται η στατική ανάλυση της γραμμής διανομής και προκύπτουν τα στιγμιότυπα των τάσεων για σενάρια μέγιστων ή ελάχιστων φορτίων και παραγωγής αντίστοιχα. Παράλληλα εξετάζεται η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ σε κάθε περίπτωση. Στην συνέχεια, αναλύεται η μεθοδολογία παράστασης φορτίων εξαρτώμενων της τάσης, και ο τρόπος εφαρμογής της στην γραμμή διανομής. Τέλος επαναλαμβάνεται η προσομοίωση του συστήματος με τα νέα δεδομένα και εξάγονται αποτελέσματα της ροής φορτίου, για διάφορα μοντέλα φορτίων και παραγωγής.

Στο 5^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία ένταξης των κινητήρων επαγωγής στην γραμμή διανομής. Αρχικά, πραγματοποιείται η παράσταση επαγωγικού κινητήρα στο πρόγραμμα επίλυσης ροής φορτίου με την δημιουργία του ισοδύναμου μονογραμμικού διαγράμματος. Στην συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός των παραμέτρων του κινητήρα σύμφωνα με την βιβλιογραφία. Έπειτα, για δύο είδη κινητήρων, δοκιμάζονται διαφορετικές συνδεσμολογίες στο πρόγραμμα που κατασκευάστηκε, λαμβάνοντας νέα στιγμιότυπα της τάσης των ζυγών και συγκρίνονται με εκείνα του 4^{ου} Κεφαλαίου.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται προσδιορισμός των ορίων της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, και στην συνέχεια παρουσίαση της μεθόδου μακροπρόθεσμης προσομοίωσης του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη επιθυμητή τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ για αποφυγή υποτάσεων ή υπερτάσεων κατά μήκος της γραμμής, μεταβάλλοντας σταδιακά την λήψη του ΣΑΤΥΦ έως κάποια τάση βγει εκτός της επιτρεπόμενης τιμής. Κατά την παρουσίαση της μακροπρόθεσμης προσομοίωσης, επισημαίνονται οι μετατροπές που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα και εξάγονται αποτελέσματα για την λειτουργία του ΣΑΤΥΦ.

Στο 7^ο Κεφάλαιο το εξεταζόμενο δίκτυο διανομής συνδέεται σε ένα ακτινικό σύστημα μεταφοράς. Αρχικά παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για να προσομοιώσει το σύστημα μεταφοράς. Έπειτα υπολογίζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος και θα εξεταστεί η ικανότητα της γραμμής διανομής να προσφέρει άεργο υποστήριξη μέσω της διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα μεταφοράς. Εξετάζονται εν συνεχεία ορισμένες ρυθμίσεις με σκοπό την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, με κύρια εκείνη της προσφοράς αέργου ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Από κάθε προσομοίωση προκύπτουν οι χαρακτηριστικές Ισχύος-Τάσης (P-V) για τον ζυγό του απομακρυσμένου φορτίου στο σύστημα μεταφοράς. Στην τελευταία ενότητα, στο ήδη υπάρχον σύστημα, συνδέονται έως δύο κινητήρες στην γραμμή διανομής, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο. Εξάγονται και πάλι οι χαρακτηριστικές P-V του φορτίου, υπολογίζεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς και η ολίσθηση του κάθε κινητήρα σε κάθε περίπτωση και έπειτα ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο 8ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία και οι προοπτικές για περαιτέρω μελέτη και βελτίωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

2. Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

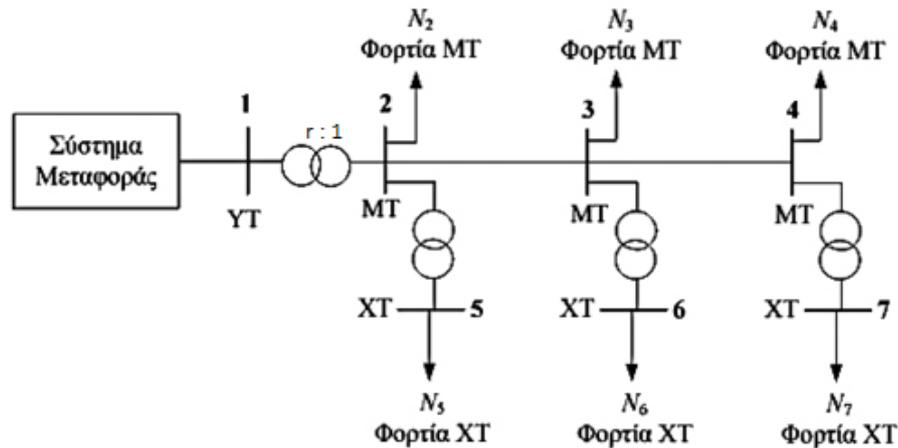
2.1.1 Περιγραφή

Το δίκτυο διανομής παραλαμβάνει την ηλεκτρική ισχύ που μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές φορτίου και τη διανέμει μέσα στην εξυπηρετούμενη περιοχή, φθάνοντας μέχρι τον τελευταίο καταναλωτή. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς Υψηλής / Μέσης Τάσης (ΥΤ/ΜΤ). Στη συνέχεια, μέσω των γραμμών Μέσης Τάσης, τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί Μέσης / Χαμηλής Τάσης (ΜΤ/ΧΤ). Από τους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ, η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει τελικά στο σύνολο των καταναλωτών χαμηλής τάσης (Σχήμα 2.1).

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν, μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια. Λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν μέχρι τώρα ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα δίκτυα διανομής να καλύπτουν ένα πολύ μεγάλο εύρος τάσεων που καλύπτει από τη μέση τάση ως τη χαμηλή και οικιακή τάση. Για διευκόλυνση και κατηγοριοποίηση των δικτύων διανομής, χωρίζονται σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα δίκτυα όπου τα πρωτεύοντα δίκτυα απασχολούν κυρίως τη μέση τάση ενώ τα δευτερεύοντα τη χαμηλή.



Σχήμα 2.1 Απλό Δίκτυο Διανομής με πρωτεύον και δευτερεύον δίκτυο που τροφοδοτεί φορτία μέσης τάσης (MT) και χαμηλής τάσης (XT)

Τα σύγχρονα δίκτυα διανομής είναι σχεδιασμένα να απορροφούν ισχύ από το ανάντη Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω των γραμμών μεταφοράς και να το διανέμουν στους καταναλωτές και η ροή τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος ρέει από την υψηλή στη χαμηλότερη τάση. Ωστόσο, με σημαντική διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής, η ροή ισχύος μπορεί να αντιστραφεί και το δίκτυο διανομής από παθητικό κύκλωμα που παρέχει ισχύ στα φορτία, μετατρέπεται σε ενεργό δίκτυο με ροές ισχύος και τάσεις που θα καθορίζονται πλέον τόσο από την Διεσπαρμένη παραγωγή όσο και από τα φορτία. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει σημαντική αλλαγή στη φύση των δικτύων διανομής με διεσπαρμένη παραγωγή.

Από την άλλη πλευρά, η συνεχής αύξηση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής μπορεί να επιφέρει κορεσμό στα δίκτυα διανομής. Για να αποφευχθούν τόσο τα προβλήματα που εισάγονται μαζί με τη Διεσπαρμένη Παραγωγή, όσο και για αυξηθεί η χωρητικότητα των δικτύων διανομής σε διεσπαρμένη παραγωγή, επιβάλλεται να γίνει συστηματική μελέτη των δικτύων διανομής.

Τα δίκτυα διανομής που πλέον θα περιλαμβάνουν νέες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής εξοπλισμένες με ηλεκτρονικά ισχύος και ρυθμιστές τάσης και συχνότητας, γίνονται ενεργά δίκτυα. Ως ενεργά δίκτυα πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν τις δυναμικές αλλαγές που θα προκύπτουν τόσο από τη μεταβαλλόμενη ισχύ που θα εγχέεται από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, όσο και από τα φορτία τα οποία στις χαμηλότερες τάσεις είναι οικιακά και ούτως ή άλλως συνεχώς μεταβαλλόμενα.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστούν αρχικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τα δίκτυα διανομής και παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά τους. Μετέπειτα θα παρουσιαστούν κάποια χαρακτηριστικά δίκτυα δοκιμών (test feeders) που εμφανίζονται συχνά στη βιβλιογραφία για μελέτες δικτύων διανομής. Τα εξεταζόμενα δίκτυα θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν με βάση τα βασικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

2.1.2 Επίπεδα Τάσης

Τα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης (MT) βρίσκονται σε τάσεις από 4kV έως και 35kV. Καθώς τα όρια δεν είναι απόλυτα ορισμένα, γραμμές διανομής υψηλής τάσης μπορεί να χαρακτηρίζονται και ως γραμμές υπομεταφοράς, καθώς μπορεί να τροφοδοτούν τόσο γραμμές διανομής, όσο και απευθείας φορτία. Πολλές φορές παρατηρείται σύνδεση διαφορετικών επιπέδων Μέσης Τάσης, πέρα από την σύνδεση με τα δίκτυα Υψηλής και Χαμηλής Τάσης. Στην αναφορά [8], από όπου αντλήθηκε και το σύστημα της συγκεκριμένης διπλωματικής, παρατηρούνται δύο επίπεδα μέσης τάσης, τα 33kV του δικτύου διανομής, καθώς και τα 11kV των feeder που συνδέονται με αυτό μέσω μετασχηματιστών.

Στην Ελλάδα τα δίκτυα διανομής Μέσης Τάσης (MT) βρίσκονται κατά κύριο λόγο στα 20kV και αποτελούν εναέρια ή υπόγεια δίκτυα.

Το επίπεδο τάσης στο οποίο βρίσκεται το κάθε δίκτυο ενδιαφέρει καθώς εμφανίζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως στην συνέχεια.

2.1.3 Λειτουργία ΣΑΤΥΦ

Μέσω των μετασχηματιστών ισχύος στους υποσταθμούς διανομής, πέρα από τον υποβιβασμό του επιπέδου τάσης διανομής, πραγματοποιείται και έλεγχος της τάσης διανομής. Για το σκοπό αυτό, οι μετασχηματιστές είναι εφοδιασμένοι με μεταβλητές λήψεις για την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού. Το *σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο* (ΣΑΤΥΦ) λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες, ενώ ο χειρισμός γίνεται αυτόματα μέσω ηλεκτρονόμου που συγκρίνει την τάση δευτερεύοντος με μια προκαθορισμένη τιμή αναφοράς. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, καθώς σε αυτήν την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δημιουργώντας την δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί διαφορά, δίνεται κατάλληλη εντολή ανύψωσης ή μείωσης της σχέσης μετασχηματισμού. [7], [11], [16]

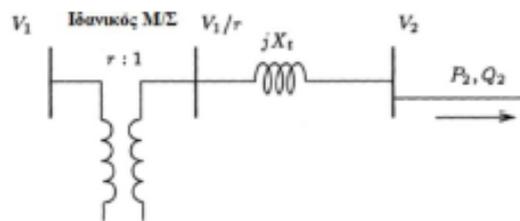
Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού τους κατά ένα βήμα Δr , σε διακριτές τιμές χρόνου t_k . Ειδικότερα, οι διακριτές τιμές δίνονται από τον ακόλουθο επαναληπτικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (2.1)$$

όπου ΔT το βήμα της προσομοίωσης και $k \in \mathbb{N}$. Η ρύθμιση αυτή περιορίζεται από το άνω και κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού r_{min} και r_{max} , οι οποίοι αντιστοιχούν στην εξάντληση των διαθέσιμων λήψεων του τυλίγματος του μετασχηματιστή. Τυπικές τιμές του κάτω ορίου είναι 0.9 αμ και του άνω ορίου 1.1 α.μ. Το μέγεθος του βήματος κάθε φορά είναι συνήθως 0.01. Θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνητίσεως του μετασχηματιστή μπορεί να αμεληθεί, αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων και θεωρώντας σταθερή αντίδραση σκεδάσεως X_t , το ισοδύναμο κύκλωμα του ΣΑΤΥΦ φαίνεται στο (1.11). Υπάρχουν δύο μοντέλα για την αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των

μετασηματιστών με ΣΑΤΥΦ. Το ένα είναι το διακριτό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο ο λόγος μετασηματισμού μεταβάλλεται συνεχώς και με ένα βήμα τη φορά. Το δεύτερο μοντέλο είναι το συνεχές, το οποίο είναι προσεγγιστικό σε σχέση με το διακριτό μοντέλο. Συνήθως, η χρονική καθυστέρηση που μεσολαβεί για την πρώτη αλλαγή λήψης ισούται με T_{D0} , ενώ για τις επόμενες είναι ίση με T_{D1} , με την πρώτη να είναι συνήθως μεγαλύτερη για να αποφεύγονται περιττές αλλαγές κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Η T_{D1} είναι συνήθως μεγαλύτερη, για αποφυγή λανθασμένων και περιττών αλλαγών στη λήψη κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων.

Σχήμα 2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ



Όπως προαναφέρθηκε, ρόλος του ΣΑΤΥΦ είναι ο έλεγχος της τάσης διανομής V_2 , προκειμένου να βρίσκεται εντός μιας νεκρής ζώνης V_{2min} έως V_{2max} :

$$V_{2min} = V_{2_0} - \frac{d}{2} \text{ και } V_{2max} = V_{2_0} + \frac{d}{2} \quad (2.2)$$

όπου V_{2_0} είναι η τάση αναφοράς του δευτερεύοντος και d το εύρος της νεκρής ζώνης ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ.

Ο διακριτός έλεγχος μοντελοποιείται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης διαφορών:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, \text{ αν } V_2 > V_{2max} \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, \text{ αν } V_2 < V_{2min} \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k, \text{ διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.3)$$

όπου $r_k = r(t_k)$ ο λόγος μετασηματισμού την χρονική στιγμή t_k . Προκειμένου να αλλάξει η λήψη του ΣΑΤΥΦ, πρέπει για όλη τη διάρκεια χρονικής καθυστέρησης του ΣΑΤΥΦ T_{LTC} να παραβιάζεται ο ανισοτικός περιορισμός που φαίνεται στην (2.3).

2.1.4 Επαγωγική/Ωμική Συμπεριφορά Γραμμών Διανομής

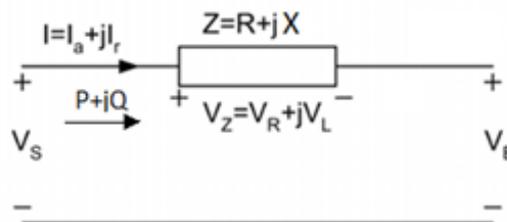
Στο ελληνικό δίκτυο, από το μετασηματιστή ΥΤ/ΜΤ (150kV/20kV) του Υποσταθμού Διανομής αναχωρούν διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20kV) που η καθεμία αφορά στη διανομή της ηλεκτρικής ισχύος σε μια ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται γραμμές κορμού και κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95mm² ισοδύναμου χαλκού στα εναέρια δίκτυα. [19]

Οι γραμμές κορμού διακλαδίζονται σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς μέσης σε χαμηλή τάση (20kV/400V) δηλαδή στο οικιακό επίπεδο XT 230V φασική. Η παροχή χαμηλής τάσης σε πελάτες XT γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης από γυμνούς εναέριους αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης του υποσταθμού. [19]

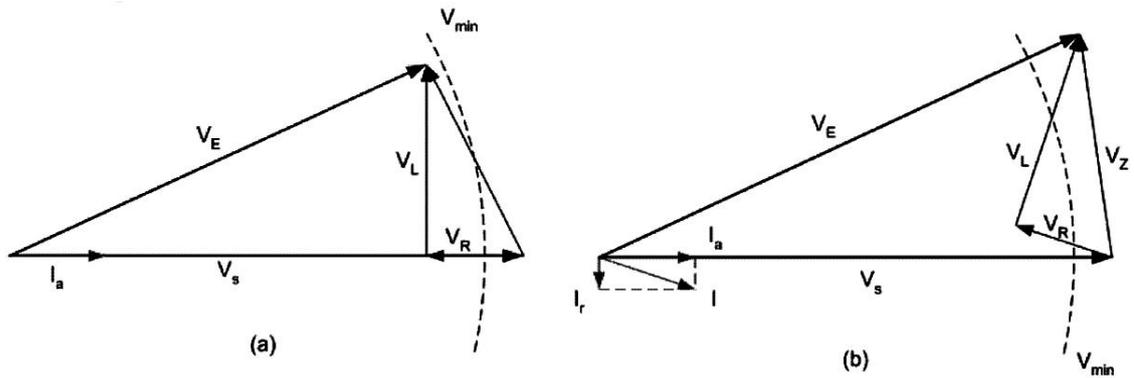
Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ο λόγος μεταξύ της επαγωγικής αντίδρασης των γραμμών X και της ωμικής αντίστασης R . Η αναλογία αυτή X/R στα δίκτυα διανομής είναι σχετικά μικρή καθώς η αντίδραση X είναι μικρότερη όσο γίνονται χαμηλότερα τα επίπεδα της τάσης. Τυπικά, στα δίκτυα διανομής μέσης τάσης η αναλογία X/R είναι λίγο μεγαλύτερη της μονάδας για εναέριες γραμμές και λίγο μικρότερη της μονάδας για καλώδια μέσης τάσης.

Το μέγεθος αυτού του λόγου X/R παίζει σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της αέργου ισχύος. Στα δίκτυα διανομής το κλάσμα X/R είναι μικρότερο σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς οπότε καθιστά τη ρύθμιση μέσω της αέργου ισχύος δυσκολότερη στην πλευρά της διανομής. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα όπου για μεγάλη και μικρή τιμή του λόγου X/R γίνεται ρύθμιση της αέργου ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η ισοδύναμη αντίδραση Z όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 και ο λόγος X/R είναι σχετικά μεγάλος, δηλαδή ($X/R \gg 1$). Τότε το ρεύμα που ρέει μέσω της γραμμής θα προκαλέσει μια πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής, που θα περιέχει επαγωγικό και ωμικό κομμάτι. Έστω, για αρχή, ότι το ρεύμα έχει μόνο πραγματικό μέρος, δηλαδή, η πτώση τάσης οφείλεται μόνο στο ωμικό μέρος. Όπως φαίνεται στα διανυσματικά διαγράμματά στο Σχήμα 2.3, η τάση V_E είναι μικρότερη από το ελάχιστο ορισμένο όριο τάσης V_{min} , που εμφανίζεται με διακεκομμένη γραμμή. Όταν το ρεύμα έχει και φανταστικό (επαγωγικό) μέρος, η τάση V_E μπορεί να αυξηθεί και να βρίσκεται πάνω από το όριο V_{min} (Σχήμα 2.4). Αυτή η στρατηγική ρύθμισης της τάσης ωστόσο είναι υλοποιήσιμη όταν ο λόγος X/R είναι σχετικά μεγάλος.

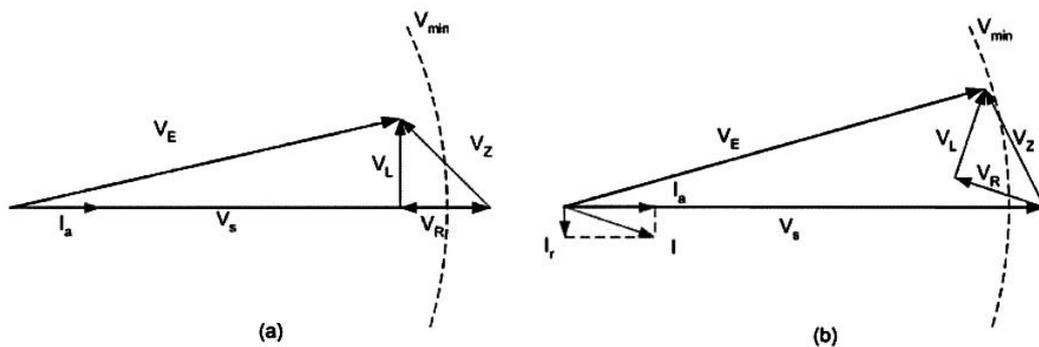
Στην περίπτωση που ο λόγος είναι σχετικά μικρός ($X/R \sim 1$), με την ωμική αντίσταση να έχει την ίδια τιμή με την προηγούμενη περίπτωση, το διανυσματικό διάγραμμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3). Η τιμή της V_E παραμένει κάτω από το ελάχιστο όριο τάσης ακόμα και μετά την προσθήκη του επαγωγικού μέρους. Δηλαδή, στην περίπτωση με το μικρότερο λόγο X/R η προσθήκη του επαγωγικού μέρους έχει μικρή επίδραση. [20]



Σχήμα 2.3 Σύνθετη Αντίδραση Z απλής γραμμής



Σχήμα 2.4 Διανυσματικό Διάγραμμα με μεγάλο λόγο X/R . (a) μόνο ενεργό ρεύμα. (b) και επαγωγικό ρεύμα



Σχήμα 2.5 Διανυσματικό Διάγραμμα με μικρό λόγο X/R . (a) μόνο ενεργό ρεύμα. (b) και επαγωγικό ρεύμα

Τα διανυσματικά διαγράμματα που εμφανίζονται παραπάνω προκύπτουν από τις εξισώσεις της απλής γραμμής που φαίνεται στο Σχήμα 2.3 και διαμορφώνονται ως εξής:

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad (2.4)$$

$$\mathbf{V}_z = V_R + jV_L = I(R + jX) \quad (2.5)$$

$$\mathbf{V}_E = V_s + I(R + jX) \quad (2.6)$$

Η τιμή του λόγου X/R αποτελεί εσωτερικό χαρακτηριστικό του δικτύου το οποίο δε μπορεί να αλλάξει δυναμικά. Γι' αυτό είναι σημαντικό να είναι γνωστές οι επιδράσεις που έχει στο δίκτυο. Παράλληλα, με την υψηλή διείσδυση διεσπαρμένης παραγωγής με ηλεκτρονικά ισχύος που προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερη δυνατότητα ρύθμισης, είναι σημαντικό να διαμορφώνεται κατάλληλα το δίκτυο εξ αρχής ώστε να αξιοποιούνται οι δυνατότητες ρύθμισης.

2.1.5 Προσεγγιστικός Τύπος Υπολογισμού Πτώσης Τάσης

Η πτώση τάσης που παρατηρείται μεταξύ δύο ζυγών μπορεί να υπολογιστεί, πέρα από την χρήση των τύπων (2.1)-(2.3), και προσεγγιστικά. Η τιμή της πτώσης τάσης περιγράφεται από τον τύπο:

$$\Delta V \cong \frac{RP+XQ}{V_S} \quad (2.7)$$

Όπου R και X η αντίσταση και η αντίδραση του κλάδου μεταξύ των δύο ζυγών, P και Q η ενεργός και η άεργος ισχύς που τον διαρρέουν, και V_S η τάση του ζυγού αναχώρησης. Η προσέγγιση που γίνεται αφορά τη θεώρηση ότι η γωνία μεταξύ της τάσης των ζυγών αναχώρησης και άφιξης είναι τόσο μικρή όσο να θεωρείται αμελητέα. Σύμφωνα και με το Σχήμα 2.2, η ενεργός και η άεργος ισχύς που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό είναι εκείνη που εξέρχεται από τον ζυγό αναχώρησης ώστε να προκύπτει η σχέση:

$$I = \frac{P}{V_S} - j \frac{Q}{V_S} \quad (2.8)$$

2.2 Εξεταζόμενη Γραμμή Διανομής

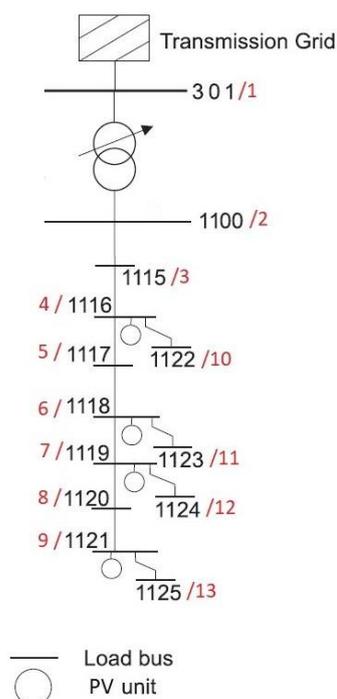
2.2.1 Δομή Συστήματος και Παρουσίαση Δεδομένων Γραμμής Διανομής

Η γραμμή διανομής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί ένα ακτινικό σύστημα διανομής Μέσης Τάσης 11kV δεκατριών ζυγών. Η τροφοδοτική γραμμή διανομής (feeder) βασίζεται σε ένα γενικευμένο υπόγειο σύστημα διανομής του Ηνωμένου Βασιλείου [14] και βασικά του χαρακτηριστικά είναι ότι διασυνδέει αστική περιοχή με μεγάλη πυκνότητα καταναλωτών, διαθέτει μικρό κυκλωματικό μήκος καθώς και είναι μικρό σε μέγεθος, συνολικά.

Ο υπολογισμοί των τάσεων, ως προς μέτρο και γωνία, σε κάθε ζυγό και οι ροές ισχύος μεταξύ τους προέκυψαν από την υλοποίηση ενός αλγορίθμου υπολογισμού της ροής φορτίου του συστήματος μέσω της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Το feeder που εξετάζεται, αποτελείται από 13 ζυγούς, ένα μετασχηματιστή και τέσσερα σημεία σύνδεσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Στην προκείμενη διπλωματική εργασία συνδέονται φωτοβολταϊκά πάρκα. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.4, ο ζυγός 301 αποτελεί το ζυγό αναφοράς (Slack Bus) που βρίσκεται σε τάση 33kV και συνδέεται με την χαμηλότερη τάση και τους υπόλοιπους 12 ζυγούς μέσω ενός μετασχηματιστή με λόγο Μ/Σ 33kV/11kV 26,4MVA. Ο μετασχηματιστής διαθέτει Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), επιτρέποντάς τον έλεγχο της τάσης του δευτερεύοντος. Επίσης επισημαίνεται πως όλοι οι ζυγοί, πέρα του ζυγού ταλάντωσης, θεωρούνται ζυγοί φορτίου (PQ), ενώ η βάση ισχύος του συστήματος ορίζεται από την βιβλιογραφία τα 100MVA.

Με κόκκινα νούμερα στο Σχήμα 2.4 υποδεικνύεται η αρίθμηση που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του μοντέλου στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, και η αρίθμηση που χρησιμοποιείται επίσης στην εργασία.



Σχήμα 2.6: Εξεταζόμενη γραμμή διανομής

2.2.2 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)

Ο μετασχηματιστής της γραμμής διανομής βρίσκεται μεταξύ του πρώτου και του δεύτερου ζυγού, και ουσιαστικά συνδέει δύο διαφορετικά επίπεδα μέσης τάσεως, τα 33kV του ανάντη συστήματος, και τα 11kV της τροφοδοτικής γραμμής διανομής (feeder). Σε ένα σύστημα διανομής συνδέονται πολλά και διαφόρων ειδών φορτία. Τα φορτία αυτά μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας, οδηγώντας την τάση σε αυξομειώσεις. Ουσιαστικά το ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και όταν αυτή μεταβαίνει εκτός των αποδεκτών ορίων, το ΣΑΤΥΦ ενεργεί για να την επαναφέρει σε αποδεκτά επίπεδα. Η μέγιστη και η ελάχιστη αποδεκτή τιμή της τάσης του δεύτερου ζυγού ορίζεται στον Πίνακα 2.1.

Ακολουθεί η παρουσίαση και η επεξήγηση των χαρακτηριστικών του ΣΑΤΥΦ:

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά Μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ

$V_{LTC} (pu)$	$t_0 (pu)$	$t_{min} (pu)$	$t_{max} (pu)$	$\Delta t (pu)$	$V_2^{min} (pu)$	$V_2^{max} (pu)$	$R_t (pu)$	$X_t (pu)$
1	0,99	0,84	1,04	0,01	0,99	1,01	0,04707	0,65409

Επεξηγώντας τα μεγέθη του Πίνακα 2.1, V_{LTC} είναι η τιμή αναφοράς ρύθμισης του ζυγού 2, t_0 η αρχική τιμή της λήψης του ΣΑΤΥΦ, t_{min} και t_{max} το άνω και κάτω όριο της λήψης t , Δt το βήμα της λήψης του ΣΑΤΥΦ, V_2^{min} και V_2^{max} το κάτω και άνω όριο, αντίστοιχα, της τάσης και τέλος R_t και X_t είναι η αντίσταση και η αντίδραση βραχυκυκλώσεως του

μετασχηματιστή. Επισημαίνεται ότι όλα τα παραπάνω μεγέθη έχουν αναχθεί στην βάση ισχύος του συστήματος, δηλαδή στα $S_B = 100MVA$.

Αν τα προκαθορισμένα όρια τάσης του δευτερεύοντος ξεπεραστούν, το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή θα αλλάξει λήψη κατάλληλα, ώστε να επανέλθει η τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, αν οποιαδήποτε στιγμή ανιχνευτεί κάποια υπέρταση στον δεύτερο ζυγό, δηλαδή η τάση του αυξηθεί πάνω από 1.01 pu, το ΣΑΤΥΦ θα αρχίσει να αυξάνει τη λήψη του Μ/Σ με βήμα $\Delta t = 0.01$, έως ότου επανέλθει η τάση μέσα στα επιθυμητά όρια. Αντίστροφα, μόλις ανιχνευτεί τάση χαμηλότερη από 0.99 pu, η λήψη του Μ/Σ θα μειώνεται με βήμα $\Delta t = 0,01$ μέχρι να επανέλθει η τάση μέσα στα προκαθορισμένα όρια.

Σημειώνεται πως η αντίσταση και η αντίδραση βραχυκυκλώματος, R_i και X_i αντίστοιχα, έχουν αναχθεί από την βάση ισχύος του μετασχηματιστή, η οποία είναι $S_B^{LTC} = 26.4MVA$, στη βάση ισχύος του συστήματος διανομής, δηλαδή στα 100MVA. Επίσης ορίζεται ελάχιστη και μέγιστη αποδεκτή τιμή τάσης για όλους τους ζυγούς μετά τον 2ο τα $V_{min} = 0,95pu$ και $V_{max} = 1,05 pu$, αντίστοιχα. Ωστόσο η τήρηση αυτών των ορίων τάσης δεν μπορεί να ελεγχθεί από το ΣΑΤΥΦ.

2.2.3 Κλάδοι Εξεταζόμενης Γραμμής Διανομής

Από την βιβλιογραφία [14] δίνονται αναλυτικά τα δεδομένα των γραμμών. Οι σύνθετες αντιστάσεις τους και τα μήκη τους, από ζυγό σε ζυγό, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά Κλάδων Δικτύου Διανομής

Κλάδοι Γραμμής Διανομής ($S_B = 100MVA$)					
Ζυγός (from)	Ζυγός (to)	$R(pu)$	$X(pu)$	$B(pu)$	Μήκος $L(m)$
1	2	0,04707	0,65409	0	902
2	3	0,07450	0,05740	0	902
3	4	0,07450	0,05740	0	902
4	5	0,07450	0,05740	0	902
5	6	0,07450	0,05740	0	902
6	7	0,07450	0,05740	0	902
7	8	0,07450	0,05740	0	902
8	9	0,07450	0,05740	0	902
4	10	0,05420	0,01470	0	205
6	11	0,05420	0,01470	0	205
7	12	0,05420	0,01470	0	205
9	13	0,05420	0,01470	0	205

Όλα τα μεγέθη βρίσκονται στο ανά μονάδα σύστημα με βασική ισχύ εκείνη του δικτύου. Επίσης οι ζυγοί 1 και 2 αποτελούν το πρωτεύον και το δευτερεύον του μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ, ενώ η μεταξύ τους σύνθετη αντίσταση αποτελεί την σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή.

2.2.4 Φορτία – Διεσπαρμένη Παραγωγή

Όλοι οι ζυγοί πέρα από τον ζυγό 1, στη μελέτη της ροής φορτίου θεωρούνται ως ζυγοί PQ, συνεπώς είναι γνωστή η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούν τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στον καθένα. Τα ονομαστικά φορτία του εξεταζόμενου δικτύου διανομής παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Φορτία του Δικτύου Διανομής

Φορτία ($V_N=11kV$)		
Ζυγός	$P(MW)$	$Q(MVar)$
2	0	0
3	0,426	0,0852
4	0,426	0,0852
5	0,426	0,0852
6	0,426	0,0852
7	0,426	0,0852
8	0,426	0,0852
9	0,426	0,0852
10	0,212	0,0424
11	0,212	0,0424
12	0,214	0,0428
13	0,214	0,0428
Σύνολο	3,834	0,7660

Για τα φορτία, αρχικά θεωρούνται σταθερής ισχύος, με την ενεργό και άεργος ισχύ που καταναλώνουν είναι σταθερή. Ωστόσο στην συνέχεια της εργασίας τα φορτία αυτά προσομοιώνονται ως σταθερής αγωγιμότητας, δηλαδή η κατανάλωση των φορτίων εξαρτάται από την τάση του ζυγού στον οποίο συνδέονται.

Η γραμμή διαθέτει επίσης συνδεδεμένες στους ζυγούς 4, 6, 7 και 9, μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής οι οποίες θεωρούνται φωτοβολταϊκά πάρκα. Θεωρείται ότι οι φωτοβολταϊκές μονάδες παράγουν όλες την ίδια ισχύ μέσα στη μέρα ενώ ακόμα ότι τα Φ/Β πάρκα

λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, με την ονομαστική παραγωγή τους να παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Μέγιστη Παραγωγή Φ/Β Πάρκων

Ονομαστική Παραγωγή Ισχύος από τα Φ/Β Πάρκα	
Ζυγός	$P(MW)$
4	1,0
6	1,0
7	1,0
9	1,0
Σύνολο	4,0

2.3 Μέγιστη Ανύψωση Τάσης

Η ύπαρξη μεγάλου αριθμού φορτίων σε μια γραμμή διανομής, καθώς και οι αντιδράσεις των κλάδων μεταξύ των ζυγών, υπό προϋποθέσεις μπορεί να οδηγήσει σε πτώση τάσης. Ακόμη, Διεσπαρμένες Πηγές Ενέργειας συνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής όταν παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας μπορούν να δράσουν αντίστροφα, προκαλώντας ανύψωση της τάσης.

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η δυνατότητα των φωτοβολταϊκών πάρκων που συνδέθηκαν στη γραμμή διανομής να ανυψώσουν την τάση του συστήματος διανομής μέσω της ενεργού και άεργης παραγωγής, σε βαθμό τέτοιο ώστε να φτάσουν τα όρια τάσης της γραμμής. Για τον σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν δύο απλοποιημένα μοντέλα της γραμμής διανομής του σχήματος 2.4, για την κάλυψη των ακραίων περιπτώσεων στις οποίες μπορεί να παρατηρηθεί μεγάλη ανύψωση τάσης. Επίσης, ο υπολογισμός της ανύψωσης τάσης έγινε με δύο τρόπους. Πρώτα παρουσιάζεται ο προσεγγιστικός τρόπος, ενώ στην συνέχεια γίνεται η πλήρης επίλυση του συστήματος. Όπως θα φανεί και στην σύγκριση που γίνεται στο τέλος, και οι δύο τρόποι βγάζουν όμοια αποτελέσματα.

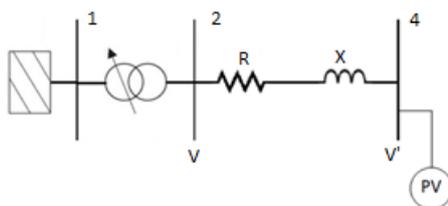
Τέλος, το διάστημα κατά το οποίο θεωρείται ότι η τάση παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα έχει οριστεί το $\pm 5\%$ της ονομαστικής σε κάθε ζυγό, δηλαδή το ανώτερο όριο είναι το 1,05 αμ και το κατώτερο το 0,95 αμ.

2.3.1 Προσεγγιστική Μέθοδος Υπολογισμού

2.3.1.1 Μοντέλο δύο ζυγών

Το πρώτο προσεγγιστικό δίκτυο είναι ένα μοντέλο δύο ζυγών, συγκεκριμένα των ζυγών 2 και 4, με το σύνολο της παραγωγής από ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά) συνδεδεμένη στον ζυγό 4, ίση με το διπλάσιο της ονομαστικής εγκατεστημένης, δηλαδή 8 MW, προκειμένου να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος για παραγωγή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Επίσης, για να προσεγγιστεί η ακραία περίπτωση της μέγιστης ανύψωσης τάσης, παραλείπονται όλα τα φορτία στους ζυγούς και για αυτόν τον λόγο, παραλείπεται και ο ζυγός 3. Η γραμμή μεταξύ των ζυγών 2 και 4 αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους γραμμών μεταξύ των ζυγών 2-3 και 3-4, με την αντίσταση και αντίδραση της να παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5, όπως προέκυψε από τα δεδομένα του Πίνακα 2.2.

Συνεπώς, το μοντέλο δύο ζυγών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7:



Σχήμα 2.7: 1^ο Απλοποιημένο Μοντέλο Γραμμής Διανομής

Πίνακας 2.5: Σύνθετη αντίσταση γραμμής

R (αμ)	X (αμ)	Z (αμ)	θ (°)
0,149	0,115	0,189	37,5

Με το ανά μονάδα σύστημα σε βάση $S_B = 100\text{MVA}$

Η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος P_{PV} από τα φωτοβολταϊκά θεωρείται ίση με 8MW. Η μέγιστη άεργος ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά Q_{PV} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.9)$$

Στο σημείο αυτό, για τον υπολογισμό του Q_{PV} , γίνεται η παραδοχή ότι η φαινόμενη ισχύς S_N των φωτοβολταϊκών ισούται με:

$$S_N = 1,1 P_{PV} \quad (2.10)$$

Η παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών σε φυσικές μονάδες παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.6: Παραγωγή ΦΒ

S_N (MVA)	P_{PV} (MW)	Q_{PV} (MVA _r)
8,8	8	3.67

Ωστόσο οι τιμές φαινόμενης, ενεργής και άεργης ισχύος θα πρέπει να αναχθούν στην βάση ισχύος του συστήματος, δηλαδή στα 100MVA, συνεπώς οι νέες τιμές της ισχύος που θα παράγουν τα φωτοβολταϊκά του ζυγού 4 θα είναι:

Πίνακας 2.7: Παραγωγή ΦΒ σε ανά μονάδα με βάση ισχύος $S_B = 100MVA$

S_N (αμ)	P_{PV} (αμ)	Q_{PV} (αμ)
0,088	0,08	0,0367

Η μέγιστη μεταβολή της τάσης που μπορεί να υπολογιστεί με αρκετή ακρίβεια, προσεγγιστικά, από τον τύπο (2.6):

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_{PV} + X \cdot Q_{PV}}{V} \quad (2.11)$$

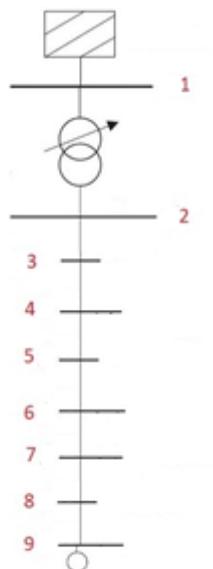
Όπου, R και X είναι η αντίσταση και η αντίδραση της γραμμής, αντίστοιχα, P_{PV} και Q_{PV} η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. ενώ η τάση V θεωρείται περίπου ίση με 0,99 αμ.

Το αποτέλεσμα του τύπου (2.11) είναι: $\Delta V = 0.0164$ αμ.

Η τιμή της μέγιστης ανύψωσης τάσης δεν ξεπερνά το 2%. Από την τιμή αυτή βγαίνει το συμπέρασμα ότι η μέγιστη ανύψωση τάσης που μπορούν να προκαλέσουν τα φωτοβολταϊκά λόγω παραγωγής άεργης ισχύος, δεν επηρεάζει τα όρια τάσεων του δικτύου ($\pm 5\%$).

2.3.1.2 Προσεγγιστικό Μοντέλο 9 Ζυγών

Το δεύτερο προσεγγιστικό μοντέλο για το οποίο ελέγχεται η μέγιστη ανύψωση τάσης λόγω των ΑΠΕ, είναι ένα μοντέλο 9 ζυγών που προκύπτει από το αρχικό του Σχήματος 2.4, αγνοώντας τις «διακλαδώσεις» και θεωρώντας για χάρη απλότητας όλα τα φορτία μηδενικά. Η παραγωγή από τις ΑΠΕ συνδέεται στον πιο απομακρυσμένο ζυγό, τον 9^ο, και ισούται με 2MW, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.8: Απλοποιημένο Μοντέλο 9 Ζυγών

Καθώς κανένας από τους ζυγούς δεν έχει φορτία, η σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταξύ των ζυγών 2 και 9 είναι δυνατόν να παρασταθεί σε μία ενιαία γραμμή, με το δίκτυο να παίρνει μορφή ανάλογη του Σχήματος 2.5, με την τιμή συνολικής αντίστασης και αντίδρασης της γραμμής να αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους. Η αντίσταση και η αντίδραση της ενιαίας γραμμής από τον ζυγό 2 στον ζυγό 9 παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.4:

Πίνακας 2.8: Σύνθετη αντίσταση γραμμής 2-9

R (αμ)	X (αμ)
0,5212	0,4018

Η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος P_{PV} από τα φωτοβολταϊκά στην περίπτωση αυτή αναφέρθηκε ότι θεωρείται ίση με 2MW. Η άεργος ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά Q_{PV} υπολογίζεται από τον τύπο (6.1). Γίνεται η παραδοχή ότι η φαινόμενη ισχύς S_N των φωτοβολταϊκών ισούται με:

$$S_N = 1,1 P_{PV} \quad (2.12)$$

Συνεπώς η παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών σε φυσικές μονάδες παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.5 και στο ανά μονάδα σύστημα στον Πίνακα 6.6:

Πίνακας 2.9: Παραγωγή ΦΒ (2)

S_N (MVA)	P_{PV} (MW)	Q_{PV} (MVar)
2,2	2,0	0,9165

Πίνακας 2.10: Παραγωγή ΦΒ σε ανά μονάδα ($S_B = 100\text{MVA}$)

S_N (αμ)	P_{PV} (αμ)	Q_{PV} (αμ)
0,022	0,02	0,0092

Η μέγιστη μεταβολή της τάσης υπολογίζεται ξανά από τον τύπο (6.3) και ισούται με:

$$\Delta V = 0.0143 \text{ αμ.}$$

Από την τιμή αυτήν ξαναβγαίνει το συμπέρασμα ότι η μέγιστη ανύψωση τάσης που μπορούν να προκαλέσουν τα φωτοβολταϊκά και σε αυτό το απλουστευμένο μοντέλο λόγω παραγωγής άεργης ισχύος δεν ξεπερνάει το όριο του 5%, συνεπώς μπορεί πάλι να θεωρηθεί ότι είναι αμελητέα για την ευστάθεια τάσης του συστήματος.

2.3.2 Ακριβής Μέθοδος Υπολογισμού

2.3.2.1 Μοντέλο δύο ζυγών

Στην δεύτερη μέθοδο υπολογισμού της ανύψωσης τάσης ΔV , αντί να χρησιμοποιηθούν οι προσεγγιστικοί τύποι, τα αποτελέσματα, τα αποτελέσματα προκύπτουν από τους γνωστούς τύπους επίλυσης δίνοντας παράλληλα εκτός από το μέτρο της μεταβολής της τάσης, και την γωνία. Στην περίπτωση αυτή γίνεται η παραδοχή ότι η τάση V' του ζυγού 4 είναι περίπου ίση με 1 αμ.

Η σύνθετη αντίσταση του Πίνακα 2.5 σε πολική μορφή ισούται με:

$$\mathbf{Z} = 0,189 \angle 37,5^\circ \text{ αμ}$$

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή διανομής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{I}^* \quad (2.13)$$

Το αποτέλεσμα του τύπου (2.8) είναι $\mathbf{I} = 0,088 \angle -24,6^\circ \text{ αμ}$

Συνεπώς η ανύψωση τάσης για αυτό το μοντέλο ισούται με:

$$\Delta V = \mathbf{I} \mathbf{Z} = 0,0166 \angle 12,9^\circ \text{ αμ}$$

2.3.2.2 Απλοποιημένο Μοντέλο 9 Ζυγών

Αντίστοιχα στην περίπτωση αυτήν, τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

Η σύνθετη αντίσταση του Πίνακα 2.8 σε πολική μορφή ισούται με:

$$\mathbf{Z} = 0,6583 \angle 37,6^\circ \text{ αμ}$$

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή διανομής υπολογίζεται και πάλι από τον τύπο (2.8) ως:

$$\mathbf{I} = 0,088 \angle -24,6^\circ \text{ αμ}$$

Συνεπώς η ανύψωση τάσης για αυτό το μοντέλο θα είναι ίση με:

$$\Delta V = \mathbf{I} \mathbf{Z} = 0,0144 \angle 13^\circ \text{ αμ}$$

2.3.3 Συμπέρασμα

Αρχικά παρατηρείται πως ανεξάρτητα από τον τρόπο εύρεσης της ανύψωσης τάσης ΔV , τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, γεγονός που υποδεικνύει πως η προσεγγιστική μέθοδος βγάξει αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, παρατηρείται ότι σε καμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η ανύψωση της τάσης στον ζυγό που συνδέεται το φωτοβολταϊκό δεν έφτασε κοντά στο όριο του 5% που είχε οριστεί εξ αρχής. Έτσι συμπεραίνεται ότι τα φωτοβολταϊκά, ακόμη και όταν παράγουν την μέγιστη δυνατή ενεργό και άεργο ενέργεια, δεν εμφανίζεται ανεπιθύμητη αύξηση της τάσης

2.4 Παράσταση Φωτοβολταϊκών

Από την Ενότητα 2.3, συμπεραίνεται ότι η κατανεμημένη παραγωγή του δικτύου δεν είναι ικανή να προκαλέσει υπερτάσεις στη γραμμή διανομής. Συνεπώς, με σκοπό την διερεύνηση της ικανότητας των φωτοβολταϊκών να υποστηρίξουν το σύστημα μεταφοράς παράγοντας άεργο ισχύ, θα χρησιμοποιηθούν δύο τρόποι παράστασης τους αναφορικά με την παραγωγή ενέργειας.

Στην πρώτη περίπτωση, τα φωτοβολταϊκά θα παράγουν μόνο ενεργό ισχύ, δηλαδή θα λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ($\Sigma.I. = 1$). Η ονομαστική ενεργός ισχύς που παράγει η κάθε μια από τις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών είναι 1MW, όπως διατυπώθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην παράσταση των Φ/Β που χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή, η ενεργός ισχύς που θα παράγει η κάθε Φ/Β εγκατάσταση θα είναι ίση με 2 MW, τη διπλάσια παραγωγή δηλαδή, για να εξεταστεί η αντίδραση του δικτύου υπό μια ακραία συνθήκη.

Στην δεύτερη περίπτωση, ο σκοπός, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι να εξεταστεί η ικανότητα των Φ/Β εγκαταστάσεων να υποβοηθήσουν το σύστημα μεταφοράς προσφέροντας άεργο ισχύ. Στην παρούσα περίπτωση, η ενεργός ισχύς που παράγουν οι Φ/Β εγκαταστάσεις, όπως αποδείχτηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι δυνατόν να τεθεί ίση

με την μέγιστη, καθώς υπολογίστηκε ότι για αυτήν την παραγωγή, δεν παρατηρούνται υπερτάσεις σε οποιονδήποτε ζυγό. Συνεπώς, επειδή τα φωτοβολταϊκά είναι ικανά να παράξουν τη μέγιστη δυνατή ενεργό και άεργο ισχύ χωρίς να προκαλέσουν διαταραχές στην τάση, κρίνεται μη αναγκαία η ρύθμιση της παραγωγής τους με σκοπό τον έλεγχο της τάσης της γραμμής. Αντιθέτως, η παραγωγή αέργου ισχύος θα τίθεται ίση με την μέγιστη.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η παραγωγή ενεργού ισχύος τίθεται ίση με 2MW (διπλάσια της ονομαστικής) για κάθε φωτοβολταϊκό πάρκο, οπότε από την τύπο (2.4) υπολογίζεται η αντίστοιχη μέγιστη άεργος ισχύς που θα ισούται με $Q_{max} = 0,9165$ αμ. Ακόμη, γίνεται υπολογισμός της μέγιστης άεργος παραγωγής, όταν η μέγιστη ενεργός παραγωγή ισούται με 1MW ανά Φ/Β εγκατάσταση καθώς η τιμή αυτή χρησιμοποιείται στην ανάλυση του 7^{ου} Κεφαλαίου. Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη άεργος παραγωγή ισούται με $Q_{max} = 0,458$ αμ. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 2.11:

Πίνακας 2.11 Περιπτώσεις Παράστασης Φ/Β

	Παραγωγή Ενεργού Ισχύος (ανά Φ/Β εγκατάσταση)	Παραγωγή Αέργου Ισχύος (ανά Φ/Β εγκατάσταση)
Παράσταση λειτουργίας με $\Sigma.I. = 1$	1 MW	0 MVAr
	2 MW	0 MVAr
Παράσταση λειτουργίας με μέγιστη άεργο παραγωγή	1 MW	0,9165 MVAr
	2 MW	0.458 MVAr

3 Πρόγραμμα Επίλυσης Ροής Φορτίου

Η μελέτη της ροής φορτίου (ή ροής ισχύος) συνίσταται στον υπολογισμό όλων των τάσεων και ροών ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η επίλυση της ροής φορτίου είναι μεγάλης σημασίας στον προσδιορισμό της καλύτερης δυνατής λειτουργίας των ΣΗΕ με ένα ικανοποιητικό προφίλ τάσης. Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται το πρόγραμμα επίλυσης Ροής Φορτίου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής.

3.1 Θεμελίωση του προβλήματος ροής φορτίου

Η μελέτη ροής φορτίου ενός συστήματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ονομάζεται βασικό σενάριο (base case). Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου χρησιμοποιούνται σαν μέτρο σύγκρισης για αλλαγές στη ροή φορτίου στις γραμμές μεταφοράς και διανομής καθώς και στις τάσεις των ζυγών υπό μη φυσιολογικές συνθήκες. Έτσι γίνονται ορατές αδυναμίες του συστήματος όπως χαμηλές τάσεις ή υπερτάσεις.

Το πρόβλημα της ροής φορτίου συνίσταται σε ένα σύνολο μη γραμμικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό, οι οποίες είναι συναρτήσεις των τάσεων των ζυγών. Οι εξισώσεις αυτές σε πολικές συντεταγμένες είναι οι εξής:

$$\Delta P_j = P_j - V_j^2 [G_j + \sum_{(m \neq j)} (G_{sjm} + G_{jmm})] + V_j \sum_{(m \neq j)} V_m [G_{jm} \cdot \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{jm} \cdot \sin(\delta_i - \delta_m)], j = 1, \dots, n-1. \quad (3.1)$$

$$\Delta Q_j = Q_j + V_j^2 [B_j + \sum_{(m \neq j)} (B_{sjm} + B_{jms})] + V_j \cdot \sum_{(m \neq j)} V_m [B_{jms} \cdot \sin(\delta_i - \delta_m) + B_{jms} \cdot \cos(\delta_i - \delta_m)], j = r+1, \dots, n-1. \quad (3.2)$$

Θεωρώντας ότι το υπό εξέταση σύστημα έχει n ζυγούς με τους r από αυτούς να είναι PV ζυγοί και οι υπόλοιποι να είναι PQ ζυγοί, προκύπτουν $n-1$ εξισώσεις ενεργού ισχύος ($\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{n-1}$) και $n-r-1$ εξισώσεις αέργου ισχύος. Ο ζυγός n θεωρείται ως ζυγός αναφοράς (slack bus) άρα $\theta_n = 0$, ενώ το V_n είναι γνωστό. Λόγω της μη γραμμικότητας των εξισώσεων οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού παίζουν σημαντικό ρόλο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση ροής φορτίου είναι το μέτρο και η γωνία της τάσης σε κάθε ζυγό, η ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε κλάδο, όπως και τις απώλειες του συστήματος. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η αριθμητική μέθοδος επίλυσης που χρησιμοποιείται είναι η *Newton – Raphson*.

Στις εξισώσεις αυτές, οι άγνωστοι είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων. Υπάρχουν $n-1$ γωνίες θ_j και $n-r-1$ μέτρα τάσεων V_j προς επίλυση. Δηλαδή συνολικά $2n-r-2$ άγνωστες μεταβλητές που δύναται να λυθούν από τις παραπάνω $2n-r-2$ εξισώσεις. Γραμμικοποιώντας τις εξισώσεις (3.1) και (3.2) κατά Taylor η εξίσωση διόρθωσης προκύπτει ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \dots \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \dots & H_{1,n-1} & \vdots & N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1,n-1} \\ H_{21} & H_{22} & \dots & H_{2,n-1} & \vdots & N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ H_{n-1,1} & H_{n-1,2} & \dots & H_{n-1,n-1} & \vdots & N_{n-1,1} & N_{n-1,2} & \dots & N_{n-1,n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_{11} & J_{12} & \dots & J_{1,n-1} & \vdots & L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1,n-1} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & J_{2,n-1} & \vdots & L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ J_{n-1,1} & J_{n-1,2} & \dots & J_{n-1,n-1} & \vdots & L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \dots & L_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_{n-1} \\ \dots \\ \Delta V_1/V_1 \\ \Delta V_2/V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_{n-1}/V_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Όπου ο πίνακας στην (3.3) ονομάζεται Ιακωβιανός (Jacobian) και αποτελείται από τις μερικές παραγώγους των εξισώσεων (3.1) και (3.2) ως προς τους αγνώστους θ_j και V_j , όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην συνέχεια.

Το διάνυσμα στο πρώτο μέλος της εξίσωσης (3.3) είναι τα *σφάλματα (mismatches)* της επίλυσης, το διάνυσμα διαφορών στο δεύτερο μέλος είναι η διόρθωση και ο Ιακωβιανός πίνακας στο δεύτερο μέλος χωρίζεται σε τέσσερα επιμέρους κομμάτια:

α) Το H_{ij} τμήμα προκύπτει, λαμβάνοντας τις μερικές παραγώγους της εξίσωσης της ενεργού ισχύος (2.4) ως προς την γωνία θ_i με τα στοιχεία του πίνακα να είναι τα εξής:

$$H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad j \neq i \quad (3.4)$$

για τα μη διαγώνια στοιχεία, ενώ τα διαγώνια υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$H_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (3.5)$$

β) Το N_{ij} τμήμα προκύπτει από την μερική παράγωγο της εξίσωσης της ενεργού ισχύος ως προς την τάση:

$$N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad j \neq i \quad (3.6)$$

$$N_{ii} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} V_i = -V_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - 2V_i^2 G_{ii} = -V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (3.7)$$

γ) Το J_{ij} τμήμα προκύπτει αντίστοιχα από την μερική παράγωγο της εξίσωσης της αέργου ισχύος ως προς την γωνία:

$$J_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3.8)$$

$$J_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_i} = -V_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (3.9)$$

δ) Τέλος, το L_{ij} προκύπτει από την μερική παραγωγή της εξίσωσης (3.2) ως προς την τάση:

$$L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_j} V_j = -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad j \neq i \quad (3.10)$$

$$L_{ii} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} V_i = -V_i \sum_{\substack{j \in i \\ j \neq i}} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2V_i^2 B_{ii} = V_i^2 B_{ii} - Q_i \quad (3.11)$$

Η συνοπτική μορφή της εξίσωσης (3.3) είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{J} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Η διόρθωση της γωνίας $\Delta\theta$, και της τάσης κάθε ζυγού ΔV , στο τέλος κάθε επανάληψης (iteration) προστίθεται στις υπάρχουσες τιμές τάσης και γωνίας. Έπειτα, υπολογίζονται τα σφάλματα (mismatches) και αν έχουν τιμή μεγαλύτερη από την επιθυμητή ανοχή ε όπου ορίζεται ίση με 10^{-5} , η μέθοδος οδηγείται στην επόμενη επανάληψη.

$$|\Delta P_{\max}| < \varepsilon \quad (3.13)$$

Θεωρώντας το διάνυσμα της γωνίας και της τάσης x , ο παραπάνω υπολογισμός της διόρθωσης μπορεί να περιγραφεί από την εξής τύπο:

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} + \Delta x \quad (3.14)$$

3.2 Ανάπτυξη προγράμματος ροής φορτίου

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας υλοποιήθηκε στο περιβάλλον MATLAB κώδικας επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος ο οποίος σε γενικές γραμμές δέχεται τα στοιχεία του εκάστοτε δικτύου, επιλύει με αριθμητικές μεθόδους τις παραπάνω εξισώσεις με τη μέθοδο Newton – Raphson και δίνει ως αποτελέσματα τις τιμές του μέτρου και της γωνίας της τάσης σε κάθε ζυγό, καθώς και τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος στους κλάδους του δικτύου. Ανάλογα με τα σενάρια και τις συνδεσμολογίες που εξετάζονται στην συνέχεια, όπως η προσθήκη κινητήρων και η μακροπρόθεσμη προσομοίωση, ο κώδικας τροποποιήθηκε ανάλογα, και περιλαμβάνει τις εξής επιμέρους ρουτίνες:

- 1) Εισαγωγή Δεδομένων
- 2) Διαμόρφωση Πίνακα Αγωγιμοτήτων
- 3) Σχηματισμός Ιακωβιανού Πίνακα και Υπολογισμός Σφαλμάτων $\Delta P/\Delta Q$
- 4) Αλγόριθμος Επίλυσης
- 5) Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο - Μακροπρόθεσμη Προσομοίωση

Η κύρια συνάρτηση του κώδικα καλεί τις επιμέρους συναρτήσεις μέσω των οποίων υπολογίζεται ο πίνακας αγωγιμοτήτων Y (ybusppg), γίνεται η επίλυση της Newton-Raphson (NR_function) και επιλύεται η ροή φορτίου (loadflow). Αφού προκύψουν οι τιμές των τάσεων από την συνάρτηση που εκτελεί την Newton-Raphson, στην main πραγματοποιείται ο έλεγχος της συνθήκης στην οποία βασίζεται ο τρόπος λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ.

3.2.1 Εισαγωγή Δεδομένων

Για την διεξαγωγή της προσομοίωσης είναι απαραίτητο να εισαχθούν τα δεδομένα. Τα εισαγόμενα δεδομένα που παρουσιάζονται πρώτα είναι τα

χαρακτηριστικά της γραμμής διανομής. Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε, καταχωρούνται δύο πίνακες δεδομένων οι οποίοι περιέχουν τις παραμέτρους για τους ζυγούς (busdata_matrix) και για τις γραμμές μεταξύ των ζυγών (linedata_matrix).

Ο πίνακας (busdata_matrix) των ζυγών περιέχει πληροφορίες για τον κάθε έναν από τους ζυγούς της γραμμής διανομής, όπως η αρίθμηση του και ο τύπος του. Αν ο εκάστοτε ζυγός είναι ζυγός ταλάντωσης (slack bus) δηλώνεται ως τύπος 1, αν είναι ζυγός παραγωγής (PV) ως τύπος 2 ή ζυγός φορτίου (PQ) ως τύπος 3. Επίσης εισάγεται η αρχική τάση και η γωνία του κάθε ζυγού, η παραγωγή ισχύος σε κάθε ζυγό, λόγω σύνδεσης ΑΠΕ, και τα φορτία, επίσης ενεργά και άεργα, που τροφοδοτεί ο κάθε ζυγός, σε φυσικά μεγέθη (MW και MVA_r).

Σημειώνεται πως στον πίνακα των ζυγών εισάγονται μόνο τα φορτία σταθερής ισχύος, καθώς οι τιμές που εισάγονται σε αυτόν παραμένουν αμετάβλητες καθ' όλην τη διάρκεια που το πρόγραμμα τρέχει. Τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας λαμβάνονται υπόψιν κατά την κατασκευή του πίνακα αγωγιμοτήτων, όπως θα παρουσιαστεί στην επόμενη υποενότητα.

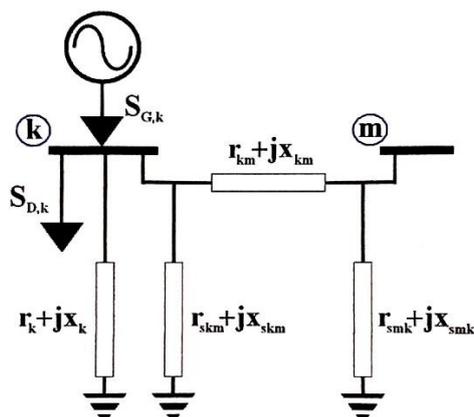
Αντίστοιχα, ο πίνακας των γραμμών διανομής περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου. Σημειώνονται για κάθε γραμμή ο ζυγός αναχώρησης και ο ζυγός άφιξης (from_bus – to_bus) σύμφωνα με τον πίνακα των ζυγών (busdata_matrix), η αντίσταση και αντίδραση της γραμμής στο ανά μονάδα σύστημα καθώς και η ύπαρξη μετασχηματιστή με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) κατά μήκος της εκάστοτε γραμμής, αναγράφοντας την λήψη του όπου υπάρχει.

3.2.2 Διαμόρφωση πίνακα αγωγιμοτήτων

Ο Πίνακας Αγωγιμοτήτων Y είναι ένας τετραγωνικός πίνακας $N \times N$ στοιχείων, όπου N ο αριθμός των ζυγών του συστήματος που κάθε μη διαγώνιο στοιχείο του Y_{km} ισούται με μείον την αγωγιμότητα της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k και m , ενώ τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα Y_{kk} ισούνται με το άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων των γραμμών που συνδέονται με τον εκάστοτε ζυγό k , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις[1]:

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km})$$
$$Y_{km} = -y_{km} \quad (3.15)$$

Όπου y_{skm} είναι οι αγωγιμότητες των εγκάρσιων κλάδων, που στην παρούσα μελέτη δεν υφίστανται. Ο όρος y_k αναπαριστά τις αγωγιμότητες των πυκνωτών που συνδέονται στον ζυγό k , δηλαδή η συνεχής αγωγιμότητα προς γη.



Σχήμα 3.1: Σύστημα δύο ζυγών

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, στην περίπτωση που τα φορτία είναι σταθερής αγωγιμότητας, συμπεριλαμβάνονται στην υπολογισμό της μήτρας αγωγιμοτήτων. Συνεπώς κατασκευάζονται δύο διανύσματα μήκους N , όσοι και η ζυγοί του συστήματος, τα οποία περιέχουν τα ενεργά και άεργα φορτία σταθερής αγωγιμότητας του κάθε ζυγού, τα οποία θα εισαχθούν σαν αγωγιμότητες εξαρτώμενες της τάσης στην διαγώνιο ενός νέου πίνακα, του Y_L , σύμφωνα με τον τύπο:

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{V^2} \quad (3.16)$$

Στην συνέχεια υπολογίζονται τα διαγώνια και τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα αγωγιμοτήτων, θεωρώντας τα φορτία ως σταθερής ισχύος, τα οποία σχηματίζουν τον πίνακα αγωγιμοτήτων Y_{kk} . Προσθέτοντας τους δύο πίνακες, Y_{kk} και Y_L , προκύπτει ο τελικός πίνακας αγωγιμοτήτων Y .

3.2.3 Σχηματισμός Ιακωβιανού Πίνακα / Υπολογισμός Σφαλμάτων $\Delta P/\Delta Q$

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.1, για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου μέσω του περιβάλλοντος MATLAB, κατασκευάστηκαν αρχικά οι εξισώσεις ισοζυγίου ροής ενεργού και άεργου ισχύος (3.1) και (3.2). Στην συνέχεια κατασκευάζεται ο Ιακωβιανός Πίνακας. Ο Ιακωβιανός Πίνακας χωρίζεται σε τέσσερις υποπίνακες H , N , J και L . Ο υποπίνακας H συντίθεται από την μερική παράγωγο της εξίσωσης (3.1) ως προς τη γωνία θ , ενώ τα μη διαγώνια και τα διαγώνια στοιχεία του υπολογίζονται στον αλγόριθμο από τις εξισώσεις (3.4) και (3.5), αντίστοιχα. Ο υποπίνακας N , συντίθεται από τη μερική παράγωγο της εξίσωσης (3.1) ως προς την τάση και τα στοιχεία του υπολογίζονται με την χρήση των εξισώσεων (3.6) και (3.7). Ομοίως ο υποπίνακας J που ορίζεται ως η μερική παράγωγος της εξίσωσης (3.2) ως προς τη γωνία υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3.8) και (3.9) ενώ ο πίνακας L που ορίζεται ως η μερική παράγωγος της εξίσωσης (3.2) ως προς την τάση υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3.10) και (3.11). Τέλος, οι τέσσερις αυτοί υποπίνακες ενώνονται και σχηματίζουν τον Ιακωβιανό.

Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση των μεταβολών $\Delta\theta$ και ΔV από τον τύπο (3.12) και των σφαλμάτων (mismatches) ΔP και ΔQ . Για τον σκοπό αυτό, ο Ιακωβιανός Πίνακας αντιστρέφεται χρησιμοποιώντας την κατάλληλη εντολή στο MATLAB. Στην πρώτη επανάληψη, τα σφάλματα ΔP και ΔQ υπολογίζονται από τη διαφορά του αρχικού ισοζυγίου παραγωγής-κατανάλωσης που εισάχθηκε στα δεδομένα των ζυγών, και των τιμών ενεργού και αέργου ισχύος που προέκυψαν από τις εξισώσεις (3.1) και (3.2). Τα αποτελέσματα αυτής της διαφοράς ορίζουν το διάνυσμα του σφάλματος M . Στην συνέχεια, λύνοντας την εξίσωση (3.12), προκύπτει το «διάνυσμα διόρθωσης» που περιέχει την μεταβολή της τάσης ΔV και της γωνίας $\Delta\theta$. Οι μεταβολές αυτές αθροίζονται στις ήδη υπάρχουσες, αντίστοιχες τιμές τάσης και γωνίας για όλους τους ζυγούς εκτός από τον ζυγό ταλάντωσης. Οι τιμές που προκύπτουν αποτελούν τα αποτελέσματα της πρώτης επανάληψης (iteration) της επαναληπτικής μεθόδου Newton-Raphson. Στο τέλος κάθε επανάληψης, γίνεται έλεγχος της τρέχουσας και της προηγούμενης τιμής του διανύσματος M , ώστε να υπολογιστεί η σύγκλιση. Σαν συνθήκη σύγκλισης στον συγκεκριμένο αλγόριθμο έχει οριστεί η τιμή $Tolerance < 10^{-5}$. Αν η τιμή του σφάλματος είναι μεγαλύτερη από την τιμή αυτή, ο αλγόριθμος οδηγείται στην επόμενη επανάληψη, με τα νέα δεδομένα που προέκυψαν. Αν τα σφάλματα είναι μικρότερα από την τιμή που ορίστηκε, η συνάρτηση της μεθόδου Newton-Raphson δίνει κάποιο τελικό αποτέλεσμα στην έξοδο, και ο αλγόριθμος οδηγείται στο επόμενο βήμα.

3.2.4 Υπολογισμός Ροής Κλάδων

Τα αποτελέσματα που επιστρέφουν οι συναρτήσεις υπολογισμού του πίνακα αγωγιμοτήτων και της μεθόδου Newton-Raphson, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για την συνάρτηση υπολογισμού της ροής φορτίου στους κλάδους του δικτύου. Επισημαίνεται ξανά ότι στην παρούσα διπλωματική αμελούνται οι εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής. Αρχικά υπολογίζεται η ένταση του ρεύματος που ρέει από κάθε ζυγό αναχώρησης i σε κάθε ζυγό άφιξης j σύμφωνα με τον τύπο στο ανά μονάδα σύστημα:

$$I_{ij} = (V_j - V_i) Y_{ij} \quad (3.17)$$

Η αντίθετη ροή, από τον ζυγό j στον ζυγό i προφανώς θα ισούται με:

$$I_{ji} = -I_{ij} \quad (3.18)$$

Στην συνέχεια, η Φαινόμενη Ισχύς που ρέει από τον ζυγό i στον ζυγό j υπολογίζεται σε φυσικά μεγέθη (MVA) από τον τύπο:

$$S_{ij} = V_i \cdot I_{ij}^* \cdot S_{base} \quad (3.19)$$

Όπου V_i η τάση στον ζυγό αναχώρησης και I_{ij}^* η συζυγής τιμή της έντασης του ρεύματος που ρέει από τον ζυγό i στον ζυγό j .

Για να γίνει η μετατροπή της φαινόμενης ισχύος από το ανά μονάδα σύστημα σε MVA, πολλαπλασιάζεται με την βασική ισχύ, η οποία ισούται με $S_{base} = 100\text{MVA}$. Η μιγαδική

τιμή της φαινόμενης ισχύος έπειτα χωρίζεται στο πραγματικό μέρος (ενεργός ισχύς) και στο φανταστικό μέρος (άεργος ισχύς).

3.2.5 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

Τα δεδομένα που εξάχθηκαν από τις συναρτήσεις επίλυσης της Newton-Raphson και της μήτρας αγωγιμοτήτων, η λειτουργία των οποίων έχει περιγραφεί στις προηγούμενες υποενότητες, χρησιμοποιούνται στο κύριο σώμα του κώδικα (main) όπου πραγματοποιείται και η δυναμική προσομοίωση της λειτουργίας του Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο του μετασχηματιστή. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ συνοψίζεται στον έλεγχο της τάσης του ζυγού αναφοράς της υπό εξέταση γραμμής διανομής.

Αρχικά, λύνεται το πρόβλημα ροής φορτίου με τα αρχικά δεδομένα και τον αρχικό λόγο του ΣΑΤΥΦ. Στην συνέχεια ο αλγόριθμος του ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση στον δεύτερο ζυγό. Εάν η τιμή της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή βρεθεί εκτός του προκαθορισμένου επιθυμητού διαστήματος, αλλάζει ο λόγος του ΣΑΤΥΦ είτε προς τα πάνω, είτε προς τα κάτω με βήμα Δt , όπως φαίνεται στο Σχήμα (3.2). Με κάθε μεταβολή, επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμού της ροής φορτίου που περιγράφηκε προηγουμένως, και συλλέγονται οι νέες τιμές των τάσεων. Όταν καταλήξουν τα αποτελέσματα αυτά εντός ορίων, ο αλγόριθμος του ΣΑΤΥΦ βγαίνει από τον επαναληπτικό βρόχο και ο κώδικας δίνει τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου.

Όπως παρουσιάζεται και στο τμήμα κώδικα του σχήματος 3.1, μέσα σε έναν επαναληπτικό βρόχο ελέγχεται η τιμή του μέτρου της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Αν η τάση είναι μικρότερη από $V_{\min} = 0,99$ αμ, η λήψη του ΣΑΤΥΦ μειώνεται από την τιμή $t = 0,99$ με βήμα $\Delta t = 0,01$, αυξάνοντας την τάση του δευτερεύοντος. Αντίστοιχα, όταν η τάση ανέβει πάνω από $V_{\max} = 1,01$ αμ, το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί αντίστροφα, αυξάνοντας την λήψη του Μ/Σ με βήμα $0,01$. Και στις δύο περιπτώσεις λαμβάνονται υπόψιν το κάτω (t_{\min}) και άνω (t_{\max}) όριο της λήψης του ΣΑΤΥΦ, τα οποία δεν μπορούν να ξεπεραστούν. Έπειτα, υπολογίζονται ξανά ο πίνακας αγωγιμοτήτων, η *Newton-Raphson* και η ροή φορτίου. Στην συνέχεια, θα ξαναγίνει ο έλεγχος της τάσης του δεύτερου ζυγού και θα επαναληφθεί η ίδια διαδικασία.

```
while (V(2) > 1.01 || V(2) < 0.99) && (0.84 < t ||  
t > 1.04)  
    if V(2) > 1.01  
        t = t + 0.01;  
    elseif V(2) < 0.99  
        t = t - 0.01;  
    end  
end
```

Σχήμα 3.2 Κώδικας ΣΑΤΥΦ

3.2.6 Μακροπρόθεσμη Προσομοίωση

Το πρόγραμμα ροής φορτίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνει μακροπρόθεσμη χρονική προσομοίωση. Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύεται η ροή φορτίου με τις παραμέτρους να αλλάζουν είτε στην είσοδο (π.χ. φορτία) είτε σαν αποτελέσματα μεταβολής των τάσεων (π.χ. ΣΑΤΥΦ). Στο 6^ο και 7^ο Κεφάλαιο χρησιμοποιείται η μακροπρόθεσμη προσομοίωση του δικτύου. Μέσα σε μια ορισμένη χρονική περίοδο t , προκαλείται μια διαταραχή στο σύστημα θέτοντας την τάση εκτός των επιτρεπτών ορίων, και παρατηρείται ο τρόπος με τον οποίον το ΣΑΤΥΦ θα επαναφέρει τάση μέσα στα όρια. Η λειτουργία αυτή περιγράφεται στον παρακάτω ψευδοκώδικα:

```
for time = 1:100

    ybusppg(t);
    NR_function(Y);

    if V(2) > Vref + 0.01 && time > 9
        t = t + 0.01;
        flag = 0;

    elseif V(2) < Vref - 0.01 && time > 9
        t = t - 0.01;
        flag = 0;

    end
```

Η μακροπρόθεσμη προσομοίωση χρησιμοποιείται επίσης και στην διακριτή αλλαγή μιας παραμέτρου, όπως η αγωγιμότητα ενός φορτίου, ώστε σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, η επόμενη κατάσταση να προκύπτει σε διακριτή μορφή, από την άθροιση της τρέχουσας, με μια σταθερή μεταβολή, προκαθορισμένη από την αρχικοποίηση του προβλήματος. Η μεταβολή αυτή στην περίπτωση της αγωγιμότητας, μπορεί να περιγραφεί από τον τύπο (3.20):

$$G_{k+1} = G_k + \Delta G \quad (3.20)$$

4. Στατική Ανάλυση Στιγμιότυπων Γραμμής Διανομής

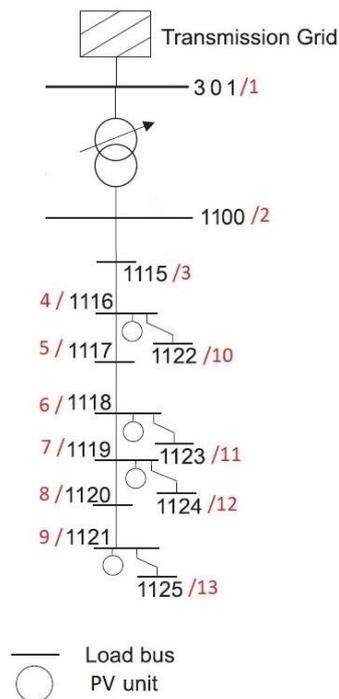
4.1 Φορτία Σταθερής Ισχύος

Η ανάλυση ενός δικτύου μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: στατική και δυναμική ανάλυση. Στην στατική ανάλυση τα φορτία παραμένουν αμετάβλητα με το χρόνο. Ωστόσο, στην πραγματικότητα τα φορτία μεταβάλλονται, με την πάροδο του χρόνου, όπως και η παραγωγή των φωτοβολταϊκών στην διάρκεια μιας ημέρας. Τα φορτία που εξαρτώνται από την τάση, όπως αναφέρεται και στην ενότητα 1.4, είναι τα φορτία σταθερού ρεύματος και τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Για τη στατική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ροής φορτίου που αναπτύχθηκε και περιεγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο.

Η ανάλυση των γραμμών τροφοδοσίας του Σχήματος 2.4 του 2^{ου} Κεφαλαίου, το οποίο επαναλαμβάνεται στο Σχήμα 4.1 λόγω ευκολίας, θα ξεκινήσει από την παρουσίαση ορισμένων στατικών στιγμιότυπων για διαφορετικές, ακραίες τιμές φορτίων και παραγωγής από ΑΠΕ και στην συνέχεια θα εξεταστούν οι συνέπειες που έχουν τα στιγμιότυπα αυτά στην τάση των ζυγών καθώς και το ενδεχόμενο αντίστροφης ροής ισχύος. Στην ενότητα αυτήν τα φορτία θα θεωρηθούν *σταθερής ισχύος*.

Τα σενάρια αυτά είναι τα εξής:

- a) Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή
- b) Μέγιστο Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή
- c) Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή



Σχήμα 4.1 Γραμμή Διανομής

4.1.1 Μεθοδολογία

Πριν την παρουσίαση των στιγμιοτύπων, στην υποενότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι προδιαγραφές του συστήματος, στις οποίες στηρίζονται οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν.

- Η νεκρή ζώνη της τάσης στον δεύτερο ζυγό, μέσα στην οποία το ΣΑΤΥΦ δεν μεταβάλλει την λήψη του, περιορίζεται στο $\pm 1\%$ της ονομαστικής, δηλαδή από 0,99 έως 1,01 αμ.
- Αντίστοιχα, στους υπόλοιπους ζυγούς είναι επιθυμητή τάση να περιορίζεται στο $\pm 5\%$ της ονομαστικής, δηλαδή από 0,95 έως 1,05.
- Το ΣΑΤΥΦ αλλάζει την λήψη του με βήμα $\Delta t = 0,01$, με ελάχιστο λόγο λήψης το 0,84 και μέγιστο το 1,04, έχοντας σαν αρχική λήψη την τιμή $t = 0,99$.

Επιπλέον, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η αρχικοποίηση που πραγματοποιήθηκε πριν την υλοποίηση του κάθε σεναρίου:

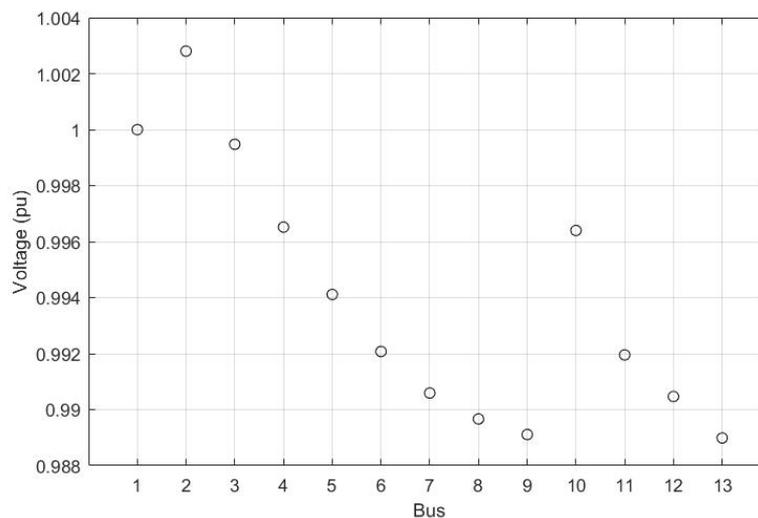
- Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή: Σε αυτήν την περίπτωση η κατανάλωση των φορτίων τίθεται ίση με την μέγιστη που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 2.3 στο 2^ο Κεφάλαιο. Η συνολική διεσπαρμένη παραγωγή αρχικά είναι μηδενική.
- Μέγιστο Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή: Στο δεύτερο σενάριο, η κατανάλωση των φορτίων τίθεται ξανά ίση με την μέγιστη. Η συνολική διεσπαρμένη παραγωγή ισούται με 4MW με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, και αντιστοιχεί με 1MW

παραγωγή σε κάθε ένα από τα τέσσερα φωτοβολταϊκά πάρκα που συνδέονται στη γραμμή διανομής.

- Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή: Στο τρίτο σενάριο, η κατανάλωση των φορτίων θεωρείται ελάχιστη ή μηδενική, ενώ η έγχυση ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά είναι 4MW στο σύνολό της, 1MW ανά μονάδα παραγωγής

4.1.2 Μέγιστο Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή Φωτοβολταϊκών

Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση στην οποία τα φορτία καταναλώνουν το ονομαστικό τους φορτίο, ενώ ταυτόχρονα τα φωτοβολταϊκά πάρκα παράγουν την ελάχιστη δυνατή ενεργό ισχύ, δηλαδή μηδενική (όπως γίνεται τις βραδινές ώρες). Το στιγμιότυπο τάσης (σε ανά μονάδα) ανά ζυγό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Η αρίθμηση των ζυγών ακολουθεί το Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.2: Προφίλ Τάσεων για Μέγιστο Φορτίο και Μηδενική Παραγωγή

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται πτώση τάσης σε αρκετούς ζυγούς, ωστόσο καμία τάση σε οποιονδήποτε ζυγό κατά μήκος της γραμμής δεν πέφτει κάτω από το επιθυμητό όριο που έχει οριστεί στην υποενότητα 4.1.1. Επιπροσθέτως η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή (του ζυγού 2) παραμένει μέσα στο όριο του $\pm 1\%$ της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ. Συνεπώς ο λόγος t του ΣΑΤΥΦ παραμένει αμετάβλητος στην αρχική τιμή $t = 0,99$ η οποία προκύπτει από την αρχικοποίηση του συγκεκριμένου στιγμιότυπου.

Αυτή η πτώση τάσης οφείλεται στο ότι σε κάθε ζυγό είναι συνδεδεμένο ένα φορτίο το οποίο απορροφά ισχύ, η οποία δεν αναπληρώνεται από τα φωτοβολταϊκά, σε αντίθεση με επόμενα σενάρια. Σαν αποτέλεσμα, κινούμενοι κατά μήκος της γραμμής κάθε φορτίο απορροφά επιπλέον ισχύ από το δίκτυο, χαμηλώνοντας σταδιακά την τάση.

Στο σενάριο αυτό οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος P_{12} και Q_{12} που απορροφά η γραμμή διανομής υπολογίζονται όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 4.1:

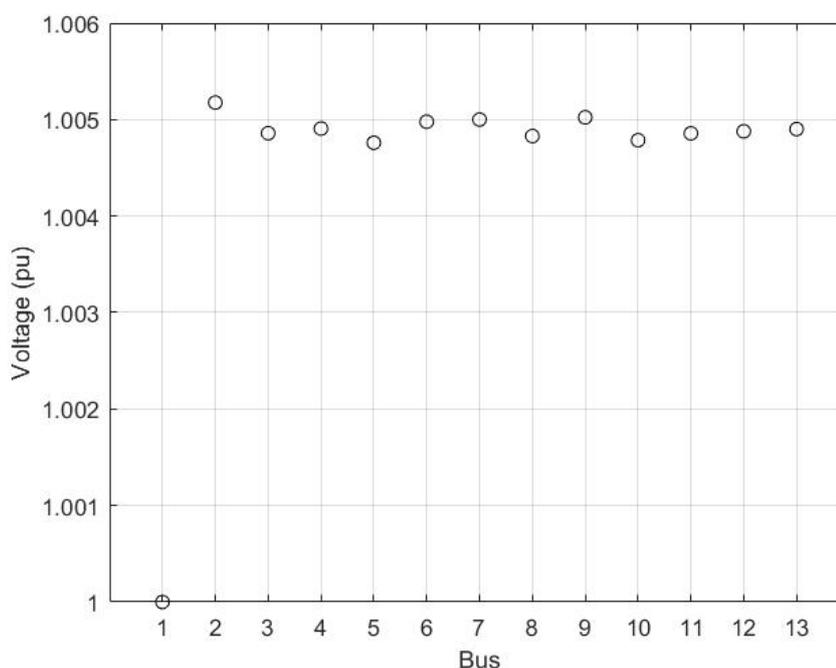
Πίνακας 4.1

Ροή ισχύος μεταξύ των ζυγών 1 και 2	
$P_{12}(\text{MW})$	3,879
$Q_{12}(\text{MVar})$	0,894

Έχει θεωρηθεί ως θετική, η ροή ισχύος από την μεταφορά προς την διανομή, συνεπώς θα συναντάται ανάστροφη ροή ισχύος, δηλαδή από το δίκτυο διανομής προς το σύστημα μεταφοράς, όταν η ροή P_{12} είναι αρνητική.

4.1.3 Μέγιστο Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή Φωτοβολταϊκών

Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση στην οποία τα φορτία καταναλώνουν το ονομαστικό τους φορτίο του Πίνακα 2.3, ενώ ταυτόχρονα τα φωτοβολταϊκά πάρκα παράγουν την μέγιστη δυνατή ενεργό ισχύ τους, δηλαδή 4MW (1 MW έκαστο). Οι τάσεις υπολογίστηκαν στο πρόγραμμα ροής ισχύος, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Προφίλ Τάσεων για Μέγιστο Φορτίο και Μέγιστη Παραγωγή

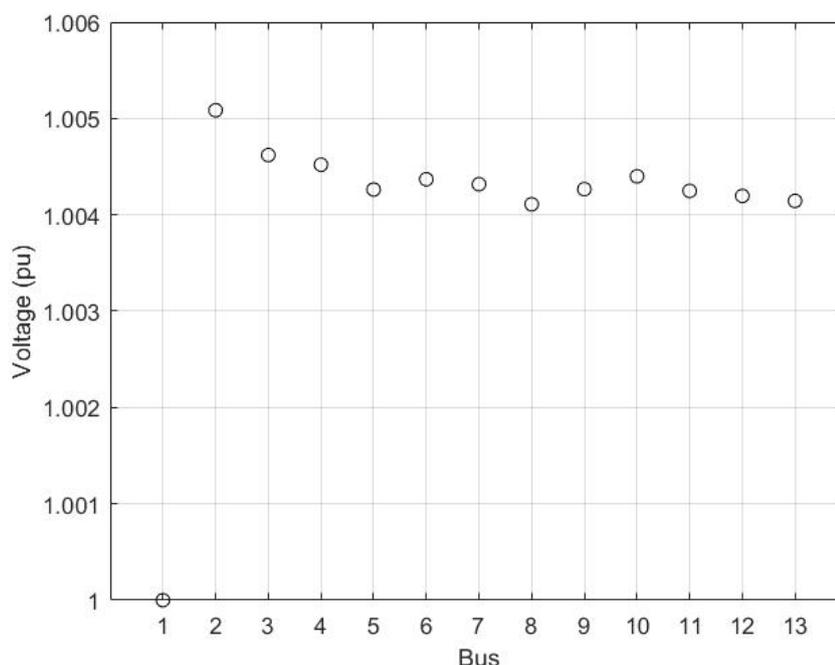
Σε αυτό το σενάριο παρατηρείται μια μικρή ανύψωση των τάσεων, καθώς η ενεργός παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι λίγο μεγαλύτερη από τα συνολικά ενεργά φορτία του δικτύου με αποτέλεσμα η ισχύς που απορροφάται από τα φορτία όχι μόνο να αναπληρώνεται από τα φωτοβολταϊκά αλλά να παρατηρείται και ροή ισχύος προς την υψηλότερη τάση. Λόγω αυτών των συνθηκών ο λόγος του μετασχηματιστή παραμένει ίσος με $t=0,99$ ενώ η ροή ισχύος στον ζυγό 1 αντιστρέφεται, όπως συνοψίζεται στον Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2

Ροή ισχύος μεταξύ των ζυγών 1 και 2	
$P_{12}(\text{MW})$	-0,161
$Q_{12}(\text{MVar})$	-0,768

4.1.4 Μέγιστο Φορτίο / Μηδενική αντίστροφη ροή

Για να βρεθεί η οριακή ενεργός τιμή της παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά ώστε να μην εμφανίζεται αντίστροφη ροή, μειώνεται σταδιακά η τιμή της φωτοβολταϊκής παραγωγής με βήμα 1% μέχρι να προκύψει $P_{12} = 0 \text{ MW}$. Η τιμή της παραγωγής κατά την οποία πραγματοποιείται αντιστροφή της ροής ισχύος είναι $P_G = 0,950 \text{ MW}$ για κάθε Φ/Β πάρκο. Η ροή αέργου ισχύος ισούται εκείνη τη στιγμή με $Q_{12} = -0,773 \text{ MVar}$. Στην ειδική αυτή περίπτωση το στιγμιότυπο της τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.

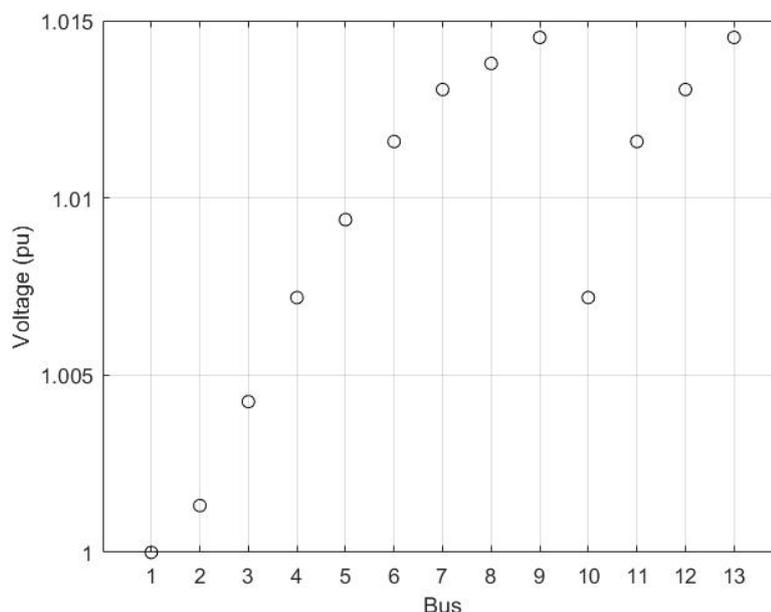


Σχήμα 4.4: Προφίλ Τάσεων με Μέγιστο Φορτίο και με τη Μέγιστη Δυνατή Παραγωγή ώστε να μην εμφανίζεται ανάστροφη ροή ενεργού ισχύος

4.1.5 Μηδενικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

Σε αυτό το στιγμιότυπο εξετάζεται η περίπτωση στην οποία παρατηρείται μέγιστη έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο από τις διεσπαρμένες πηγές, ενώ τα φορτία θεωρούνται αμελητέα ή μηδενικά. Στην περίπτωση αυτή αναμένεται πως θα

παρατηρηθεί αντίστροφη ροή ενεργού ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς, καθώς οι μόνες απώλειες ισχύος που υπάρχουν είναι των γραμμών διανομής.



Σχήμα 4.5: Προφίλ Τάσεων Δικτύου για Μέγιστη Παραγωγή και Μηδενικό Φορτίο

Στο σχήμα 4.5 γίνεται αντιληπτό ότι η μεγάλη παραγωγή από τα Φ/Β καθώς και τα μηδενικά φορτία οδηγούν σε αυξήσεις τάσεων κατά μήκος της γραμμής. Επίσης, όπως αναμένεται, συναντάται μεγάλη αντίστροφη ροή, καθώς σχεδόν όλη η ενεργός ισχύς που παράγεται ρέει από τη γραμμή διανομής στο δίκτυο μεταφοράς. Η ενεργός και η άεργος ροή ισχύος στον ζυγό 1 συνοψίζεται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3

Ροή ισχύος μεταξύ των ζυγών 1 και 2	
$P_{12}(\text{MW})$	-3,950
$Q_{12}(\text{MVA}_r)$	-0,132

Επίσης, στο σενάριο αυτό, συναντάται και αλλαγή του λόγου t του ΣΑΤΥΦ, από το ονομαστικό 0,99 σε 1, για να επαναφέρει την τάση του ζυγού 2 εντός της νεκρής ζώνης ρύθμισης που έχει προκαθοριστεί. Η τάση των υπολοίπων ζυγών παραμένει μέσα στο επιθυμητό όριο του $\pm 5\%$, με αποτέλεσμα να μην απαιτούνται περαιτέρω ρυθμίσεις τάσης.

4.2 Φορτία Εξαρτώμενα από την Τάση

4.2.1 Μεθοδολογία

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 1.4, στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα εξεταστεί η εξάρτηση των φορτίων μόνο από την τάση. Η συμπεριφορά των φορτίων, στα σενάρια που θα αναλυθούν παρακάτω, εξαρτάται από την τάση σύμφωνα με τις παρακάτω εκθετικές σχέσεις [6]:

$$P = z P_0 (V_i / V_0)^a \quad (4.1)$$

$$Q = z Q_0 (V_i / V_0)^b \quad (4.2)$$

όπου P_0 και Q_0 είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνει το φορτίο με τάση ίση με την τάση αναφοράς V_0 και z μια αδιάστατη σταθερά ζήτησης που έχει την τιμή 1 στην συγκεκριμένη εργασία.

Εάν τα φορτία θεωρηθούν σαν αγωγιμότητες σε κάθε ζυγό, εντάσσονται στη μήτρα αγωγιμοτήτων Y_L , σύμφωνα με τον τύπο:

$$Y_L = \frac{(P_L - jQ_L)}{V^2} \quad (4.3)$$

όπου Y_L η ισοδύναμη σύνθετη αγωγιμότητα του φορτίου στο ανά μονάδα σύστημα, P_L , Q_L η ενεργός και άεργος ισχύς που απορροφά το φορτίο σε ανά μονάδα, V η τάση του ζυγού σε ανά μονάδα.

Οι τρεις μέθοδοι παράστασης των φορτίων σε αυτήν την ενότητα είναι οι εξής:

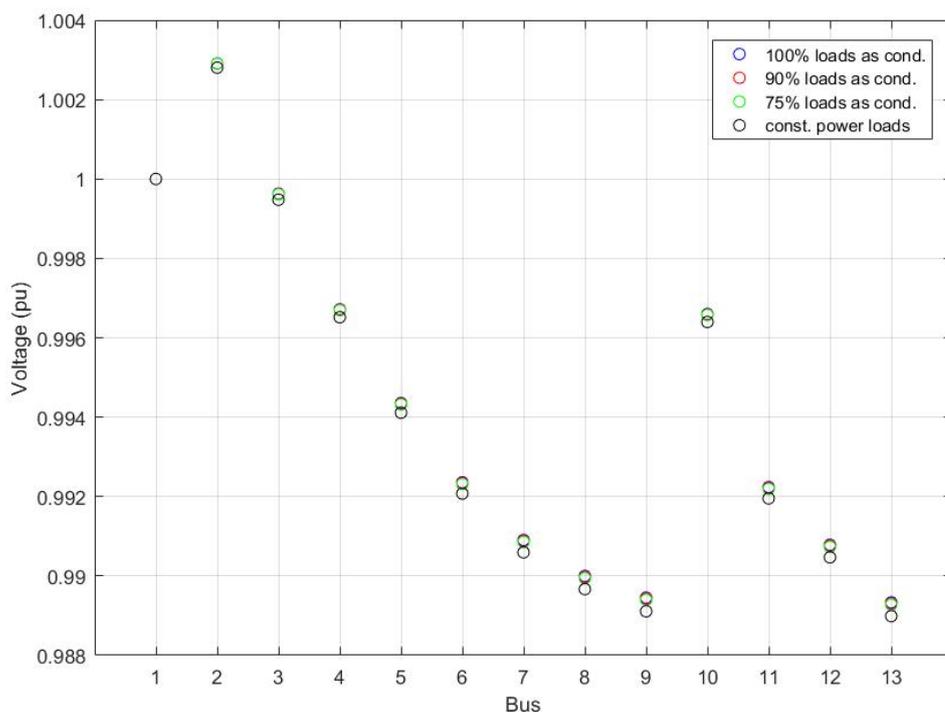
- Θεώρηση του 100% των ενεργών και άεργων φορτίων ως αγωγιμότητες. Στην περίπτωση αυτή τα φορτία χαρακτηρίζονται φορτία σταθερής αγωγιμότητας για τα οποία ισχύει ότι $a = b = 2$.
- Θεώρηση του 90% των ενεργών φορτίων ως αγωγιμότητες. Τα άεργα φορτία παραμένουν στο 100% ως αγωγιμότητες. Το υπόλοιπο 10% των φορτίων θεωρούνται φορτία σταθερής ισχύος.
- Θεώρηση του 75% των ενεργών φορτίων σαν αγωγιμότητες. Τα άεργα φορτία παραμένουν στο 100% ως αγωγιμότητες. Όμοια με πριν, το υπόλοιπο 25% των φορτίων θεωρούνται φορτία σταθερής ισχύος.

Τα τρία αυτά διαφορετικά μοντέλα φορτίων, παρουσιάζονται ταυτόχρονα σε κάθε σχήμα, μαζί με την μεταβολή της τάσης για φορτία σταθερής ισχύος που αναλύθηκαν στην Ενότητα 4.1, για πιο εύκολη σύγκριση και εξαγωγή συμπερασμάτων, για κάθε ένα από τέσσερα διαφορετικά σενάρια παραγωγής και φορτίων. Τα σενάρια που εξετάστηκαν είναι τα εξής:

- a) Ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή
- b) Ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή
- c) Διπλάσιο ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή
- d) Διπλάσιο ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

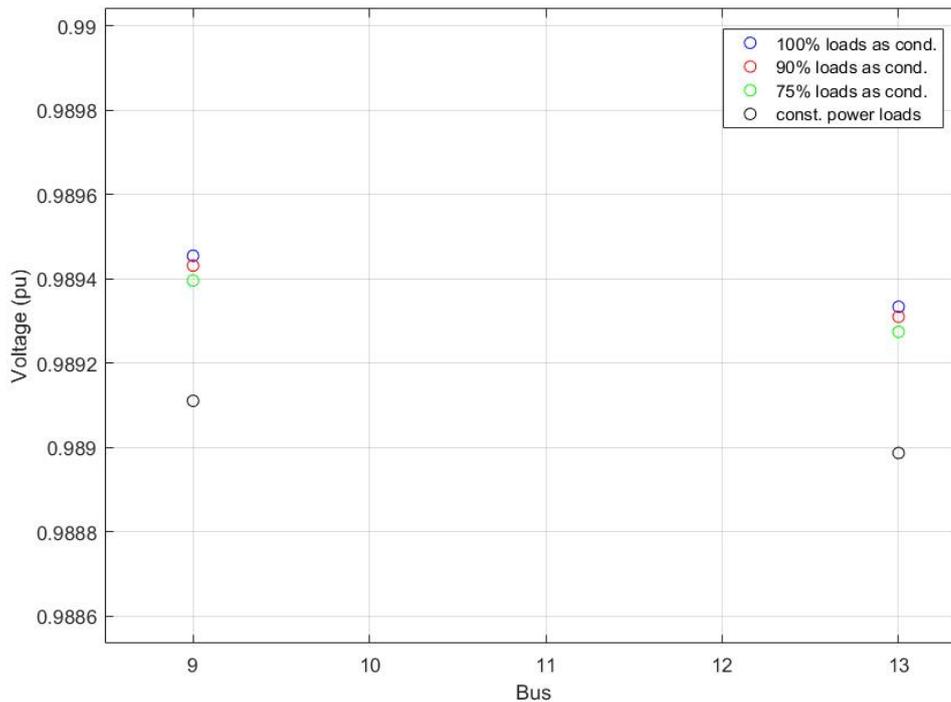
4.2.2 Ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή

Στην πρώτη περίπτωση εξετάζεται η συμπεριφορά των τάσεων στους ζυγούς για ονομαστικά φορτία, ενώ η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάρκα είναι μηδενική. Σε όσες περιπτώσεις όπου η κατανάλωση είναι ονομαστική, είναι ίση με τις τιμές που αναφέρονται στον Πίνακα 2.3 του 2^{ου} Κεφαλαίου. Το στιγμιότυπο της τάσης ανά ζυγό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6:



Σχήμα 4.6: Προφίλ Τάσεων (Μηδενική Παραγωγή ΦΒ)

Δεδομένου ότι οι τιμές είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, παρατίθεται ακόμα ένα σχήμα, με πιο ευκρινή προβολή κυρίως των ζυγών 9 και 13 οι οποίοι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση τιμών μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων φορτίων. Αυτό συμβαίνει καθώς οι ζυγοί 9 και 13 είναι οι πιο απομακρυσμένοι από τον ζυγό υψηλής τάσης στη γραμμή διανομής.



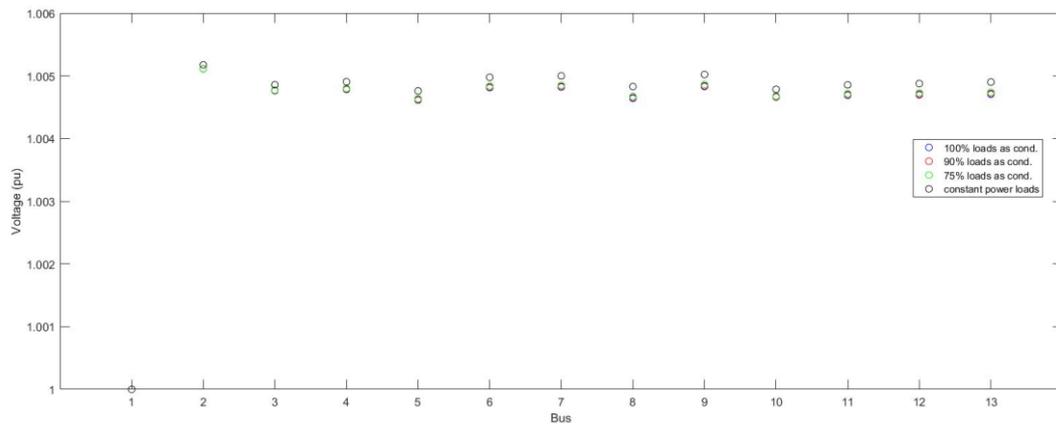
Σχήμα 4.7: Εστιασμένο Στιγμιότυπο Τάσης για Ονομαστικά Φορτία και Μηδενική Παραγωγή (Ζυγοί 9 και 13)

Παρατηρείται ότι όσο περισσότερα φορτία αναπαρίστανται σαν αγωγιμότητες, τόσο μικρότερη η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής. Αυτό προκύπτει από τη σχέση (4.1) για διαφορετικές τιμές του εκθέτη a . Όταν κατά μήκος της γραμμής παρατηρείται πτώση τάσης, η τάση V λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Συνεπώς όταν αυτή η τάση υψωθεί σε μία δύναμη a , ο όρος V^a θα μικραίνει, όσο θα αυξάνεται ο εκθέτης. Έτσι για φορτία σταθερής αγωγιμότητας όπου ισχύει ότι $a = 2$, ο όρος V^a θα λαμβάνει τη μικρότερη τιμή του, οδηγώντας και την ενεργό ισχύ που απορροφά το αντίστοιχο φορτίο να είναι μικρότερη από τις άλλες περιπτώσεις. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση μικρότερης πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής.

4.2.3 Ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

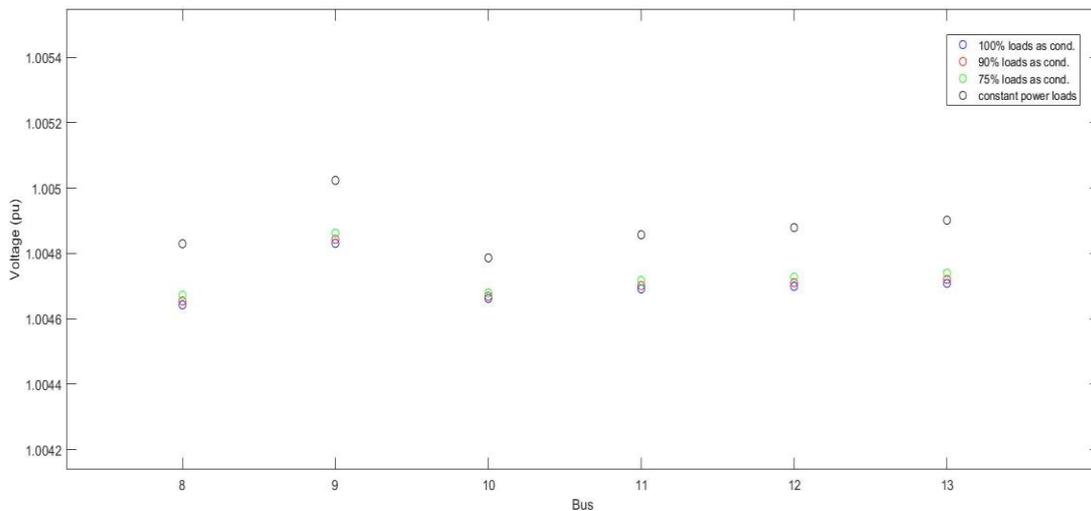
Σε αυτήν την περίπτωση εξετάζεται η συμπεριφορά των τάσεων στους ζυγούς για ονομαστικά φορτία, ενώ η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πάρκα είναι μέγιστη, ίση με 4MW συνολικά.

Το στιγμιότυπο της τάσης ανά ζυγό για κάθε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8:



Σχήμα 4.8: Στιγμιότυπο Τάσης για Ονομαστικά Φορτία και Μέγιστη Παραγωγή

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο, δεδομένου ότι οι τιμές είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, παρατίθεται ακόμα ένα σχήμα, με πιο ευκρινή προβολή κυρίως μεταξύ των ζυγών 9 και 13 οι οποίοι όντας οι πιο απομακρυσμένοι από τον ζυγό ΥΤ, παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόκλιση τιμών μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων φορτίων.



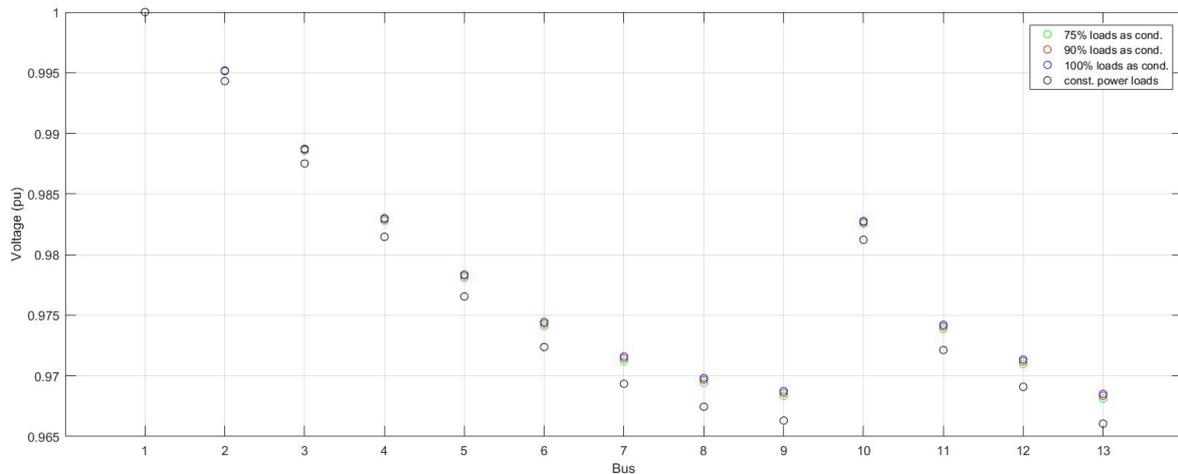
Σχήμα 4.9: Εστιασμένο Στιγμιότυπο Τάσης για Ονομαστικά Φορτία και Μηδενική Παραγωγή (Ζυγοί 8 έως 13)

Παρατηρείται, ανάλογα με το πρώτο σενάριο, ότι όσο περισσότερα φορτία αναπαρίστανται σαν αγωγιμότητες, τόσο μικρότερη η αύξηση της τάσης, σε αυτήν την περίπτωση, κατά μήκος της γραμμής. Αυτό μπορεί να προκύψει και πάλι από την σχέση (1), καθώς σε αυτήν την περίπτωση η τάση V λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1 αμ. Σαν αποτέλεσμα, για εκθέτη $a = 2$ η ισχύ που απορροφά το εκάστοτε φορτίο θα είναι μεγαλύτερη για τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων πτώσεων τάσεων κατά μήκος της γραμμής σε σχέση με τα άλλα μοντέλα.

Αρχικά σημειώνεται πως στο σενάριο της μέγιστης παραγωγής με τα ονομαστικά φορτία, η ανάστροφη ροή υπολογίστηκε ίση με 0,129MW και 0,78MVA_r με φορά προς τον ζυγό μέσης τάσης. Επίσης, στις προηγούμενες περιπτώσεις δεν απαιτήθηκε η αλλαγή της λήψης του ΣΑΤΥΦ, δεδομένου ότι η τιμή της τάσης του ζυγού 2, σε κάθε σενάριο, έβγαινε μέσα στη νεκρή ζώνη που έχει οριστεί ως αποδεκτή.

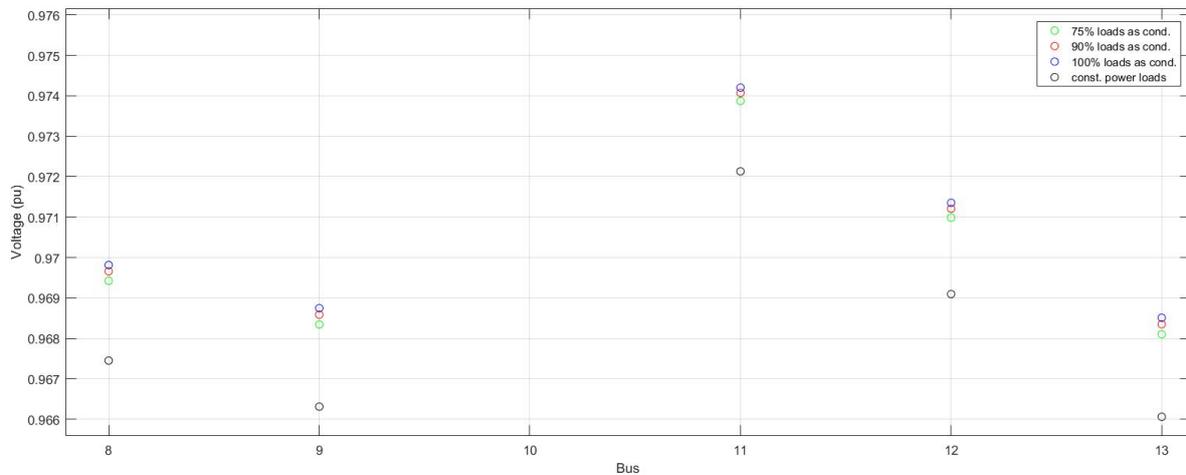
4.2.4 Διπλάσιο ονομαστικό Φορτίο – Μηδενική Παραγωγή

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά της τάσης για φορτία διπλάσια του ονομαστικού, χωρίς να υπάρχει παραγωγή ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Το στιγμιότυπο της τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10:



Σχήμα 4.10: Στιγμιότυπο Τάσης για Φορτία Διπλάσια του Ονομαστικού και Μηδενική Παραγωγή

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, παρατίθεται ένα πιο εστιασμένο σχήμα (Σχήμα 4.11), για πιο ευκρινή προβολή των πιο απομακρυσμένων ζυγών, στους οποίους παρατηρείται και η μεγαλύτερη πτώση τάσης.

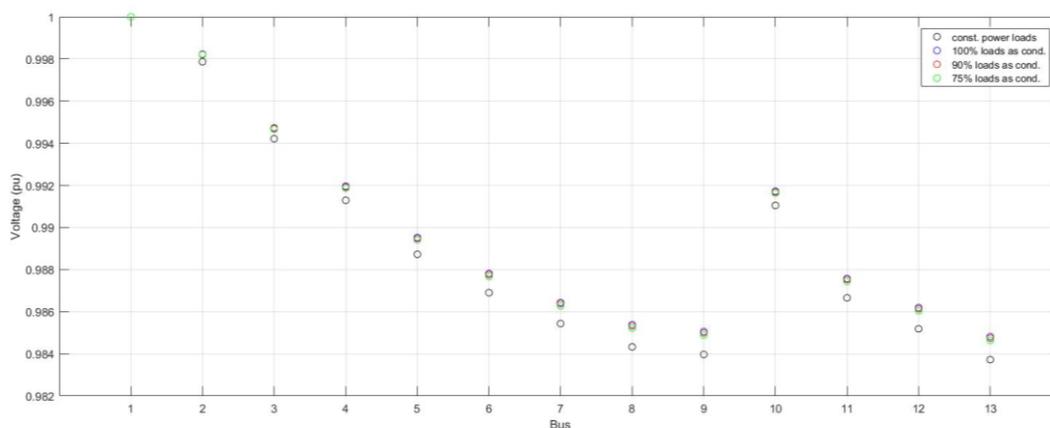


Σχήμα 4.11: Εστιασμένο Στιγμιότυπο Τάσης για Φορτία Διπλάσια του Ονομαστικού και Μηδενική Παραγωγή

Και σε αυτό το σενάριο, παρατηρούνται παρόμοια φαινόμενα με το σενάριο της υποενότητας 4.2.2 καθώς και σε αυτήν την περίπτωση γίνεται εμφανές ότι όσο περισσότερα φορτία αναπαρίστανται σαν αγωγιμότητες, τόσο μικρότερη η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής. Επιπλέον, δεν ήταν απαραίτητο να αλλάξει η λήψη του ΣΑΤΥΦ ούτε σε αυτήν την περίπτωση, γεγονός που υποδηλώνει πως η υπό εξέταση γραμμή διανομής είναι ικανή να υποστηρίξει φορτία αρκετά μεγαλύτερα των ονομαστικών.

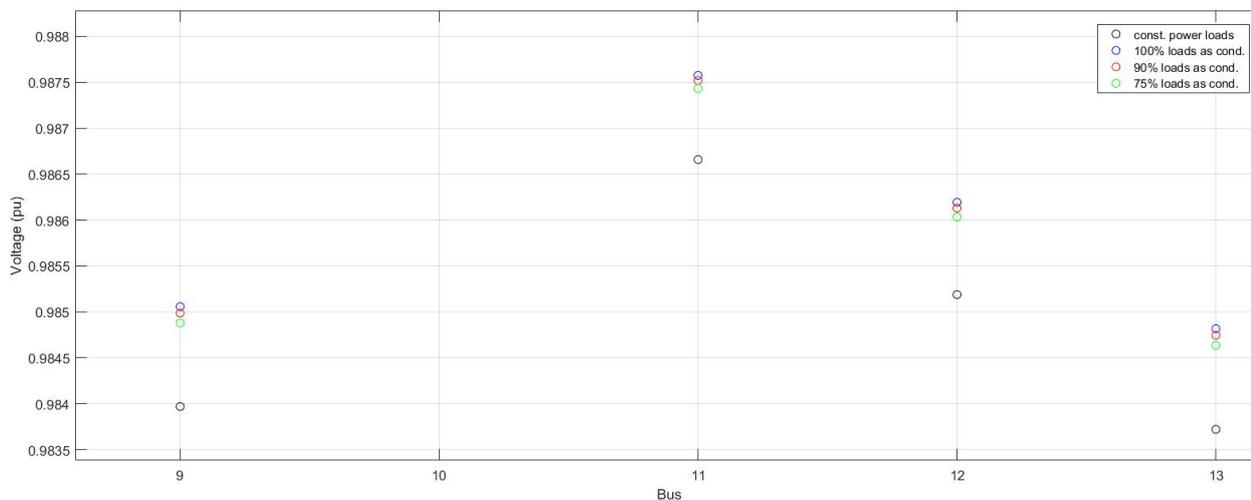
4.2.5 Διπλάσιο Ονομαστικό Φορτίο – Μέγιστη Παραγωγή

Στο επόμενο σενάριο, εξετάζεται η συμπεριφορά της τάσης για φορτία διπλάσια του ονομαστικού και για μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος από τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Το στιγμιότυπο της τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12:



Σχήμα 4.12: Στιγμιότυπο Τάσης για Φορτία Διπλάσια του Ονομαστικού και Μέγιστη Παραγωγή

Ομοίως με τα προηγούμενα σενάρια, παρατίθεται ένα πιο εστιασμένο σχήμα (Σχήμα 4.13), για πιο ευκρινή προβολή των πιο απομακρυσμένων ζυγών, στους οποίους παρατηρείται και η μεγαλύτερη πτώση τάσης.



Σχήμα 4.13: Εστιασμένο Στιγμιότυπο Τάσης για Φορτία Διπλάσια του Ονομαστικού και Μέγιστη Παραγωγή

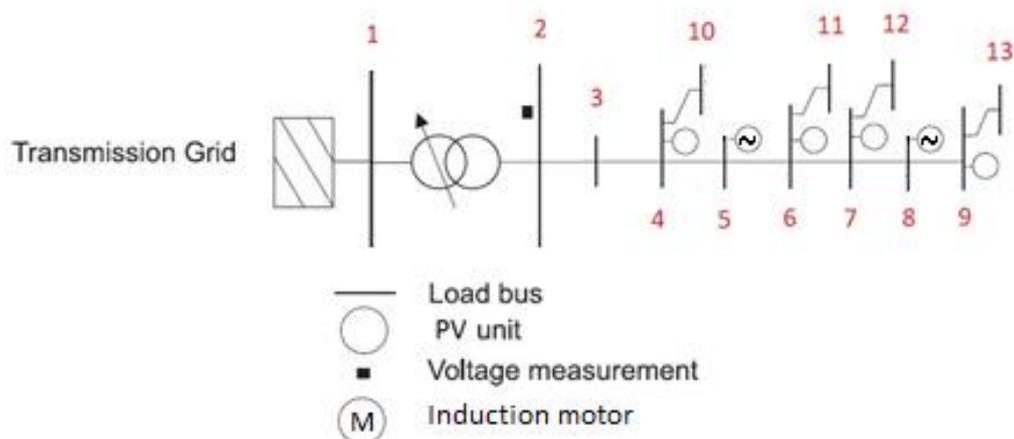
Στην τελευταία περίπτωση, παρατηρείται ότι συγκριτικά με το προηγούμενο σενάριο, η πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής είναι αισθητά μικρότερη, ωστόσο και πάλι όλες οι τιμές των τάσεων βρίσκονται μέσα στην προκαθορισμένη νεκρή ζώνη. Και πάλι γίνεται αντιληπτό ότι όσο περισσότερα φορτία αναπαρίστανται σαν αγωγιμότητες, τόσο μικρότερη η αύξηση της τάσης, κατά μήκος της γραμμής, γεγονός που αιτιολογήθηκε παραπάνω.

5. Ένταξη Κινητήρων Επαγωγής

5.1 Παράσταση Κινητήρα στο Πρόγραμμα Ροής Φορτίου

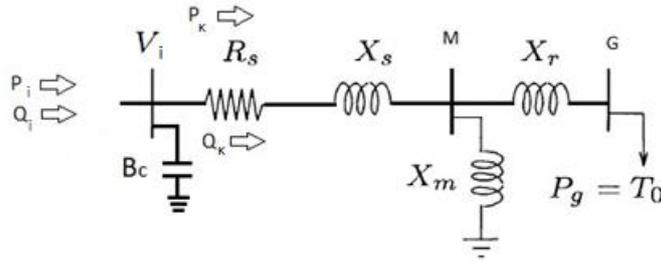
Στην ενότητα αυτήν ελέγχεται και συγκρίνεται η συμπεριφορά της τάσης της γραμμής διανομής στην περίπτωση όπου τα φορτία διαφόρων ζυγών, αντικατασταθούν ολικώς ή μερικώς, από τριφασικούς κινητήρες επαγωγής και παρουσιάζεται το ισοδύναμο μοντέλο τους το οποίο χρησιμοποιείται στην επίλυση της ροής φορτίου.. Η λειτουργία των κινητήρων προσεγγίζεται από το ισοδύναμο κύκλωμα σταθερής κατάστασης (steady-state) ενώ επιλέγεται αρχικά το μοντέλο σταθερής ροπής για την ανάλυσή τους [6].

Το κύκλωμα της γραμμής διανομής αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1: Γραμμή Διανομής

Το μονογραμμικό διάγραμμα του κινητήρα για ένταξη στο πρόγραμμα ροής ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 5.2:



Σχήμα 5.2: Μονογραμμικό Διάγραμμα Κινητήρα για Ροή Φορτίου

Το μονογραμμικό διάγραμμα υλοποιείται στο πρόγραμμα προσθέτοντας στους ζυγούς της γραμμής V_i όπου θα συνδεθεί κινητήρας, δύο επιπλέον ζυγούς για κάθε κινητήρα, τον M_i και τον G_i , ο πρώτος με μηδενικό φορτίο και ο G με φορτίο ενεργού ισχύος $P_g = T_0$ και $Q_g = 0$. P_i και Q_i είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφά από την ζυγό, ενώ P_K και Q_K η συνολική ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας.

5.2: Αρχικοποίηση Κινητήρων Επαγωγής

Όταν εντάσσεται ένας κινητήρας επαγωγής στο δίκτυο, πρέπει να προσδιοριστεί η αρχική του ολίσθηση και ροπή ώστε να αντιστοιχεί στην αρχική ροή φορτίου του δικτύου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αρχικοποίηση και πραγματοποιείται όπως παρουσιάζεται παρακάτω,

5.2.1 Παραδοχές και Δεδομένα

Δοκιμάζονται διάφορα σενάρια τόσο για κινητήρες οικιακής, όσο και για επαγγελματικής (commercial) χρήσης, και στην συνέχεια συγκρίνονται οι τιμές των τάσεων και των ροών ισχύος που προκύπτουν από κάθε περίπτωση, αλλά και με τα αποτελέσματα της αρχικής ροής φορτίου. Ο υπολογισμός της ολίσθησης και της άεργου ισχύος πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου που αναλύεται στην αναφορά [15].

Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος, έγιναν οι εξής παραδοχές:

- i. Αρχικά θεωρήθηκε ότι ο κινητήρας θα συνδεθεί στον ζυγό 8 της γραμμής διανομής, και θα αντικαταστήσει εξ ολοκλήρου το ενεργό και άεργο φορτίο του συγκεκριμένου ζυγού, στην περίπτωση του διπλάσιου φορτίου για πιο ευκρινή αποτελέσματα, δηλαδή αφού το ονομαστικό φορτίο καταναλώνει 426kW ενεργό ισχύ (2^ο Κεφάλαιο), στην περίπτωση αυτή η ενεργός ισχύς που θα καταναλώνει ο κινητήρας θα είναι ίση με του φορτίου που αντικαθιστά, δηλαδή ισούται με $P_K=852kW$ για πιο ευκρινή αποτελέσματα.
- ii. Η βασική τάση του κινητήρα θεωρείται ίση με εκείνη του συστήματος στα 11kV.
- iii. Η παραγωγή ισχύος των φωτοβολταϊκών έχει θεωρηθεί μηδενική.
- iv. Ακόμη γίνεται η παραδοχή ότι ο *συντελεστής φόρτισης* του κινητήρα, δηλαδή ο λόγος της ενεργού και της φαινόμενης ισχύος ισούται με:

$$\frac{P_K}{S_K} = 0,7$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει η τιμή της βασικής ισχύος του κινητήρα:

$$S_K = \frac{P_K}{0,7} = 1217 \text{kVA} = 1,217 \text{MVA}$$

- v. Η άεργος ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας συμβολίζεται ως Q_K . Η ισχύς αυτή προκύπτει από τη διαφορά της αέργου ισχύος Q_i που εισέρχεται στον ζυγό από την γραμμή μεταφοράς, και της αέργου ισχύος που προσφέρει ο πυκνωτής αντιστάθμισης. Συνεπώς, ανάγοντας την άεργο ισχύ του κινητήρα στην βάση ισχύος του δικτύου, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

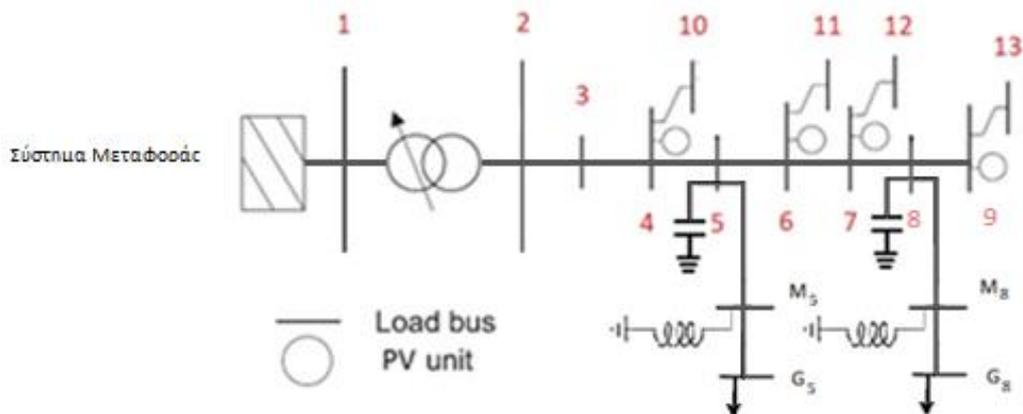
$$Q_i = Q_K \frac{S_N}{S_K} - V_i^2 B_C$$

Όλες οι παραπάνω τιμές συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1 Τιμές ισχύος και τάσης κατά την αρχικοποίηση

$P_i = P_k$ (MW)	S_k (MW)	Q_i (MVAr)	V_B (V)
0,852	1,217	0,1704	11×10^3

Όπου S_N η βάση ισχύος της γραμμής διανομής, V_i η τάση του ζυγού σε αμ και B_C η αγωγιμότητα του πυκνωτή.



Σχήμα 5.3: Γραμμή διανομής με κινητήρες

5.2.2 Εύρεση Ολίσθησης

Το στατικό μοντέλο ενός κινητήρα επαγωγής βασίζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης του κινητήρα, όπου το K_1 ισούται με:

$$K_1 = X_r + X_m \quad (5.1)$$

Κατά την μέθοδο αυτή η ενεργός ισχύς που απορροφά ο κινητήρας θεωρείται γνωστή από την αρχική ροή φορτίου, όπως επίσης και η τάση του ζυγού σύνδεσης του κινητήρα

ενώ η άεργος ισχύς και η ολίσθηση υπολογίζεται μέσω των συντελεστών A, B, C, K₁, K₂, K₃, K₄ οι οποίοι υπολογίζονται σύμφωνα με την παρακάτω ανάλυση:

$$A = P(R_s^2 + K_3^2) - V^2 R_s \quad (5.2)$$

$$B = 2P(R_s K_2 + K_3 K_4) - V^2 (K_2 + K_1 K_3) \quad (5.3)$$

$$C = P(K_2^2 + K_4^2) - V^2 K_1 K_4 \quad (5.4)$$

$$K_2 = -X_s K_1 - X_r X_m \quad (5.5)$$

$$K_3 = X_m + X_s \quad (5.6)$$

$$K_4 = R_s K_1 \quad (5.7)$$

όπου η ισχύς P_k είναι γνωστή και δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$P_k = P_i = \frac{|V|^2 \left\{ \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] + K_1 \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (5.8)$$

και η άεργος ισχύς Q υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q_k = \frac{-|V|^2 \left\{ (K_1) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right] - \left(\frac{R_r}{s} \right) \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right] \right\}}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right) R_s - X_s K_1 - X_r X_m \right]^2 + \left[\left(\frac{R_r}{s} \right) (X_m + X_s) + R_s K_1 \right]^2} \quad (5.9)$$

Η ολίσθηση του κινητήρα υπολογίζεται λύνοντας την δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 A + \left(\frac{R_r}{s} \right) B + C = 0 \quad (5.10)$$

και λαμβάνεται η μεγαλύτερη τιμή του s ως ορθή [15].

Επίσης στην υλοποίηση αυτήν στον τύπο (2.3) του 2^{ου} Κεφαλαίου οι τάσεις έλαβαν τις τιμές του κάθε ζυγού από την αρχική επίλυση της ροής φορτίου. Σαν αποτέλεσμα ανεξάρτητα από τον τρόπο μοντελοποίησης των φορτίων, τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης θα πρέπει να είναι τα ταυτίζονται, ή τουλάχιστον να τείνουν να γίνουν ίσα.

5.3 Ανάλυση Σεναρίων

5.3.1 Ένας οικιακός κινητήρας στον ζυγό 8

Αρχικά προσομοιώνεται το σύστημα, με έναν επαγωγικό κινητήρα συνδεδεμένο στον ζυγό 8, ο οποίος θεωρείται ότι απορροφά το σύνολο της ενεργού ισχύος που απορροφούσε το αντίστοιχο φορτίο στην ανάλυση της υποενότητας (2.3.3). Για τον κινητήρα που συνδέθηκε στον ζυγό 8, οι ζυγοί M και G του ισοδυνάμου κυκλώματος ονομάστηκαν 14 και 15 αντίστοιχα. Η παραγωγή από τις φωτοβολταϊκές μονάδες θεωρείται μηδενική. Η ροή ισχύος που εισέρχεται στον ζυγό 8 από το σύστημα

είναι 852kW και 170,4kVAr. Επιλέχθηκε από τη βιβλιογραφία [6] ένας κινητήρας που τροφοδοτεί οικιακά φορτία συνεπώς θα διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.1: Τιμές Φαινόμενης και Ενεργού Ισχύος

S_K	P_K
1217 kVA	852 kW
1 pu	0,7 pu

Πίνακας 5.2: Δεδομένα οικιακού κινητήρα σε αμ στη βάση ισχύος $S_K = 1217\text{kVA}$

R_S	X_S	X_m	X_r	R_r
0,077	0,107	2,22	0,098	0,079

Οι συντελεστές της μεθόδου, σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.2)-(5.7) υπολογίστηκαν όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2 στην ονομαστική ισχύ του κινητήρα:

Πίνακας 5.3: Συντελεστές ισοδύναμου οικιακού κινητήρα

K_1	K_2	K_3	K_4	A	B	C
2,3180	-0,4656	2,3270	0,1785	3,7222	-4,1040	-0,2151

Όπως αναφέρθηκε στην αρχικοποίηση, η βασική τάση του κινητήρα είναι ίση με $V_B = 11\text{kV}$ και η βασική αντίσταση με $Z_B = 99,4248\Omega$. Συνεπώς έχοντας υπολογίσει ήδη την βασική ισχύ του κινητήρα, το βασικό ρεύμα ισούται με $I_B = 0,1106\text{A}$. Από τις εξισώσεις (5.8) και (5.9) επαληθεύεται η τιμή της ενεργού ισχύος ίση με $P_K = 0,7\text{ pu}$ και επίσης προκύπτει πως η άεργος ισχύς που θα απορροφά ο κινητήρας είναι $Q_K(\text{αμ}) = 0,4712\text{pu}$ ή σε kVAr θα ισούται με $Q_K = 573,411\text{kVAr}$. Η τάση του ζυγού είναι γνωστή και ίση με $V_8 = 0,97645\text{pu}$ με γωνία $-3,6382^\circ$. Η μέγιστη άεργος ισχύς που μπορεί να προσφέρει η γραμμή είναι ίση με $Q_i = 170,4\text{kVAr}$, που ήταν και η άεργος ισχύς που απορροφούσε και το μέγιστο φορτίο στην προηγούμενη ενότητα. Οπότε η διαφορά αέργου ισχύος θα συμπληρωθεί από έναν πυκνωτή συνδεδεμένο εγκάρσια στον ζυγό 8, προσφέροντας άεργο υποστήριξη. Ο πυκνωτής θα πρέπει να προσφέρει $Q_C = 403,011\text{kVAr}$, οπότε η διαστασιολόγησή του παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.4, μαζί με τα υπόλοιπα ζητούμενα της προσομοίωσης, την άεργο ισχύ και την ολίσθηση.

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα αρχικοποίησης

s	Q_K (kVAr)	Q_i (kVAr)	Q_C (kVAr)	B_C	
6,85%	573,411	170,4	403,011	pu (S_K)	pu (S_N)
				0,3509	$4,196 \cdot 10^{-3}$

Αφού προσδιορίστηκαν όλα τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, στην συνέχεια συνδέεται στο σύστημα. Εφόσον ο κινητήρας συνδέεται στο δίκτυο διανομής, όλα τα

στοιχεία του θα πρέπει να αναχθούν ως προς την βασική τάση και ισχύ του συστήματος, δηλαδή $V_B = 11\text{kV}$ και $S_B = 100\text{MVA}$. Επίσης η βασική αντίσταση του συστήματος είναι ίση με $Z_B = 1,21\Omega$ και η βασική ένταση του ρεύματος $I_B = 9090,9\text{A}$.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, ανηγμένα στη νέα βάση ισχύος, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.5, 5.6 και 5.7:

Πίνακας 5.5: Αντιστάσεις και Αντιδράσεις στη βάση ισχύος $S_B=100\text{MVA}$

R_S	X_S	X_m	X_r	R_r	$P_g=T_0$
pu	pu	pu	pu	pu	pu
6,327	8,792	182,416	8,053	6,491	$0,791126 \times 10^2$

Πίνακας 5.6: Τάσεις κινητήρα

V_1	V_{1a}	V_2
pu	pu	pu
$0,96981 \angle 3,4529^\circ$	$0,92473 \angle 5,3487^\circ$	$0,92143 \angle 0,4912^\circ$

Η ισχύς στον άξονα του κινητήρα στο μοντέλο που μελετάται και η οποία ισούται με την ισχύ του διακένου P_g προκύπτει από τον τύπο:

$$P_g = \frac{R_r}{s} (I_2)^2 \quad (5.11)$$

Η αντίσταση R_r/s ισούται με $114,60878 \Omega$ άρα η ισχύς διακένου είναι ίση με $P_g = 791126\text{W}$.

Θεωρώντας τους ζυγούς 14 και 15 ως ζυγούς PQ, ο 14 με μηδενικό φορτίο και ο 15 με φορτίο την ισχύ στην έξοδο του κινητήρα, δηλαδή το P_g , προσομοιώνεται η συμπεριφορά του συστήματος για φορτία 100% ως αγωγιμότητες και προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 5.7 Επαλήθευση Αρχικοποίησης

Σενάρια	Μέτρο Τάσης Ζυγού 8 (αμ)
Φορτία 100% ως αγωγιμότητες με κινητήρα	0,96743
Αρχική επίλυση ροής φορτίου (φορτία σταθερής ισχύος)	0,96745

Παρατηρείται ότι η τιμή της τάσης του ζυγού 8 είναι σχεδόν αμετάβλητη το οποίο υποδηλώνει ότι ο κινητήρας έχει αρχικοποιηθεί σωστά.

5.3.2 Ένας Ισοδύναμος Επαγγελματικός Κινητήρας στον ζυγό 8

Επιλέχθηκε από τη βιβλιογραφία [6] ένας κινητήρας που τροφοδοτεί εμπορικά (commercial) φορτία συνεπώς θα διαθέτει τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.8: Στοιχεία κυκλώματος επαγγελματικού κινητήρα

R_S	X_S	X_m	X_r	R_r
pu	pu	pu	pu	pu
0,001	0,23	3,0	0,23	0,02

Οι συντελεστές της παραπάνω μεθόδου υπολογίστηκαν όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9 στην ονομαστική ισχύ του κινητήρα:

Πίνακας 5.9: Συντελεστές επαγγελματικού κινητήρα

K_1	K_2	K_3	K_4	A	B	C
3,2300	-1,4329	3,23	0,0032	7,3021	-8,4110	1,4275

Πίνακας 5.10: Τιμές Φαινόμενης και Ενεργού Ισχύος

S_K	P_K	Q_K	s
1217 kVA	852 kW	751,51 kVAr	2,12%
1 pu	0,7 pu	0,6175 pu	

Από τις εξισώσεις (4.8) και (4.9) και με την τιμή της ενεργού ισχύος ίση με $P_K = 0,7$ pu, προκύπτει πως η άεργος ισχύς που θα απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο θα είναι $Q_K = 0,6175$ pu ή σε kVAr θα ισούται με $Q_K = 751,51$ kVAr. Η τάση του ζυγού είναι γνωστή και ίση με $V_8 = 0,97645$ pu με γωνία $-3,6382^\circ$, τιμή προερχόμενη από την αρχική ροή ισχύος. Επίσης είναι γνωστή από το προηγούμενο σενάριο η μέγιστη άεργος ισχύς που μπορεί να δώσει το δίκτυο διανομής, $Q_i = 170,4$ kVAr

Συνεπώς η διαφορά αέργου ισχύος στο σενάριο αυτό θα συμπληρωθεί από έναν πυκνωτή συνδεδεμένο εγκάρσια στον ζυγό 8, προσφέροντας άεργο ισχύ ίση με $Q_C = 581,11$ kVAr, οπότε ο πυκνωτής θα είναι των προδιαγραφών που παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.9 και 4.10, στη βάση ισχύος του κινητήρα και του συστήματος, αντίστοιχα:

Πίνακας 5.11: Διαστάσεις Πυκνωτή Αντιστάθμισης σε ανά μονάδα στην βάση ισχύος του Κινητήρα και του Συστήματος

s	Q_K (kVAr)	Q_i (kVAr)	Q_C (kVAr)	B_C	
				pu (S_K)	pu (S_N)
2,12%	751,51	170,4	403,011	0,5101	$6,099 \cdot 10^{-3}$

Μετά την σύνδεση του κινητήρα στο δίκτυο διανομής, παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του ανηγμένα στη νέα βάση ισχύος (100MVA) στους Πίνακες 5.12 και 5.13:

Πίνακας 5.12: Αντιστάσεις και Αντιδράσεις εμπορικού κινητήρα ανηγμένες στη βάση ισχύος του συστήματος $S_B=100\text{MVA}$

R_S	X_S	X_m	X_r	R_r	P_g
pu	pu	pu	pu	pu	pu
0,0822	18,8989	246,5078	18,8989	1,6434	0,850949

Πίνακας 5.13: Τάσεις κινητήρα

V_2	V_1	V_{1a}
pu	pu	pu
$0,8731\angle-17,2976^\circ$	$0,96745\angle-3.6382^\circ$	$0,89856\angle-3,6204^\circ$

Η αντίσταση R_r/s ισούται με $9,9562 \Omega$ άρα σύμφωνα με τη σχέση (4.11) η ισχύς διακένου είναι ίση με:

$$P_g = 850944\text{W}.$$

Θεωρώντας ξανά τους ζυγούς 14 και 15 ως ζυγούς PQ, ο 14 με μηδενικό φορτίο και ο 15 με φορτίο την ισχύ στην έξοδο του κινητήρα, δηλαδή το P_g , προσομοιώνεται η συμπεριφορά του συστήματος για φορτία 100% ως αγωγιμότητες και προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 5.14 Επαλήθευση Τάσεων Ζυγού 8 με χρήση επαγγελματικού κινητήρα

Σενάρια	Μέτρο Τάσης Ζυγού 8 (αμ)
Φορτία 100% ως αγωγιμότητες με κινητήρα	0,96713
Αρχική επίλυση ροής φορτίου (φορτία σταθ. ισχύος)	0,96745

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται μια μικρή απόκλιση στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο μεταξύ της αρχικής ροής φορτίου και της περίπτωσης που χρησιμοποιήθηκε επαγγελματικός κινητήρας μαζί με φορτία σταθερής αγωγιμότητας. Ωστόσο αυτό οφείλεται στις στρογγυλοποιήσεις των τιμών κατά την επίλυση του προβλήματος.

5.3.3 Σύστημα με δύο Κινητήρες επαγγελματικών και οικιακών φορτίων στους ζυγούς 5 και 8 αντίστοιχα

Στην συγκεκριμένη συνδεσμολογία, συνδέθηκε ένας κινητήρας εμπορικών φορτίων στον ζυγό 5, και ένας κινητήρας οικιακών φορτίων στον ζυγό 8, με έκαστο να απορροφά από το δίκτυο ενεργό ισχύ ίση με το φορτίο που αντικατέστησε. Παρόλο που οι τάση που εφαρμόζεται στην είσοδο του κινητήρα εμπορικών φορτίων όταν συνδεθεί στον ζυγό 5 είναι διαφορετική από την τάση του ζυγού 8 που εξετάστηκε στην υποενότητα 2.3, λόγω της θεώρησης ότι το μοντέλο του κινητήρα είναι σταθερής ροπής, η ισχύς στον άξονά του είναι ανεξάρτητη της τάσης, όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$P_g = \omega_s \times T_m \quad (5.12)$$

όπου ω_s η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής και T_m η μηχανική ροπή του κινητήρα.
Αρα χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα για τα στοιχεία του δικτύου από τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, προσομοιώνεται πάλι η συμπεριφορά του συστήματος και προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 5.15 Σύγκριση Τάσεων Ζυγών 5 και 8

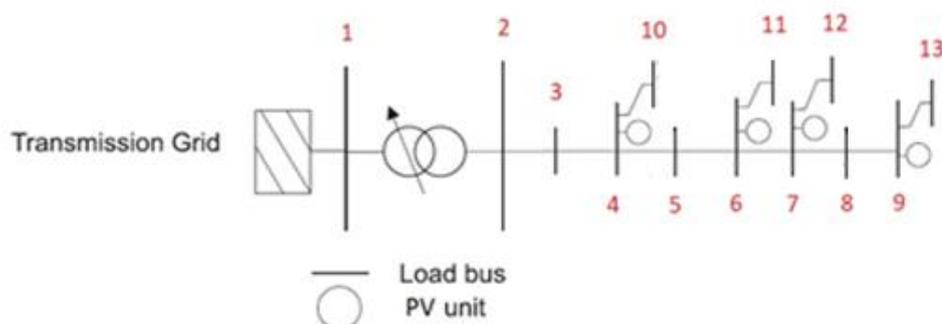
Σενάρια	Μέτρο Τάσης Ζυγού 8 (αμ)	Μέτρο Τάσης Ζυγού 5 (αμ)
Αρχική επίλυση ροής φορτίου (φορτία σταθ. ισχύος)	0,96745	0,97655
Φορτία 100% ως αγωγιμότητες με 2 κινητήρες στους ζυγούς 5 και 8	0,96717	0,97628

6. Χρονική Προσομοίωση

6.1 Προσδιορισμός Ορίων Τάσεως αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Προτού παρουσιαστεί η χρονική προσομοίωση της γραμμής διανομής, για διαφορετικές περιπτώσεις φορτίου, είναι επιθυμητή η εύρεση των οριακών τιμών τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Αυτές οι τάσεις ουσιαστικά αποτελούν τις ακραίες τιμές τις οποίες μπορεί να λάβει η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ώστε, κανένας από τους ζυγούς να μην ξεπεράσει τα άνω και κάτω όρια τάσης που έχουν θεωρηθεί, 1,05 αμ και 0,95 αμ, αντίστοιχα. Οι μέγιστες και ελάχιστες τάσεις αναφοράς (V_{max}^{ref} και V_{min}^{ref}) υπολογίστηκαν με διαδοχικές μεταβολές της λήψης του ΣΑΤΥΦ ξεκινώντας από την αρχική τιμή $t = 0,99$ μέχρι τη στιγμή που κάποιος ζυγός βγει εκτός των προαναφερθέντων ορίων. Η γνώση των τιμών αυτών δίνει την δυνατότητα στη γραμμή διανομής να συνεισφέρει ενεργό ή άεργο υποστήριξη στο δίκτυο μεταφοράς, διατηρώντας ταυτόχρονα τις τάσεις της μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι περιπτώσεις που θα προσομοιωθούν παρουσιάζονται παρακάτω.

Για διευκόλυνση του αναγνώστη επαναλαμβάνεται το σχήμα της γραμμής διανομής στο Σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1 Δίκτυο Διανομής

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται για την εύρεση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ V_{ref} διαχωρίζονται ανάλογα με το αν έχουν συνδεθεί ένας ή δύο κινητήρες, την παραγωγή ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή και από το μέγεθος των φορτίων. Πιο αναλυτικά:

- a. Δίκτυο με έναν οικιακό (residential) κινητήρα
 - I) Με μηδενική παραγωγή από ΑΠΕ και μέγιστα φορτία
 - II) Με μέγιστη (διπλάσια του ονομαστικού) παραγωγή από ΑΠΕ και ελάχιστα (1/2 του ονομαστικού) φορτία
- b. Δίκτυο με έναν επαγγελματικό (commercial) κινητήρα
 - I) Με μηδενική παραγωγή από ΑΠΕ και μέγιστα φορτία
 - II) Με μέγιστη (διπλάσια του ονομαστικού) παραγωγή από ΑΠΕ και ελάχιστα (1/2 του ονομαστικού) φορτία
- c. Δίκτυο και με τα δύο είδη κινητήρων
 - I) Με μηδενική παραγωγή από ΑΠΕ και μέγιστα φορτία
 - II) Με μέγιστη (διπλάσια του ονομαστικού) παραγωγή από ΑΠΕ και ελάχιστα (1/2 του ονομαστικού) φορτία

Η νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ ορίζεται ως $2\Delta V$, και ίση με 0.02 αμ.

6.2 Ορισμός Τάσεων Αναφοράς για αποφυγή υπερτάσεων και υποτάσεων

Στην ενότητα αυτήν ερευνώνται τα ανώτερα και κατώτερα όρια της τάσεως αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η σταδιακή μεταβολή της λήψης του ΣΑΤΥΦ, μέχρι τη στιγμή όπου η τάση κάποιου ζυγού, πέρα από τους ζυγούς του μετασχηματιστή, βγει εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης ($\pm 0,05$ αμ) όπως ορίστηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. Όταν αναζητείται η μέγιστη τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, σε κάθε σενάριο, μειώνεται βηματικά η λήψη του ΣΑΤΥΦ, από την αρχική τιμή $t = 0,99$. Λόγω της πτώσης τάσης κατά μήκος της γραμμής η υπέρταση θα προκύψει στο κοντινότερο στον Μ/Σ ζυγό (ζυγό 3). Αντίθετα για να βρεθεί η ελάχιστη τάση αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, αυξάνεται η λήψη του μέχρι να βρεθεί η τάση του πιο απομακρυσμένου ζυγού εκτός της νεκρής ζώνης.

6.2.1 Μηδενική παραγωγή από τα Φ/Β και μέγιστα φορτία σταθερής ισχύος για επαγγελματικό (commercial) κινητήρα στον ζυγό 5.

Στην περίπτωση αυτή λόγω της μηδενικής παραγωγής ο πιο απομακρυσμένος ζυγός θα παρουσιάζει την μεγαλύτερη πτώση τάσης. Έτσι όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.1 όταν η λήψη του ΣΑΤΥΦ αρχίσει να μειώνεται, θα αυξάνεται η τάση στους ζυγούς, και περισσότερο σε όσους είναι εγγύτερα του μετασχηματιστή, θέτοντας πρώτο εκτός ορίων τον ζυγό 3, η τάση του οποίου θα ξεπεράσει το 1,05 αμ, όταν η λήψη του ΣΑΤΥΦ γίνει μικρότερη από $t = 0,94$. Αντίστοιχα όταν η λήψη αυξάνει, η τάση θα αρχίσει να μειώνεται και συγκεκριμένα αυτή του ζυγού 13 θα πέσει κάτω από 0,95 όταν $t > 1$. Στον Πίνακα 6.1 καταγράφονται οι οριακές τιμές της λήψης του ΣΑΤΥΦ πριν οι τάσεις βγουν εκτός ορίων. Θεωρώντας σε αυτές τις καταστάσεις, την τάση του

δευτερεύοντος ως το άνω όριο της νεκρής ζώνης όταν η λήψη του ΣΑΤΥΦ είναι 0,94 και αντίστοιχα το κάτω όριο της νεκρής ζώνης όταν η λήψη είναι 1, ορίζονται οι τάσης αναφοράς με το εύρος της νεκρής ζώνης να είναι $2\Delta V = 0.02$ αμ. Η ανάλυση αυτή παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1

Λόγος ΣΑΤΥΦ	Τάση δευτερεύοντος V_2 (αμ)	Οριακή τιμή τάσης ζυγού (αμ)	V_{ref} (αμ)
$t = 0,94$	1,04907	1,04264 (ζυγός 3)	1,03907
$t = 1,00$	0,98437	0,95543 (ζυγός 13)	0,99400

6.2.2 Μέγιστη παραγωγή ενεργού ισχύος 2MW από κάθε Φ/Β και ελάχιστα

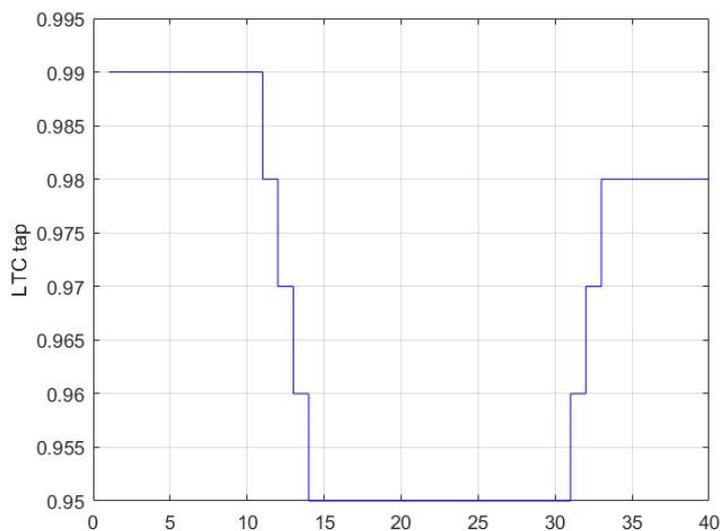
φορτία σταθερής ισχύος για επαγγελματικό (commercial) κινητήρα.

Αντιστρόφως, στην περίπτωση όπου τα ΦΒ παράγουν μέγιστη ενεργό ισχύ, ενώ τα φορτία είναι ελάχιστα (50% του ονομαστικού), οι ζυγοί εγγύτερα στις ΑΠΕ θα παρουσιάσουν την μεγαλύτερη αύξηση τάσης. Έτσι όταν η λήψη του ΣΑΤΥΦ αρχίσει να μειώνεται, θα αυξάνεται η τάση στους ζυγούς, θέτοντας πρώτο εκτός ορίων τον ζυγό 9 στον οποίον είναι συνδεδεμένα ΦΒ, η τάση του οποίου θα ξεπεράσει το 1,05 αμ, όταν η λήψη του ΣΑΤΥΦ λάβει τιμή $t > 0.97$. Αντίστοιχα όταν η λήψη σταδιακά αυξηθεί η τάση θα αρχίσει να μειώνεται και συγκεκριμένα αυτή του ζυγού 3 θα πέσει πρώτη κάτω από 0,95 όταν $t > 1,04$. Ωστόσο επειδή, σύμφωνα με την παρουσίαση των παραμέτρων του μετασχηματιστή στο Κεφάλαιο 2, το εύρος της λήψης του Μ/Σ είναι από 0,84 έως 1,04 η μέγιστη τιμή που θα λάβει η λήψη του ΣΑΤΥΦ θα είναι $t = 1,04$. Στον Πίνακα 6.2 καταγράφονται οι τιμές της λήψης και οι τάσης αναφοράς.

Πίνακας 6.2

Λόγος ΣΑΤΥΦ	Τάση δευτερεύοντος V_2 (αμ)	Οριακή τιμή τάσης ζυγού (αμ)	V_{ref} (αμ)
$t = 0,97$	1,03007	1,04912 (ζυγός 9)	1,02007
$t = 1,04$	0,96043	0,96479 (ζυγός 3)	0,97043

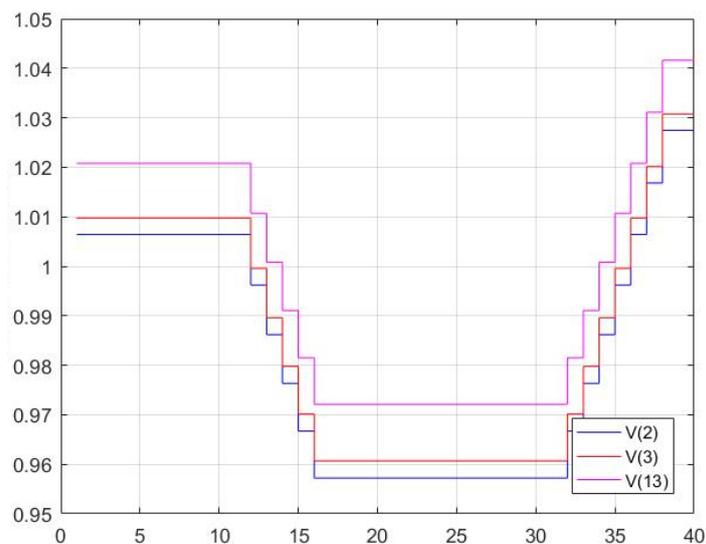
Ανάλογη συμπεριφορά με των δύο πρώτων παρατηρείται και σε όλες τις επόμενες διαφορετικές περιπτώσεις με και χωρίς την ύπαρξη κινητήρων επαγωγής, οι οποίες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6.3:



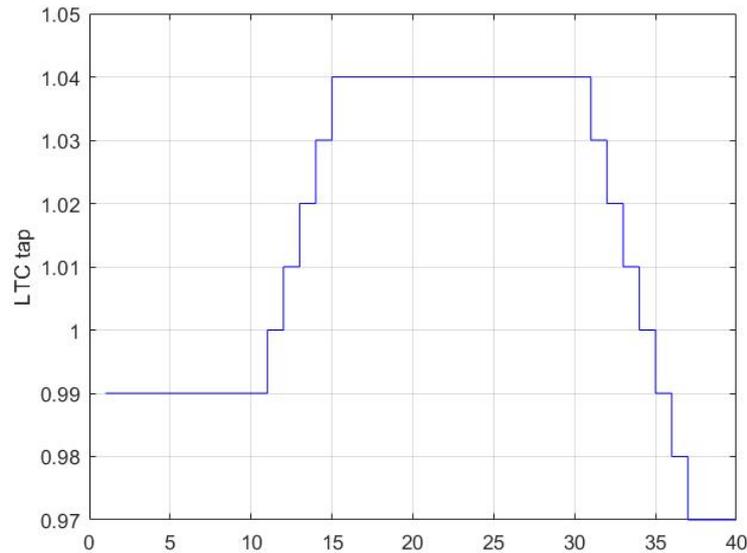
Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστική λόγου ΣΑΤΥΦ για Δίκτυο Διανομής με φορτία Σταθερής Ισχύος

6.3.3 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, ελάχιστα φορτία σταθερής ισχύος και μέγιστη παραγωγή από τα Φ/Β

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της μέγιστης παραγωγής και του ελάχιστου φορτίου λόγω της υψηλότερης τάσης που επικρατεί κατά μήκος της γραμμής διανομής, επιλέγεται να εφαρμοστεί αρχικά η μικρότερη τάση αναφοράς για να παρατηρηθούν περισσότερες μεταβολές της λήψης του ΣΑΤΥΦ. Μετά από 5 μεταβάσεις η τάση του ζυγού 2 εισέρχεται μέσα στη νέα νεκρή ζώνη (0,95043-0,97043). Δέκα δευτερόλεπτα μετά την αρχική ενεργοποίηση του ΣΑΤΥΦ δίνεται εντολή για αλλαγή της τάσεως αναφοράς στην μέγιστη οπότε συνολικά 20 Δt μετά, το ΣΑΤΥΦ αυξάνει τη λήψη του 7 φορές μέχρι η τάση του δευτερεύοντος βρεθεί εντός της νέας νεκρής ζώνης (1,02007–1,04007 αμ).



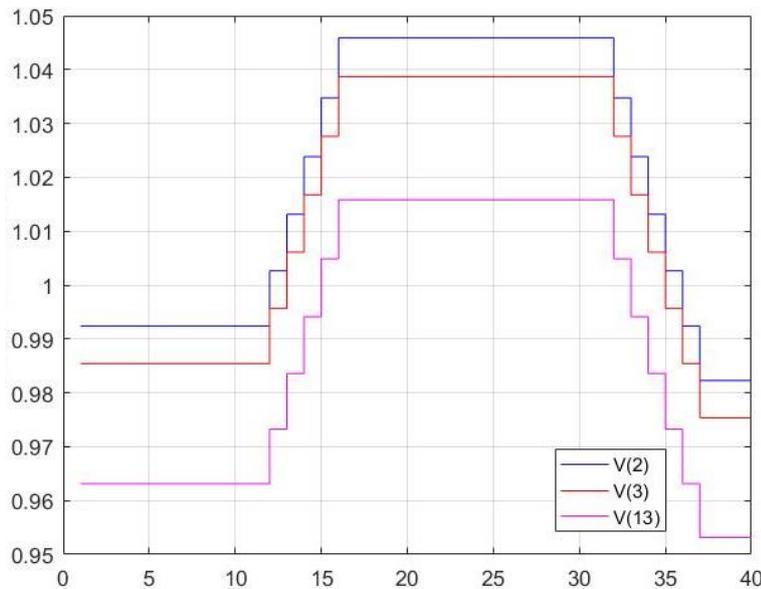
Σχήμα 6.4: Χαρακτηριστική Τάσεων-Χρόνου για Δίκτυο Διανομής με φορτία Σταθερής Ισχύος για μέγιστη παραγωγή



Σχήμα 6.5: Χαρακτηριστική λόγου ΣΑΤΥΦ για Δίκτυο Διανομής με φορτία Σταθερής Ισχύος για μέγιστη παραγωγή

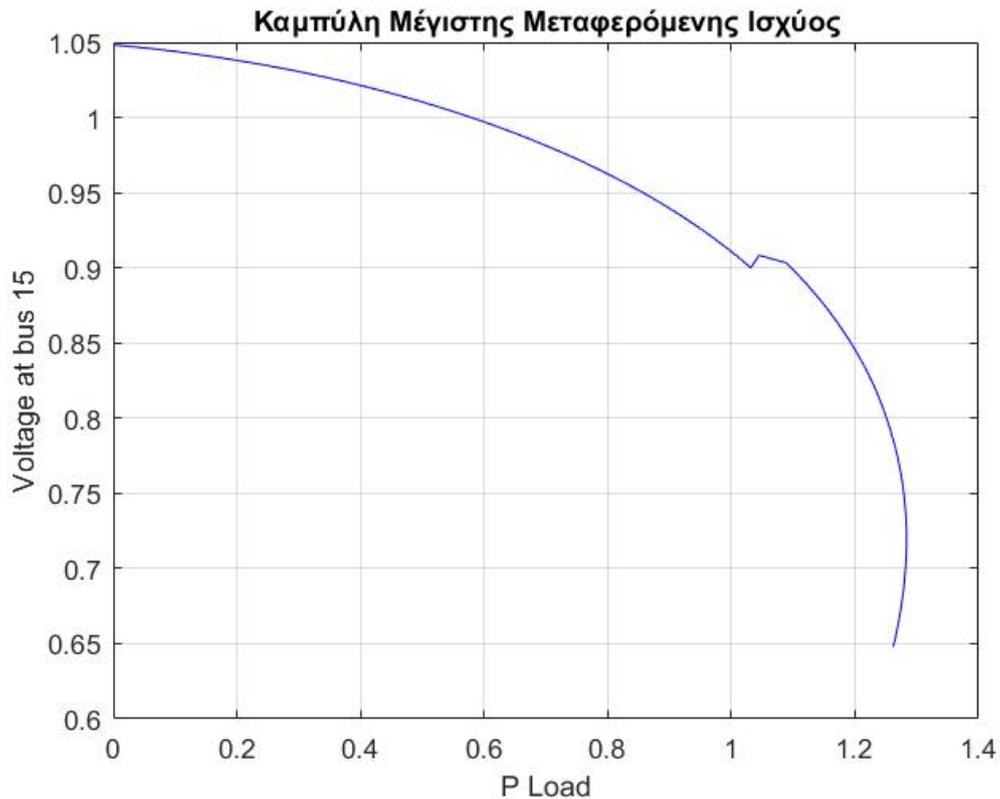
6.3.4 Δίκτυο με επαγγελματικό κινητήρα, μέγιστα φορτία σταθερής αγωγιμότητας και μηδενική παραγωγή Φ/B

Στην περίπτωση όπου τα φορτία είναι σταθερής αγωγιμότητας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αναμενόταν είναι όμοια με την περίπτωση των μοντέλων φορτίων σταθερής ισχύος, καθώς, όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 5 με την μοντελοποίηση των κινητήρων επαγωγής, οι δύο μέθοδοι μοντελοποίησης της ροής φορτίου είναι ισοδύναμοι. Άρα παρατηρείται η τάση των ζυγών να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα και παρατηρείται ο ίδιος αριθμός μεταβάσεων του ΣΑΤΥΦ.



Σχήμα 6.6: Χαρακτηριστική Τάσεων-Χρόνου για Δίκτυο Διανομής με φορτία Σταθερής Αγωγιμότητας για μηδενική παραγωγή

σε αυτήν την περίπτωση, όταν η τάση του 15^{ου} ζυγού γίνει μικρότερη από 0,9 αμ, συνδέεται ο εγκάρσιος πυκνωτής για αντιστάθμιση ισχύος. Η σύνδεση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 7.5 την στιγμή όπου η ενεργός ισχύς P είναι ίση με 0,8 αμ, με την τάση να αυξάνεται στιγμιαία και ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς. Συγκριτικά με το Σχήμα 7.2 της προηγούμενης υποενοτήτας, αυτή η αύξηση λόγω του πυκνωτή εμφανίζεται για μεγαλύτερη τιμή τάσης και ισχύος, το οποίο είναι και επιθυμητό. Η νέα τιμή της MMI₃ παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.5.



Σχήμα 7.6: Καμπύλη MMI με $E = 1,05$ μετά την προσθήκη πυκνωτή

Πίνακας 7.5 MMI με πυκνωτή και $E = 1,05$

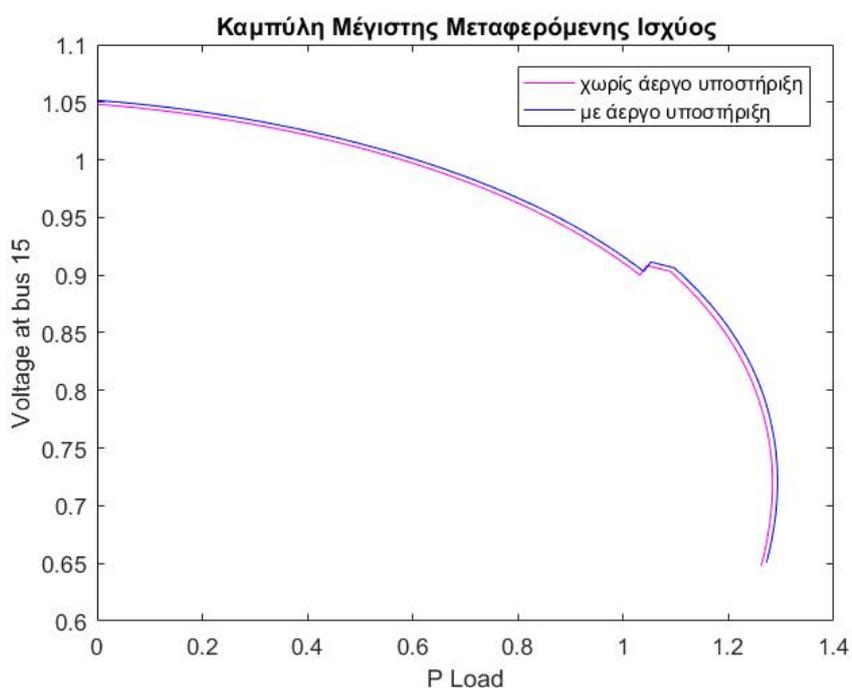
P_{\max} (MW)	$V_{\max P}$ (αμ)
128,34	0,7179

Η αύξηση που παρατηρείται σε σχέση με την αρχική τιμή της περίπτωσης Π.1 είναι $\Delta P_{\max 2} = 13,97$ MW και η ποσοστιαία μεταβολή είναι +12,21%.

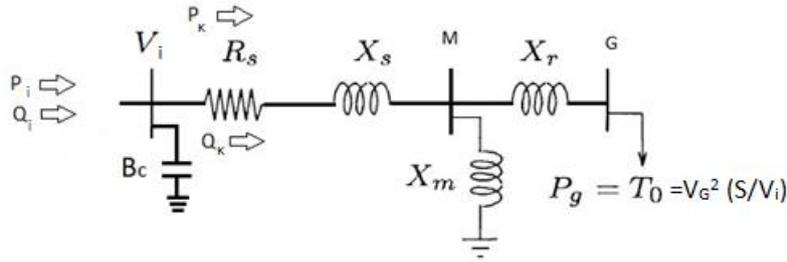
7.6 Ενίσχυση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος Συστήματος Μεταφοράς από Φ/Β (Π.3)

Όπως αναλύθηκε στην Ενότητα 2.3, η μέγιστη αέργου παραγωγή που είναι δυνατόν να προσφέρει το κάθε πάρκο φωτοβολταϊκών είναι, σύμφωνα και με τον Πίνακα 7.2, 0,458 MVA. Η παραγωγή ενεργού ισχύος είναι και στην περίπτωση αυτήν ίση με 1 MW. Για να προσομοιωθεί η μέγιστη δυνατή τιμή της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος, και σε αυτήν την περίπτωση διατηρούνται τα χαρακτηριστικά της Ενότητας 7.3, δηλαδή η σύνδεση του πυκνωτή αντιστάθμισης και η αρχική τιμή του ζυγού ταλάντωσης στο 1,05 αμ.

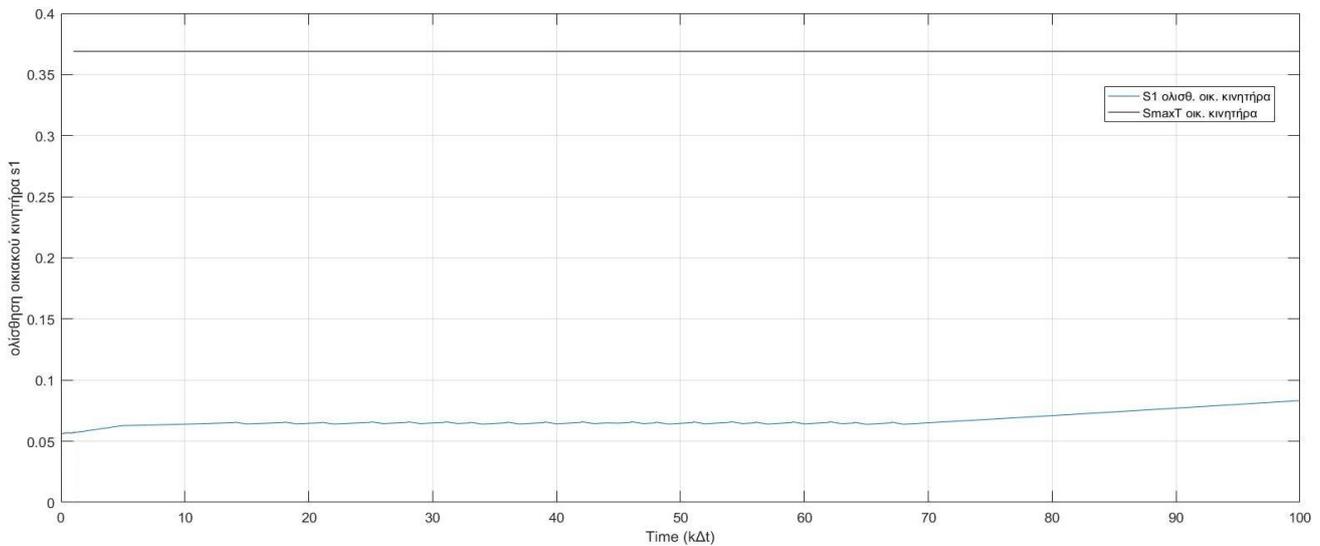
Στα Σχήματα 7.6 και 7.7 απεικονίζεται η σύγκριση των καμπυλών P-V, με και χωρίς αέργο υποστήριξη.



Σχήμα 7.6 Συγκριτικό σχήμα καμπύλης MMI με μέγιστη παραγωγή αέργου ισχύος

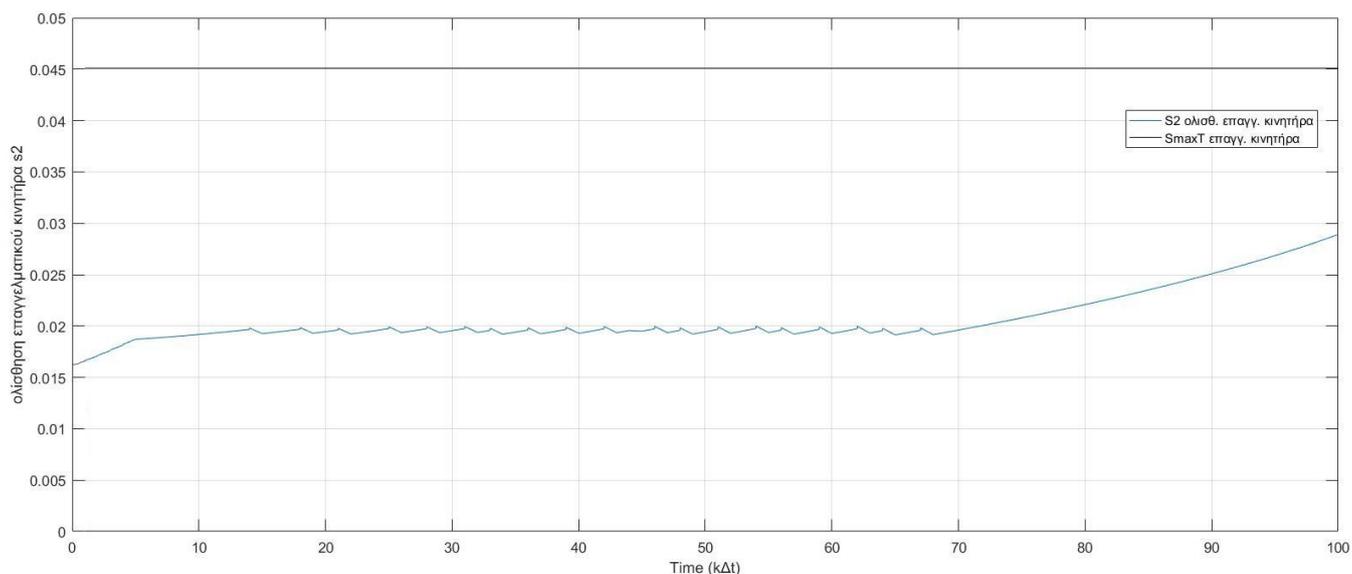


Σχήμα 7.10: Μονογραμμικό Διάγραμμα Κινητήρα



Σχήμα 7.11 Ολίσθηση οικιακού κινητήρα

Στο Σχήμα 7.11 με την μπλε γραμμή απεικονίζεται η ολίσθηση του οικιακού κινητήρα συναρτήσει του χρόνου, ενώ η μαύρη ευθεία αναπαριστά την μέγιστη ολίσθηση του κινητήρα, όπου αντικαθιστώντας στην εξίσωση (7.7) προκύπτει ίση με $s_{maxT1} = 0.3689$. Αρχικά, ο κυματισμός που παρατηρείται από τα $5\Delta t$ μέχρι τα $67\Delta t$, οφείλεται στην μεταβολή του λόγου του ΣΑΤΥΦ που αντιδρά στην πτώση της τάσης του ζυγού του συστήματος μεταφοράς. Στην συνέχεια, το ΣΑΤΥΦ φτάνει στο κατώτερο όριο της νεκρής ζώνης, συνεπώς οι λήψη του σταματά να μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα η ολίσθηση να αυξάνεται αλλά να παραμένει χαμηλότερα της μέγιστης μέχρι το πέρας της προσομοίωσης στις 100 χρονικές μονάδες (Δt).



Σχήμα 7.12 Ολίσθηση επαγγελματικού κινητήρα

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.12 με την μπλε γραμμή απεικονίζεται η ολίσθηση του επαγγελματικού (commercial) κινητήρα συναρτήσεως του χρόνου, ενώ η μαύρη ευθεία αναπαριστά την μέγιστη ολίσθηση (ολίσθηση μέγιστης ροπής), όπου προκύπτει ίση με $s_{maxT2} = 0.0451$. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ξανά η κυμάτωση λόγω της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ που περιγράφηκε παραπάνω, ενώ στην συνέχεια η ολίσθηση αυξάνεται, παραμένοντας ωστόσο εντός των επιτρεπτών ορίων μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

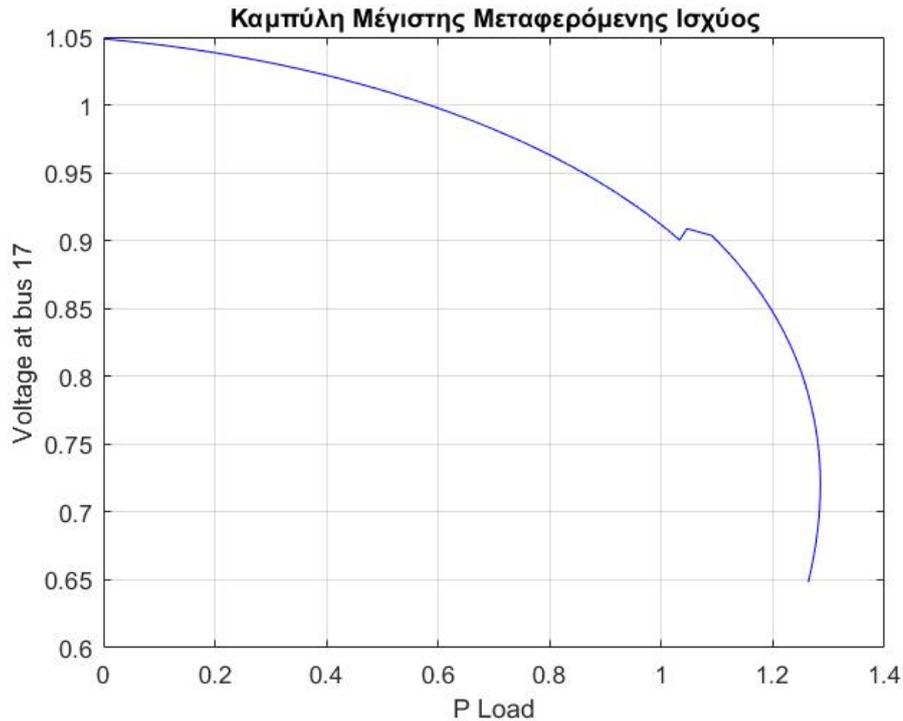
Οι ολισθήσεις μέγιστης ροπής των δύο κινητήρων παρουσιάζονται συγκεντρωμένες στον Πίνακα 7.8.

Πίνακας 7.8 Ολίσθηση μέγιστης ροπής s_{maxT} κινητήρων επαγωγής

Ολίσθηση οικιακού κινητήρα (s_{maxT1})	Ολίσθηση επαγγελματικού κινητήρα (s_{maxT2})
0,3689	0,0451

7.7.2.2 Δίκτυο διανομής με οικιακό κινητήρα στον ζυγό 9 (Κ.2α)

Σε αυτήν την περίπτωση ο κλάδος του επαγγελματικού κινητήρα με τους ζυγούς 17 και 18 του Σχήματος 7.8 παραλείπεται και το σύστημα προσομοιώνεται με 17 ζυγούς συνολικά. Με την ύπαρξη μόνο του οικιακού κινητήρα η προσομοίωση ολοκληρώνεται επιτυχώς στα 100s και όπως φαίνεται και από την καμπύλη μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο Σχήμα 7.13 το σημείο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι ευκρινές και δίνεται στον Πίνακα 7.9.



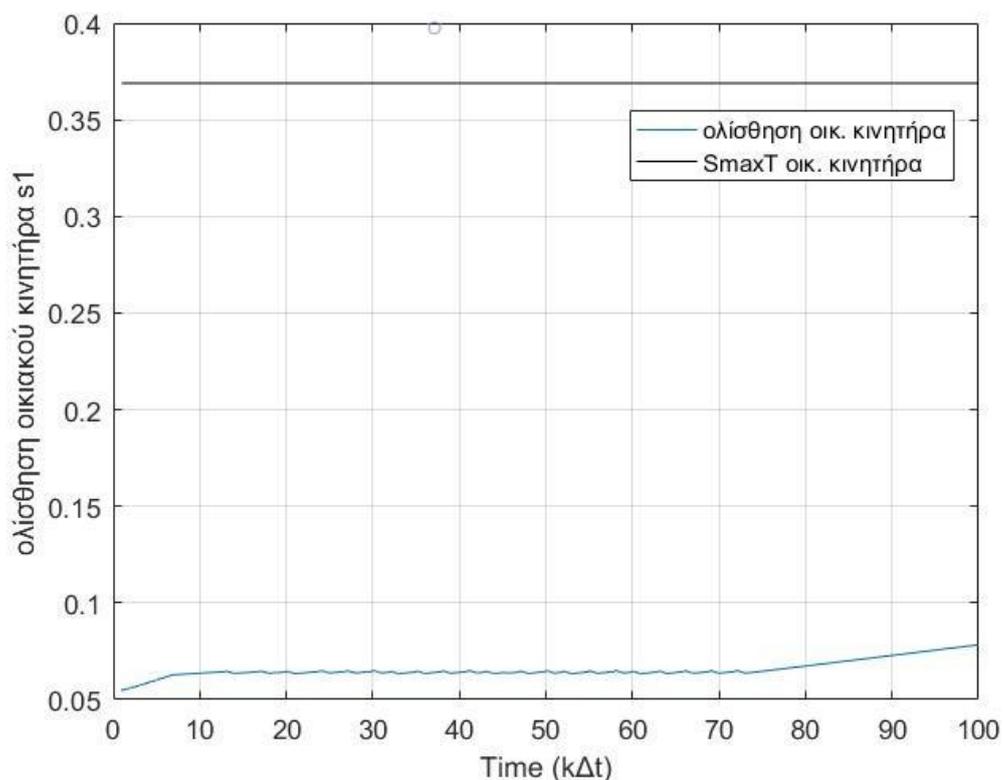
Σχήμα 7.13 Καμπύλη MMI με την προσθήκη οικιακού κινητήρα στο ζυγό 9

Πίνακας 7.9 Τιμή MMI με σύνδεση οικιακού κινητήρα

P_{\max} (MW)	V_{\max} (αμ)
128,28	0,7177

Συγκρίνοντας τους Πίνακες 7.5, 7.7 και 7.9 παρατηρείται ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται περισσότεροι κινητήρες, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι μικρότερη.

Υπολογίζεται πως η αντικατάσταση του φορτίου σταθερής αγωγιμότητας με έναν ισοδύναμο κινητήρα επαγωγής οικιακής χρήσης οδήγησε σε μικρή πτώση της MMI στα 128,28 MW από 128,34 MW χωρίς κινητήρες. Ακόμη μεγαλύτερη μείωση της MMI παρατηρείται όταν προστεθεί και δεύτερος κινητήρας στη γραμμή διανομής. Η νέα τιμή της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος θα ισούται με 128,07 MW, δηλαδή κατά 0,27 MW μικρότερη από την αρχική. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα πως η ύπαρξη κινητήρων επαγωγής συνδεδεμένων ως φορτία σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της MMI του συστήματος μεταφοράς.



Σχήμα 7.14 Ολίσθηση οικιακού κινητήρα (μοναδικού)

Η συμπεριφορά της ολίσθησης του οικιακού κινητήρα στην περίπτωση αυτή είναι όμοια με της προηγούμενης ενότητας όταν οικιακός και επαγγελματικός κινητήρας συνυπάρχουν στο δίκτυο διανομής.

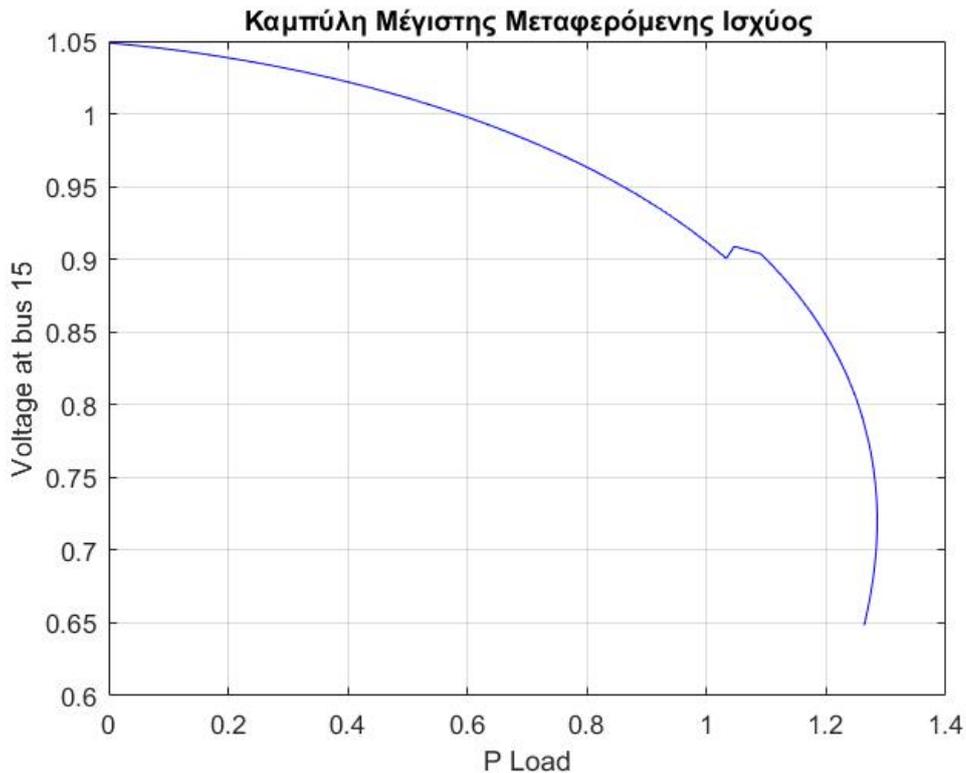
7.7.2.3 Δίκτυο διανομής με επαγγελματικό κινητήρα στον ζυγό 6 (Κ.3α)

Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιείται μόνο ο επαγγελματικός κινητήρας, συνεπώς το σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο διανομής αποτελούνται από 17 ζυγούς, με τον οικιακό κινητήρα να αντικαθίσταται από φορτίο σταθερής αγωγιμότητας ίσης κατανάλωσης.

Στον Πίνακα 7.10 παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος που μπορεί να μεταφέρει το δίκτυο μεταφοράς στα Σχήματα 7.15 και 7.16 η καμπύλη P-V και η ολίσθηση του κινητήρα, αντίστοιχα.

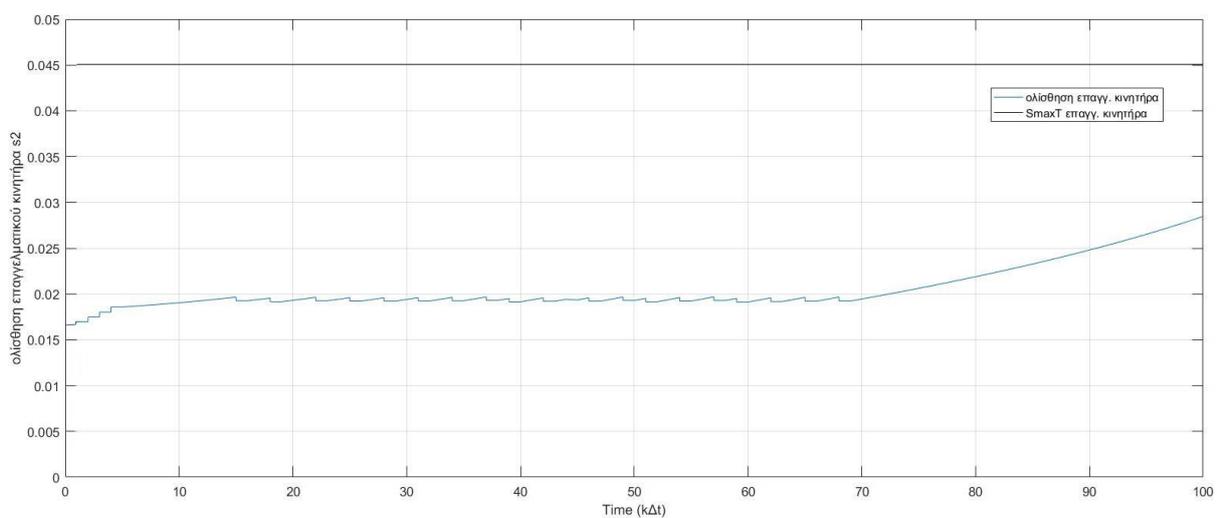
Πίνακας 7.10 Τιμή MMI με σύνδεση επαγγελματικού κινητήρα

P_{max} (MW)	V_{max} (αμ)
128,29	0,7177



Σχήμα 7.15 Καμπύλη MMI με την προσθήκη επαγγελματική (commercial) κινητήρα στο ζυγό 6

Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζεται η ολίσθηση s_2 του επαγγελματικού κινητήρα συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται πως στα 67Δt η λήψη του ΣΑΤΥΦ φτάνει στο όριο της νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα να αρχίσει να αυξάνεται η ολίσθηση, παραμένοντας πάντα μικρότερη από την ολίσθηση μέγιστης ροπής.

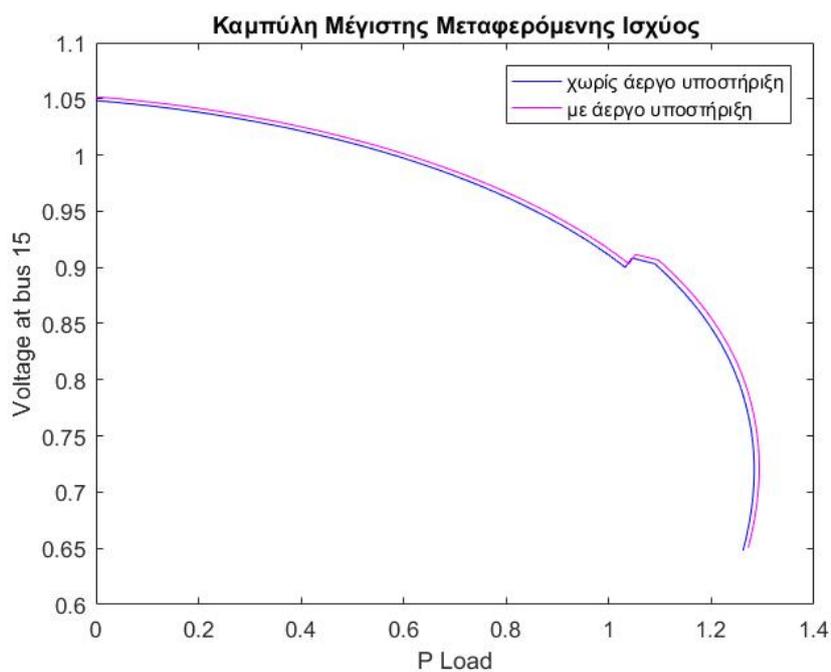


Σχήμα 7.16 Ολίσθηση επαγγελματικού κινητήρα (μοναδικού)

7.7.3 Δίκτυο Διανομής με Άεργο Υποστήριξη

Στις τελευταίες περιπτώσεις με κινητήρες που θα εξεταστούν (Κ.1β, Κ.2β, Κ.3β), λαμβάνεται υπόψιν η άεργη υποστήριξη από τα Φ/Β. Σε κάθε περίπτωση εκτός από την τιμή της ΜΜΙ και την αντίστοιχη τάση στην οποία αυτή εμφανίζεται, παρουσιάζεται και η αύξηση της ΜΜΙ που προσέφερε η άεργος υποστήριξη ΔP καθώς και ο λόγος της αύξησης ΔP προς την εγκατεστημένη φαινόμενη παραγωγή $\Delta P_{\max}/S_N^{PV}$.

7.7.3.1 Δίκτυο διανομής με δύο κινητήρες επαγωγής (Κ.1β)

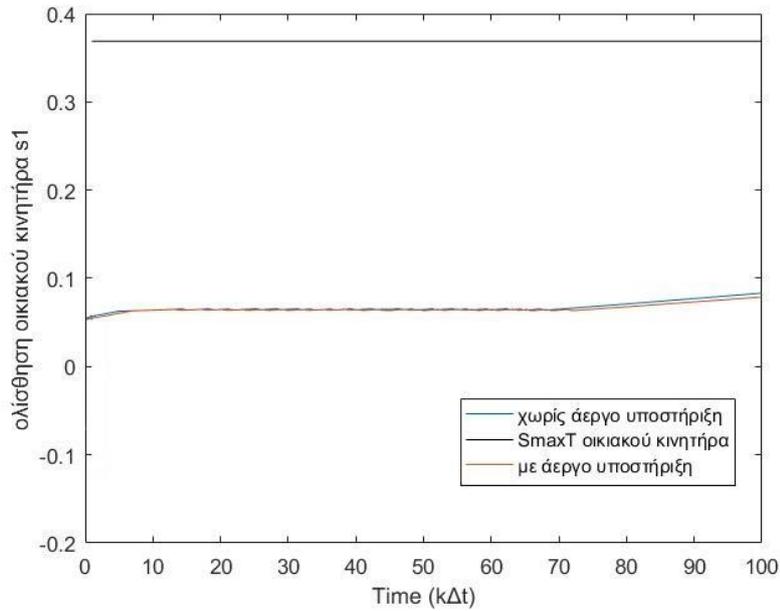


Σχήμα 7.17 Καμπύλη P-V για δίκτυο διανομής με δύο κινητήρες (συγκριτικό)

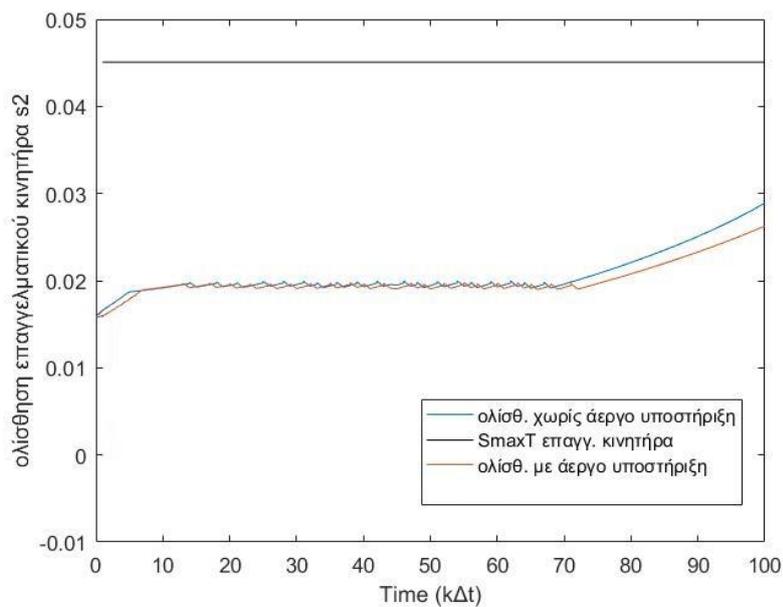
Πίνακας 7.11 ΜΜΙ με 2 κινητήρες και άεργο υποστήριξη

P_{\max} (MW)	V_{\max} (αμ)	ΔP_{\max} (MW)	$\Delta P_{\max}/S_N^{PV}$
129,04	0,7198	0,97	22,05%

Στην περίπτωση όπου τα φωτοβολταϊκά παράγουν μέγιστη άεργο ισχύ, παρατηρείται αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος ίση με 0,97 MW, τιμή που αποτελεί το 22,05% της μέγιστης εγκατεστημένης φαινόμενης ισχύος, ποσοστό όμοιο με την περίπτωση Π.3.



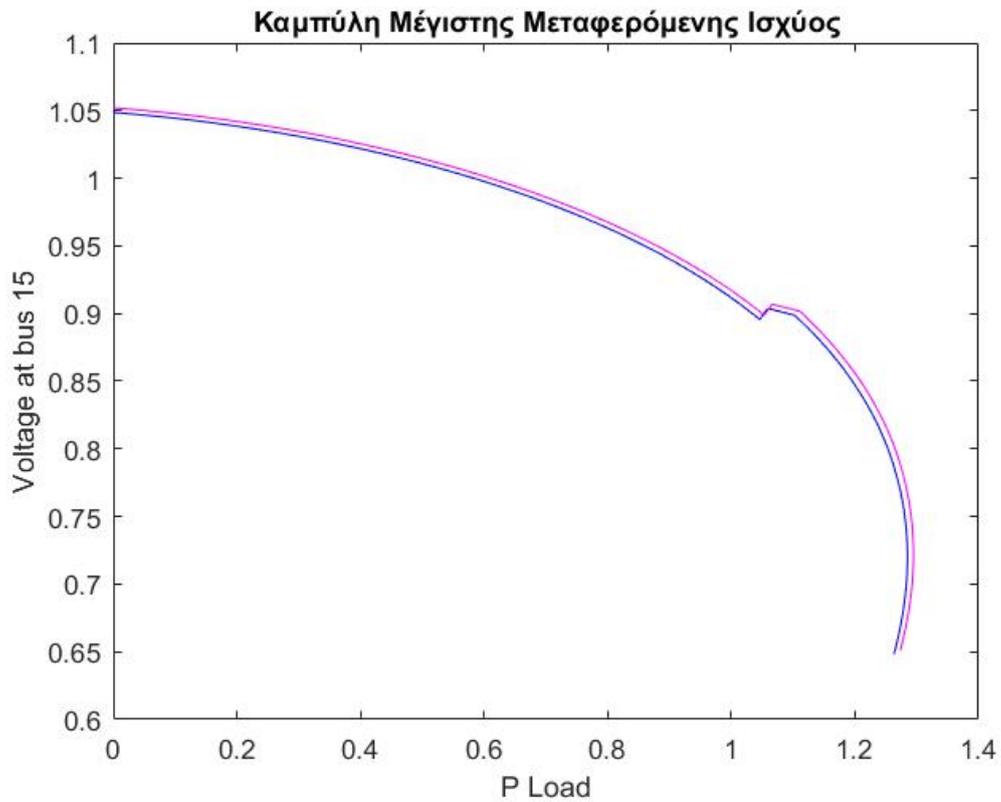
Σχήμα 7.18 Ολίσθηση οικιακού κινητήρα (συγκριτικό)



Σχήμα 7.19 Ολίσθηση επαγγελματικού κινητήρα (συγκριτικό)

Από τα Σχήματα 7.18 και 7.19 παρατηρείται ότι στη περίπτωση όπου παρέχεται άεργος υποστήριξη (Κ.1β) η ολίσθηση και των δύο κινητήρων δεν αυξάνεται τόσο, όσο στην περίπτωση (Κ.1α). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα Φ/Β προσφέροντας άεργο ισχύ, περιορίζουν την πτώση τάσης στους ζυγούς. Έτσι σε κάθε χρονική στιγμή, οι τάσεις των ζυγών κατά μήκος της γραμμής στην περίπτωση Κ.1β θα είναι υψηλότερες σε σχέση με τις τάσεις των ζυγών στην περίπτωση Κ.1α.

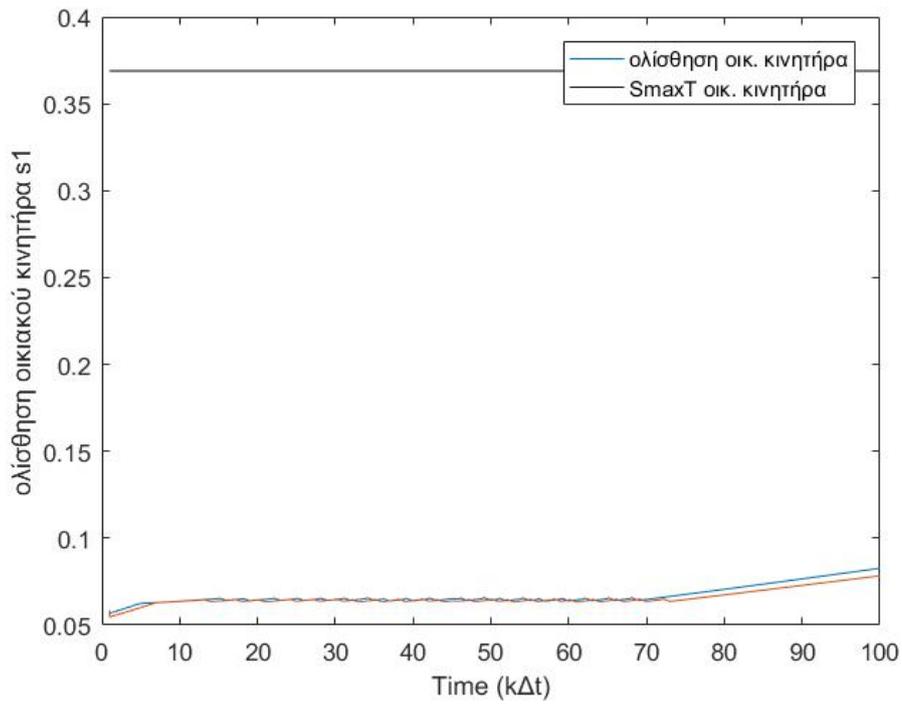
7.7.3.2 Δίκτυο διανομής με οικιακό κινητήρα στον ζυγό 9 (Κ.2β)



Σχήμα 7.20 Καμπύλη P-V για δίκτυο διανομής με οικιακό κινητήρα (συγκριτικό)

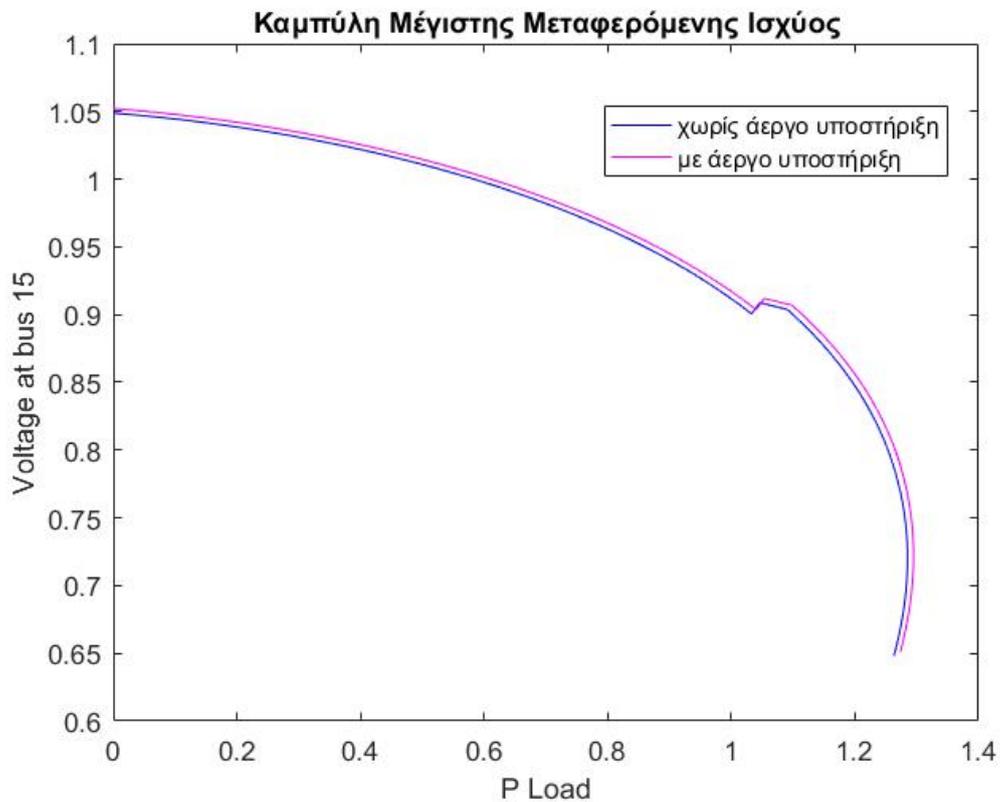
Πίνακας 7.12 MMI με οικιακό κινητήρα και άεργο υποστήριξη

P_{\max} (MW)	V_{\max} (αμ)	ΔP_{\max} (MW)	$\Delta P_{\max}/S_N^{PV}$
129,24	0,7204	0.96	21,82%



Σχήμα 7.21 Ολίσθηση οικιακού κινητήρα (συγκριτικό)

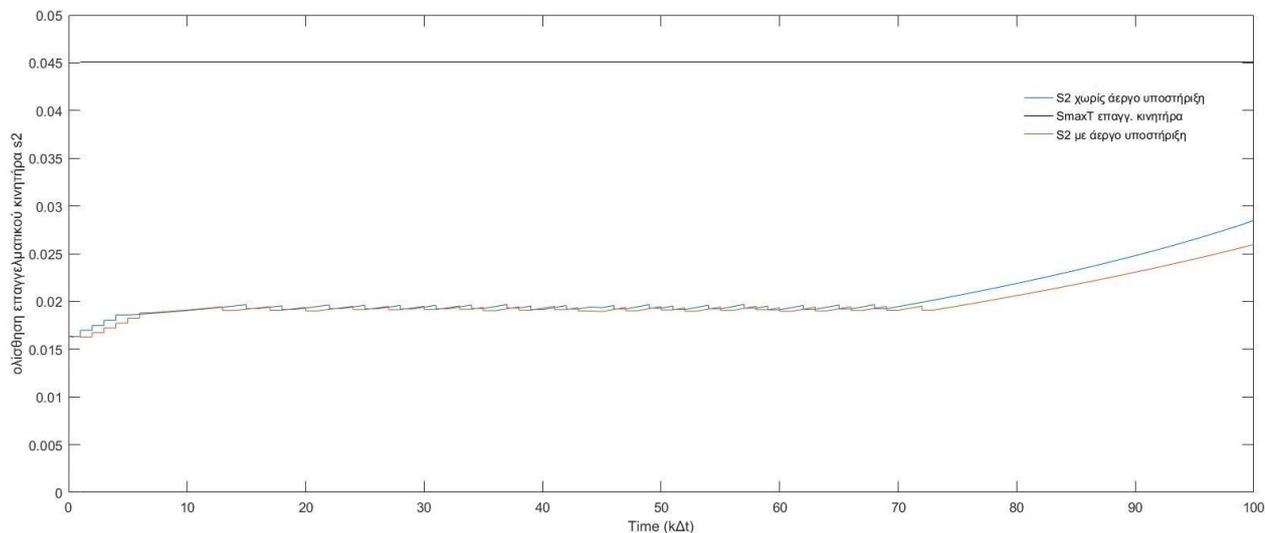
7.7.3.3 Δίκτυο διανομής με επαγγελματικό κινητήρα στον ζυγό 6 (Κ.3β)



Σχήμα 7.22 Καμπύλη P-V για δίκτυο διανομής με επαγγελματικό κινητήρα (συγκριτικό)

Πίνακας 7.13 MMI με επαγγελματικό κινητήρα και άεργο υποστήριξη

P_{max} (MW)	V_{max} (αμ)	ΔP_{max} (MW)	$\Delta P_{max}/S_N^{PV}$
129,25	0,7204	0,96	21,82%



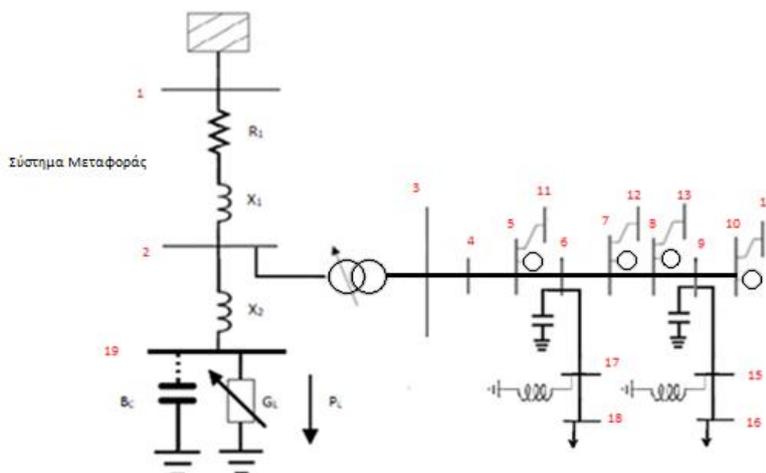
Σχήμα 7.23 Ολίσθηση εμπορικού κινητήρα (συγκριτικό)

Συγκρίνοντας τις τιμές της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε κάθε περίπτωση, παρουσία κινητήρων, με εκείνες της προηγούμενης ενότητας, παρατηρείται μείωση περίπου 0,05 MW της MMI όταν στο δίκτυο διανομής συνδέεται ένας κινητήρας, και ακόμη μεγαλύτερη μείωση, ίση με 0,26 MW με την ένταξη και δεύτερου κινητήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κινητήρες επαγωγής που χρησιμοποιήθηκαν, αναφορικά με την ενεργό παραγωγή τους, θεωρούνται φορτία σταθερής ισχύος, συνεπώς η κατανάλωσή τους θα είναι μεγαλύτερη από των αντίστοιχων φορτίων σταθερής αγωγιμότητας που αντικατέστησαν. Συνεπώς, όσο περισσότεροι κινητήρες προστίθενται στο δίκτυο, αυξάνονται τα φορτία σταθερής ισχύος, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος.

Αντιθέτως, παρατηρήθηκε ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται δύο κινητήρες επαγωγής. Λόγω της άεργης υποστήριξης από τα φωτοβολταϊκά, μειώνεται η άεργος κατανάλωση των κινητήρων και σαν αποτέλεσμα, η αύξηση του αριθμού των κινητήρων οδηγεί σε αύξηση της ενίσχυσης της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος.

7.8 Εξέταση περίπτωσης απώλειας σημείου ισορροπίας κινητήρα

Στην Ενότητα αυτή τροποποιείται ελαφρώς το σύστημα του Σχήματος 7.8, με σκοπό να επιτευχθεί απώλεια του σημείου ισορροπίας κάποιου κινητήρα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για διευκόλυνση το σχήμα της γραμμής διανομής και του συστήματος μεταφοράς επαναλαμβάνεται στο Σχήμα 7.24:



Σχήμα 7.24 Γραμμή διανομής και ακτινικό σύστημα μεταφοράς

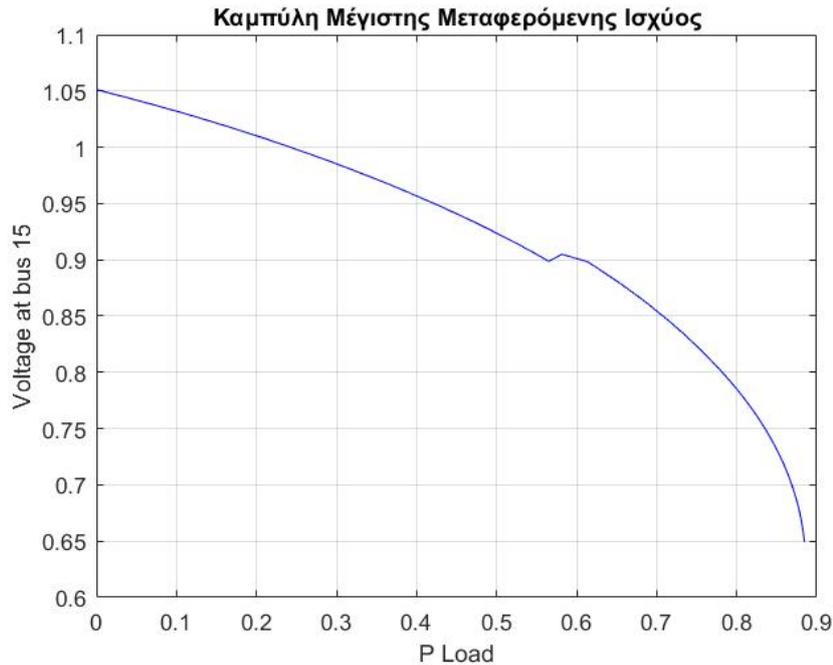
Η παρέμβαση που πραγματοποιείται είναι η αλλαγή της αντίστασης R_1 η οποία στην μέχρι τώρα ανάλυση ισούται με 0,04 αμ, με μια αντίσταση με τιμή 0,2 αμ. Συνεπώς τα στοιχεία του συστήματος μεταφοράς γίνονται όπως στον Πίνακα 7.13:

Πίνακας 7.14 Στοιχεία Συστήματος Μεταφοράς

R_1 (αμ)	X_1 (αμ)	X_2 (αμ)	B_C (αμ)
0,2	0,2	0,2	j0,05

Η περίπτωση που εξετάζεται περιέχει και τους δύο κινητήρες συνδεδεμένους στο δίκτυο διανομής.

Η καμπύλη της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που προέκυψε, απεικονίζεται στο Σχήμα 7.25:



Σχήμα 7.25 Καμπύλη MMI με την προσθήκη δυο κινητήρων

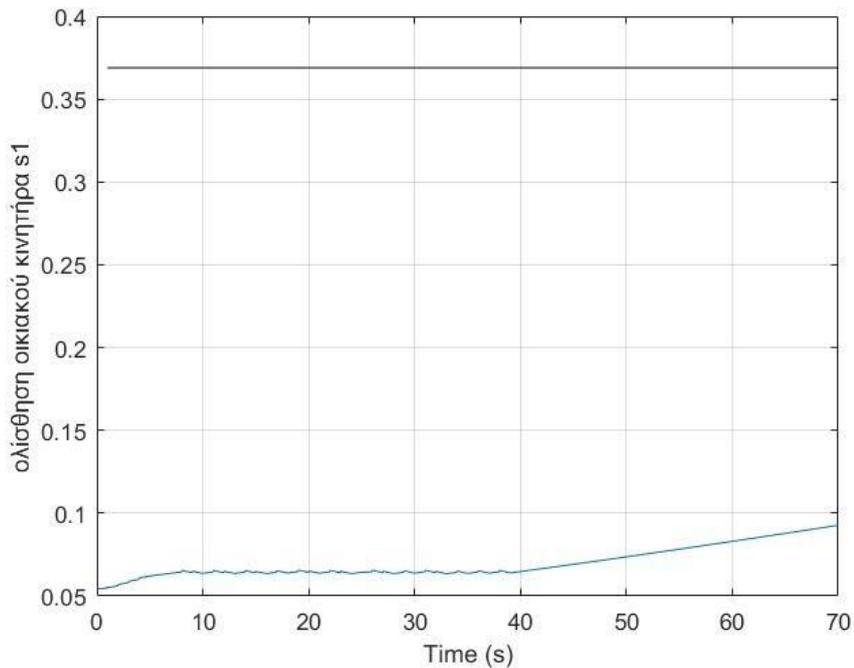
Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 7.25, η προσομοίωση σταματάει νωρίτερα από τα 100Δt που έχουν οριστεί, κοντά στο σημείο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως φαίνεται και σε όλα διαγράμματα των ολισθήσεων συναρτήσεως του χρόνου, όσο η τάση των ζυγών μειώνεται, η ολίσθηση των κινητήρων αυξάνεται. Στο σημείο που η προσομοίωση διακόπτεται, η ολίσθηση του επαγγελματικού κινητήρα ξεπερνάει την μέγιστη, και ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται.

Η μέγιστη ισχύς που είναι ικανό να μεταφέρει το σύστημα μεταφοράς μέχρι τον αποσυγχρονισμό του επαγγελματικού κινητήρα φαίνεται στον Πίνακα 7.15:

Πίνακας 7.15 Τιμή MMI με σύνδεση δύο κινητήρων

P_{\max} (MW)	V_{\max} (αμ)
88,451	0,6504

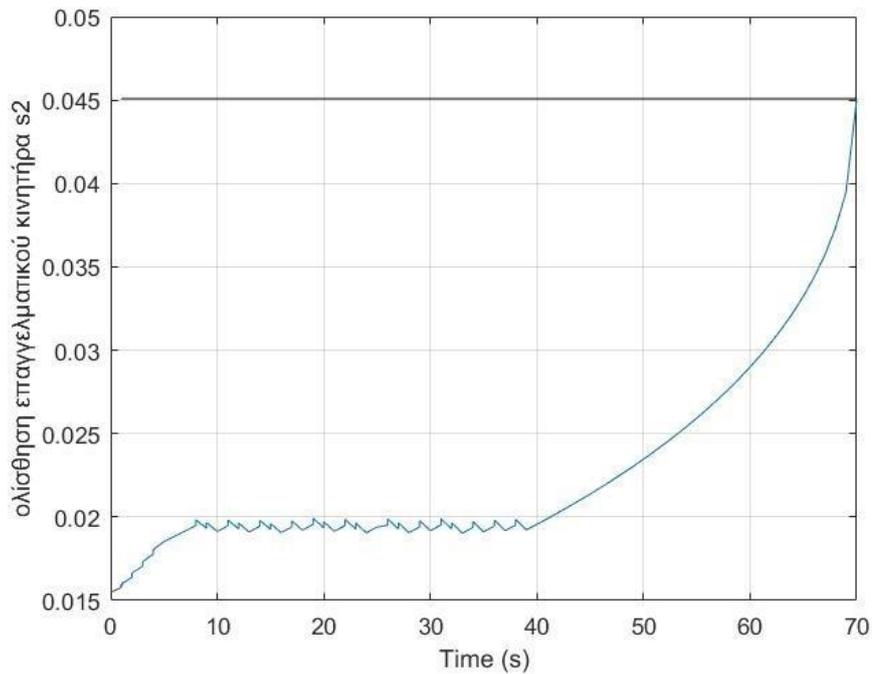
Στα Σχήματα 7.26 και 7.27 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της ολίσθησης του κάθε κινητήρα συναρτήσεως του χρόνου.



Σχήμα 7.26 Ολίσθηση οικιακού κινητήρα

Στο Σχήμα 7.26 με την μπλε γραμμή απεικονίζεται η ολίσθηση του οικιακού κινητήρα συναρτήσει του χρόνου, ενώ η μαύρη ευθεία αναπαριστά την μέγιστη ολίσθηση του κινητήρα. Για χρόνο από $8\Delta t$ έως $40\Delta t$ εμφανίζεται κυματισμός που οφείλεται στην μεταβολή της λήψης του ΣΑΤΥΦ που αντιδρά στην πτώση της τάσης των ζυγών της γραμμής διανομής. Στην συνέχεια η ολίσθηση αυξάνεται αλλά παραμένει χαμηλότερα της μέγιστης μέχρι την διακοπή της προσομοίωσης στα $70\Delta t$.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 7.27 που ακολουθεί με την μπλε γραμμή απεικονίζεται η ολίσθηση του επαγγελματικού (commercial) κινητήρα συναρτήσει του χρόνου, ενώ η μαύρη ευθεία αναπαριστά την μέγιστη ολίσθηση (ολίσθηση μέγιστης ροπής). Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται αρχικά μια κυμάτωση λόγω της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, ενώ στην συνέχεια η ολίσθηση αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό μέχρι τα $70\Delta t$, όπου θα φτάσει την τιμή της μέγιστης, θα προκαλέσει αποσυγχρονισμό του κινητήρα και διακοπή της προσομοίωσης.



Σχήμα 7.27 Ολίσθηση επαγγελματικού κινητήρα

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τελευταία περίπτωση, όπου ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται και η προσομοίωση διακόπτεται, δεν είναι εφικτό να συμβεί σε ένα πραγματικό σύστημα. Στην πραγματικότητα, ο αποσυγχρονισμός ενός κινητήρα συνδεδεμένου σε ένα δίκτυο διανομής είναι αδύνατον να προκαλέσει ουσιώδεις διαταραχές στο σύστημα μεταφοράς. Ωστόσο, επιστάται η προσοχή κατά την σύνδεση κινητήρων επαγωγής ως φορτία σε μια γραμμή διανομής που εκτελεί παράλληλα και άεργο υποστήριξη, καθώς υπό προϋποθέσεις η πτώση της τάσης των ζυγών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια του σημείου ισορροπίας των κινητήρων (stalling).

8. Συμπεράσματα και Προοπτικές

8.1 Σύνοψη και Βασικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η επίδραση που έχουν κινητήρες επαγωγής ως φορτία στην ενίσχυση της ευστάθειας τάσης που μπορεί να προσφέρει μια γραμμή διανομής. Επίσης εξετάστηκε η μέθοδος ρύθμισης της τάσης κατά μήκος της γραμμής μέσω της μεταβολής της λήψης του ΣΑΤΥΦ για διαφορετικά μοντέλα παράστασης φορτίων. Για την προσομοίωση του δικτύου κατασκευάστηκε αλγόριθμος ο οποίος επιλύει το πρόβλημα ροής φορτίου του δικτύου διανομής με τη μέθοδο Newton-Raphson με τη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.

Στην εργασία επίσης αναλύθηκε η επίδραση στις τάσεις της γραμμής διανομής λόγω της παραγωγής αέργου ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Από την ανάλυση βγήκε το συμπέρασμα πως στη συγκεκριμένη γραμμή διανομής που εξετάστηκε, η τάση στους ζυγούς δεν ξεπέρασε τα μέγιστα επιτρεπτά όρια σε καμία περίπτωση, συνεπώς είναι ασφαλές τα φωτοβολταϊκά να παράγουν μέγιστη ενεργό και άεργο ισχύ. Λόγω αυτού του συμπεράσματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα παράστασης των φωτοβολταϊκών. Στο πρώτο λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, παράγοντας είτε ισχύ 1 MW έκαστο, είτε τη διπλάσια (2 MW). Στο δεύτερο, τα Φ/Β παράγουν μέγιστη ενεργό και άεργο ισχύ, καθώς δεν υφίσταται κίνδυνος υπέρτασης.

Στην εργασία αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε η μέθοδος επίλυσης της ροής φορτίου μέσω της μεθόδου Newton-Raphson. Στη συνέχεια παρουσιάστηκε αναλυτικά κάθε κομμάτι του προγράμματος που αναπτύχθηκε μαζί με τον αντίστοιχο ψευδοκώδικα και εξηγήθηκε η λειτουργία της κάθε ρουτίνας, από την εισαγωγή των δεδομένων της αρχικοποίησης, την συνάρτηση υπολογισμού της μήτρας

πυκνωτής αντιστάθμισης παράλληλα με το φορτίο της μεταφοράς, ενώ σε επόμενη προσομοίωση η αρχική τάση του ζυγού ταλάντωσης τίθεται ίση με 1,05 αμ.

Όπως φάνηκε από την προσομοίωση, η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς ενισχύεται μέσω της προσφοράς άεργης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Παρόλο που η αύξηση της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος που επετεύχθη από την άεργο υποστήριξη των Φ/Β είναι μικρή (0,96MW), επισημαίνεται ότι ισούται με το 21,8% της μέγιστης εγκατεστημένης παραγωγής ισχύος, ένα αρκετά ικανοποιητικό ποσοστό. Συνεπώς ένας τρόπος ακόμα μεγαλύτερης αύξησης της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι η αυξημένη εγκατεστημένη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά και η συμμετοχή τους με έγχυση αέργου ισχύος όταν απαιτείται.

Στην τελευταία ενότητα, στο ήδη υπάρχον σύστημα, συνδέθηκαν δύο κινητήρες στην γραμμή διανομής, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο. Υπολογίστηκε η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς και η ολίσθηση του κάθε κινητήρα σε κάθε περίπτωση και υπολογίστηκε ξανά η αύξηση της MMI χάρη στην προσφορά αέργου από τα ΦΒ. Η αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προκύπτει ελαφρώς μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση χωρίς κινητήρες, ωστόσο παρουσία των κινητήρων η MMI είναι ελαφρώς μικρότερη.

Τέλος, το σύστημα μεταφοράς τροποποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε η αύξηση του φορτίου της μεταφοράς να οδηγήσει σε απώλεια του σημείου ισορροπίας κάποιου κινητήρα. Ωστόσο είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τελευταία περίπτωση, όπου ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται και η προσομοίωση διακόπτεται, δεν είναι εφικτό να συμβεί σε ένα πραγματικό σύστημα. Στην πραγματικότητα, ο αποσυγχρονισμός ενός κινητήρα συνδεδεμένου σε ένα δίκτυο διανομής είναι αδύνατον να προκαλέσει κατάρρευση του συστήματος μεταφοράς. Ωστόσο, εφίσταται η προσοχή κατά την σύνδεση κινητήρων επαγωγής ως φορτία σε μια γραμμή διανομής που εκτελεί παράλληλα και άεργο υποστήριξη, καθώς υπό προϋποθέσεις η πτώση της τάσης των ζυγών μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια του σημείου ισορροπίας των κινητήρων (stalling).

Τα συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως εξής

- Η γραμμή διανομής μπορεί να προσφέρει υποστήριξη και να αυξήσει τη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ. Η αύξηση εξαρτάται από την εγκατεστημένη ισχύ της διεσπαρμένης παραγωγής
- Η παροχή άεργης υποστήριξης στη συγκεκριμένη γραμμή δεν προκαλεί πρόβλημα υπερτάσεων λόγω της σχετικά μικρής ονομαστικής ισχύος των ΦΒ. Αυτό όμως πρέπει να ελέγχεται σε κάθε ειδική περίπτωση, ιδίως αν αυξάνει η εγκατεστημένη ισχύς ως προς την ισχύ των φορτίων.
- Οι κινητήρες επαγωγής στη γραμμή διανομής μειώνουν ελαφρώς τη MMI στο απομακρυσμένο φορτίο, αλλά η προσφορά άεργης υποστήριξης από τις διεσπαρμένες πηγές εξακολουθεί να αυξάνει τη MMI.
- Όταν περιλαμβάνονται κινητήρες επαγωγής στη δυναμική ανάλυση υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να εμφανιστεί αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης των κινητήρων λόγω απώλειας του σημείου ισορροπίας.

8.2 Προοπτικές Περαιτέρω Έρευνας

Για το συγκεκριμένο δίκτυο που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εξάχθηκαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επειδή η ανάλυση περιορίστηκε σε μια συγκεκριμένη γραμμή διανομής και ένα ακτινικό δίκτυο μεταφοράς για να γενικευτούν τα συμπεράσματα απαιτούνται παραπέρα μελέτες για διαφορετικά δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς.

Χρήσιμο θα ήταν επίσης να εξεταστεί η ρύθμιση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς του τελευταίου κεφαλαίου, με την μεταβολή της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ. Πιο συγκεκριμένα, αναμένεται η μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ να οδηγήσει σε αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος λόγω μείωσης της καταναλισκόμενης ισχύος από τα φορτία και της αύξησης της τάσεως μεταφοράς.

Ακόμη, η μέθοδος που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε δίκτυα μεταφοράς μεγαλύτερα και πιο πολύπλοκα από το εξεταζόμενο, όπως για παράδειγμα το σύνολο του συστήματος διανομής που παρουσιάζεται στην δημοσίευση [14] και όχι μόνο ενός feeder του. Επίσης θα μπορούσαν να προβλεφθούν περαιτέρω αυτοματισμοί διαχείρισης των τάσεων των ζυγών της γραμμής, όπως η αυτόματη ζεύξη-απόζευξη πυκνωτών και κινητήρων, αυτόματη αλλαγή της τάσεως αναφοράς των ΣΑΤΥΦ και η μεταβλητή προσφορά αέργου ισχύος από ΑΠΕ, σε περιπτώσεις δικτύων που αυτό κρίνεται αναγκαίο. Τέλος θα μπορούσε να γίνει υπολογισμός της Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με διαφορετικά φορτίων της γραμμής διανομής, πέρα από σταθερής αγωγιμότητας.

Συνοπτικά οι προοπτικές παραπέρα έρευνας με χρήση της μεθόδου που αναπτύχθηκε είναι:

- Εξέταση και ανάλυση νέων ρεαλιστικών ή και πραγματικών δικτύων διανομής
- Ένταξη σε μεγαλύτερα συστήματα μεταφοράς
- Παραπέρα ανάπτυξη της μεθόδου για να περιλαμβάνει αυτόματη ζεύξη/απόζευξη πυκνωτών, αλλαγή τάσης αναφοράς ΣΑΤΥΦ

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας', Αθήνα 2010.
- [2] Β. Κ. Παπαδιά, 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας', Τόμοι Ι,ΙΙ Αθήνα 1985.
- [3] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιά, 'Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως', Αθήνα 1991.
- [4] Κ. Θ. Δέρβος, 'Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Από τη θεωρία στην πράξη', Ε.Μ.Π. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ, Αθήνα, Ιανουάριος 2013.
- [5] Σ. Ν. Μανιάς, 'Ηλεκτρονικά Ισχύος' Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2014.
- [6] T. van Cutsem, Κ. Βουρνάς, 'Voltage Stability of Electric Power Systems', Springer Science & Business Media, 1998.
- [7]. Θ. Σουξές, 'Αξιοποίηση μετατροπέων Αιολικών Πάρκων για τη βελτίωση της Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ', Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 2019.
- [8] Frederic Olivier, Petros Aristidou, Damien Ernst, Thierry Van Cutsem, 'Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages due to Photovoltaic Units'.
- [9] Κ. Βουρνάς, 'Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα', Αθήνα 1999.
- [10] Σ. Ν. Μανιάς, 'Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά', Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2013.
- [11] Θ. Σουξές, 'Άεργος υποστήριξη συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές', Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.
- [12] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, G. W. Chang, 'Power System Analysis', McGraw-Hill Education, 2016.
- [13] P. Kundur, 'Power System Stability and Control', 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [14] P. Aristidou, G. Valverde, T. Van Cutsem, 'Contribution of Distribution Network Control to Voltage Stability: A Case Study', IEEE Transactions on smart grids, vol. 8, No. 1, Ιανουάριος 2017
- [15] D. Ruiz-Vega, T. I. A. Olivares, D. O. Salinas, 'An Approach to the Initialization of Dynamic Induction Motor Models', IEEE Transactions on power systems, vol. 17, No. 3, Αύγουστος 2002.
- [16] Β. Κ. Παπαδιά, 'Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας', Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1985.

-
- [17] E.-E. E. Portal, 'Primary Distribution Voltage Levels', *EEP - Electrical Engineering Portal*, August 2012
- [18] M. Shafiei, G. Nourbakhsh, G. Ledwich, T. Fernando, H. Iu, και A. Arefi, 'Dynamic load modelling using measured data in distribution networks', στο *2017 3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*,
- [19] Π. Γεωργιάκης, 'Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας', Αθήνα 2015
- [20] Θ. Σουξές, 'Άεργος υποστήριξη συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές', Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2016.
- [21] Γ. Πριονιστής, 'Αποκεντρωμένος Έλεγχος Δικτύου Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή για Βελτίωση Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ', Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2018