



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

---

ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ  
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

---

Διπλωματική Εργασία

ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΟΥΡΝΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

---

**ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ  
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**

---

Διπλωματική Εργασία

**ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**

Επιβλέπων: ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΒΟΥΡΝΑΣ, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2014.

.....  
Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής

.....  
Γ. Κορρές  
Καθηγητής

.....  
Π. Γεωργιλάκης  
Επ. Καθηγητής

Αθήνα, 2014



.....

**Παναγιώτης Μαρινάκης**

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

Copyright © Παναγιώτης Μαρινάκης, 2014

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.

## **Ευχαριστίες**

*Ξεκινώντας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κ. Βουρνά, η συνεχής καθοδήγηση του οποίου υπήρξε κομβικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τον ευχαριστώ που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα επιμορφωτικό και ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για το ότι ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να βοηθήσει και να μοιραστεί τις γνώσεις του, αφιερώνοντας για το λόγο αυτό οκ ολίγο χρόνο. Ιδιαίτερης σημασίας για μένα είναι το γεγονός ότι στα πλαίσια της συνεργασίας αυτής, πέραν ενός άξιου καθηγητή γνώρισα έναν αξιόλογο άνθρωπο, στον οποίον από την πλευρά μου εύχομαι τα καλύτερα.*

*Σε καμία περίπτωση δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους μου από τη σχολή που ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια, οι οποίοι οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκε μου δίνανε τη βοήθειά τους, και τους οποίους αναφέρω αλφαβητικά: Γιάννης Αθανάσογλου, Ηλίας Αλευράς, Νίκος Ανδρουλάκης, Αντώνης Αναστασόπουλος, Φώτης Ηλιόπουλος, Φαίη Καζάκου, Σάκης Καραγιάννης, Χάρης Κοντούλης, Μαρία Παπαμιχάλη, Γιάννης Παρόλας, Νίκος Σταματόπουλος, Ελένη Τσακίρακη, Αιμίλιος Τσουβελεκάκης και Γιώργος Φουστούκος. Ιδιαίτερα ευχαριστώ για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια την κοπέλα μου Μαρία Μούσιου καθώς και τον φίλο μου Νίκο Μπεμπεδέλη ο οποίος ήταν πρόθυμος να βοηθήσει σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυπτε.*

*Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, χωρίς την υποστήριξη της οποίας δεν θα μπορούσα να βρίσκομαι σε αυτήν τη θέση. Τους ευχαριστώ τόσο για τη συμπαράστασή τους όσο και για τη δυνατότητα που μου έδωσαν να βρεθώ εκεί όπου επιθυμούσα.*

## Περίληψη

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βασιστούν κυρίως, στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή καινούργιων γραμμών μεταφοράς είναι σε μεγάλο βαθμό απαγορευτική αφού υπόκειται στην έγκριση ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών περιορισμών αυξάνοντας το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης, που είναι ούτως ή άλλως μεγάλο. Μια αποδοτικότερη αξιοποίηση των συστημάτων μεταφοράς μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της αντικατάστασης ορισμένων συμβατικών μετασχηματιστών στο δίκτυο με μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος, οι οποίοι δίνουν δυνατότητες στο δίκτυο που δεν υπήρχαν πριν, όπως είναι ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας/γωνίας.

Με βάση την παραπάνω σκέψη στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας ενός δικτύου διανομής τροφοδοτούμενο από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο, στην περίπτωση υπερφόρτωσης του δικτύου, που μπορεί να προκληθεί από την υψηλή ζήτηση φορτίου, τα ηλεκτρονικά ισχύος δεν έχουν τη δυνατότητα να αντέξουν αυτή την υπερφόρτωση. Οι ημιαγωγοί ισχύος μπορεί να υπερφορτωθούν μόνο για λίγα μικροδευτερόλεπτα, σε αντίθεση με τα συνήθη εξαρτήματα του δικτύου που έχουν ικανότητα υπερφόρτωσης για αρκετά δευτερόλεπτα. Έτσι, ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος χρειάζεται νέες διαδικασίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπερφόρτωσης. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση του παραπάνω προβλήματος μέσω της ρύθμισης της τάσης ή της συχνότητας ώστε να μην υπερφορτίζονται τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετασχηματιστή.

Στην παρούσα εργασία τα σενάρια εξετάζονται είτε στη μόνιμη κατάσταση, μέσω προγράμματος MATLAB, είτε με δυναμική συμπεριφορά, μέσω προγράμματος Simulink.

Στη μόνιμη κατάσταση εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Η τροφοδοσία δικτύου αποκλειστικά από έναν μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και η τροφοδοσία από τον μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και από διεσπαρμένη παραγωγή. Στη δυναμική συμπεριφορά εξετάζεται ξανά το δίκτυο με την διεσπαρμένη παραγωγή. Επίσης εξετάζονται επιπλέον σενάρια, όπως η αντιστάθμιση πτώσης τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και η ρύθμιση της τάσης στη διεσπαρμένη παραγωγή.

**Λέξεις Κλειδιά:** Μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος, Μικροδίκτυα, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Κεντρικός Έλεγχος, Στατισμός, Περιορισμός Ρεύματος, Ρύθμιση Τάσης, Ρύθμιση Συχνότητας





## Abstract

In order to deal with the constantly increasing electricity supply demand, the electric power companies have to rely mainly on existing infrastructure for production and transmission of electricity. The construction of new transmission lines is difficult since it requires approval by regulatory authorities and is also under environmental restrictions and thus leading to an increased cost of such an investment. A more efficient use of transmission systems can be accomplished by replacing some conventional transformers in the network by power electronics transformers; this will allow to enhance the networks capacities, such as voltage control and frequency/angle control.

According to the above information, the goal of the thesis is to study the voltage and the frequency regulation of a distributed grid fed by a solid state transformer. However, in case of an overload, which may be caused by the high load demand, power electronics will not be able to withstand the overload. The power semiconductors can be overloaded for a few microseconds, in contrast to the usual components of the network that have overload capacity for several seconds. Thus, the solid state transformer requires new measures to deal with the problem of overloading. The focus of this thesis is based on solving the aforementioned problem by regulating the voltage or the frequency in order to avoid causing overload to the power electronics of the solid state transformer.

The thesis focuses on scenarios examined, which are based on either the steady state, via the program MATLAB, or the dynamic behavior, via the program Simulink.

Two scenarios are examined at the steady state. One is the feeding of the grid exclusively by a solid state transformer and the other is the feeding of the grid by a solid state transformer and a distributed generation. The thesis also considers the grid with the distributed generator at the dynamic behavior. The dynamic behavior also includes scenarios such as voltage drop compensation in the secondary of the transformer and the voltage regulation of the distributed generation.

**Key Words:** Solid state transformer, Microgrids, Distributed generation, Central control, Droop control, Current limitation, Voltage regulation, Frequency regulation



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Δομή ΣΗΕ	1
1.2	Ευστάθεια ΣΗΕ	3
1.3	Ανάλυση ροών φορτίων	5
1.4	Ανάλυση Δυναμικού Συστήματος	6
1.4.1	Ποιοτική θεωρία διαφορικών εξισώσεων	6
1.4.2	Σημεία Ισοροπίας και Ευστάθεια	7
1.4.3	Χωρισμός χρονικών κλιμάκων	11
1.4.4	Υβριδικά συστήματα	14
1.5	Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος και Μικροδίκτυα	15
1.5.1	Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος	15
1.5.2	Διεσπαρμένη Παραγωγή και Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας	16
1.5.3	Μικροδίκτυα	16
1.6	Αντικείμενο και δομή της εργασίας	17
<b>2</b>	<b>Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος</b>	<b>21</b>
2.1	Μετασχηματιστές	21
2.2	Δομή Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος	22
2.3	Δυνατότητες Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος	22
2.4	FREEDM (Μελλοντικό προηγμένο σύστημα διανομής μέσης τάσης)	25
2.5	Τεχνολογίες Μετασχηματιστών Ηλεκτρονικών Ισχύος	25
2.6	Έλεγχος μέσω των Μετασχηματιστών Ηλεκτρονικών Ισχύος και Αντιστροφείς Πηγής Τάσης	27
2.7	Βραχυκυκλώματα	32
2.8	Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος	34
<b>3</b>	<b>Μικροδίκτυα, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Αποθήκευση Ενέργειας</b>	<b>37</b>
3.1	Μικροδίκτυα	37
3.1.1	Περιγραφή	37
3.1.2	Τεχνολογίες Παραγωγής	38

3.1.3	Τεχνική Λειτουργία του Μικροδικτύου . . . . .	41
3.1.4	Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου . . . . .	42
3.2	”Αυτόνομο” δίκτυο με έλεγχο συχνότητας και τάσεως . . . . .	44
3.2.1	Έλεγχος Μικροδικτύου . . . . .	44
3.2.2	Στρατηγική Διαχείρισης Ισχύος . . . . .	47
3.3	Διεσπαρμένη Παραγωγή . . . . .	49
3.3.1	Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής . . . . .	52
3.3.2	Έλεγχος Τάσης από Διεσπαρμένη Παραγωγή . . . . .	55
3.4	Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας . . . . .	56
3.4.1	Μπαταρίες . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Λειτουργία Γραμμής Διανομής με Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος</b>	<b>63</b>
4.1	Τροφοδοσία γραμμής διανομής από Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος .	63
4.2	Μοντέλο Ανάλυσης Μόνιμης Κατάστασης . . . . .	65
4.3	Ρυθμίσεις και Όρια Κανονικής Λειτουργίας . . . . .	67
4.3.1	Κανονική λειτουργία . . . . .	67
4.3.2	Έλεγχος ορίων ρεύματος . . . . .	68
4.3.3	Παράδειγμα . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Λειτουργία Γραμμής Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή</b>	<b>73</b>
5.1	Περιγραφή Δικτύου . . . . .	73
5.2	Έλεγχος Ορίων Λειτουργίας Υπερφόρτισης . . . . .	74
5.2.1	Γενικά . . . . .	74
5.2.2	Στάδιο Λειτουργίας . . . . .	74
5.3	Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης . . . . .	75
5.3.1	Κανονική περιοχή λειτουργίας . . . . .	75
5.3.2	Ρύθμιση Συχνότητας . . . . .	77
5.3.3	Μετατροπέας Πηγής Ρεύματος . . . . .	78
5.4	Εφαρμογή . . . . .	79
5.4.1	Διαγράμματα Μονίμου Καταστάσεως . . . . .	79
5.4.2	Προσομοίωση Δυναμικής Συμπεριφοράς . . . . .	85
5.4.3	Αποτέλεσμα Προσομοίωσης . . . . .	89
5.4.4	Αποτελέσματα προσομοίωσης βηματικής αύξησης του φορτίου . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Επίδραση Ρύθμισης Τάσεως</b>	<b>101</b>
6.1	Περιγραφή Συστήματος . . . . .	101
6.2	Αντιστάθμιση Πτώσης Τάσεως . . . . .	101
6.2.1	Αντιστάθμιση πτώσης τάσεως με βάση το ρεύμα . . . . .	102

6.2.2	Αντιστάθμιση πτώσης τάσεως με βάση την ισχύ . . . . .	108
6.2.3	Σύγκριση . . . . .	113
6.3	Ρύθμιση Τάσεως Διεσπαρμένης Παραγωγής . . . . .	114
6.3.1	Όρια αέργου ισχύος μετατροπέα διεσπαρμένης παραγωγής . . . . .	114
6.3.2	Εξισώσεις συστήματος . . . . .	116
6.3.3	Προσομοίωση Ρύθμισης Τάσεως Διεσπαρμένης Παραγωγής . . . . .	118
6.4	Αποτελέσματα και Σύγκριση . . . . .	125
7	<b>Συμπεράσματα - Προοπτικές</b>	<b>129</b>
7.1	Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα . . . . .	129
7.2	Προοπτικές για μελλοντική έρευνα . . . . .	130
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>133</b>



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Δομή ΣΗΕ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί, να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όπου υπάρχει ζήτηση
- Ικανότητα ικανοποίησης της συνεχώς μεταβαλλόμενης ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος
- Ικανοποίηση ορισμένων όρων ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας. Τρεις είναι οι βασικοί παράγοντες που συνιστούν τη ποιότητα: σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.
- Παροχή της ενέργειας με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη

Τα τρία βασικά υποσυστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής. Το σύστημα παραγωγής αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση (ΥΤ) που σκοπό έχει τη μείωση των απωλειών. Οι σταθμοί παραγωγής μετατρέπουν μια πρωτογενή μορφή ενέργειας σε μηχανική (κινητήριες μηχανές-στρόβιλοι) και στη συνέχεια ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής κατατάσσονται σε θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς.

Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο (εξωτερική καύση) για παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω ατμοστροβίλων. Αντίθετα οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ).



Σχήμα 1.1: Χωρισμός σταθμών παραγωγής

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική με τη βοήθεια υδροστροβίλων διαφόρων τύπων.

Όσον αφορά τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, οι περισσότερες διαδεδομένες εφαρμογές τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στο ίδιο ζυγό του δικτύου. Συνήθως τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν κυρίως νηξελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνήθως για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων γεωγραφικών οικισμών, οι οποίοι είναι δύσκολο να συνδεθούν με το δίκτυο. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται μια προσπάθεια για την αύξηση της διείσδυσης των εναλλακτικών πηγών ενέργειας στο κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. [1]

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Με το σύστημα μεταφοράς η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Διεθνώς οι εφαρμοζόμενες ονομαστικές τάσεις μεταφοράς σήμερα περιλαμβάνουν τιμές που



ξεκινάνε από 66 KV και για πολύ μεγάλες αποστάσεις φτάνουν και τα 500 KV ή και τα 750 KV. Πάνω από 230 KV θεωρείται υπερυψηλή τάση. Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας προς όλους τους καταναλωτές. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές MT και XT. Περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει έως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τους συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, όπως και για τη μεταφορά, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο της μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. [2]

## 1.2 Ευστάθεια ΣΗΕ

Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ ορίζεται ως η ικανότητά του να παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας υπό κανονικές συνθήκες και να επανέρχεται σε αυτή μετά από κάποια διαταραχή.

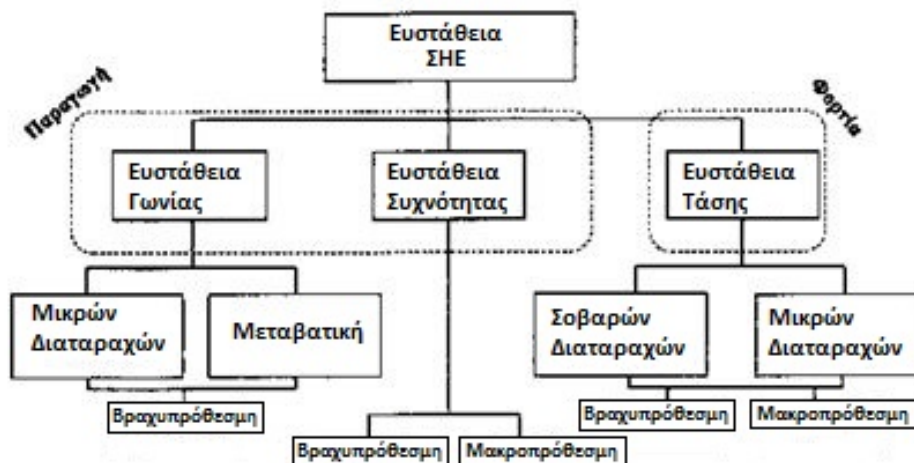
Η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και μπορεί να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Η ανάλυση των προβλημάτων αστάθειας, η αναγνώριση των βασικών παραγόντων που συνεισφέρουν στην αστάθεια και η σχεδίαση μεθόδων βελτίωσης της ευσταθούς λειτουργίας διευκολύνεται ιδιαίτερα από το διαχωρισμό της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες βασίζονται στους παρακάτω παράγοντες:

- Το μέγεθος της διαταραχής που μπορεί να προκαλέσει την αστάθεια
- Οι μηχανισμοί, διαδικασίες και η χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εξεταστεί η αστάθεια
- Τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η επικείμενη αστάθεια [3]

Στο σχήμα (1.2) δίνεται μια κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων ευστάθειας των ΣΗΕ με βάση τα παραπάνω κριτήρια.

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς σε αποδεκτά επίπεδα τιμών όταν υποβάλλεται σε μια διαταραχή από ένα αρχικό σημείο λειτουργίας.

Η αστάθεια τάσης εκδηλώνεται με τη μορφή της βαθμιαίας πτώσης ή ανύψωσης των τάσεων ορισμένων ζυγών. Πιθανή επίπτωση μιας τέτοιας εξέλιξης είναι η απώλεια φορτίου μιας περιοχής ή απώλεια γραμμών μεταφοράς εξαιτίας της λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας που μπορεί να οδηγήσουν και σε άλλες διαδοχικές απώλειες στοιχείων του συστή-



Σχήμα 1.2: Κατηγοριοποίηση των μορφών ευστάθειας ενός ΣΗΕ

ματος.

Η κινητήρια δύναμη της αστάθειας τάσης είναι συνήθως τα φορτία που τείνουν να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν. Τέτοια δυναμικά φορτία είναι συνήθως κινητήρες επαγωγής που μεταβάλλουν την ολίσθησή τους, θερμοστατικά φορτία αλλά και έμμεσοι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου, Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και φορτία ελεγχόμενα με μετατροπείς ισχύος.

Η ευστάθεια τάσης μπορεί, για λόγους αποτελεσματικότερης ανάλυσης, να χωριστεί σε ευστάθεια μεγάλων και μικρών διαταραχών. Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τα επίπεδα των τάσεων στις επιθυμητές τιμές ύστερα από σοβαρές διαταραχές όπως απώλεια μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής ή μιας διασυνδεδετικής γραμμής. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών βασίζεται στην εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για ορισμένο χρόνο, ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ διατάξεων του δικτύου όπως οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ.

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υφίσταται μικρές διαταραχές όπως είναι η μεταβολή στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Ο εξεταζόμενος τύπος ευστάθειας εξαρτάται από την χαρακτηριστική των φορτίων και των συνεχόμενων ή διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή λειτουργίας. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρών διαταραχών μπορεί να γίνει με γραμμικοποίηση του συστήματος στην εγγύ-

τητα του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας.

Επιπλέον η ευστάθεια τάσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και ως προς το χρονικό πλαίσιο στο οποίο εξετάζεται, δηλαδή είτε στη βραχυπρόθεσμη (μερικά δευτερόλεπτα) είτε στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (δεκάδες λεπτά). Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης εμπλέκει ταχέως αποκρινόμενους δυναμικούς μηχανισμούς όπως κινητήρες επαγωγής, ηλεκτρικά ελεγχόμενα φορτία και διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Η ανάλυση φαινομένων αυτής της κλίμακας απαιτεί την επίλυση διαφορικών εξισώσεων ή και εξισώσεων διαφορών. Επιπλέον, η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία, σε αντίθεση με την αστάθεια γωνίας που εξετάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής.

Η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης προέρχεται από την λειτουργία πιο αργών μηχανισμών, όπως τα ΣΑΤΥΦ, επαναφερόμενα θερμοστατικά φορτία, περιοριστές υπερδιέγερσης στις σύγχρονες μηχανές και στατά συστήματα πυκνωτών. Η ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης πραγματοποιείται με δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Στη περίπτωση αυτή η αστάθεια μπορεί να οφείλεται είτε σε απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας είτε στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο όμως είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών. Επίσης η αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί όταν ξεπεραστούν τα όρια της περιοχής έλξης ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή και τη λήψη διορθωτικών μέτρων.

Στις περιπτώσεις αξιολόγησης μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης απαιτούνται εκτεταμένες χρονικές προσομοιώσεις του δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές για την απλοποίηση και επιτάχυνση των υπολογισμών χρησιμοποιούνται απλοποιητικές τεχνικές η "οιονεί στατικές πρακτικές". [4]

### 1.3 Ανάλυση ροών φορτίων

Με τον όρο ανάλυση ροών φορτίων εννοούμε τον υπολογισμό των τάσεων, των ρευμάτων και των ροών ενεργού ισχύος στα διάφορα σημεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κάτω από πραγματικές ή προβλεπόμενες συνθήκες φόρτισης και λειτουργίας. Η ανάλυση των ροών φορτίου χρειάζεται για να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις από τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, την εισαγωγή νέων φορτίων, την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής, την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς κτλ.

Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος ανάμεσα στις μονάδες παραγωγής. Η παραγωγή (ενεργός και άεργος) του συστήματος καθορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγ-

χάνεται το ελάχιστο κόστος λειτουργίας λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του συστήματος. Οι περιορισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τα θερμικά όρια των γραμμών μεταφοράς, τα επιθυμητά όρια τάσεων υποσταθμών, τα όρια ενεργού και αέργου παραγωγής των μονάδων κτλ. [2]

## 1.4 Ανάλυση Δυναμικού Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα ανακεφαλαιώνονται βασικές έννοιες από την Ανάλυση Δυναμικών Συστημάτων.

Αρχικά εξηγούνται συνοπτικά κάποιες μαθηματικές έννοιες όπως αυτές της διακλάδωσης και των ιδιαζουσών διαταραχών, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα μη γραμμικά συστήματα, όπως είναι τα ΣΗΕ. Επίσης γίνεται αναφορά στο διαχωρισμό των χρονικών κλιμάκων στα συστήματα διαφορικών εξισώσεων, που αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την απλούστευση της ανάλυσης. Τέλος εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας των μηχανισμών ελέγχου της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και θα δίνονται τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη θεωρητική ανάλυση αυτών των μηχανισμών.

### 1.4.1 Ποιοτική θεωρία διαφορικών εξισώσεων

Τα περισσότερα δυναμικά συστήματα μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα  $n$  συνήθων διαφορικών εξισώσεων που γράφονται στη συνοπτική μορφή:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.1)$$

όπου  $x$  είναι ένα  $n \times 1$  διάνυσμα και κάθε  $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$  είναι γενικά μια μη γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης  $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ . Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με την επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (1.1) για μία αρχική συνθήκη του διανύσματος μεταβλητών κατάστασης:

$$x(0) = x_o \quad (1.2)$$

Οι αρχικές συνθήκες (1.2) και το σύστημα (1.1) αποτελούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών.

Η λύση  $x(t)$  του συστήματος μπορεί να απεικονιστεί ως μια καμπύλη στο χώρο κατάστασης. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται τροχιά. Η τροχιά καλείται θετική όταν  $t > 0$ , ενώ για  $t < 0$  καλείται αρνητική. Η απεικόνιση του συνόλου των τροχών για διάφορες αρχικές συνθήκες είναι γνωστή ως πορτραίτο φάσεων.

Για κάθε διαφορετική αρχική συνθήκη υπάρχει μοναδική λύση του μη γραμμικού συστήμα-

τος. Η παραπάνω ιδιότητα εξασφαλίζεται από το "θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας" σύμφωνα με το οποίο:

1. Αν η  $f$  είναι συνεχής στο πεδίο  $U$  υπάρχει λύση  $x(t)$  για όλες τις αρχικές συνθήκες  $x_o \in U$ . Κάθε λύση ορίζεται σε ένα μέγιστο διάστημα  $I_{x_o}$  το οποίο εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες:

$$I_{x_o} : \alpha_{x_o} < t < \beta_{x_o} \quad (1.3)$$

Φυσικά ένα από τα  $\alpha_{x_o}$  και  $\beta_{x_o}$  ή και τα δύο μπορεί να τείνουν στο άπειρο, στην οποία περίπτωση υπάρχει λύση για όλες τις τιμές του χρόνου.

2. Όταν η  $f$  είναι  $k$  φορές διαφορίσιμη, τότε η λύση είναι μοναδική και έχει  $k$  συνεχείς παραγώγους. Επομένως η επαρκής συνθήκη για τη μοναδικότητα είναι η  $f$  να είναι ομαλή.

3. Όταν το μέγιστο διάστημα ύπαρξης είναι πεπερασμένο, τα οριακά σημεία της λύσης  $x(t)$  καθώς  $t \rightarrow \beta^-$  ή  $t \rightarrow \alpha^+$ , είτε ανήκουν στο σύνορο του  $U$ , όταν αυτό είναι φραγμένο, είτε απειρίζονται όταν είναι μη φραγμένο.

### 1.4.2 Σημεία Ισορροπίας και Ευστάθεια

Τα σημεία ισορροπίας  $x^*$  ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων προκύπτουν από τη λύση της εξίσωσης:

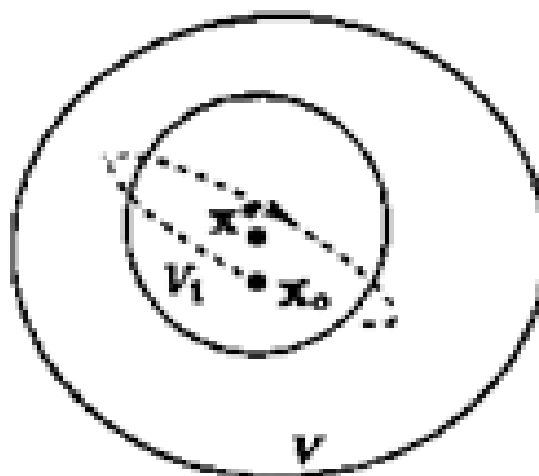
$$f(x) = 0 \quad (1.4)$$

Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ευσταθές αν όλες οι λύσεις με αρχική συνθήκη κοντά στο  $x^*$  παραμένουν κοντά στο  $x^*$  και αυτές για όλο το χρόνο. Ο παρακάτω ορισμός της ευστάθειας οφείλεται στον Liapunov και απεικονίζεται στο Σχήμα (1.3):

"Ένα σημείο ισορροπίας  $x^*$  είναι ευσταθές αν για κάθε γειτονιά  $V$  του  $x^*$  μπορούμε να βρούμε μια γειτονιά  $V_1$  του  $x^*$  τέτοια ώστε για κάθε  $x_o \in V_1$  η λύση  $x(t)$  υπάρχει στο  $V$  για κάθε  $t > 0$ ."

Επιπλέον λέμε ότι ένα σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές όταν όλες οι τροχιές με  $x_o \in V_1$  προσεγγίζουν το  $x^*$  καθώς  $t \rightarrow \infty$ . Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ασταθές όταν δεν είναι ευσταθές.

Όπως φαίνεται και στον παρακάτω ορισμό η ευστάθεια αναφέρεται σε ένα σημείο ισορροπίας και επομένως είναι μια τοπική ιδιότητα. Αν κάποιος ενδιαφέρεται για μια πιο εποπτική εικόνα της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος θα πρέπει να καταφύγει στο πορτραίτο



Σχήμα 1.3: Ορισμός ευστάθειας

φάσεων του συστήματος και να δει για ποιες αρχικές συνθήκες οι τροχιές συγκλίνουν ή αποκλίνουν από τα σημεία ισορροπίας.

Το μεγαλύτερο σύνολο  $A$  για το οποίο όλες οι τροχιές με αρχικές συνθήκες  $x_0 \in V_1$  συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας  $x^*$  ονομάζεται περιοχή έλξης του  $x^*$ . Η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας απεικονίζεται στο Σχήμα (1.4):

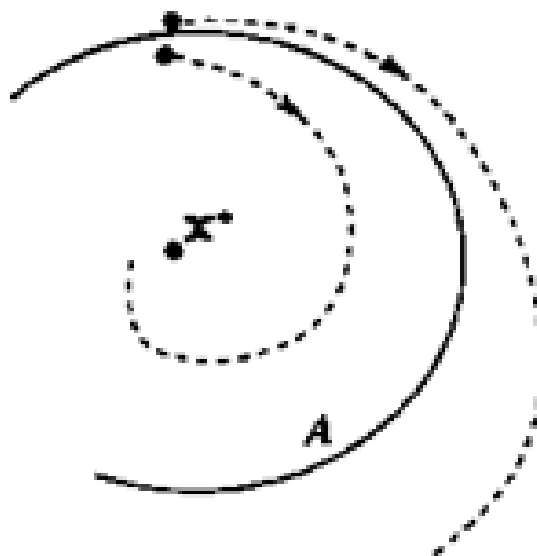
Ας θεωρήσουμε τώρα ένα γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{x} = Ax \quad (1.5)$$

Ως γνωστόν το ανωτέρω σύστημα έχει μόνο ένα σημείο ισορροπίας  $x^* = 0$ , η ευστάθεια του οποίου καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης  $A$ . Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα, η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος κατάστασης.

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, σε ένα μη γραμμικό σύστημα ισχύουν τα εξής:

- Ο αριθμός των σημείων ισορροπίας ποικίλει. Ένα σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα από ένα ή κανένα σημείο ισορροπίας
- Η περιοχή έλξης ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας μπορεί να είναι περιορισμένος, επομένως η ύπαρξη ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν επαρκεί για να εξασφα-



Σχήμα 1.4: Περιοχή έλξης

λίσει την ευστάθεια γενικά.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος γραμμικοποιώντας το σύστημα γύρω από το σημείο ισορροπίας  $x^*$ . Ορίζοντας:

$$\Delta x = x - x^* \quad (1.6)$$

και κρατώντας μόνο τους όρους πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor του  $f$  γύρω από το σημείο  $x^*$ , προκύπτει το παρακάτω γραμμικό σύστημα:

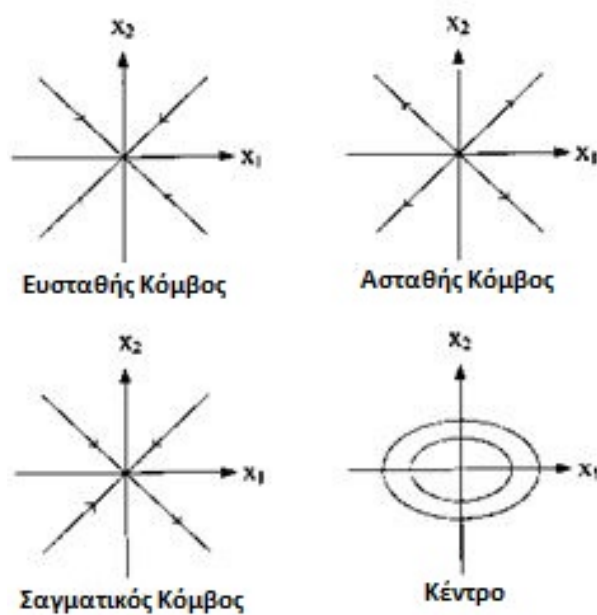
$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (1.7)$$

όπου ο πίνακας κατάστασης  $A$  ορίζεται ως η Ιακωβιανή του  $f$  ως προς  $x$  στο σημείο  $x^*$ :

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^*} = f_x(x^*) \quad (1.8)$$

Η ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα  $A$ . Πιο συγκεκριμένα:

- Αν όλες οι ιδιοτιμές του  $f_x$  έχουν αρνητικά πραγματικά, έρη τότε το σημείο ισορροπίας



Σχήμα 1.5: Είδη σημείων ισορροπίας

είναι ασυμπτωτικά ευσταθές

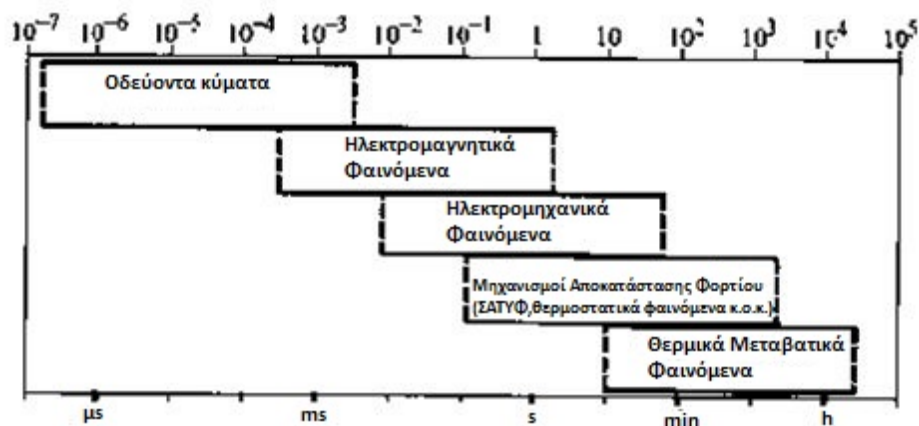
- Αν έστω και μια ιδιοτιμή του γραμμικοποιημένου συστήματος έχει θετικό πραγματικό μέρος τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ονομάζονται καταβόθρες ή ευσταθής καταβόθρες. Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν θετικά πραγματικά μέρη το ασταθές σημείο ισορροπίας ονομάζεται εστία ή ασταθής κόμβος. Αν κάποιες ιδιοτιμές έχουν θετικά πραγματικά μέρη και άλλες αρνητικά το ασταθές σημείο ισορροπίας ονομάζεται σαγματικός κόμβος. Αν από το γραμμικοποιημένο μοντέλο προκύψουν δύο φανταστικές ιδιοτιμές (μηδενικό πραγματικό μέρος) που είναι συζυγείς τότε το σημείο ισορροπίας ονομάζεται κέντρο και οι αντίστοιχες τροχιές είναι περιοδικές γύρω από αυτό το σημείο.

Τονίζεται ότι η γραμμικοποίηση δεν προσφέρει καμία πληροφορία για την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας στην περίπτωση που από την Ιακωβιανή  $f_x$  προκύψουν μία ή περισσότερες ιδιοτιμές με μηδενικό πραγματικό μέρος. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει κανείς να καταφύγει στον ορισμό της ευστάθειας που έχει δοθεί παραπάνω για να μπορέσει να αποφανθεί για το είδος της.

Για ένα πρώτης τάξης σύστημα τα είδη των σημείων ισορροπίας απεικονίζονται στο Σχήμα (1.5). Τα βέλη στο σχήμα εκφράζουν τη κατεύθυνση των τροχιών.





Σχήμα 1.6: Κατηγοριοποίηση δυναμικών φαινομένων

### 1.4.3 Χωρισμός χρονικών κλιμάκων

Πολλά συστήματα περιλαμβάνουν δυναμικούς μηχανισμούς που εξελίσσονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, άλλες βραχυπρόθεσμες και άλλες μακροπρόθεσμες. Για την προσεγιστική ανάλυση τέτοιων συστημάτων θεωρούμε συνήθως ότι κατά τις γρήγορες μεταβολές του συστήματος οι αργές μεταβλητές του παραμένουν πρακτικά σταθερές, ενώ κατά τις αργές μεταβολές του, οι γρήγορες μεταβλητές έχουν προλάβει να φτάσουν σε ισορροπία. Στα ΣΗΕ τα διάφορα δυναμικά φαινόμενα μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες ως εξής:

- κυματικά φαινόμενα
- ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα
- ηλεκτρομηχανικά φαινόμενα
- θερμικά μεταβατικά φαινόμενα

Η ανωτέρω κατηγοριοποίηση εκφράζει μια κατηγοριοποίηση με βάση τη χρονική κλίμακα εκδήλωσής τους. Στο Σχήμα (1.6) φαίνεται αυτή η κατηγοριοποίηση σχηματικά:

Από ένα μοντέλο με πολλαπλές χρονικές κλίμακες μπορεί να εξαχθούν ακριβή, μειωμένης τάξης μοντέλα κατάλληλα για κάθε χρονική κλίμακα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται χωρισμός χρονικών κλιμάκων και βασίζεται στην ανάλυση ιδιάζουσών διαταραχών.

Ένα σύστημα το οποίο υφίσταται μια ιδιάζουσα διαταραχή, είναι εκείνο στο οποίο μια ή περισσότερες παράγωγοι μεταβλητών κατάστασης είναι πολλαπλασιασμένες με μία μικρή παράμετρο  $\epsilon$ . Για αυτό όταν η παράμετρος αυτή τείνει στο μηδέν, η τάξη του συστήματος αλλάζει. Ένα τέτοιο σύστημα περιγράφεται από τις εξισώσεις της μορφής:

$$\dot{x} = f(x, y, \epsilon) \quad (1.9)$$

$$\epsilon \dot{y} = g(x, y, \epsilon) \quad (1.10)$$

όπου  $x, y$  διανύσματα κατάστασης διάστασης  $n$  και  $m$  αντίστοιχα.

Ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες περιλαμβάνει την εξαγωγή δύο μειωμένης τάξης υποσυστημάτων, εκ των οποίων το ένα περιγράφει τους αργούς μηχανισμούς και το άλλο τους γρήγορους του αρχικού συστήματος, που περιγράφεται από τις σχέσεις (1.9) και (1.10). Συμβολίζοντας με  $x_s, y_s$  τις αργές συνιστώσες των μεταβλητών κατάστασης και με  $x_f, y_f$  τις αντίστοιχες ταχείες έχουμε:

$$x = x_s + x_f \quad (1.11)$$

$$y = y_s + y_f \quad (1.12)$$

Εξαιτίας του όρου  $\epsilon$ , η δυναμική των μεταβλητών  $y$  είναι γρηγορότερη αυτής των μεταβλητών  $x$ . Επομένως μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε ότι η αργή δυναμική του συστήματος των (1.9) και (1.10) αντιστοιχεί σε  $\epsilon$  που τείνει στο μηδέν. Αυτό ορίζει την οιονεί στατική προσέγγιση (quasi steady state, QSS) του αργού υποσυστήματος, η οποία περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\dot{x}_s = f(x_s, y_s) \quad (1.13)$$

$$0 = g(x_s, y_s) \quad (1.14)$$

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (1.13) και (1.14), το αργό υποσύστημα της οιονεί στατικής προσέγγισης είναι ένα διαφορικό-αλγεβρικό σύστημα και η ανάλυση της ευστάθειας του μπορεί να γίνει με την μέθοδο της παραγράφου 2.1.5.

Η οιονεί στατική προσέγγιση μπορεί να βελτιωθεί σε οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας εισάγοντας την έννοια της αργής πολλαπλότητας. Η τελευταία αυτή πολλαπλότητα ορίζεται σαν αναλλοίωτη πολλαπλότητα πάνω στην οποία δεν διεγείρονται η ταχείες δυναμικοί μηχανισμοί, ώστε  $x = x_s, y = y_s$ . Σε αυτήν την περίπτωση η αργή πολλαπλότητα είναι διάσταση  $n$ , όση και η διάσταση των αργών μεταβλητών, και μπορεί να οριστεί με την βοήθεια των  $m$  εξισώσεων:

$$y_s = h(x_s) \quad (1.15)$$

Για να αποτελούν λύσεις του συστήματος (1.9),(1.10) τα  $x_s$  και  $y_s$  πρέπει οι εξισώσεις  $h$  που ορίζουν το αργό υποσύστημα να ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη, που προκύπτει από την αντικατάσταση των σχέσεων (1.9),(1.15) στην (1.10):

$$\epsilon h_x(x_s, h) = g(x_s, h) \quad (1.16)$$

όπου  $h_x$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας των  $h$  ως προς  $x$ . Αυτές οι μερικές διαφορικές εξισώσεις συνήθως δε μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους, γι' αυτό το αργό υποσύστημα συνήθως προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor ως προς  $\epsilon$  :

$$h(x_s) = h_o(x_s) + \epsilon h_1(x_s) + \epsilon^2 h_2(x_s) + \dots \quad (1.17)$$

Για  $\epsilon = 0$  παίρνουμε τον πρώτο όρο  $h_o$  του αναπτύγματος και για τον οποίο η (1.16) γίνεται:

$$g(x_s, h_o) = 0 \quad (1.18)$$

Επομένως όταν  $\epsilon \rightarrow 0$  η αργή πολλαπλότητα δίνεται από την οιοσδήποτε στατική προσέγγιση της σχέσης (1.14). Σε αυτήν την περίπτωση το σφάλμα που γίνεται από αυτήν την προσέγγιση, κρατώντας μόνο τον πρώτο όρο της σειράς Taylor, είναι τόσο μικρότερο, όσο κοντύτερα στο μηδέν είναι το  $\epsilon$  (μέγεθος σφάλματος τάξης  $\epsilon$ ). Έχοντας υπολογίσει την αργή πολλαπλότητα με όση ακρίβεια είναι επιθυμητή, οι αργοί δυναμικοί μηχανισμοί του συστήματος (1.9),(1.10) δίνονται από το ελαττωμένης τάξης αργό υποσύστημα:

$$\dot{x}_s = f(x_s, h(x_s)) \quad (1.19)$$

Ενώ οι αργές συνιστώσες των γρήγορων μεταβλητών, δίνονται από την σχέση (1.15). Η προσέγγιση του γρήγορου υποσυστήματος θεωρεί ότι οι μεταβλητές  $x$  είναι τόσο αργές ώστε να παραμένουν πρακτικά σταθερές ( $x \approx x_s$ ). Ως εκ τούτου οι μεταβλητές κατάστασης του γρήγορου υποσυστήματος, είναι οι ταχείες συνιστώσες  $y_f$ , που έχουν ήδη αναφερθεί και καλούνται επίσης και μεταβλητές εκτός (αργής) πολλαπλότητας.

$$y_f = y - y_s = y - h(x_s) \quad (1.20)$$

Συνδυασμός των σχέσεων (1.20) και (1.10) δίνει:

$$\epsilon \dot{y}_f = \epsilon \dot{y} - \epsilon \dot{y}_s = g(x_s, y_f + h(x_s)) \quad (1.21)$$

Η σχέση (1.21) αποδεικνύει ότι το γρήγορο υποσύστημα έχει σημείο ισορροπίας πάνω στην αργή πολλαπλότητα, ενώ οι μεταβλητές  $x_s$  αποτελούν τις παραμέτρους του. Η γραμμικοποίηση της (1.21) γύρω από ένα σημείο  $(x_s, h(x_s))$  δίνει:

$$\epsilon \Delta y_f = g_y \Delta y_f \quad (1.22)$$

απ' όπου συνεπάγεται ότι η ευστάθεια του γρήγορου υποσυστήματος καθορίζεται από τον Ιακωβιανό πίνακα  $g_y$  των γρήγορων εξισώσεων.[5]

#### 1.4.4 Υβριδικά συστήματα

Υβριδικά συστήματα χαρακτηρίζονται τα συστήματα που απαρτίζονται τόσο από μηχανισμούς με συνεχή συμπεριφορά όσο και από μηχανισμούς με διακριτή χρονική συμπεριφορά. Χαρακτηρίζοντας ως υβριδικά αφού δεν παρουσιάζουν καθαρά συνεχή ή διακριτή συμπεριφορά. Τα ΣΗΕ είναι τέτοιου είδους συστήματα αφού περιέχουν συνεχείς μηχανισμούς όπως π.χ. γεννήτριες αλλά και διακριτούς μηχανισμούς όπως εγκάρσιοι πυκνωτές ή ΣΑΤΥΦ.

Οι σχέσεις που περιγράφουν ένα υβριδικό σύστημα δίνονται παρακάτω:

$$\dot{x} = f(x, y, z, p) \quad (1.23)$$

$$0 = g^o(x, y, z, p) \quad (1.24)$$

$$0 = g^{i^-}(x, y, z, p), y_i < 0 \quad (1.25)$$

$$0 = g^{i^+}(x, y, z, p), y_i < 0 \quad (1.26)$$

$$z^+ = h(x^-, y^-, z^-, p), y_j = 0 \quad (1.27)$$

$$\dot{z} = 0, y_j \neq 0 \quad (1.28)$$

όπου  $x, y, z, p$  είναι οι συνεχείς, αλγεβρικές, διακριτές μεταβλητές και οι παράμετροι αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις  $f, g$  είναι συναρτήσεις που αφορούν τις συνεχείς μεταβλητές αλλά εξαρτώνται και από τις διακριτές. Τα σύμβολα + και - αναφέρονται στις στιγμές πριν και μετά από ένα διακριτό γεγονός. Τέλος  $h$  είναι η συνάρτηση που απεικονίζει τις διακριτές μεταβλητές.

Όταν ένα γραμμικό σύστημα είναι συνεχές η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας τους κα-

θορίζεται μονοσήμαντα από το πρόσημο του πραγματικού μέρους των ιδιοτιμών του πίνακα κατάστασης  $A$  του συστήματος. Ακόμα και όταν το σύστημα είναι μη γραμμικό είναι δυνατό να γραμμικοποιηθεί γύρω από ένα σημείο ισορροπίας και να ακολουθήσει η παραπάνω ανάλυση.

Όσον αφορά τα διακριτά συστήματα αυτά περιγράφονται από τις εξισώσεις διαφορών της μορφής:

$$z(k+1) = A_d z(k) \quad (1.29)$$

όπου  $z(k+1)$ ,  $z(k)$  οι διακριτές μεταβλητές τις χρονικές στιγμές  $k+1$  και  $k$  αντίστοιχα και  $A_d$  ο πίνακας κατάστασης του διακριτού συστήματος (γραμμικού ή γραμμικοποιημένου).

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται και πάλι από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης, αλλά σε αυτή τη περίπτωση το κριτήριο ευστάθειας του σημείου ισορροπίας είναι η ύπαρξη ιδιοτιμών εντός του μοναδιαίου κύκλου στο μιγαδικό επίπεδο.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι στη περίπτωση ενός υβριδικού συστήματος η ευστάθεια δε μπορεί να οριστεί μόνο από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης και απαιτούνται επιπλέον κριτήρια, τα οποία όμως δε θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία. Η σύνθετη συμπεριφορά των υβριδικών συστημάτων έχει ως συνέπεια την εμφάνιση νέων μορφών αστάθειας, όπως π.χ. η περιοδική ταλαντωτική συμπεριφορά των οριακών κύκλων.[6]

## 1.5 Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος και Μικροδίκτυα

### 1.5.1 Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος

Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται από έναν μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και δύο μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος στο πρωτεύον και στο δευτερεύον. Αποσκοπεί όχι μόνο να αντικαταστήσει το παραδοσιακό μετασχηματιστή, αλλά και να παρέχει επίσης βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο, χάρη στην μεγαλύτερη ευελιξία που προσφέρεται από τα ηλεκτρονικά ισχύος. Αποτελείται από υψηλής ισχύος ημιαγωγούς, έναν αποδοτικό μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και κυκλώματα ελέγχου. Τα βασικά πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος είναι η μείωση του βάρους και του μεγέθους, καθώς και η εξάλειψη των μονωτικών λαδιών κάτι που οδηγεί σε μεγαλύτερη περιβαλλοντική προστασία. [8] [9]

Με τους μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας/γωνίας μπορεί να γίνει και από τους αντιστροφείς και στις δύο πλευρές (πρωτεύον-δευτερεύον) και όχι μόνο από τις σύγχρονες μηχανές που συνδέονται στο δίκτυο. Το δίκτυο διανομής δεν διαθέτει συνήθως στρεφόμενες μηχανές και έτσι στην περίπτωση που τροφοδοτείται από μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος απόκειται στον έλεγχο του αντιστροφέα να υποκαταστήσει την δυναμική που έχει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με στρεφόμενες μηχανές. [22]

### 1.5.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή και Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να ορισθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέεται σε ένα δίκτυο διανομής το οποίο περιλαμβάνει καταναλωτές, και όχι στο δίκτυο μεταφοράς. Συνήθως η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) χωρίς όμως αυτό να είναι αναγκαίο. Οι εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής είναι σαφώς μικρότερες σε μέγεθος και ισχύς από τα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο του συστήματος διανομής. [5] [16]

Με την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας εισάγεται ένα νέο στοιχείο στη λειτουργία του συστήματος και το σύστημα μπορεί να καταστεί πιο αποδοτικό. Με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης η οποία αποδίδεται στο δίκτυο όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Έτσι επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων, μείωση εκπομπών ρύπων και καλύτερη λειτουργία των μονάδων παραγωγής βοηθώντας στην αποφυγή καταστάσεων υπολειτουργίας ή υπερλειτουργίας τους. Επίσης η αποθήκευση συμβάλει στην εξισορρόπηση του φορτίου. Τέλος στην εργασία αυτή θα δούμε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για έλεγχο ενεργού ισχύος.

### 1.5.3 Μικροδίκτυα

Τα μικροδίκτυα είναι συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να λειτουργήσουν συνδεδεμένα στο δίκτυο ή ως αυτόνομα συστήματα. Στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στη χαμηλή ή μέση τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ισχύος είτε αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο σχηματίζοντας μία νησίδα. Ένα μικροδίκτυο είναι ένα τμήμα ενός ηλεκτρικού συστήματος και ενδέχεται να παραμείνει σε λειτουργία μετά το διαχωρισμό από το σύστημα, εάν κάτι τέτοιο έχει προβλεφθεί.

Οι περισσότερες μικροπηγές συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών οι οποίοι τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντική εξέλιξη. Ο έλεγχος των ηλεκτρονικών

ισχύος είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης. Υπό κανονικές συνθήκες, τα μικροδίκτυα συμμετέχουν συνδεδεμένα σε λειτουργίες του συστήματος παροχής τροφοδοσίας. Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε νησίδα οι δύο κύριες στρατηγικές έλεγχου που μπορούν να γίνουν είναι ο κεντρικός έλεγχος (master control) και ο έλεγχος μέσω (droop control). [3] [13] [21]

Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος δεδομένου ότι το δευτερεύον δεν είναι στη συχνότητα του υπόλοιπου συστήματος δημιουργεί στην πραγματικότητα ένα μικροδίκτυο το οποίο τροφοδοτείται με χωριστή συχνότητα. Για το λόγο αυτό ο έλεγχος που γίνεται σε ένα δίκτυο που τροφοδοτείται από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος είναι παρόμοιος με αυτόν ενός μικροδικτύου και στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν αντίστοιχες τεχνικές έλεγχου τόσο της συχνότητας όσο και της τάσεως. Ένα ειδικότερο θέμα στο οποίο θα επικεντρωθεί η εργασία είναι ο έλεγχος ώστε το ρεύμα του μετατροπέα να μην ξεπερνά την ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή κατά τη μεταβολή του φορτίου.

## 1.6 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βασιστούν κυρίως, στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή καινούργιων γραμμών μεταφοράς είναι σε μεγάλο βαθμό απαγορευτική αφού υπόκειται στην έγκριση ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών περιορισμών αυξάνοντας το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης, που είναι ούτως ή άλλως μεγάλο. Οπότε γίνονται προσπάθειες αποδοτικότερης αξιοποίησης των συστημάτων μεταφοράς. Μία εκ των προτάσεων για την αποδοτικότερη αξιοποίηση είναι η εισαγωγή στο δίκτυο μετασχηματιστών ηλεκτρονικών ισχύος, σε αντικατάσταση συμβατικών μετασχηματιστών, οι οποίοι δίνουν δυνατότητες στο δίκτυο που δεν υπήρχαν πριν, όπως είναι ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας/γωνίας.

Με βάση την παραπάνω σκέψη στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας ενός δικτύου διανομής τροφοδοτούμενο από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο, στην περίπτωση υπερφόρτωσης του δικτύου, που μπορεί να προκληθεί από την υψηλή ζήτηση φορτίου, τα ηλεκτρονικά ισχύος δεν έχουν τη δυνατότητα υπερφόρτωσης. Οι ημιαγωγοί ισχύος μπορεί να υπερφορτωθούν μόνο για λίγα μικροδευτερόλεπτα, σε αντίθεση με τα συνήθη εξαρτήματα του δικτύου που έχουν ικανότητα υπερφόρτωσης για αρκετά δευτερόλεπτα. Έτσι, ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος χρειάζεται νέες διαδικασίες για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπερφόρτωσης. Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση του παραπάνω προβλήματος μέσω της ρύθμισης της τάσης και της συχνότητας ώστε να μην υπερφορτίζονται τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετασχηματιστή.



Στην παρούσα εργασία τα σενάρια εξετάζονται είτε στη μόνιμη κατάσταση, μέσω προγράμματος MATLAB, είτε η δυναμική συμπεριφορά, μέσω προγράμματος Simulink.

Η εργασία περιλαμβάνει 7 κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης περιλαμβάνει το μαθηματικό υπόβαθρο. Γίνεται μια εισαγωγή σε έννοιες, όπως οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος, η διεσπαρμένη παραγωγή, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και τα μικροδίκτυα, που θα περιγραφούν σε επόμενα κεφάλαια, καθώς και μια περιγραφή της δομής και του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος, αφού από έναν τέτοιο τροφοδοτείται το δίκτυο που εξετάζεται. Περιγράφεται η δομή των εν λόγω μετασχηματιστών, οι δυνατότητές τους καθώς και οι δυνατότητες ελέγχου που έχουν.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται έννοιες απαραίτητες για την κατανόηση της εργασίας. Γίνεται περιγραφή των μικροδικτύων, των τεχνολογιών από τις οποίες απαρτίζονται, της αρχιτεκτονικής τους και γίνεται περιγραφή των ελέγχων συχνότητας και τάσης σε αυτόνομο δίκτυο. Επίσης περιγράφεται η διεσπαρμένη παραγωγή και περιγραφικά οι κυριότερες τεχνολογίες της. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα περιγράφονται αναλυτικά μιας και χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Τέλος στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα κεφάλαια 4,5 και 6 παρουσιάζονται τα διάφορα σενάρια ελέγχου που εξετάστηκαν. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η ανάλυση της τροφοδοσίας μιας γραμμής διανομής από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Γίνεται η ανάλυση της τροφοδοσίας μιας γραμμής διανομής από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Παρουσιάζεται το μοντέλο μονίμου καταστάσεως και προσδιορίζονται τα όρια λειτουργίας του συστήματος. Επίσης στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραδείγματος τροφοδοσίας ενός ακτινικού συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η λειτουργία μιας γραμμής διανομής τροφοδοτούμενη από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος με διεσπαρμένη παραγωγή. Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ και έχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω συστοιχειών (μπαταρίες). Παρουσιάζεται ο έλεγχος ορίων λειτουργίας υπερφόρτισης, καθώς πάνω από κάποια τιμή του ρεύματος για λόγους προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος του μετασχηματιστή δεν επιτρέπεται αυτός να λειτουργεί. Παρουσιάζεται, επίσης, το μοντέλο ανάλυσης λειτουργίας του συστήματος καθώς και τα αποτελέσματα παραδείγματος λειτουργίας του συστήματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και δύο παραδείγματα λειτουργίας του συστήματος με δυναμική συμπεριφορά, το πρώτο με αυξομείωση φορτίου μέσω ράμπας και το δεύτερο με βηματικές αυξήσεις



του φορτίου.

Στο Κεφάλαιο 6 το σύστημα που εξετάζεται είναι ίδιο με αυτό του προηγούμενου κεφαλαίου. Τώρα, όμως, εξετάζεται η επίδραση της ρύθμισης τάσεως στα όρια λειτουργίας. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται αντιστάθμιση πτώσης τάσεως από το ρυθμιστή αέργου ισχύος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει ρύθμιση τάσεως από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής. Στην περίπτωση της αντιστάθμισης πτώσης τάσης περιγράφονται δύο παραδείγματα. Στο πρώτο γίνεται αντιστάθμιση με βάση το ρεύμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και στο δεύτερο με βάση την ενεργό ισχύ του μετασχηματιστή. Ακολουθεί σύγκριση των δύο παραδειγμάτων. Στην περίπτωση της ρύθμισης τάσεως από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του παραδείγματος. Όλα τα παραδείγματα αυτού του κεφαλαίου είναι με δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραδειγμάτων και η σύγκρισή τους.

Τέλος στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται μια σύνοψη της διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα, καθώς και προοπτικές για μελλοντική έρευνα πάνω στο θέμα.



## Κεφάλαιο 2

# Μετασχηματιστές Ηλεκτρονικών Ισχύος

### 2.1 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μία ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια ενός επιπέδου εναλλασσόμενης τάσης σε ηλεκτρική ενέργεια διαφορετικού επιπέδου τάσης χρησιμοποιώντας σαν μέσο το μαγνητικό πεδίο. Αυτή η συσκευή αποτελείται από δύο ή περισσότερα πηνία που τυλίγονται γύρω από έναν κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα πηνία αυτά συνήθως δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η μόνη σύζευξη που υπάρχει μεταξύ των σπειρών είναι το κοινό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του πυρήνα.

Τα πλεονεκτήματα του συμβατικού μετασχηματιστή περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος, υψηλή ανθεκτικότητα, υψηλή αξιοπιστία και υψηλή απόδοση.

Αδυναμίες του συμβατικού μετασχηματιστή είναι η πτώση τάσης υπό φορτίο, οι απώλειες κενού φορτίου, η ευαισθησία σε αρμονικές ότι δεν παρέχει προστασία υπερφόρτισης, δεν είναι ρυθμίσιμος (εκτός από την αλλαγή λόγου - ΣΑΤΥΦ) και ότι λόγω των μονωτικών ελαίων που χρησιμοποιούνται υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες καθώς και κίνδυνοι πυρκαγιών μετά από έκρηξη.

Ο συμβατικός μετασχηματιστής είναι ογκώδης και βαρύς. Το μέγεθος του μετασχηματιστή είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη συχνότητα. Από τον παρακάτω τύπο:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi \quad (2.1)$$

μπορούμε να συμπεράνουμε ότι με δεδομένη τάση όσο μικρότερη είναι η συχνότητα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μαγνητική ροή. Όμως υψηλή μαγνητική ροή σημαίνει και μεγαλύτερος πυρήνας.

Ο μετασχηματιστής στερεάς κατάστασης (Solid State Transformer (SST) ή Power Electronic

Transformer (PET)) ή μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται από υψηλής ισχύος ημιαγωγούς, ένα συμβατικό μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και ένα κύκλωμα ελέγχου. Συχνά έχει κάποια ικανότητα επικοινωνίας οπότε αναφέρεται έξυπνος μετασχηματιστής (Smart Transformer).

Όπως και ο συμβατικός μετασχηματιστής, έτσι και ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος, μετασχηματίζει το επίπεδο της εναλλασσόμενης τάσης.

## 2.2 Δομή Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος

Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται κατά κανόνα από τρία στάδια. Η επικρατούσα συνδεσμολογία είναι AC/DC/AC, δηλαδή το εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου το μετατρέπει σε συνεχή, στη συνέχεια σε υψηλής συχνότητας εναλλασσόμενο όπου γίνεται ο μετασχηματισμός, μετά ξαναγίνεται συνεχές και στη συνέχεια ξαναμετατρέπεται σε εναλλασσόμενο. Προς το παρόν οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούνται σε μετασχηματισμούς μέσης με χαμηλής τάσης. Τα τρία στάδια ενός μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος είναι τα εξής :

1<sup>ο</sup> στάδιο (input) : Ανορθωτής AC/DC

- Διαμορφώνει το ρεύμα εισόδου συχνότητας 50/60 Hz
- Διορθώνει τον συντελεστή ισχύος ή ρυθμίζει την τάση πρωτεύοντος
- Ρυθμίζει την τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος του πρωτεύοντος

2<sup>ο</sup> στάδιο (isolation) : μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας

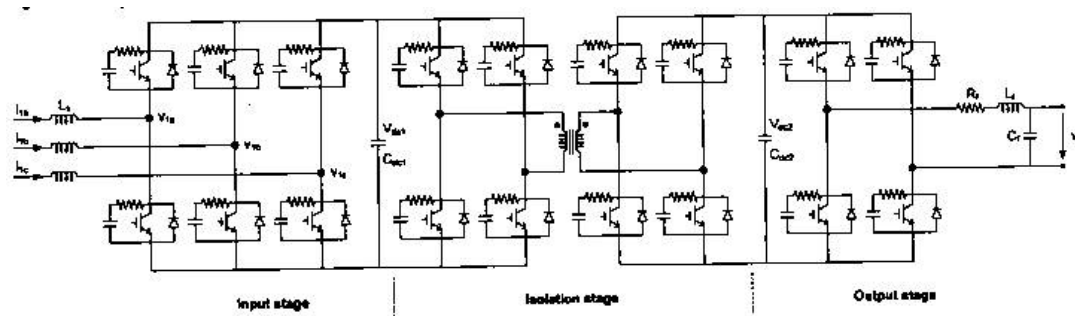
Σε αυτό το στάδιο του μετασχηματιστή παρέχετε γαλβανική απομόνωση για την παρεμπόδιση της ροής ρεύματος. Η συνεχής τάση μετατρέπεται σε υψηλής συχνότητας (μερικά kHz) τετραγωνικός παλμός τάσης και στη συνέχεια μετασχηματίζεται και ανορθώνεται.

3<sup>ο</sup> στάδιο (output) : Αντιστροφέας DC/AC

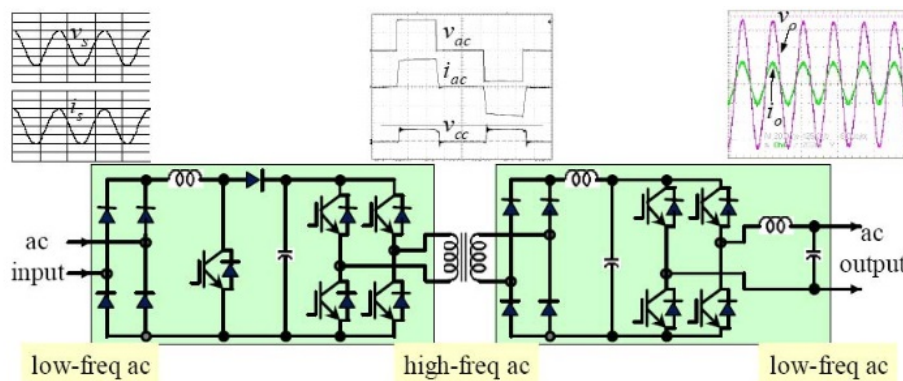
Ο αντιστροφέας, έχοντας ως είσοδο την τάση του δευτερεύοντος του ζυγού συνεχούς ρεύματος, παράγει την απαιτούμενη εναλλασσόμενη κυματομορφή, όπου η συχνότητα ξαναπαίρνει την κανονική τιμή της, 50/60 Hz. (Μονοφασική όπως στο σχήμα (2.1) ή τριφασική) [7]

## 2.3 Δυνατότητες Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος

Πέρα από τον κυρίως σκοπό των μετασχηματιστών που είναι η αλλαγή του επιπέδου της τάσης, ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος παρέχει μια σειρά από δυνατότητες που



Σχήμα 2.1: Τοπολογία Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος 1 [8]



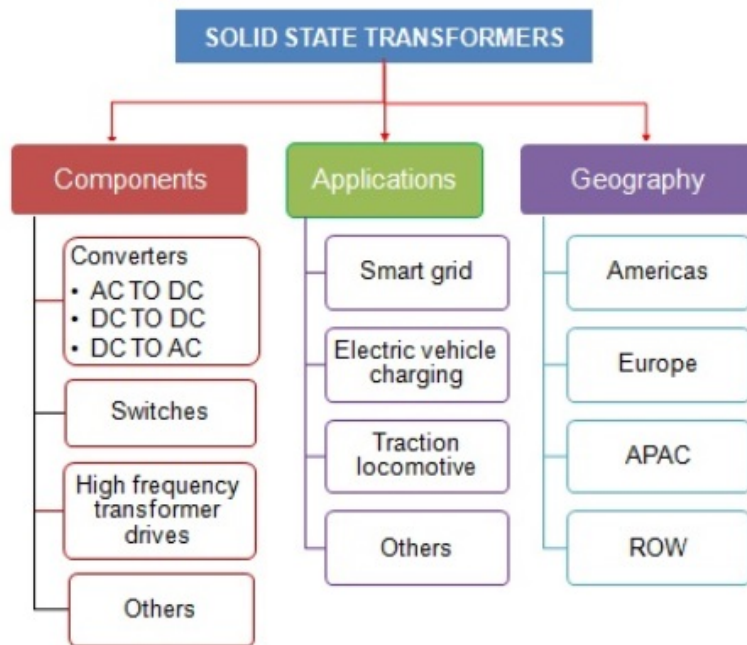
Σχήμα 2.2: Τοπολογία Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος 2

δεν μπορεί να κάνει ο συμβατικός μετασχηματιστής.

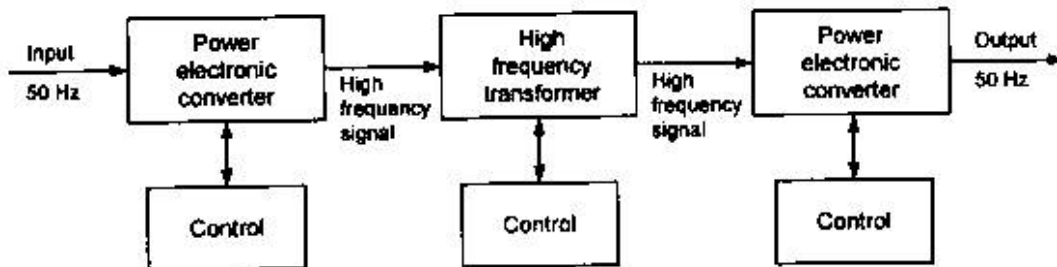
Τα βασικά πλεονεκτήματα του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος είναι η μείωση του βάρους και του μεγέθους, καθώς και η εξάλειψη λαδιών, που οδηγεί σε περιβαλλοντική προστασία [8]. Η μείωση του βάρους και του μεγέθους οφείλεται στην υψηλή συχνότητα κατά τον μετασχηματισμό της τάσης. Όπως είδαμε παραπάνω η τιμή της συχνότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος και το βάρος του μετασχηματιστή. Έτσι ένας μετασχηματιστής με συχνότητα κάποια kHz είναι λογικό να είναι σημαντικά μικρότερος από τον συμβατικό. Πέραν των πλεονεκτημάτων αυτών που οφείλονται στο μετασχηματισμό σε υψηλή συχνότητα, τα ηλεκτρονικά ισχύος παρέχουν πολλές δυνατότητες ελέγχου, μερικές από τις οποίες θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Γενικά με κατάλληλη ρύθμιση των ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπως τα παρακάτω [8]:

- Ρύθμιση τάσης
- Ευστάθεια τάσης
- Ρύθμιση ρεύματος
- Αντιμετώπιση αρμονικών



Σχήμα 2.3: Solid State Transformers



Σχήμα 2.4: Αρχή λειτουργίας SSTs [8]

- Διόρθωση συντελεστή ισχύος
- Καλύτερη ποιότητας ισχύος
- Εξάλειψη λαδιών, που οδηγεί σε περιβαλλοντική προστασία
- Νοημοσύνη, καλύτερη αξιοποίηση συνολικά του δικτύου
- Αμφίδρομη ροή ισχύος

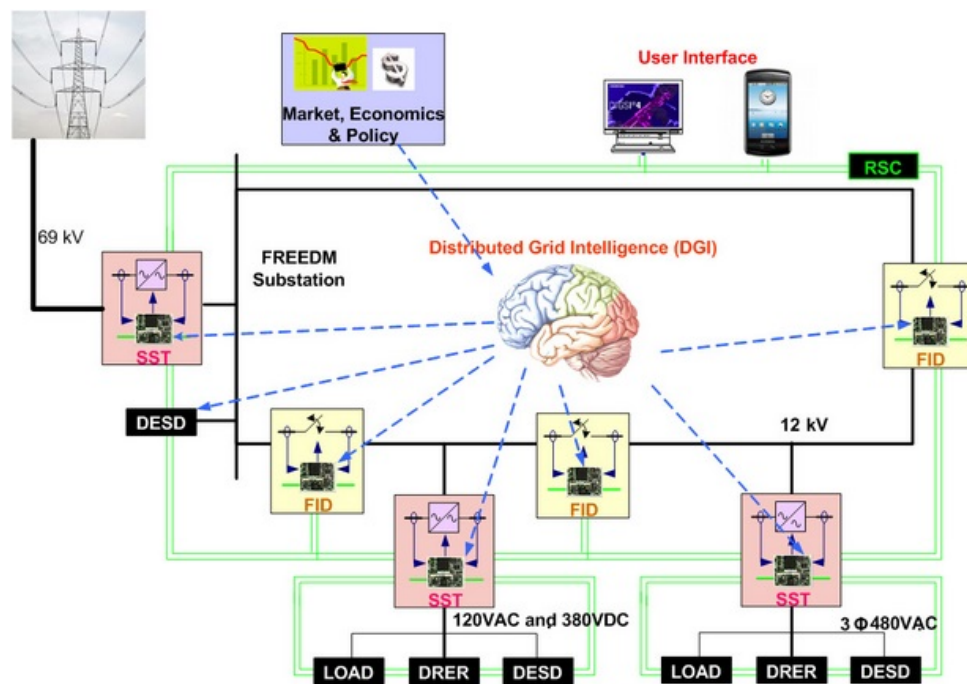
Σήμερα ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος έχει απόδοση 96%-98% . Χαμηλότερη από τον συμβατικό μετασχηματιστή . Όμως θεωρείται ότι βελτιώνει την απόδοση όλου του δικτύου. Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος παρέχει μια εφικτή λύση για την αντικατάσταση του συμβατικού μετασχηματιστή για μια υψηλής αποδόσεως και ευστάθειας ισχύος. Η ποιότητα ισχύος αποκτά όλο και πιο σημαντικό ρόλο λόγω της διείσδυσης στο δίκτυο της διεσπαρμένης παραγωγής, έτσι οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος γίνονται όλο και πιο απαραίτητοι.[9]

## 2.4 FREEDM (Μελλοντικό προηγμένο σύστημα διανομής μέσης τάσης)

Στην αναφορά [10] αναφέρεται ένα σύστημα διανομής βασισμένο στα ηλεκτρονικά ισχύος που οραματίζεται να γίνει ένα αποτελεσματικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Θα ενσωματώνει σε μεγάλο βαθμό κατανεμημένες εναλλακτικές πηγές παραγωγής και αποθήκευσης μαζί με τα υπάρχοντα συστήματα τροφοδοσίας. Σκοπός του συστήματος είναι η ένταξη σε αυτό νέων τεχνολογιών που θα επιτρέπουν μια πιο ευέλικτη αξιοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, που θα έχει ως αποτέλεσμα τη διευκόλυνση ένταξης στο σύστημα πιο πράσινης ενέργειας και μείωσης των επιπτώσεων των εκπομπών άνθρακα στο περιβάλλον. Θα προκαλεί σημαντική βελτίωση ενεργειακής ασφάλειας και αξιοπιστίας. Κυρίαρχο ρόλο στο σύστημα FREEDM θα έχει ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος που θα χρησιμοποιείται για να επιτρέπει την ενεργό διαχείριση ενός διεσπαρμένου συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στη δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος που έχει ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος και δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας έξυπνων δικτύων, μέσω και της ανάπτυξης επικοινωνίας στο συγκεκριμένο σύστημα. [24]

## 2.5 Τεχνολογίες Μετασχηματιστών Ηλεκτρονικών Ισχύος

Στην αναφορά [9] αναφέρεται ότι τα IGBT,IGCT,ETO έχουν υψηλές απώλειες για συχνότητα >1kHz , όμως χρειαζόμαστε μεγαλύτερη συχνότητα για να μειώσουμε ικανοποιητικά τον όγκο του μετασχηματιστή. Σε σειρά συσκευές ισχύος χαμηλής τάσης προκαλούν μεγάλη αυτεπαγωγή. Έτσι προτείνεται post-silicon power devices ( 4H-SiC) για εφαρμογές υψηλής



Σχήμα 2.5: FREEDM [24]

τάσης, το οποίο είναι υλικό με μεγάλο ενεργειακό διάκενο και έτσι έχει μεγαλύτερη ενεργειακή αγωγιμότητα. Για  $10\text{kV} < V < 15\text{kV}$  και  $f > 2\text{kHz}$  προτείνεται MOSFET πυριτίου καρβιδίου (SiC) από IGBT. Όμως για  $V > 15\text{kV}$  προτιμάται IGBT πυριτίου καρβιδίου (SiC).

Καλή επιλογή για μαγνητικό υλικό είναι τα νανοκρυσταλλικά κράματα. Έχουν μικρές απώλειες, ικανοποιητικό κορεσμό και υψηλή διαπερατότητα. Τα μειονεκτήματά του είναι το υψηλό κόστος και η γεωμετρία του πυρήνα. Άλλη καλή επιλογή είναι το κράμα άμορφου σιδήρου, το οποίο έχει λίγο χειρότερες επιδόσεις αλλά χωρίς τα παραπάνω μειονεκτήματα.

Από εφαρμογές που έχουν γίνει [9] έχουμε τα εξής:

1η amorphous core 10KVA, 3.8KV/400V, 3KHz,  $\eta = 97\%$

2η amorphous core 100KVA/20KHz, 100KVA/3KHz, 33,3KVA/20KHz, 33.3KVA/3KHz,  $\eta > 99\%$

3η nanocrystalline core 1MW, 12KV/1,2KV, 20KHz,  $\eta = 99,9\%$

### Θυρίστορ

Το θυρίστορ είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n) το οποίο μπορεί να θεωρηθεί σαν συνδυασμός δύο τρανζίστορ. Όταν στην πύλη του θυρίστορ δεν υπάρχει παλμός έναυσης, ακόμα και αν είναι θετικά πολωμένο, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω του θυρίστορ. Για να μεταβεί το θυρίστορ σε κατάσταση αγωγής, πρέπει στην πύλη του να δοθεί παλμός έναυσης, με την προϋπόθεση ότι το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο. Ένα τέτοιο στοιχείο όταν βρεθεί στην κατάσταση αγωγής, μετά την εφαρμογή του



παλμού έναυσης, θα εξακολουθεί να παραμένει στην κατάσταση αυτή, ακόμα και ο παλμός έναυσης αφαιρεθεί.

### MOSFET

Το MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) είναι ημιαγωγός τριών ακροδεκτών, στον οποίο η πύλη ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή και η υποδοχή. Το MOSFET ονομάζεται ημιαγωγός τάσης, επειδή η τάση καθορίζει ποιο σημείο λειτουργίας θα επιλεγεί σε αντίθεση με τους ημιαγωγούς ρεύματος, όπου το ρόλο αυτό παίζει το ρεύμα βάσης.

### IGBT

Το IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) προέκυψε σαν ένας συνδυασμός μεταξύ των χαρακτηριστικών του MOSFET ισχύος και του τρανζίστορ ισχύος. Έτσι, μπορεί να λειτουργεί σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες από το τρανζίστορ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χειρισθεί υψηλότερες τάσεις και ρεύματα από ένα MOSFET. [11]

### GTO

Το GTO (Gate Turn-off Thyristor) είναι ένας ειδικός τύπος θυρίστορ. Είναι ημιαγωγός υψηλής ισχύος. Σε αντίθεση με τα κανονικά θυρίστορ, είναι πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες, που μπορούν να ενεργοποιηθούν και να απενεργοποιηθούν από την πύλη.

### IGCT

Το IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor) είναι ημιαγωγός ηλεκτρονικών ισχύος, που χρησιμοποιείται για τη μεταγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος σε βιομηχανικό εξοπλισμό. Είναι παρόμοιο με το GTO, καθώς και αυτό είναι πλήρως ελεγχόμενος διακόπτης.

### ETO

Το ETO (Turn Off Thyristor) είναι ένας τύπος θυρίστορ που χρησιμοποιεί MOSFET για να ενεργοποιηθεί και να απενεργοποιηθεί. Συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο του GTO όσο και του MOSFET. Έχει δύο πύλες, μία κανονική πύλη για την ενεργοποίηση και μία σε σειρά MOSFET για την απενεργοποίηση.

## 2.6 Έλεγχος μέσω των Μετασχηματιστών Ηλεκτρονικών Ισχύος και Αντιστροφείς Πηγής Τάσης

Με τους μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας περνάει στους αντιστροφείς και όχι στις στρεφόμενες μάζες των μηχανών που συνδέονται στο δίκτυο. Το δίκτυο διανομής δεν διαθέτει στρεφόμενες μηχανές και έτσι απόκειται στον

---

έλεγχου των αντιστροφών να υποκαταστήσει την δυναμική που έχει ένα διασυνδεδεμένο σύστημα με στρεφόμενες μηχανές.

Στα παραδοσιακά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, η ισορροπία (ή μάλλον ανισορροπία) της ισχύος φαίνεται στη ρύθμιση συχνότητας, συχνά με έναν πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή έλεγχο. Σε ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να διατηρείται η ισορροπία ισχύος για μια σταθερή λειτουργία. Ανισορροπίες στο σύστημα συνεχούς ρεύματος αντισταθμίζονται από την αποθήκευση της ενέργειας στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος, κυρίως με κάποιον πυκνωτή, προκαλώντας μια απόκλιση του προφίλ τάσης από το αρχικό σημείο. Ως εκ τούτου, η τάση συνεχούς ρεύματος συμπεριφέρεται ως ένα μέτρο για την ισορροπία ισχύος συνεχούς ρεύματος, παρόμοια με την συχνότητα σε ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος. Μια σημαντική διαφορά είναι η πτώση τάσης στο διασκορπισμένο σύστημα συνεχούς ρεύματος που προκαλεί διαφορετική τάση σε σημεία πάνω τους διαφορετικούς κόμβους συνεχούς ρεύματος, σε αντίθεση με παρόμοια περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου η συχνότητα είναι σχεδόν σταθερή σε όλο το σύστημα.

Ο συμβατικός μετασχηματιστής παραδοσιακά κάνει έλεγχο τάσης είτε με tap changes στο πρωτεύον είτε με Static Var-Compensators στο δευτερεύον. Στην πρώτη περίπτωση, τα tap changes έχουν έναν ελεγκτή που επιτρέπει να αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού της τάσης. Με τα tap changers επιτρέπεται η σωστή παρακολούθηση της τάσης του φορτίου στο δίκτυο. Ωστόσο ο έλεγχος τάσης που βασίζεται με tap changes αντιπροσωπεύει μια κεντροποιημένη μέθοδο και δεν επιτρέπει έναν ευέλικτο έλεγχο της τάσης στους διάφορους ζυγούς του δικτύου. Επιπλέον, επιτρέπεται περιορισμένος αριθμός διαφορετικών τάσεων και το εύρος της τάσης που μπορεί να ελεγχθεί είναι περιορισμένο. Έτσι, οι συσκευές αυτές δεν είναι καλές για το βέλτιστο και γρήγορο έλεγχο τάσης, όπου ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά είναι η διεύθυνση των εξαιρετικά ευμετάβλητων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σε ό, τι αφορά το Static VAR Compensator, παρέχουν έναν συνεχή ή διακριτό έλεγχο με την έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο. Αυτό έχει μια τοπική επίδραση στο προφίλ της τάσης των ζυγών όπου αυτές οι συσκευές συνδέονται. Επιπλέον, λόγω της μη αμελητέας αναλογίας  $R/$  των γραμμών του δικτύου διανομής, ο έλεγχος της τάσης απαιτεί τον έλεγχο ενεργού ισχύος πέραν του ελέγχου αέργου ισχύος.

Όλα τα παραπάνω ζητήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς μπορεί να ελέγξει την παροχή ισχύος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής και τη διαχείριση της υπερφόρτισης ρεύματος ταυτόχρονα. Μπορεί να προσφέρει πολλές υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως ο έλεγχος της τάσης, αύξηση της παρουσίας κατανεμημένων πηγών παραγωγής, μείωση των ρευμάτων και των απωλειών στις γραμμές διανομής, και τη μείωση των αρμονικών. Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος μπορεί να λειτουργήσει ως διεπαφή μεταξύ των επιπέδων τάσης όντας σημείο κεντρικού ελέγχου του δικτύου

για το δίκτυο χαμηλής τάσης και ταυτόχρονα ένα σημείο ελέγχου για τα συστήματα υψηλότερης τάσης. Τέλος, ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος προσφέρει τη βέλτιστη διαχείριση των αρμονικών, που δημιουργούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αποφεύγει την έγχυση αρμονικών, λόγω του φυσικού διαχωρισμού του κυκλώματος από το υπόλοιπο δίκτυο.

Σε ένα δίκτυο με πηγές ηλεκτρονικών μετατροπέων η παροχή ισχύος στην έξοδο πρέπει να έχει τα χαρακτηριστικά που είναι αναγκαία για την τροφοδότηση των φορτίων. Οι αντιστροφείς πηγής παραλληλίζονται μέσω του δικτύου. Η επικοινωνία μεταξύ των αντιστροφείων γίνεται μέσω της συχνότητας, οπότε το μόνο μέσο επικοινωνίας είναι το ίδιο το δίκτυο. Ο έλεγχος συχνότητας με στατισμό (droop control) επιτρέπει σε κάθε γεννήτρια στο δίκτυο να μοιράζεται το φορτίο ενεργού ισχύος με τις υπόλοιπες με βάση την δική της χαρακτηριστική ενεργού ισχύος-συχνότητας. Η ρύθμιση της τάσης επιτυγχάνεται χάρη στην δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος από τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος.

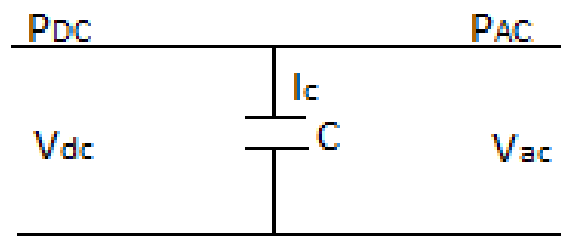
Οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος, χάρη στους αντιστροφείς, δίνουν τη δυνατότητα μεγαλύτερης ευελιξίας στον έλεγχο παροχής ισχύος προς το δίκτυο διανομής. Είναι αντιστροφείς με εξαναγκασμένη και όχι φυσική μεταγωγή έτσι ώστε να μπορούν να παρέχουν ισχύ με οποιοδήποτε συντελεστή ισχύος επαγωγικό ή χωρητικό. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Αντιστροφείς πηγής τάσης, οι οποίοι δημιουργούν μια καθορισμένη κυματομορφή τάσης στην έξοδο τους. Η πλευρά συνεχούς ρεύματος διατηρεί σταθερή την τάση με τη βοήθεια ενός πυκνωτή. Η κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος του ρεύματος καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του επιβαλλόμενου φορτίου.
- Αντιστροφείς πηγής ρεύματος, οι οποίοι παρέχουν μια καθορισμένη κυματομορφή ρεύματος στην έξοδο. Η πλευρά συνεχούς ρεύματος διατηρείται σε σταθερό ρεύμα με τη χρήση ενός πηνίου. Η τάση εξόδου καθορίζεται τώρα από το φορτίο.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης εφαρμόζονται κυρίως σε διατάξεις μέσης και χαμηλής τάσης, οπότε αυτοί είναι που μας ενδιαφέρουν περισσότερο.

Μεταβάλλοντας το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος το μέτρο της τάσης εξόδου μπορεί να αλλάξει, ενώ μεταβάλλοντας την συχνότητα του ημιτονοειδούς σήματος ελέγχεται η συχνότητα, κεντρικός έλεγχος (master control) ή η γωνία της τάσης εξόδου και η ενεργός ισχύς, στατισμός (droop control). Έτσι μπορούμε να ρυθμίζουμε την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται από τους μετατροπείς, με την προϋπόθεση φυσικά ότι υπάρχει επαρκής εφεδρεία.

Η φυσική σύζευξη ισχύος-συχνότητας δεν υπάρχει στην περίπτωση του αντιστροφέα, καθώς



Σχήμα 2.6

παράγεται μια κυματομορφή τάσης συγκεκριμένης συχνότητας και μέτρου από τον κεντρικό ελεγκτή. Μια αλλαγή στη φόρτιση ενεργού ισχύος δεν επηρεάζει τη συχνότητα της παραγόμενης τάσης. Η σχέση μεταξύ ισχύος και συχνότητας έχει αντικατασταθεί στον αντιστροφέα πηγής τάσης με τη σχέση ενεργού ισχύος στο ΕΡ και τάσης στο ΣΡ. Η ενεργός ισχύς στην έξοδο της πλευράς ΕΡ ισούται με την ισχύ στην είσοδο της πλευράς ΣΡ πλην την ισχύ φόρτισης του πυκνωτή, (2.6).

$$P_{AC} = P_{DC} + \frac{\partial W_c}{\partial t} = P_{DC} + CV_{dc} \frac{\partial V_{dc}}{\partial t} \quad (2.2)$$

Ο πυκνωτής είναι αυτός που αντισταθμίζει ενδεχόμενη αύξηση στην ισχύ του φορτίου έως ότου η ισχύς αυτή καλυφθεί από το δίκτυο. Η συχνότητα μένει σταθερή παρόλο που ο αντιστροφέας πλέον παράγει αυξημένη ισχύ. Μεταβολή του φορτίου συνεπάγεται την μεταβολή της τάσης ΣΡ. Ο ρυθμιστής του ανορθωτή (ή του αντιστροφέα) αναλαμβάνει να κρατήσει την τάση του πυκνωτή σταθερή.

Σε περίπτωση παράλληλης σύνδεσης δύο μετατροπέων ισχύος είναι απαραίτητη η αποκατάσταση της σχέσης ενεργού ισχύος και συχνότητας προκειμένου να γίνεται σωστά ο καταμερισμός ενεργού ισχύος. Ο έλεγχος σε κάθε αντιστροφέα, εκτός από τον κεντρικό ελεγκτή, αποκαθιστά την σχέση αυτή.

Κατά τον ίδιο τρόπο εξασφαλίζεται η σχέση μεταξύ αέργου ισχύος και τάσης. Ο έλεγχος της συχνότητας και της τάσης επιτυγχάνεται έχοντας ως είσοδο την ενεργό ισχύ και την άεργο ισχύ και με βάση τις κλίσεις των χαρακτηριστικών P-f, Q-V βγαίνει η επιθυμητή τιμή. [12]

Οι μικροπηγές στις οποίες η διαθεσιμότητα της πρωτογενούς πηγής είναι συνεχής, όπως οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της συχνότητας στο μικροδίκτυο, στο οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια, αλλά και της τάσης ρυθμίζοντας

τα ποσά αέργου ισχύος. Αυτές οι πηγές ονομάζονται πηγές δημιουργοί του δικτύου. Χάρη σε αυτές μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο και οι μονάδες που ελέγχονται από σταθερές τιμές παραγωγής P,Q όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι οι μικροπηγές μπορούν να μοιράζονται κατάλληλα το φορτίο του συστήματος χωρίς να υπάρχει η ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων. Οι πηγές δημιουργοί του δικτύου είναι απαραίτητο να είναι πηγές τάσης.

Οι χαρακτηριστικές P-f σχηματίζονται σύμφωνα με την συνθήκη

$$k_{p1}\Delta P_1 = k_{p2}\Delta P_2 = \dots = k_{pn}\Delta P_n = \Delta f = f_0 - f_{ref} \quad (2.3)$$

Αντίστοιχα επιμερίζεται και η άεργος ισχύς με τον έλεγχο σύμφωνα με τη χαρακτηριστική Q-V.

Οι βασικές διαφορές ελέγχου της τάσης με αντιστροφέα και με σύγχρονη μηχανή είναι η ταχύτερη απόκριση στην πρώτη περίπτωση

$$V = -k_q Q / (1 + sT) \quad T \text{ η σταθερά χρόνου του φίλτρου} \quad (2.4)$$

και ότι με τον αντιστροφέα δεν ελέγχεις μόνο το μέτρο της τάσης αλλά και την μορφή της κυματομορφής της.

Ο έλεγχος μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος αποτελείται από δύο στάδια. Ο εξωτερικός ελέγχει την τάση ΣΡ και ΕΡ του ανορθωτή, καθώς και τη τάση ΕΡ και συχνότητα στην πλευρά του αντιστροφέα. Στόχος του είναι να παράγει το ρεύμα αναφοράς για τον πιο γρήγορο εσωτερικό ελεγκτή που κάνει έλεγχο στο ρεύμα. Η ενεργός ισχύς στην έξοδο πρέπει να είναι ίση με την ενεργό ισχύ στην είσοδο μείον τις απώλειες, αλλιώς η τάση ΣΡ αλλάζει δραστικά. Οπότε είναι απαραίτητος ο έλεγχος στην τάση ΣΡ. Σκοπός του εσωτερικού ελεγκτή είναι να παράξει την ελεγχόμενη τάση. Στον εξωτερικό ελεγκτή το  $u_{Ld} = 0$  και το  $u_{Lq}$  είναι ίσο με την ονομαστική τάση. Έτσι ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$P_{ac}^{(dq)}(t) = u_{Lq} \dot{v}_{vq}^*(t) \quad (2.5)$$

$$Q_{ac}^{(dq)}(t) = u_{Lq} \dot{v}_{vd}^*(t) \quad (2.6)$$

Από τις οποίες βγαίνει το ρεύμα αναφοράς για τον εσωτερικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής τάσης ΣΡ εφαρμόζεται σαν PI ελεγκτής.

Ο ελεγκτής συχνότητας είναι αναλογικός (για να διατηρεί τη συχνότητα σε αποδεκτό εύρος) και ολοκληρωτικός (για να εξαλείφει το σφάλμα). Τέτοιος ελεγκτής συχνότητας χρησιμοποιείται σε συστήματα που δεν υπάρχει άλλη πηγή με ελεγκτή συχνότητας.

Ο ρυθμιστής τάσης EP εφαρμόζεται σαν PI ελεγκτής. Η τάση ρυθμίζεται από το d-component του ρεύματος.

Από αποτελέσματα προσομοίωσης, [13], βλέπουμε ότι το όριο του ρεύματος επηρεάζει σημαντικά τη δυναμική του συστήματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος στην πλευρά του δικτύου. Για ένα επαρκώς υψηλό όριο ρεύματος του ελεγκτή είναι σε θέση να διατηρήσει την τάση και τη συχνότητα PCC σε τιμές προ-εκδήλωση του. Όταν αυτό το όριο είναι χαμηλότερο τότε υπάρχει μείωση συχνότητας και πτώση της τάσης. Ακόμη και για την χειρότερη περίπτωση με το χαμηλότερο όριο ρεύματος ( $I_{lim} = 1, 0I_{load}$ ) και με βουτιά τάσης μεγέθους 0, 1pu η ελάχιστη τάση EP στο PCC εξακολουθεί να διατηρείται πάνω από 0.86pu.

## 2.7 Βραχυκυκλώματα

Βραχυκύκλωμα, ή απλώς σφάλμα, λέγεται η επαφή οποιουδήποτε υπό τάση τμήματος του δικτύου με το έδαφος ή με γειωμένα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων, όπως επίσης και η επαφή δύο διαφορετικών υπό τάση τμημάτων, με διαφορετικές τάσεις μεταξύ τους. Τα βραχυκυκλώματα κανονικά εκδηλώνονται ως απότομες υπερεντάσεις πολλαπλάσιας τιμής από τα κανονικά ρεύματα λειτουργίας του δικτύου. Η διέλευση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης από τους αγωγούς του συστήματος προκαλεί δυναμικές και θερμικές καταπονήσεις του συστήματος με επιβλαβείς συνέπειες. [2]

Σύμφωνα με τον κλασικό τρόπο υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκυκλώματος είναι απαραίτητη η εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin, και υπολογίζεται από τον τύπο:

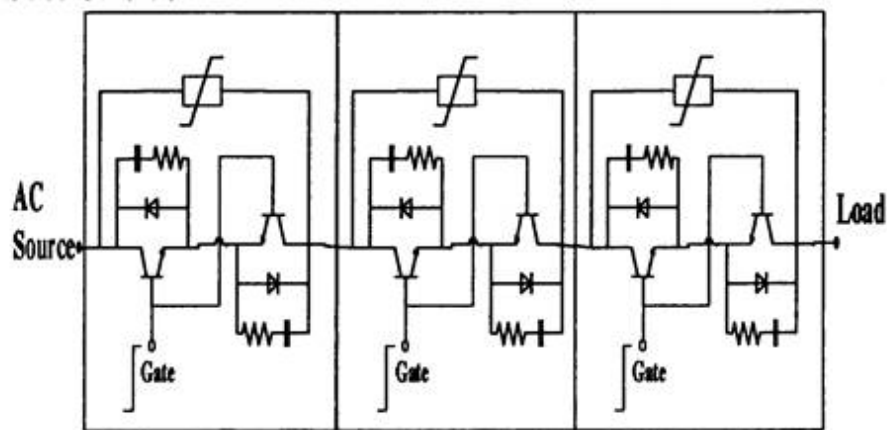
$$I_{\beta\rho} = \frac{V}{Z_{th}} \quad (2.7)$$

όπου  $V$  είναι η τάση στο σημείο του βραχυκυκλώματος.

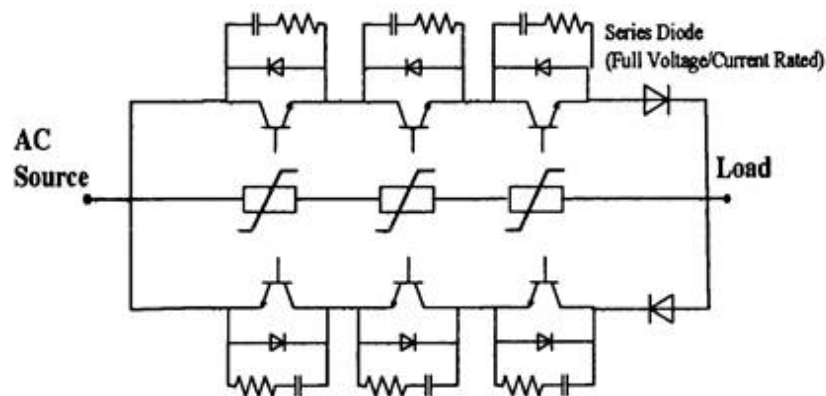
Όμως τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι πολύ ευαίσθητα για να αντέξουν ρεύματα πολλαπλάσιας τιμής από τα κανονικά. Το ρεύμα στο δίκτυο δε θα πρέπει να ξεπερνάει την ανώτατη τιμή ρεύματος που μπορούν να αντέξουν τα ηλεκτρονικά ισχύος,  $I_{lim}$ .

Έτσι στο συγκεκριμένο σύστημα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μηχανικός διακόπτης, ο οποίος χρειάζεται αρκετές περιόδους και μεγάλη ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας προκειμένου να καθαρίσει ένα σφάλμα. Στο συμβατικό σύστημα διανομής δεν υπάρχει περιοριστής ρεύματος γι' αυτό δεν υπάρχει μεγάλη πτώση τάσης στο σύστημα.

Στην περίπτωση όμως που το σύστημα έχει μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος χρειάζεται διαφορετικούς διακόπτες. Ο SSFID (solid state fault isolation device) μπορεί να παρέχει το περιορισμό ρεύματος σε ολόκληρο το σύστημα, ώστε να προστατευθούν τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετασχηματιστή. Για να περιορίσει το ρεύμα σφάλματος κατεβάζει σημαντικά



Σχήμα 2.7: Τοπολογία SSFID με τα IGBTs σε σειρά



Σχήμα 2.8: Τοπολογία SSFID με τα IGBTs παράλληλα

την τάση του συστήματος. Έτσι ο διακόπτης πρέπει να αποσυνδέσει το τμήμα με το σφάλμα ώστε ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος να επαναφέρει γρήγορα την τάση.

Για γρήγορη απομόνωση του σφάλματος χρειαζόμαστε διακόπτες ημιαγωγών. Ένας απλός τρόπος σχεδιασμού ενός SSFID είναι με θυρίστορ. Ο διακόπτης θα κλείσει το ρεύμα όταν το ημίτονο θα περνά από το μηδέν. Δεδομένου ότι οι μετασχηματιστές ισχύος έχουν συχνότητες ενδεχομένως και δεκάδων kHz, ο διακόπτης θα κλείσει σε μερικά  $\mu s$ . Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν GTOs, IGBTs ή IGCTs για την κατασκευή του SSFID ο καθαρισμός του σφάλματος γίνεται ακόμα πιο γρήγορα. [10]

Το μειονέκτημα των συγκεκριμένων διακοπών είναι το αυξημένο κόστος των υλικών του.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος, ένα βραχυκύκλωμα πρέπει αμέσως να μπλοκαριστεί μετά την ανίχνευση υπερτάσεων μέσα από τις αντιπαράλληλες διόδους ή από τα θυρίστορ παράκαμψης. Αυτή η εγγενής προστασία μετατροπέα μπορεί να διαταράξει τη συνολική τάση στην πλευρά συνεχούς ρεύματος και, ενδεχομένως, να διαταράξουν την ισορροπία της κατανομής της τάσης κατά μήκος των πυκνωτών, ανάλογα με τις τοπολογικές ιδιότητες του μετατρο-

πέα. Κατά συνέπεια, οι μηχανισμοί ελέγχου ενεργοποιείται ώστε να εξισορροπήσουν την κατανομή της τάσης κατά μήκος των πυκνωτών στη πλευρά συνεχούς ρεύματος, για παράδειγμα, μπλοκάροντας για λίγο την ισχύ εξόδου και σταδιακά επαναφέροντάς την. Ως εκ τούτου, το χρονοδιάγραμμα αυτού του μηχανισμού προστασίας κυμαίνεται από αρκετά  $\mu s$  έως  $10s$ .

Επίσης το ρεύμα περιορίζεται εσωτερικά από το σύστημα ελέγχου. Το σύστημα ελέγχου ορίζει το ενεργό ( $i_d$ ) και άεργο ( $i_q$ ) τμήμα του ρεύματος. Αν το πλάτος του ρεύματος υπερβαίνει το οριακό ρεύμα ( $\sqrt{i_d^2 + i_q^2} > |i|_{max}$ ), το ρεύμα πρέπει να περικοπεί, το οποίο μπορεί να γίνει με τον περιορισμό αναλογικά ή δίνοντας προτεραιότητα είτε στο ενεργό είτε στο άεργος μέρος. Η προτεραιότητα στον d-άξονα μεγιστοποιεί την ενεργή ισχύς του μετατροπέα σε περίπτωση ταραχών, ενώ η προτεραιότητα στον q-άξονα μεγιστοποιεί την υποστήριξη της τερματικής τάσης. Αυτή η ασυνεχής συμπεριφορά έχει ένα χρονικό πλαίσιο  $1ms$  έως και αρκετά  $s$ .

## 2.8 Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος

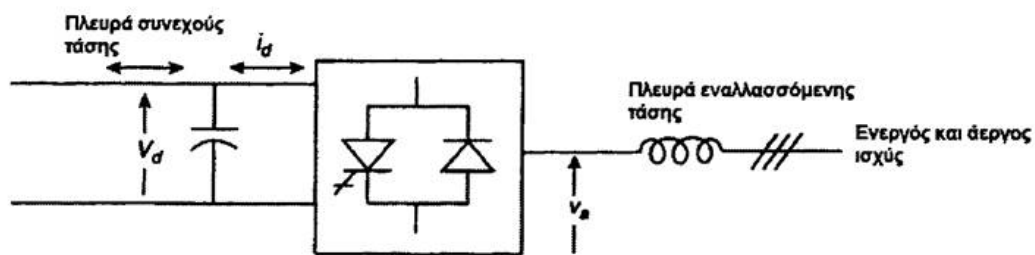
Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος παραδοσιακά γίνεται με τη χρήση εγκάρσιων πυκνωτών. Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει φέρει στο προσκήνιο τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς τα οποία λόγω ταχύτερης απόκρισης παρουσιάζουν καλύτερη δυναμική συμπεριφορά από τους μηχανικά συνδεδεμένους πυκνωτές.

Η μεταφερόμενη ισχύς μιας γραμμής μεταφοράς είναι συνάρτηση της επαγωγικής αντίδρασης της, του μέτρου της τάσης αναχώρησης και άφιξης και της μεταξύ τους γωνίας. Ελέγχοντας έτσι έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες, είναι δυνατόν να ελέγξουμε την ενεργό και την άεργο ισχύ σε μια γραμμή μεταφοράς.

Είναι συνήθης πρακτική στα συστήματα ισχύος να εγκαθίστανται εγκάρσιοι πυκνωτές για να διατηρούν την τάση του συστήματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Μέχρι πρόσφατα οι συσκευές στα συστήματα μεταφοράς ελέγχονταν μηχανικά για αυτό και ήταν σχετικά αργές. Είναι πολύ χρήσιμες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου η χρονική απόκριση είναι πολύ αργή και μπορεί να προκαλέσει μεταβατικές ταλαντώσεις. Αν τα μηχανικά συστήματα ελέγχου ήταν κατασκευασμένα για να ανταποκρίνονται ταχύτερα, η ασφάλεια των συστημάτων ισχύος θα ήταν αρκετά βελτιωμένη, επιτρέποντας τη πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος, διατηρώντας παράλληλα σε ικανοποιητικά επίπεδα τα όρια ευστάθειας. Η πρόοδος στα ηλεκτρονικά ισχύος ήταν η λύση για την αποδοτικότερη χρήση των ήδη υπαρχόντων πόρων στα ΣΗΕ, επιτρέποντας την αξιοποίηση και επέκταση των δυνατοτήτων μεταφοράς.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος δίνουν τη δυνατότητα για χρόνους απόκρισης πολύ μικρότερους από





Σχήμα 2.9: Τοπολογία μετατροπέα πηγής τάσης

1 δευτερόλεπτο. Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν ως κύριους στόχους τις κατά το δυνατόν μειωμένες διακοπτικές απώλειες και απώλειες μετάδοσης. Ημιαγωγικοί διακόπτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα θυρίστορ και τα IGBTs.

Οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως είδαμε και παραπάνω, μπορούν να χωριστούν σε μετατροπείς πηγής τάσης ή ρεύματος. Οι μετατροπείς ρεύματος χρησιμοποιούν συμβατικά θυρίστορ χωρίς τη δυνατότητα ελεγχόμενης σβέσης. Οι μετατροπείς τάσης αποτελούνται από συμβατικά θυρίστορ, GTOs θυρίστορ ή IGBTs. Για οικονομικούς λόγους και λόγους απόδοσης έχει επικρατήσει η χρήση μετατροπέων τάσης. Οι μετατροπείς τάσης στην ουσία μετατρέπουν συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Για ιστορικούς λόγους έχει επικρατήσει να λέγονται αντιστροφείς παρά το γεγονός ότι έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι μετατροπείς τάσης ελέγχουν τη φασική γωνία, τη συχνότητα και το μέτρο της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου της. Το σχήμα (2.9) απεικονίζει τον βασικό τρόπο λειτουργίας του μετατροπέα πηγής τάσης. Η συνεχής τάση του μετατροπέα παρέχεται από έναν πυκνωτή (ή συστοιχία πυκνωτών). [14] [15]



## Κεφάλαιο 3

# Μικροδίκτυα, Διεσπαρμένη Παραγωγή, Αποθήκευση Ενέργειας

### 3.1 Μικροδίκτυα

#### 3.1.1 Περιγραφή

Τα μικροδίκτυα (Microgrids) είναι ένα είδος συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που στο μέλλον αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο. Τα μικροδίκτυα αποτελούνται από μικρές μονάδες παραγωγής (μικροπηγές) όπως μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου ή φωτοβολταϊκά στοιχεία σε συνδυασμό με μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, σφόνδυλοι) αλλά και ελεγχόμενα φορτία. Τα παραπάνω λειτουργούν στη χαμηλή τάση, είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ισχύος είτε αποσυνδεδεμένα από το κεντρικό δίκτυο σχηματίζοντας μία νησίδα.

Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ), διεσπαρμένης αποθήκευσης (ΔΑ) και συνδυασμός διεσπαρμένης παραγωγής / αποθήκευσης (ΔΠ+ΔΑ) αποτελούν την ευρύτερη οικογένεια των διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων (ΔΕΠ). Ένα μικροδίκτυο είναι ένα τμήμα ενός ηλεκτρικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μονάδες ΔΕΠ και αναμένεται να παραμείνει σε λειτουργία μετά το διαχωρισμό από το σύστημα.

Στην περίπτωση του προγραμματισμένου σχηματισμού μικροδικτύου, η κατάλληλη κατανομή του φορτίου του μικροδικτύου μεταξύ των μονάδων της ΔΠ και του κυρίως δικτύου μπορεί να προγραμματιστεί πριν από την νησιδοποίηση. Έτσι, η διαδικασία νησιδοποίησης έχει ως αποτέλεσμα ελάχιστα μεταβατικά και το μικροδίκτυο συνεχίζει τη λειτουργία του, έστω και ως ένα αυτόνομο σύστημα. Το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος λειτουργεί στην πραγματικότητα σαν μικροδίκτυο. [16]

Τα μικροδίκτυα, αυτόνομα τμήματα του συστήματος με παραγωγή λίγων MW ή και λιγότερο,

με ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα κέντρα φορτίου, και με δυνατότητα τοπικής αποθήκευσης ενέργειας μπορεί πραγματικά να ενσωματωθούν με την υπάρχουσα υποδομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς σημαντική τροποποίηση για ολόκληρο το σύστημα.

Ουσιαστικά τα μικροδίκτυα είναι μικρογραφίες των μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρουσία των μικροδικτύων παρ' όλη την πολυπλοκότητα που εισάγει σε ότι αφορά την λειτουργία του δικτύου χαμηλής τάσης, παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Οι περισσότερες μικροπηγές συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων οι οποίοι τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν σημαντική εξέλιξη λόγω της σχετικής έρευνας τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι σύγχρονοι αντιστροφείς δίνουν την δυνατότητα να ελεγχθούν πάρα πολλές λειτουργίες όπως η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος, οπότε ελέγχουν την τάση και τη συχνότητα του δικτύου.

Τα μικροδίκτυα αποτελούν τμήμα μίας γενικότερης τάσης για αλλαγή του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων ανά τον κόσμο που ουσιαστικά οφείλεται στην γενίκευση της διεσπαρμένης παραγωγής.

Η ευρεία διασύνδεση μικροπηγών συνδεδεμένων μέσω ηλεκτρονικών ισχύος προσφέρει σημαντική ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, αλλά και εισάγει σημαντική πολυπλοκότητα στην λειτουργία του μικροδικτύου δεδομένου ότι οι πηγές αυτές στην πλειονότητα τους δεν διαθέτουν στρεφόμενες μάζες (αδράνεια) για τον έλεγχο της συχνότητας. Έτσι, με τον κατάλληλο συντονισμό και διαχείριση μικροπηγών, συστημάτων αποθήκευσης και φορτίων είναι δυνατή η αποδοτική λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Στο σχήμα (3.1) εμφανίζονται τυπικές μονάδες μικροδικτύου.

### 3.1.2 Τεχνολογίες Παραγωγής

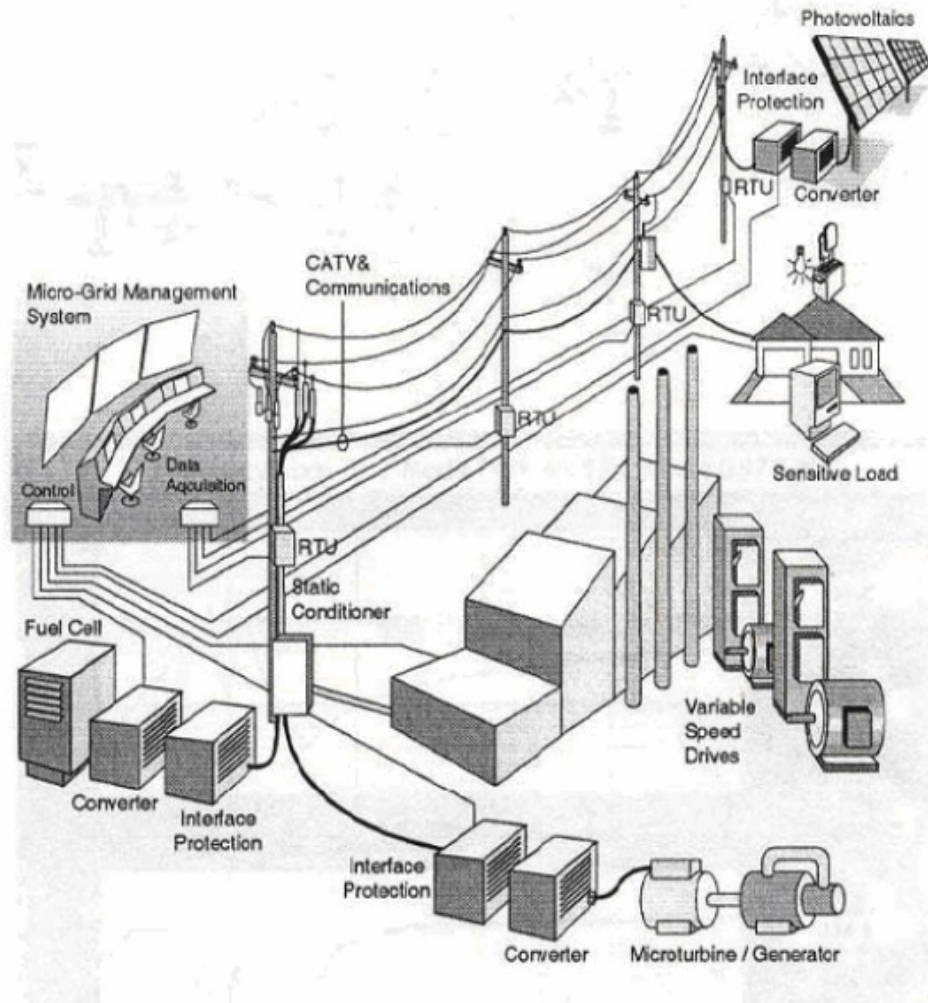
Οι μονάδες παραγωγής είναι βασικό στοιχείο των μικροδικτύων.

#### Μικροτουρμπίνες

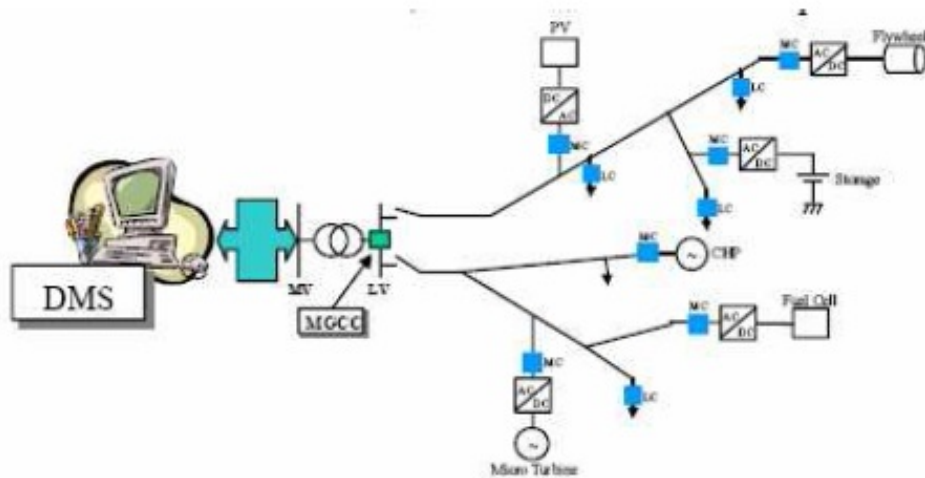
Οι μικροτουρμπίνες κυμαίνονται σε ισχείς από 20 έως 100kW. Η τεχνολογία τους προέρχεται από τις βοηθητικές μονάδες ισχύος (auxiliary power unit -APU) και η μηχανολογική τους λειτουργία είναι απλή με ότι αυτό συνεπάγεται σε θέματα διάρκειας ζωής και απαιτήσεων συντήρησης. Το καύσιμό τους είναι κυρίως το φυσικό αέριο, ωστόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και πετρέλαιο ή προπάνιο.

#### Κυψέλες Καυσίμου

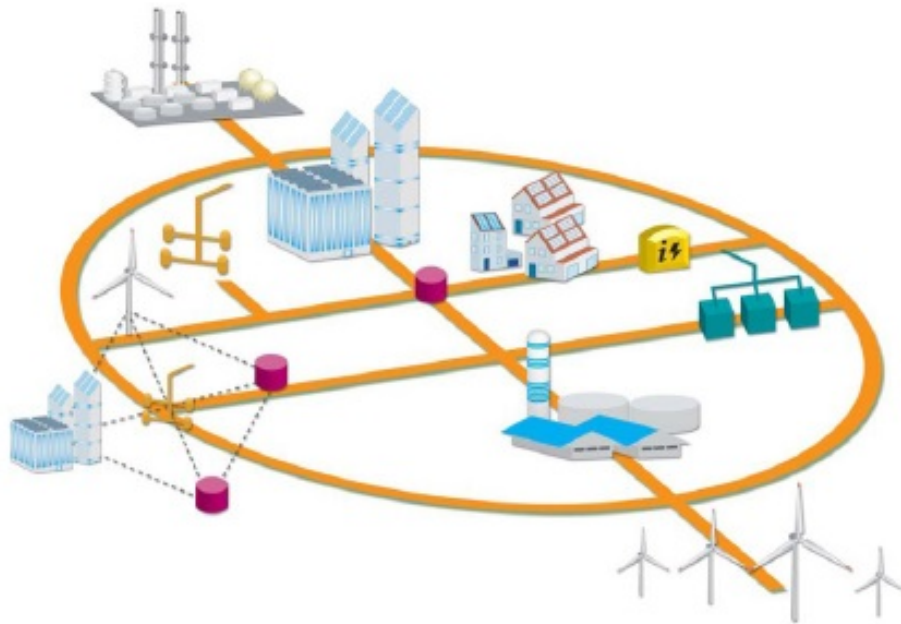
Οι κυψέλες καυσίμου είναι μία τεχνολογία που υπόσχεται πολλά τόσο στα μικροδίκτυα όσο και στον γενικότερο χώρο της διεσπαρμένης παραγωγής. Η κυψέλη καυσίμου (fuel cell) είναι



Σχήμα 3.1: Τυπικό μικροδίκτυο 1



Σχήμα 3.2: Τυπικό μικροδίκτυο 2



Σχήμα 3.3: Τυπικό μικροδίκτυο 3

μια ηλεκτροχημική διάταξη που μετατρέπει απευθείας την χημική ενέργεια των καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια. Το καύσιμο που τροφοδοτεί τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να είναι υδρογόνο ή θεωρητικά οποιοδήποτε άλλο συμβατικό καύσιμο αποτελούμενο από υδρογονάνθρακες. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση λειτουργίας αλλά το βασικό τους πρόβλημα αυτή την στιγμή είναι το υψηλό τους κόστος.

### Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι σημαντικό τμήμα ενός μικροδικτύου και η παραγωγή βασίζεται κυρίως σε φωτοβολταϊκά στοιχεία αλλά και μικρές ανεμογεννήτριες. Επιπλέον θα μπορούσαν να περιληφθούν και συμβατικές μονάδες που λειτουργούν με βιοκαύσιμα.

### Αποθήκευση Ενέργειας

Το βασικό πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί εύκολα σε εκτεταμένη κλίμακα. Σχεδόν όλη η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα είναι ταυτόχρονη με την παραγωγή της. Ωστόσο για την λειτουργία των μικροδικτύων εφόσον αυτά περιλαμβάνουν μεγάλη παραγωγή για το μέγεθός τους από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η παρουσία μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτή της ηλεκτροχημικής μετατροπής και αποθήκευσης της ενέργειας σε συσκευές που ονομάζονται ηλεκτρικοί συσσωρευτές (κοινώς μπαταρίες) και κυρίως μπαταρίες μολύβδου οξέος. Περισσότερα για τις μπαταρίες θα ανα-

φερθούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης αποθήκευση μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες μεθόδους:

- με πεπιεσμένο αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES) όπου ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για την συμπίεση ποσότητας αέρα η οποία στη συνέχεια κινώντας έναν θερμοστρόβιλο παράγει ηλεκτρική ενέργεια.
- Με σφονδύλους (flywheels). Πρόκειται για διατάξεις όπου μέσω ενός κινητήρα –γεννήτριας μπορεί να γίνει αποθήκευση με την μορφή κινητικής ενέργειας σε μια στρεφόμενη μάζα.
- Με υπεραγώγιμες διατάξεις. Εφαρμογές με διατάξεις που χρησιμοποιούν υγρό ήλιο είναι ήδη σε εμπορική εκμετάλλευση ενώ διατάξεις υγρού αζώτου αναμένονται στο άμεσο μέλλον.
- Με διατάξεις άντλησης. Η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιείται για άντληση νερού σε υψηλότερη υψομετρική στάθμη. Κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια παράγεται όταν ζητηθεί με έναν υδροστρόβιλο.

### 3.1.3 Τεχνική Λειτουργία του Μικροδικτύου

Η εισαγωγή μονάδων παραγωγής στο επίπεδο της χαμηλής και μέσης τάσης δεν είναι απλό θέμα από τεχνικής πλευράς. Δημιουργούνται μία σειρά από τεχνικά ζητήματα που θα πρέπει να μελετηθούν.

#### Μεταβολές στην Τάση Δικτύου

Για κάθε δίκτυο διανομής έχουν τεθεί συγκεκριμένα όρια για την τάση. Το πλέον επικίνδυνο σενάριο από την παρουσία μικροπηγών στο επίπεδο της χαμηλής και μέσης τάσης είναι η πιθανότητα η τάση να υπερβεί τα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Το σενάριο αυτό θα συμβεί στην περίπτωση που το φορτίο τοπικά είναι στο ελάχιστο και παράλληλα έχουμε σημαντική παραγωγή. Το πρόβλημα εντείνεται στη χαμηλή τάση δεδομένου ότι εκεί η τιμή της αντίστασης των καλωδίων είναι σχετικά μεγάλη οπότε στην τιμή της τάσης εμπλέκεται και η ενεργός ισχύς.

#### Ποιότητα Ισχύος

Η ποιότητα της ισχύος είναι ένα σημαντικό θέμα στην εισαγωγή των μικρομονάδων στο δίκτυο. Η ποιότητα ισχύος περιλαμβάνει μία σειρά από φαινόμενα όπως: μεταβολή της τάσης, απότομη αλλαγή της τάσης, διακύμανση της τάσης, φλίκερ (ταλαντώσεις στη συχνότητα συντονισμού του ανθρώπινου ματιού  $\sim 10$ ), προσωρινή υπέρταση, αρμονικές στην τάση, προσωρινή ασυμμετρία στην τάση.



Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να προέλθουν από την παρουσία στρεφόμενων μηχανών, ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και από απότομη σύνδεση ή αποσύνδεση μονάδων.

### Προστασία

Η προστασία των συσκευών του μικροδικτύου είναι ένα σύνθετο θέμα αφού αφορά τόσο την λειτουργία των υπάρχουσών προστασιών αλλά και των αλλαγών που θα πρέπει να γίνουν στο σύστημα διανομής. Ειδικότερα θα πρέπει να μελετηθεί το θέμα των γειώσεων, των προστασιών που θα πρέπει να έχουν οι μονάδες αλλά και τη λειτουργία του συστήματος σε κατάσταση νησίδας. Στο βραχυκύκλωμα το ρεύμα δεν είναι  $V/Z$ , αλλά καθορίζεται από το  $I_{lim}$  των ηλεκτρονικών ισχύος.

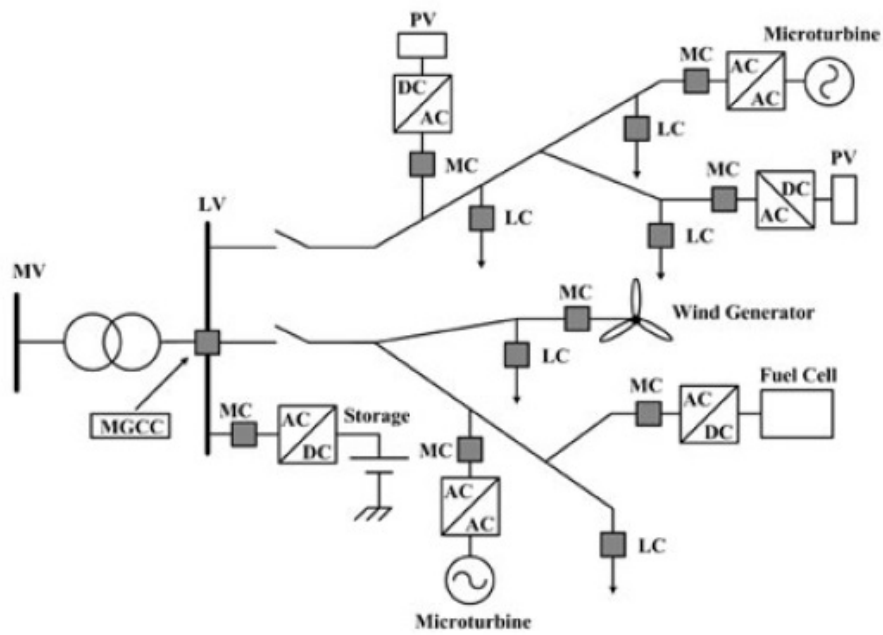
#### 3.1.4 Αρχιτεκτονική Μικροδικτύου

Ο έλεγχος του μικροδικτύου βασίζεται στην ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου. Ένας Κεντρικός Ελεγκτής (MicroGrid Central Controller (MGCC)) εγκαθίσταται στην πλευρά της XT ενός υποσταθμού MT / XT διαχειριζόμενη σε ένα ανώτερο επίπεδο τη λειτουργία του μικροδικτύου μέσω διαφόρων λειτουργιών ζωτικής σημασίας. Σε ένα δεύτερο επίπεδο ιεραρχίας κάθε μικροπηγή και κάθε μονάδα αποθήκευσης τοπικά ελέγχεται από έναν ελεγκτή μονάδος και κάθε ηλεκτρικό φορτίο ή ομάδα φορτίων ελέγχεται από έναν ελεγκτή φορτίου. Αυτοί οι ελεγκτές ανήκουν στους τοπικούς ελεγκτές (Local Controllers (LC)). Μια υποδομή επικοινωνίας πρέπει επίσης να παρέχεται ούτως ώστε να διασφαλίζεται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του MGCC και των άλλων ελεγκτών.

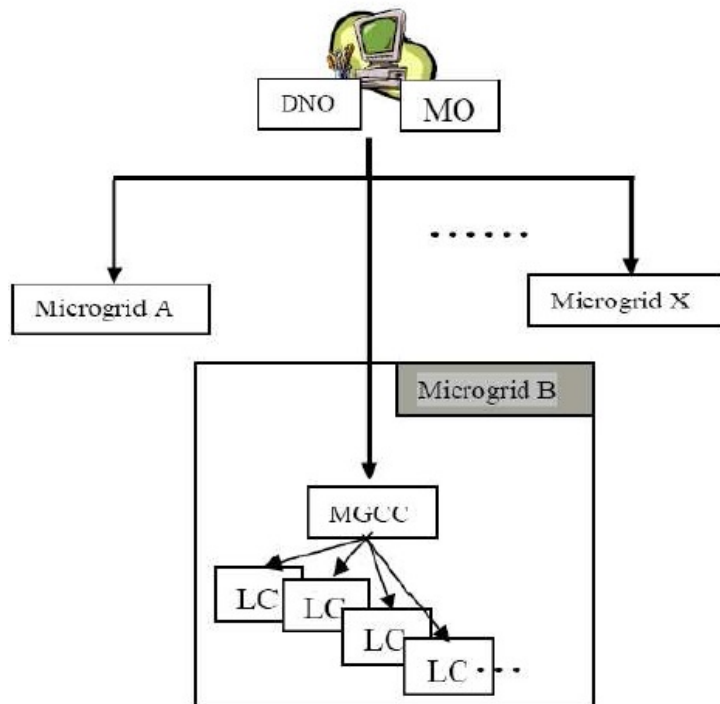
Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μονάδων ελέγχου έχει ως εξής: το MGCC προωθεί τις κατάλληλες τεχνικές πολιτικές διαχείρισης και παρέχει σημεία αναφοράς στον ελεγκτή φορτίου και στον ελεγκτή μονάδος. Ο ελεγκτής φορτίου θα ενεργήσει βασιζόμενος σε διακοπτική αντίληψη και ο ελεγκτής μονάδος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των μικροπηγών όσον αφορά τα επίπεδα της ενεργού και αέργου παραγωγής ισχύος. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η ποσότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των διαφόρων ελεγκτών δικτύου είναι μικρή, δεδομένου ότι περιλαμβάνει κυρίως μηνύματα με σημεία αναφοράς σε LC και MC, καθώς και οι πληροφορίες που απέστειλε το MGCC σε LC και MC για την ενεργό και άεργο ισχύς και τα επίπεδα τάσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που διευκολύνει τη δημιουργία των υποδομών επικοινωνίας είναι η μικρή γεωγραφική έκταση του μικροδικτύου. Το σύστημα επικοινωνίας μπορεί να χρησιμοποιήσει είτε επικοινωνία μέσω γραμμής ισχύος είτε άλλου τύπου επικοινωνία, όπως ασύρματη. [17]

Το μικροδίκτυο μέσω του MGCC επικοινωνεί με το Διαχειριστή Δικτύου Διανομής το οποίο ανήκει στο δίκτυο. Ο Διαχειριστής Δικτύου Διανομής είναι υπεύθυνος για την τεχνική λειτουργία του συστήματος στην χαμηλή και μέση τάση. Στο κομμάτι αυτό του δικτύου μπορεί να υπάρχουν περισσότερα του ενός μικροδίκτυα.





Σχήμα 3.4: Δομή μικροδικτύου



Σχήμα 3.5: Επίπεδα ελέγχου μικροδικτύου

## 3.2 "Αυτόνομο" δίκτυο με έλεγχο συχνότητας και τάσεως

### 3.2.1 Έλεγχος Μικροδικτύου

Το μικροδίκτυο είναι ένα δίκτυο που βασίζεται σε ηλεκτρονικούς μετατροπείς, όπου ο έλεγχος των ηλεκτρονικών ισχύος είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσης.

Υπό κανονικές συνθήκες, τα μικροδίκτυα συμμετέχουν συνδεδεμένα σε λειτουργίες του συστήματος παροχής τροφοδοσίας, συμβάλλοντας περίσσεια ενέργειας, παρέχοντας βοηθητικές υπηρεσίες, ή παίρνοντας ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα. Υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης, τα μικροδίκτυα μπορούν να διαχωριστούν, ή νησιδοποιηθούν, από το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα και να λειτουργούν ανεξάρτητα, εντός των ορίων.

Όταν το μικροδίκτυο λειτουργεί σε νησί, δύο είναι οι κύριες στρατηγικές ελέγχου που μπορούν να γίνουν :

- Κεντρικός ελεγκτής (master control): Ένας μετατροπέας πηγής τάσης που συνδέεται άμεσα με το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τάση αναφοράς. Όλοι οι υπόλοιποι μετατροπείς μπορούν να λειτουργούν σε λειτουργία σταθερής ισχύος.
- Στατισμός (Droop control) : Περισσότερα από ένας μετατροπείς λειτουργούν ως μετατροπείς πηγής τάσης, που αντιστοιχεί σε ένα σενάριο με διάσπαρτες μονάδες αποθήκευσης, άλλοι PQ μετατροπείς μπορεί επίσης να συνυπάρχουν.

Όσο το μικροδίκτυο λειτουργεί διασυνδεδεμένο, όλοι οι μετατροπείς λειτουργούν σε λειτουργία σταθερής ισχύος. Ωστόσο, μια ξαφνική αποσύνδεση της κύριας παροχής ενέργειας (δίκτυο MT) θα οδηγήσει στην απώλεια του μικροδικτύου, δεδομένου ότι δεν θα υπάρχει δυνατότητα εξισορρόπησης φορτίου-παραγωγής, και ως εκ τούτου, για έλεγχο συχνότητας και τάσης. Η μονάδα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη αυτών των απαιτήσεων είναι ο μετατροπέας πηγής τάσης. Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες ελέγχου μέσω droop ρυθμίσεων προσαρμογής, ο μετατροπέας πηγής τάσης μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με το κύριο δίκτυο, χωρίς την έγχυση ενεργού ή άεργου ισχύος. Όταν η αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο συμβεί, η έξοδος του μετατροπέα πηγής τάσης καθορίζεται αυτόματα από την απόκλιση μεταξύ του φορτίου και της παραγωγής στο μικροδίκτυο.

Ο μετατροπέας πηγής τάσης έχει τη δυνατότητα να μιμηθεί τη συμπεριφορά μιας συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας. Αντιδρά με διαταραχές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (για παράδειγμα, καταστάσεις ροής φορτίου ή τις διακυμάνσεις του ανέμου) βασιζόμενο μόνο στις πληροφορίες που διατίθενται τοπικά στους ακροδέκτες του μετατροπέα (μετρήσεις τάσης και ρεύματος). Για την προώθηση του κατάλληλου δευτερογενούς ελέγχου με στόχο την

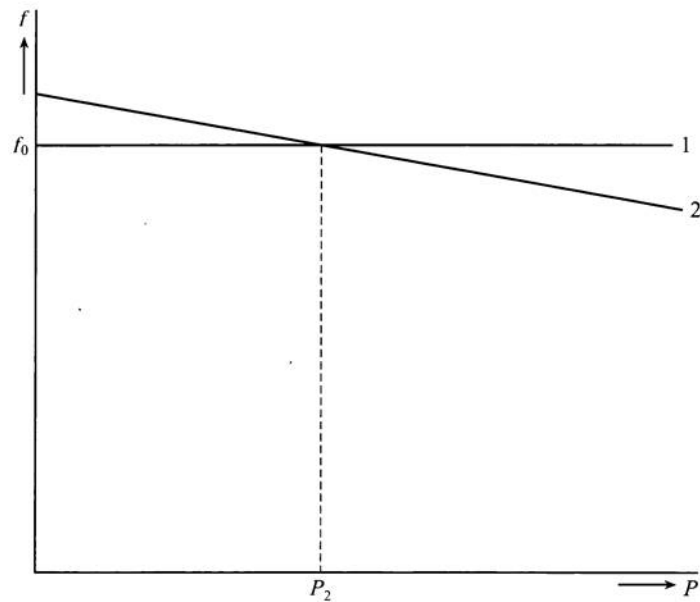
αποκατάσταση της συχνότητας στην ονομαστική τιμή μετά τη διαταραχή, δύο κύριες στρατηγικές μπορούν να ακολουθηθούν: τοπικός δευτερογενής έλεγχος, χρησιμοποιώντας έναν τοπικό ελεγκτή PI σε κάθε μικροπηγή, ή το κεντροποιημένο δευτερογενή έλεγχο ελεγχόμενο από το MGCC. [18]

### Κεντρικός Ελεγκτής

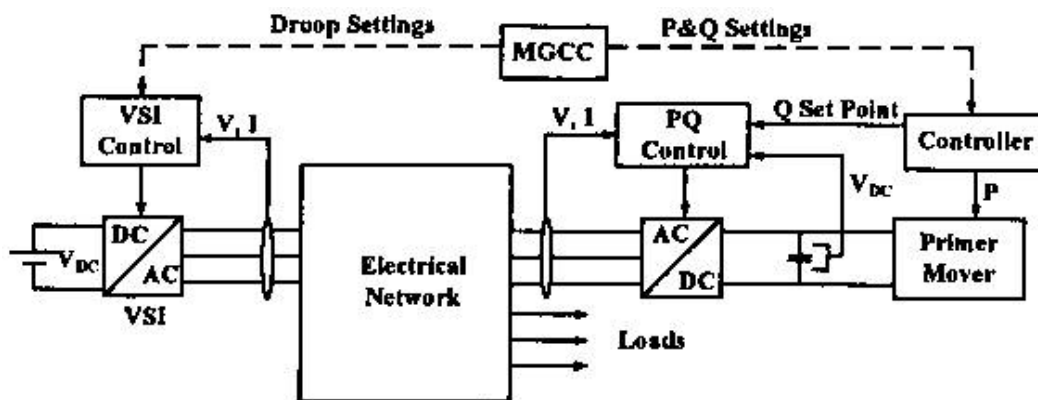
Στην περίπτωση αυτή, ο μετατροπέας πηγής τάσης (που ενεργεί ως "master") συνδέεται με το δίκτυο, οι υπόλοιπες μικροπηγές συνδέονται με το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα με PQ σύστημα ελέγχου("slaves"). Οι ρυθμίσεις του μετατροπέα πηγής τάσης μπορούν να τροποποιηθούν από το MGCC ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας και προκειμένου να αποφευχθούν μεγάλες διακυμάνσεις της συχνότητας. Έτσι ο κεντρικός ελεγκτής ασκεί επίπεδο έλεγχο συχνότητας. Οποιαδήποτε αύξηση του φορτίου θα καλυφθεί από τον μετατροπέα πηγής τάσης που ενεργεί ως "master" και ο οποίος έχει μηδενικό στατισμό, δηλαδή η αύξηση της παραγωγής του δεν θα επηρεάσει την τιμή της συχνότητας. Οι υπόλοιπες μικροπηγές θα έχουν συγκεκριμένη παραγωγή καθώς με συγκεκριμένη συχνότητα θα μπορούν να παράγουν ορισμένη ισχύ. Η εξασφάλιση μιας μηδενικής απόκλισης συχνότητας κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε νησιδοποιημένης λειτουργίας θα πρέπει να θεωρείται ο βασικός στόχος για οποιαδήποτε στρατηγική έλεγχου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό δεδομένου ότι οι συσκευές αποθήκευσης έχουν περιορισμένη χωρητικότητα και είναι απαραίτητη η αποφυγή έγχυσης (ή απορρόφησης) ενεργού ισχύος κάθε φορά που η απόκλιση συχνότητας διαφέρει από το μηδέν. Ένα τέτοιο σύστημα λειτουργεί καλά για μικρότερα συστήματα, αλλά έχει τα μειονεκτήματα ότι, στην περίπτωση της διακοπής του "master" μετατροπέα, ένας νέος "master" πρέπει να πάρει τη θέση του. Ένα δεύτερο μειονέκτημα είναι ότι αυτός ο "master" μετατροπέας λαμβάνει το βάρος κάλυψης οποιαδήποτε περαιτέρω ζήτησης ισχύος και ιδιαίτερα σε περίπτωση που το σύστημα βιώσει σημαντικές αλλαγές ισχύος, όπως εάν υπάρξει κάποια διακοπή μετατροπέα.

### Στατισμός

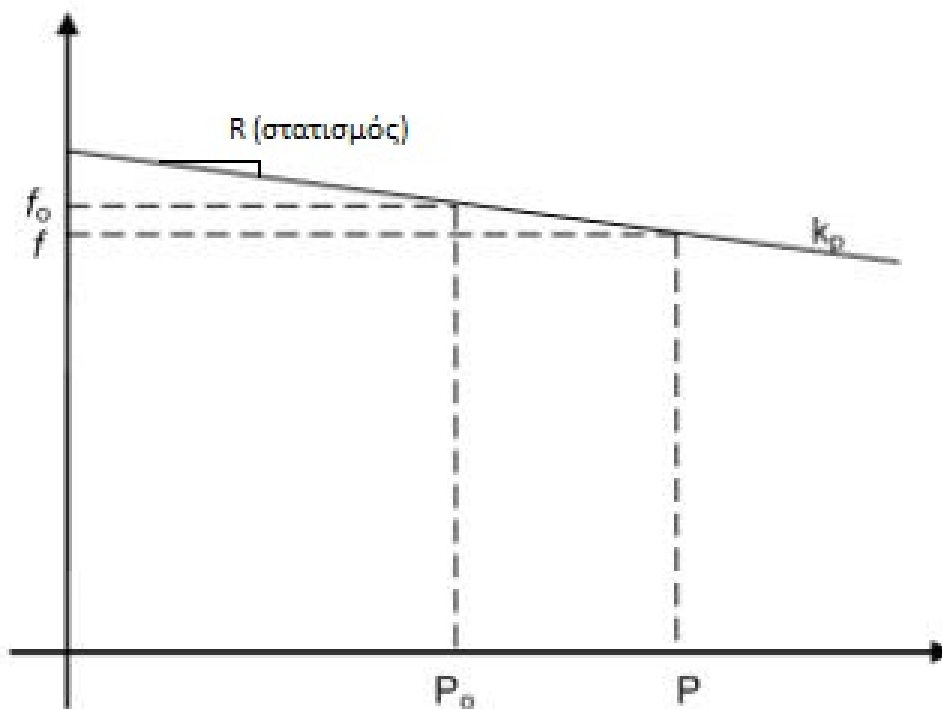
Ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου είναι η συνεργασία όλων των μετατροπέων για να μοιραστούν ενδεχόμενη αύξηση της ζήτησης ισχύος. Αυτό μπορεί να γίνει με την εφαρμογή ενός ελέγχου στατισμού. Αυτός ο ελεγκτής ρυθμίζει την έγχυση ενέργειας με ανάλογο τρόπο σε περίπτωση που εμφανιστεί ανισορροπία. Στο στατισμό, αρκετοί μετατροπείς λειτουργούν ως μετατροπείς πηγής τάσης με προκαθορισμένες χαρακτηριστικές P-f και Q-V. Και άλλοι PQ-ελεγχόμενοι μετατροπείς μπορούν επίσης να συνυπάρχουν. Η διόρθωση των αποκλίσεων της συχνότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αλλαγή της τιμής της συχνότητας αναφοράς όπως χρησιμοποιείται στις σύγχρονες γεννήτριες που καθορίζουν αναλογικά/ολοκληρωτικά τη συχνότητα. Ο στατισμός είναι χρήσιμος όταν θέλουμε να επιτρέπεται αυτόματα η αλλαγή στην παραγωγή ισχύος πολλών πηγών όταν έχουμε δυναμικά με-



Σχήμα 3.6: Παράλληλη λειτουργία δύο πηγών, η πρώτη είναι ο κεντρικός ελεγκτής



Σχήμα 3.7: Κεντρικός Ελεγκτής



Σχήμα 3.8: Έλεγχος μέσω στατισμού

ταβαλλόμενα φορτία. Έτσι σε αυτή την περίπτωση μια αλλαγή στο φορτίο δεν καλύπτεται αποκλειστικά και μόνο από έναν μετατροπέα πηγής τάσης αλλά από περισσότερους, χωρίς όμως κατ' ανάγκη να συμμετέχουν όλοι οι μετατροπείς. Ο στατισμός έχει το πλεονέκτημα της κατανομής των συνεπειών των αποκλίσεων και τον περιορισμό της ατομικής συνεισφοράς. Σε γενικές γραμμές, ο στατισμός των επιμέρους μετατροπέων μπορεί να είναι διαφορετικός κατά μήκος του δικτύου.

### 3.2.2 Στρατηγική Διαχείρισης Ισχύος

Μια Στρατηγική Διαχείρισης Ισχύος (ΣΔΙ) είναι απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία ενός μικροδικτύου με πολλαπλές (πάνω από δύο) μονάδες ΔΠ, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας. Η γρήγορη απόκριση του ΣΔΙ είναι περισσότερο κρίσιμη για ένα μικροδίκτυο σε σύγκριση με ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Οι λόγοι είναι: 1) η παρουσία πολλαπλών μικρών μονάδων ΔΠ με σημαντικά διαφορετικές ικανότητες ισχύος και χαρακτηριστικά παραγωγής, 2) η μη παρουσία κυρίαρχης πηγής παραγωγής κατά τη διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας, 3) η γρήγορη ανταπόκριση των ηλεκτρονικά διασυνδεδεμένων μονάδων ΔΠ, η οποία μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ευστάθειας τάσης / γωνίας αν δεν υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις.

Η ΣΔΙ μικροδικτύου αποδίδει ενεργό και άεργο ισχύ για τις μονάδες ΔΠ για 1) τον αποτελεσματικό μοίρασμα ενεργού/άεργου ισχύος μεταξύ των μονάδων ΔΠ ανάλογα με τις απαι-

τήσεις των φορτίων, 2) γρήγορη ανταπόκριση σε διαταραχές και μεταβατικά, λόγω των αλλαγών στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, 3) τον καθορισμό των σημείων αναφοράς των μονάδων ΔΠ για την εξισορρόπηση ισχύος και την επαναφορά της συχνότητας του συστήματος και 4) τον εκ νέου συγχρονισμό του αυτόνομου μικροδίκτυο με το κύριο δίκτυο για επανασύνδεση. Οι ΣΔΙ μικροδικτύου και οι επιπτώσεις τους στον έλεγχο των μονάδων ΔΠ ούτε έχουν κατανοηθεί πλήρως ούτε διερευνηθεί στην τεχνική βιβλιογραφία.

Δηλαδή ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας του μικροδικτύου 1) συνδεδεμένα με το δίκτυο, 2) νησιδοποίηση ή 3) μετάβαση μεταξύ των δύο τρόπων, η υιοθέτηση της ΣΔΙ έχει άμεσο αντίκτυπο στην λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος όσον αφορά την ευστάθεια τάσης/γωνίας, της ποιότητας ισχύος, και τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών προς τους καταναλωτές. Σε αντίθεση με τη φιλοσοφία της λειτουργίας των διασυνδεδεμένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα σύστημα μικροδικτύου, καμία από τις μονάδες της ΔΠ δεν ενεργεί ως στρεφόμενη εφεδρεία ή ως εφεδρική παραγωγή.

Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία, οι μονάδες ΔΠ αναμένεται να παράσχουν προκαθορισμένη ισχύ, π.χ. για την ελαχιστοποίηση εισαγωγής ισχύος από το δίκτυο (εξομάλυνση των αιχμών). Τέτοιες απαιτήσεις εξαρτώνται από το σύστημα και διαφέρουν από σύστημα σε σύστημα. Στη διασυνδεδεμένη λειτουργία, παρόμοια με ένα συμβατικό σύστημα, κάθε μονάδα της ΔΠ μπορεί να ελεγχθεί για την παραγωγή προκαθορισμένης ποσότητας πραγματικής και άεργης ισχύος (PQ-ζυγός) ή να παράγει προκαθορισμένη πραγματική ισχύ και να ρυθμίζει την τάση του ακροδέκτη (PV-ζυγός). Το δίκτυο αναμένεται να στηρίζει τη διαφορά σε πραγματική/άεργο ισχύ και να διατηρήσει τη συχνότητα.

Στην αυτόνομη λειτουργία, η διαθέσιμη ισχύς των μονάδων της ΔΠ πρέπει να πληρούν το σύνολο των απαιτήσεων του φορτίου του μικροδικτύου. Διαφορετικά, το σύστημα πρέπει να υποβάλλονται σε απόρριψη φορτίου για να ταιριάζει η παραγωγή και η ζήτηση φορτίου. Επιπλέον, γρήγορες και ευέλικτες στρατηγικές ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος απαιτούνται για την ελαχιστοποίηση της δυναμικής του μικροδικτύου π.χ. λόγω νησιδοποίησης και απόσβεσης των ταλαντώσεων του συστήματος. Στις ΣΔΙ με βάση τις τοπικές μετρήσεις σημάτων, χωρίς δηλαδή επικοινωνία μεταξύ των μονάδων ΔΠ, οι έλεγχοι θα πρέπει να λειτουργούν με βάση τις τοπικές πληροφορίες.

Τα βασικά κριτήρια που πρέπει να πληρούνται από τις ΣΔΙ είναι τα εξής:

- Διαμοιρασμός των φορτίων μεταξύ των μονάδων ΔΠ, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τη συνολική απώλεια ισχύος του συστήματος
- Θεώρηση των ειδικών ορίων της κάθε μονάδας ΔΠ, συμπεριλαμβανομένου του τύπου της μονάδας ΔΠ, το κόστος παραγωγής, τη χρονική εξάρτηση από την κύρια πηγή, το διάστημα συντήρησης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις

- Διατήρηση της ποιότητας ισχύος συμπεριλαμβανομένων των προφίλ της τάσης, των διακυμάνσεων τάσης και της αρμονικής παραμόρφωσης
- βελτίωση της δυναμικής απόκρισης, διατηρώντας το περιθώριο ευστάθειας, και αποκατάσταση τάσης/συχνότητας του συστήματος κατά τη διάρκεια και μετά των μεταβατικών

Το σύστημα διαχείρισης ισχύος περιλαμβάνει δύο μέρη: 1) την παραγωγή ενεργού ισχύος που καθορίζει την πραγματική ισχύς εξόδου της μονάδας βασιζόμενη σε διακυμάνσεις συχνότητας στο σημείο κοινής ζεύξης της μονάδας ΔΠ και 2) τον έλεγχο άεργου ισχύος που ρυθμίζει την τάση του αντίστοιχου ζυγού ΔΠ ή αντισταθμίζει την άεργο ισχύ του φορτίου.

### Διαχείριση ενεργού ισχύος

Η παραγωγή ενεργού ισχύος από ηλεκτρονικά διασυνδεδεμένες μονάδες ΔΠ καθορίζεται με βάση τη χαρακτηριστική συχνότητας-ενεργού ισχύος και έναν αλγόριθμο αποκατάστασης συχνότητα. Αυτή η μέθοδος επιλέγεται αφού η συχνότητα του μικροδικτύου, κατά τη διάρκεια της αυτόνομης λειτουργίας, ποικίλει ελεύθερα όταν καμία από τις μονάδες ΔΠ δεν επιβάλλει την βασική συχνότητα του συστήματος. Οι αποκλίσεις συχνότητας περιορίζονται με την εισαγωγή της χαρακτηριστικής συχνότητας-ενεργού ισχύος που χρησιμοποιεί τη συχνότητα του μικροδικτύου ως μέσο επικοινωνίας, μεταξύ των ταχείας δράσης ηλεκτρονικά διασυνδεδεμένων μονάδων ΔΠ, ώστε να εξισορροπεί δυναμικά την παραγωγή ενεργού ισχύος του νησιδοποιημένου μικροδικτύου. Κατά τη διάρκεια της διασυνδεδεμένης λειτουργίας, όπου η συχνότητα του συστήματος είναι σταθερή, η παραγωγή ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΔΠ ελέγχεται από τις αναφορές ενεργού ισχύος των μονάδων.

### Διαχείριση άεργου ισχύος

Οι τρεις στρατηγικές ελέγχου της άεργου ισχύος μιας ηλεκτρικά διασυνδεδεμένης μονάδας ΔΠ είναι 1) η παρεμπόδιση της απόκλισης της τάσης στον τερματικό ζυγό χρησιμοποιώντας μια προκαθορισμένη χαρακτηριστική V-Q, 2) η επίτευξη ρύθμισης της τάσης σε ένα συγκεκριμένο ζυγό φορτίου ή 3) η αντιστάθμιση άεργου ισχύος ενός φορτίου με βάση το συντελεστή ισχύος καθορισμένου σημείου του φορτίου.

## 3.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Ως διανεμημένη ή διεσπαρμένη παραγωγή ή κατανεμημένη παραγωγή (DG-Distributed Generation) μπορεί να ορισθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, εντός ενός δικτύου διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού στην πλευρά του καταναλωτή και όχι στο δίκτυο υψηλής τάσης [16]. Συνήθως στον ορισμό της συμπεριλαμβάνονται και κάποια

βασικά χαρακτηριστικά, όπως η ύπαρξη και εκμετάλλευση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας κ.α. Οι βασικότερες ΑΠΕ είναι οι εξής :

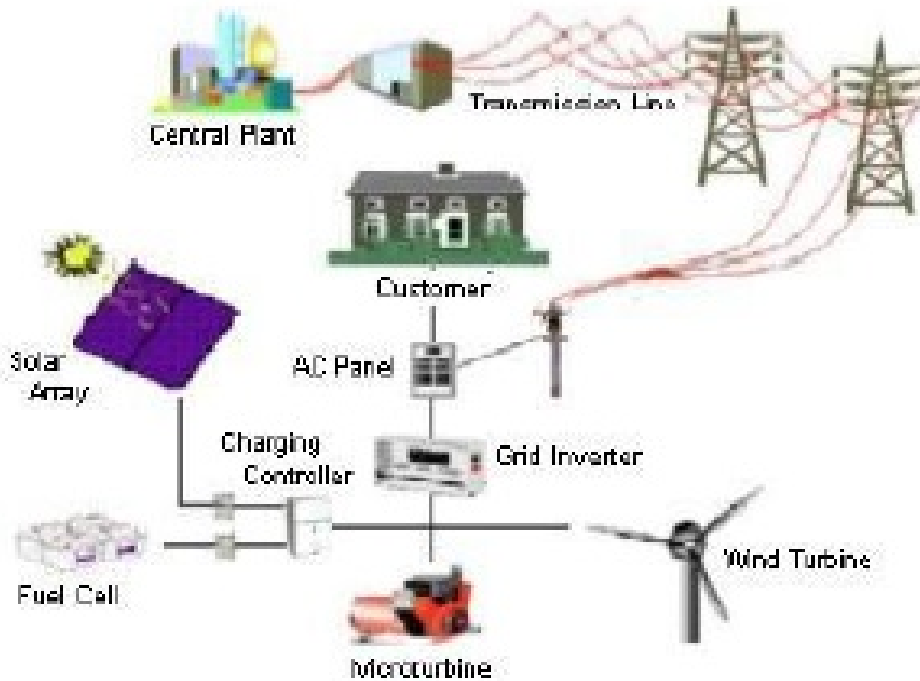
- Μικρά υδροηλεκτρικά
- Βιομάζα
- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Γεωθερμική ενέργεια
- Κυψέλες καυσίμου
- Ενέργεια θαλασσίων κυμάτων

Εκτός από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες, που η λειτουργία τους βασίζεται στη χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως οι τουρμπίνες και οι μικρο-τουρμπίνες αερίου κ.α. Οι εγκαταστάσεις διεσπαρμένης παραγωγής είναι σαφώς μικρότερες σε μέγεθος και ισχύς από τα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να είναι δυνατή η διασύνδεσή τους σχεδόν σε κάθε σημείο του συστήματος διανομής. Η ισχύς των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW αλλά συνήθως είναι της τάξης των kW. Επίσης η κατανομή φορτίου στις εγκαταστάσεις παραγωγής δεν γίνεται κεντρικά.

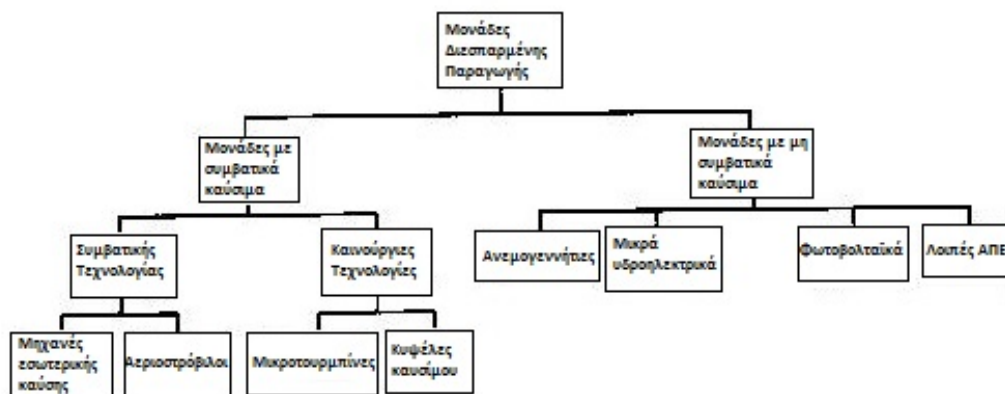
Οι λόγοι που οδήγησαν στη διεσπαρμένη παραγωγή έχουν να κάνουν με τις ανάγκες για:

- Ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος για παροχή εφεδρείας σε περίπτωση διακοπής τροφοδοσίας ή και για ψαλιδισμό αιχμών του καταναλωτή
  - Αυξημένη αξιοπιστία και βελτίωση της παρεχόμενης ποιότητας ισχύος σε τοπικό επίπεδο
  - Μείωση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από ένα απομακρυσμένο κεντρικό σταθμό στο σημείο κατανάλωσης
  - Υποστήριξη δικτύου με βοηθητικές υπηρεσίες όπως είναι η παροχή αέργου ισχύος και υποστήριξης τάσης, η παροχή παραγωγής με γρήγορη απόκριση για αποφυγή διακοπής της κατανάλωσης και η δυνατότητα επανεκκίνησης μετά από διακοπή
  - Εκμετάλλευση συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού η οποία γίνεται σε τοπικό επίπεδο π.χ. σε βιομηχανικές διεργασίες κτλ.
-

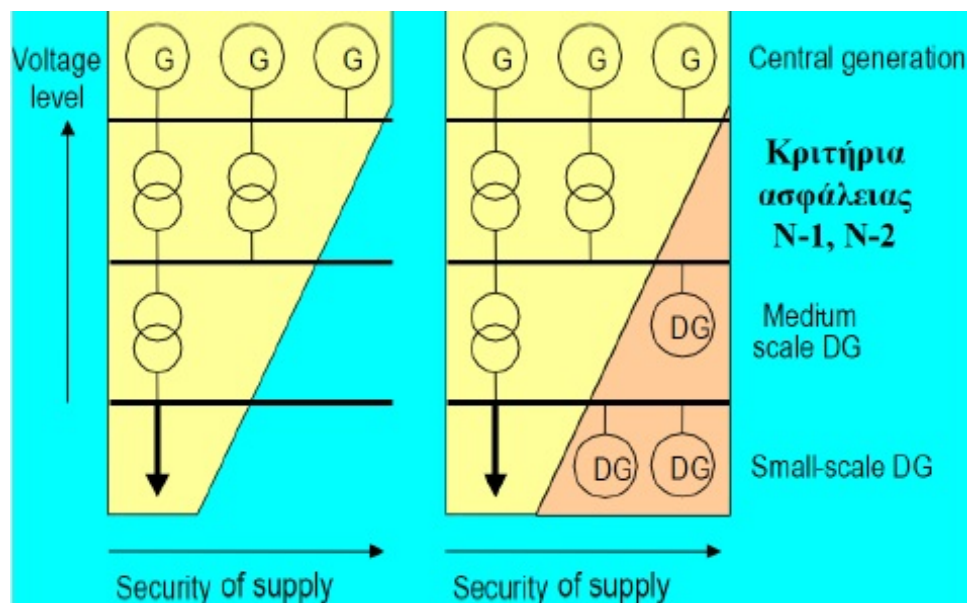




Σχήμα 3.9: Διεσπαρμένη παραγωγή



Σχήμα 3.10: Τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής



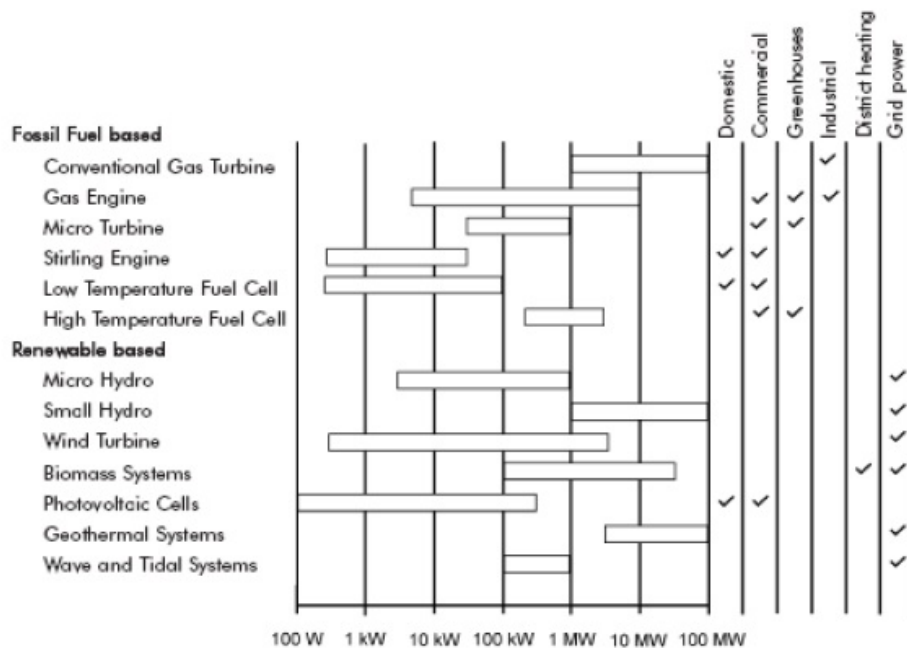
Σχήμα 3.11: Αύξηση της αξιοπιστίας παροχής από την διεσπαρμένη παραγωγή

- Αποτελεσματική χρήση των δυνατοτήτων για φτηνά τοπικά παραγόμενα καύσιμα και η επί τόπου αξιοποίησή τους όπως για παράδειγμα το τοπικά παραγόμενο βιοαέριο στους βιολογικούς καθαρισμούς
- Εξοικονόμηση αρχικού κόστους κεφαλαίου και χρόνου από τη δημιουργία ενός κεντρικού σταθμού παραγωγής
- Μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εξευγενισμένων καυσίμων

### 3.3.1 Τεχνολογίες Διεσπαρμένης Παραγωγής

Οι τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής χωρίζονται ανάλογα με το είδος καυσίμου που χρησιμοποιούν. Έτσι υπάρχουν τεχνολογίες με συμβατικά καύσιμα και τεχνολογίες με μη συμβατικά καύσιμα. Στις πρώτες ανήκουν οι μονάδες εσωτερικής και οι αεριοστρόβιλοι καθώς και νεότερες τεχνολογίες όπως οι κυψέλες καυσίμου και οι μικροτουρμπίνες. Στις δεύτερες ανήκουν οι ανεμογεννήτριες, τα μικρά υδροηλεκτρικά, τα φωτοβολταϊκά και οι λοιπές ΑΠΕ.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σε παγκόσμιο επίπεδο μια αυξανόμενη τάση ανάπτυξης των ΑΠΕ. Η διείσδυση των ΑΠΕ γίνεται με γοργούς ρυθμούς καθώς νέου τύπου ανεμογεννήτριες εγκαθίσταται βελτιώνοντας αισθητά την απόδοση των αιολικών πάρκων και μειώνοντας τα προβλήματα διασύνδεσης τους με το δίκτυο. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα γνωρίζουν μια εντυπωσιακή άνοδο με αισθητή μείωση του κόστους επένδυσης, τα υδροηλεκτρικά παραμένουν μία σταθερή αξία στην ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή, η βιοενέργεια παρέχει



Σχήμα 3.12: Χρήσεις και εύρος ισχύος εξόδου των τεχνολογιών διεσπαρμένης παραγωγής

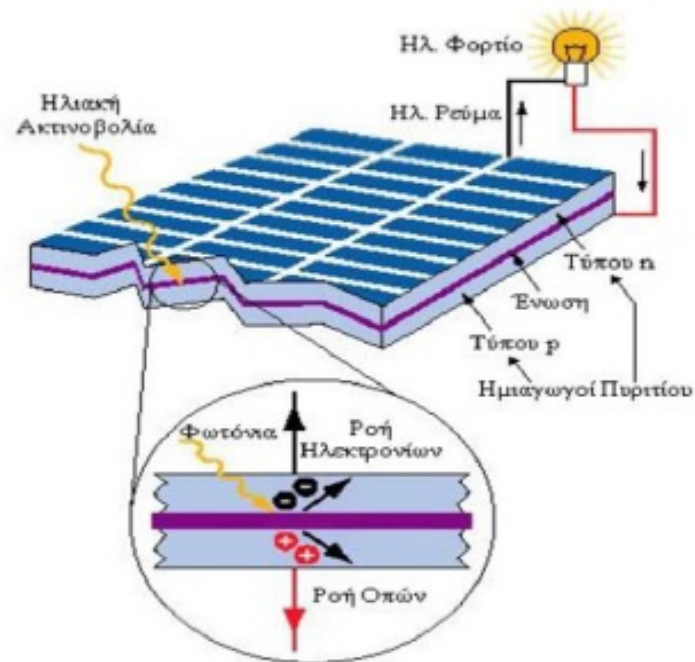
λύσεις για θέρμανση, ισχύ και καύσιμα μεταφορών, και τέλος η γεωθερμία χρησιμοποιείται σε ποικίλες εφαρμογές θέρμανσης και ηλεκτρισμού.

Για τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής με συμβατικά καύσιμα το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το φυσικό αέριο όπου είναι διαθέσιμο ή πετρέλαιο diesel. Για διαφορετικό καύσιμο, άνθρακα, λιγνίτη ή πυρηνική ενέργεια τα μεγέθη εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερα, επομένως τέτοιου είδους μονάδες δεν εμπίπτουν στην διεσπαρμένη παραγωγή. Στις μονάδες νέων τεχνολογιών το καύσιμο είναι στις περισσότερες περιπτώσεις το φυσικό αέριο. Για τις κυψέλες καυσίμου το υδρογόνο προέρχεται από κατάλληλη επεξεργασία του φυσικού αερίου ή από ηλεκτρόλυση του νερού. Αν το υδρογόνο παράγεται από διαδικασίες παραγωγής με τη βοήθεια ΑΠΕ τότε μπορούμε αυτές τις πηγές να τις κατατάξουμε ακόμη και στις ΑΠΕ. Αν στις μικροτουρμπίνες χρησιμοποιείται ως καύσιμο το βιοαέριο, τότε επίσης μπορούμε να τις κατατάξουμε στις μονάδες ΑΠΕ.

### Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ευρέως γνωστά ως ηλιακά πάνελ. Μια συστοιχία από Φ/Β αποτελείται από Φ/Β πάνελ τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από Φ/Β πλαίσια τα οποία περιλαμβάνουν Φ/Β στοιχεία. Τα Φ/Β στοιχεία παράγουν συνεχές ρεύμα (DC) το οποίο στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο (AC). Ο μέγιστος θεωρητικός βαθμός απόδοσης που μπορεί να έχει ένα Φ/Β είναι 0,3, ενώ στην πράξη φθάνει το 0,1.

Η ηλιακή μόνωση (insolation) είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την



Σχήμα 3.13: Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών

διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η ένταση του φωτός και η θερμοκρασία λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Η ένταση του φωτός εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και τις κλιματολογικές συνθήκες της κάθε περιοχής και γενικά αυξάνεται όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στον ισημερινό.

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στο Φ/Β με τη μορφή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη Φ/Β κελιού περνούν αδιατάρακτα την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής.

Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο κομμάτι της επαφής n πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη όπως ένας μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω μέρος της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται. Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών είναι:

- Δεν καταναλώνουν καύσιμο.

- Δεν έχουν κινούμενα μέρη και παράγουν ισχύ αθόρυβα.
- Δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον με αέρια ή με άλλα κατάλοιπα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν αυτόνομα και αξιόπιστα χωρίς την παρουσία κάποιου χειριστή.
- Μπορούν να εγκατασταθούν σε απομονωμένες περιοχές.
- Μπορούν εύκολα να λειτουργήσουν παράλληλα με άλλα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Είναι επεκτάσιμα ανάλογα με τις ανάγκες σε φορτίο.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής(τουλάχιστον 20 ή 30 χρόνια)

Μειονεκτήματά τους είναι το αρχικό κόστος κεφαλαίου και η μικρή απόδοση. Το δεύτερο έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη κάλυψης μεγάλων εκτάσεων όταν το φορτίο που πρέπει να τροφοδοτεί μία Φ/Β συστοιχία είναι μεγάλο. Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυμαίνεται μεταξύ 8% και 12% ανάλογα με την τεχνολογία ενώ το κόστος εγκατάστασης ανέρχεται στα 4200 – 7000€/kW.

Εφαρμογές Φ/Β συστημάτων είναι:

- Τροφοδότηση καταναλωτών μικρής κλίμακας ισχύος όπως τροχόσπιτα, σκάφη αναψυχής, εξωτερικό φωτισμό κήπων.
- Τροφοδότηση απομονωμένων συστημάτων δηλαδή κατοικιών ή άλλων εγκαταστάσεων που χρειάζονται ηλεκτρικό ρεύμα και δεν είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο όπως είναι τα συστήματα τηλεπικοινωνιών, πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου κλπ.
- Μεγάλοι Φ/Β σταθμοί παραγωγής μεγέθους 50kW έως μερικά MW που διοχετεύουν την παραγόμενη ενέργεια απευθείας στο δίκτυο.
- Οικιακά Φ/Β συστήματα μεγέθους 1,5kW έως 20kW, εγκαταστημένα σε στέγες ή πρόσοψεις κατοικιών, τροφοδοτούν τις ανάγκες του κτιρίου σε ηλεκτρικό ρεύμα και διοχετεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια πίσω στο δίκτυο.

### 3.3.2 Έλεγχος Τάσης από Διεσπαρμένη Παραγωγή

Σύμφωνα με οδηγία της IEEE(Institute of Electric and Electronic Engineers) η διεσπαρμένη παραγωγή δεν θα πρέπει να συμμετέχει ενεργά στον έλεγχο της τάσης. Παρόλα αυτά η αναφορά [Narain G.Hingorani] αναγνωρίζει τη πιθανή ευεργετική συνεισφορά της διεσπαρμένης παραγωγής στον έλεγχο της τάσης με την παροχή ή απορρόφηση αέργου ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό χάρη στους μετατροπείς ισχύος

που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των διεσπαρμένων παραγωγών με το δίκτυο. Η διεσπαρμένη παραγωγή ωστόσο δεν παράγει μεγάλες ποσότητες ισχύος οπότε θα μπορούσε κανείς να πει η συνεισφορά της στον έλεγχο της τάσης θα ήταν αμελητέα. Αυτό ισχύει στην περίπτωση που οι διεσπαρμένοι παραγωγοί συνδέονται σε ένα ισχυρό δίκτυο. Ωστόσο σε περιπτώσεις που η σύνδεση γίνεται σε σημεία που το δίκτυο είναι αδύναμο η διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι σε θέση να συνεισφέρει σημαντικά στον έλεγχο της τάσης. Φυσικά η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης θα έχει επιπτώσεις στη παραγωγή ενεργού ισχύος από τους διεσπαρμένους παραγωγούς, οπότε κάποια οικονομικά οφέλη θα πρέπει να προβλεφθούν για τους παραγωγούς για την παροχή αυτής της δευτερεύουσας υπηρεσίας.

### 3.4 Αποθήκευση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μέχρι πρόσφατα ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνταν από τρία στοιχεία : από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας , τη διανομή της και από τους καταναλωτές. Πλέον ένα νέο στοιχείο εισάγεται και αυτό είναι η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Χάρη σε αυτό το σύστημα μπορεί να καταστεί πιο αποδοτικό. Με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων, μείωση εκπομπών ρύπων και καλύτερη λειτουργία των μονάδων παραγωγής βοηθώντας στην αποφυγή καταστάσεων υπολειτουργίας ή υπερλειτουργίας τους.

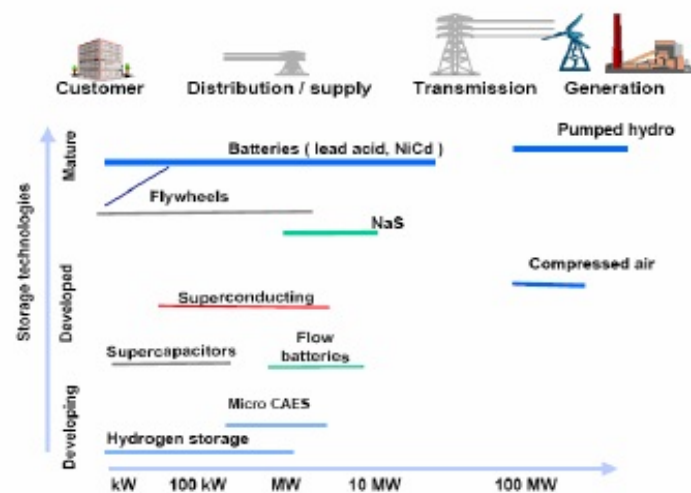
Η ηλεκτρική αποθήκευση έχει ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών το οποίο κυμαίνεται από εφαρμογές ποιότητας ισχύος για την διασφάλιση της αξιοπιστίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για την μεγιστοποίηση του κέρδους. Αυτές οι εφαρμογές απαιτούν χρόνους εκφόρτισης από κλάσματα του δευτερολέπτου για εφαρμογές ισχύος μέχρι μερικές ώρες για εφαρμογές ενέργειας.

Γενικά η ηλεκτρική αποθήκευση είναι συμφέρουσα όταν το οριακό κόστος του ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερο από τα κόστη για την αποθήκευση και την ανάκτηση της ενέργειας που χάνεται κατά την διαδικασία.

Η ζήτηση ηλεκτρισμού ποικίλει κατά τη διάρκεια της ημέρας και από εποχή σε εποχή. Βάσει αυτής της λογικής αποθηκεύεται ενέργεια χαμηλού κόστους κατά τη διάρκεια της νύχτας κυρίως και στη συνέχεια αποδίδεται στο δίκτυο τις ώρες αιχμής που η ζήτηση είναι πολύ μεγάλη και η ενέργεια ακριβότερη.

Τα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική και στην συνέχεια στην εκ νέου μετατροπή αυτής σε ηλεκτρική.

Εφαρμογές συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι :



Σχήμα 3.14: Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας

- Χρήση αποθήκευσης ενέργειας σε περιπτώσεις που οι μονάδες παραγωγής δεν μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση
- Παροχή στρεφόμενης εφεδρείας (παροχή ισχύος σε έκτακτες περιπτώσεις)
- Καλύτερη λειτουργία των ΑΠΕ αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας που μπορεί να παράγεται και παροχή της στο δίκτυο όταν δεν θα υπάρχει παραγωγή
- Επίτευξη κέρδους για τους αυτόνομους παραγωγούς αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες χαμηλού κόστους και χρησιμοποιώντας την τις ώρες υψηλού κόστους.
- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος.
- Εξασφάλιση ποιότητας ισχύος κυρίως σε περίπτωση σφάλματος λόγω της γρήγορης απόκρισης των μονάδων αποθήκευσης.

### 3.4.1 Μπαταρίες

Είναι ίσως η σημαντικότερη διάταξη αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η αποθήκευση χημικής ενέργειας και η αποδέσμευσή της στη συνέχεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων με τη μορφή ηλεκτρισμού. Τα κριτήρια εξέτασης της καταλληλότερης διάταξης αποθήκευσης είναι η διάρκεια ζωής (σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης), ο χρόνος φόρτισης και εκφόρτισης, η ενεργειακή πυκνότητα, το βάθος εκφόρτισης και το κόστος.

### **Μπαταρίες Οξέως Μολύβδου**

Είναι η πιο κοινή μορφή επαναφορτιζόμενης μπαταρίας για ηλεκτρική αποθήκευση. Έχει το μικρότερο κόστος και παρόλο που έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα(30-40 Wh/Kg) είναι πολύ αξιόπιστες σε απότομες μεταβολές του ρεύματος. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 70% έως 85% και συνήθως η διάρκεια ζωής τους είναι περίπου 1000 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης.

Παρά τις πολλαπλές εφαρμογές τους και το χαμηλό κόστος, αναπτύσσονται εναλλακτικές εξαιτίας της χαμηλής χωρητικότητας σε αποθήκευση, των τοξικών υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και τις επιπτώσεις στο περιβάλλον από την αποσύνθεσή τους. Παρόλο που ο μικρός χρόνος ζωής τους είναι ένας περιοριστικός παράγοντας σε εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας, έχει χρησιμοποιηθεί σε μερικές μεγάλης κλίμακας εφαρμογές διαχείρισης ενέργειας.

Οι μπαταρίες οξέως μολύβδου κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις επικρατούσες συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες έχουν σχεδιασθεί και πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τη διάρκεια του χρόνου εκφόρτισης ως εξής:

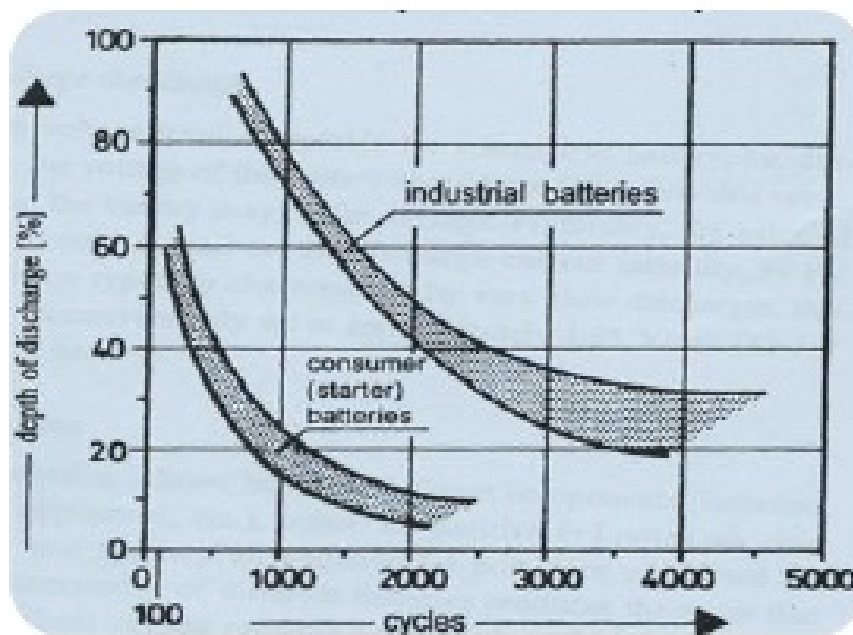
- Εκφορτίσεις λίγων δευτερολέπτων(μπαταρίες εκκίνησης)
- 5-10 λεπτά εκφορτίσεις(τροφοδοτικά μικρής διάρκειας)
- 30 λεπτά με 1 ώρα(εφεδρικά UPS)
- 10 ώρες και περισσότερο(σε φωτοβολταϊκά συστήματα,σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές)

Οι μπαταρίες με μικρές και ισχυρές εκφορτίσεις είναι σχεδιασμένες να δίνουν ρεύμα μεγάλης έντασης για μικρό χρονικό διάστημα. Ενώ αυτές μεγάλης διάρκειας και ασθενείς εκφορτίσεις είναι σχεδιασμένες να παρέχουν ρεύματα μικρής έως μέτριας έντασης για μεγαλύτερο χρόνο.

### **Μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου**

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν ως βασικό πλεονέκτημα το μεγάλο χρόνο ζωής και ότι δεν απαιτείται παρακολούθηση κατά τη λειτουργία τους. Δεν απαιτούν κάποια διόρθωση ή συντήρηση και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές με δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες. Μειονεκτήματά τους το υψηλό κόστος και τα τοξικά απόβλητα μετά τη χρήση τους. Επίσης παρουσιάζει το φαινόμενο της μνήμης. Δηλαδή σε περίπτωση που η μπαταρία για μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργεί σε εκφορτίσεις μικρού βάθους η διαθέσιμη χωρητικότητα της μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Για να έχει τη δυνατότητα να ξαναφτάσει την ονομαστική της χωρητικότητα πρέπει να υποβληθεί σε μία σειρά ολοκληρωμένων κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Τέλος χρειάζεται υψηλό ρεύμα φόρτισης.



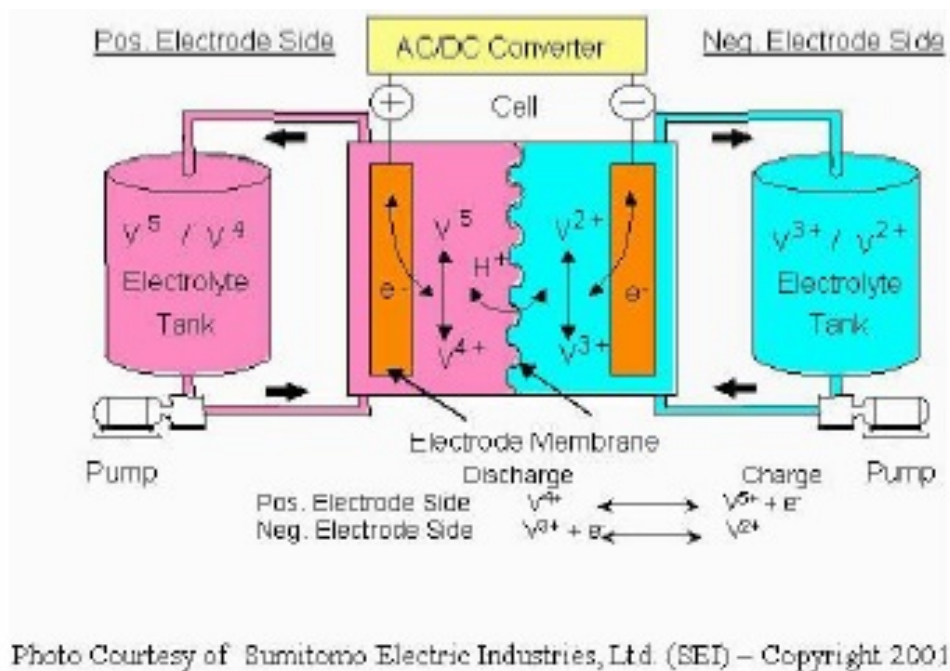


Σχήμα 3.15: Διάρκεια ζωής συναρτήσει του βάθους εκφόρτισης των μπαταριών οξέως-μολύβδου

### Μπαταρίες Ροής

Πρόκειται για σχετικά καινούργια τεχνολογία με αρκετά πλεονεκτήματα. Μπορούν να αποφορτίζονται πλήρως με ασφάλεια και να εκτελέσουν μέχρι και 10.000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης με σχεδόν μηδενική μείωση απόδοσης. Χρησιμοποιούν υγρούς ηλεκτρολύτες. Αποθηκεύονται σε δεξαμενές σε στοίβες κυψελών για φόρτιση και εκφόρτιση. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι χωρητικότητες ενέργειας και ισχύος είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η χωρητικότητα ενέργειας (kWh) εξαρτάται από το μέγεθος της δεξαμενής του ηλεκτρολύτη ενώ η χωρητικότητα ισχύος (kW) εξαρτάται από το μέγεθος των αντλιών και των κυψελών. Η χωρητικότητα ισχύος έχει να κάνει με το πόσα kW μπορεί να αποδώσει η μπαταρία ενώ η χωρητικότητα ενέργειας έχει να κάνει με το πόσες ώρες μπορεί να αποδίδει αυτά τα kW. Σε όλες τις μπαταρίες οι δύο αυτές χωρητικότητες συνδέονται, εκτός απλό τις μπαταρίες ροής.

Οι κυψέλες έχουν εύρος από μερικές εκατοντάδες kW έως MW σε μέγεθος και όσο η συνολική χωρητικότητα του συστήματος αυξάνεται το κόστος ανά kWh μειώνεται σημαντικά. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι χρειάζονται σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, οπότε απαιτούνται κτήρια γύρω από τις μπαταρίες ροής.



Σχήμα 3.16: Μπαταρία ροής

### Μπαταρίες Θειούχου Νατρίου

Οι μπαταρίες θειούχου νατρίου έχουν μεγάλη χωρητικότητα ισχύος, φθάνουν μέχρι την κλίμακα των MW. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι περίπου 120 Wh/kg και είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν των μπαταριών οξέως μολύβδου. Η απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης φθάνει το 90% και η διάρκεια ζωής είναι περίπου 2500 κύκλοι. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξομάλυνση των αιχμών που προκύπτει από την μεταβλητή έξοδο των φωτοβολταϊκών. Η πιο σημαντική εφαρμογή τους αφορά εγκαταστάσεις ενίσχυσης αέργου ισχύος σε υποσταθμούς. Η ζήτηση αυτών των μπαταριών σαν μέσο σταθεροποίησης της εξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι συνεχώς αυξημένη. Μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι χρειάζεται να είναι πάντα σε λειτουργία και έτσι καταναλώνουν ηλεκτρισμό ώστε να διατηρούν την υψηλή θερμοκρασία που χρειάζεται για να λειτουργήσουν (320 – 340C).

### Μπαταρίες Μετάλλου-Αέρος

Είναι οι πιο οικονομικές μπαταρίες και φιλικές προς το περιβάλλον. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι ότι δεν μπορούν να επαναφορτιστούν εύκολα. Έχουν λίγους εκατοντάδες κύκλους διάρκεια ζωής και απόδοση περίπου 50%. Παρά την υψηλή ενεργειακή τους πυκνότητα και το χαμηλό κόστος τους τα μειονεκτήματά της δεν την καθιστούν συγκρίσιμη με τις άλλες μπαταρίες.

### Μπαταρίες και Φωτοβολταϊκά

Οι βασικές συνθήκες λειτουργίας που συμβαίνουν σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της ενέργειας των φωτοβολταϊκών είναι:

- πολύ μικρά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης
- μεγάλης διάρκειας φορτίσεις και εκφορτίσεις (συνήθως πάνω από 20 ώρες)
- πολύ ισχυρές εκφορτίσεις (70% βάθος εκφόρτισης)
- τυχαίες και διαφορετικές σε μέγεθος φορτίσεις/εκφορτίσεις
- μεγάλη διάρκεια ζωής (συνήθως πάνω από 1500 κύκλους)

Σε περιπτώσεις μέγιστης ηλιακής ακτινοβολίας το ρεύμα φόρτισης που δημιουργείται από το φωτοβολταϊκό πρέπει τουλάχιστον μερικές φορές να πλησιάζει το ονομαστικό ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας (συνήθως είναι το ρεύμα με το οποίο η μπαταρία μπορεί να φορτιστεί πλήρως σε δέκα ώρες). Αν δεν συμβεί αυτό τότε πρέπει μια συμβατική γεννήτρια να παρέχει το επιπλέον ρεύμα που χρειάζεται η μπαταρία(τουλάχιστον κάθε 3 μήνες).

Σήμερα οι μπαταρίες οξέως μολύβδου και οι μπαταρίες νικελίου καδμίου είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες για αποθήκευση ενέργειας σε φωτοβολταϊκά συστήματα. [20]

---

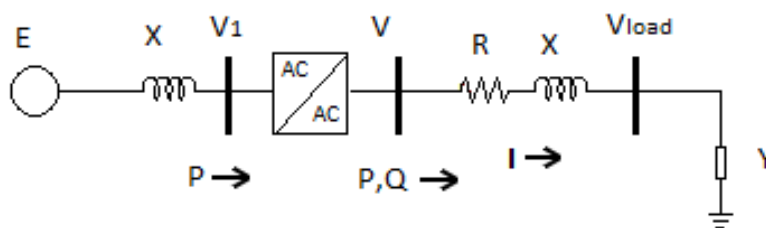


## Κεφάλαιο 4

# Λειτουργία Γραμμής Διανομής με Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της τροφοδοσίας μιας γραμμής διανομής από μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, (Σχήμα 4.1). Παρουσιάζεται το μοντέλο μονίμου καταστάσεως και προσδιορίζονται τα όρια λειτουργίας του συστήματος.

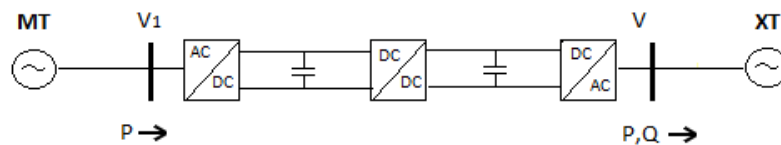
### 4.1 Τροφοδοσία γραμμής διανομής από Μετασχηματιστή Ηλεκτρονικών Ισχύος



Σχήμα 4.1: Ακτινικό δίκτυο με  $M/\Sigma$  υποβιβασμού ηλεκτρονικών ισχύος

Στο εξεταζόμενο σύστημα θεωρείται ότι η τροφοδοσία του δικτύου διανομής γίνεται μέσω ενός πλήρους μετατροπέα AC/DC/AC. Έτσι δημιουργείται πλήρης απόζευξη μεταξύ χαμηλής και μέσης τάσης με αποτέλεσμα στο δίκτυο διανομής να δημιουργείται ένα δίκτυο παρόμοιο με ένα μικροδίκτυο, (Σχήμα 4.2). Η τάση συνεχούς ρεύματος διατηρείται σταθερή. Ο μετατροπέας στην πλευρά της χαμηλής τάσης κάνει ρύθμιση είτε στην τάση είτε στο ρεύμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και είναι αυτός που εγγχεί ενεργό και άεργο ισχύ

στο δίκτυο διανομής, οπότε ορίζει τη συχνότητα του συστήματος.



Σχήμα 4.2: Πλήρης μετατροπέας AC/DC/AC

Η τάση συνεχούς ρεύματος των πυκνωτών μεταξύ του AC/DC και DC/DC μετατροπέα και μεταξύ του DC/DC και DC/AC μετατροπέα θεωρείται πρακτικά σταθερή. Ο πολύ γρήγορος ρυθμός προσαρμογής της τάσης συνεχούς ρεύματος (ο οποίος εξαρτάται από την χωρητικότητα  $C$ ) σε συνδυασμό με την ακόμα γρηγορότερη απόκριση των μετατροπέων, οι οποίοι λειτουργούν σε διακοπτικές συχνότητες της τάξης των kHz, έχει ως αποτέλεσμα η τάση αυτή να ρυθμίζεται σε λίγα ms μετά από μία διαταραχή, με αποτέλεσμα να εμφανίζει ελάχιστες διακυμάνσεις. Έτσι μπορούμε να αμελήσουμε την δυναμική συμπεριφορά του πυκνωτή για μελέτες ευστάθειας.

Οι μετασχηματιστές με ηλεκτρονικά ισχύος δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης (ή ισόδυναμα της αέργου ισχύος) και της ενεργού ισχύος ή της συχνότητας. Καθώς στην έξοδο του μετασχηματιστή η ισχύς που απαιτείται εξαρτάται από το φορτίο, στην κανονική λειτουργία ελέγχεται μόνο η τάση και η συχνότητα στην ονομαστική τιμή. Η απόκριση των ρυθμίσεων με ηλεκτρονικά ισχύος είναι πολύ γρήγορη, και έτσι θεωρείται σχεδόν ακαριαία.

Δεδομένου ότι πολύ μεγάλο ποσοστό των φορτίων είναι επαγωγικού χαρακτήρα για να διατηρείται το επίπεδο της τάσης είναι απαραίτητη η παραγωγή αέργου ισχύος. Ο μετασχηματιστής ηλεκτρονικών ισχύος έχει τη δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος και μπορεί να παράγει αυτήν την άεργο ισχύ κοντά στην ζήτηση με αποτέλεσμα να μειώνονται οι άεργες απώλειες ( $I^2 X$ ) του δικτύου μέσης τάσης αλλά και να καθιστά εφικτή την καλύτερη αξιοποίηση του δικτύου διανομής μεταφέροντας περισσότερη ενεργό ισχύ. Η έγχυση αέργου ισχύος βελτιώνει την τάση του δικτύου καθώς μειώνει την πτώση της. Η αντιστάθμιση της αέργου ισχύος γίνεται με συνεχή τρόπο και μπορεί εκτός από έγχυση να απορροφήσει άεργο ισχύ εάν κάτι τέτοιο καταστεί αναγκαίο.

Η ρύθμιση της τάσης τόσο στο δευτερεύον όσο και στο πρωτεύον του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος επιτυγχάνεται χάρη στη δυνατότητα παραγωγής αέργου ισχύος. Στην παρούσα εργασία δεν μελετάται το πρωτεύον του μετασχηματιστή. Ο έλεγχος της αέργου ισχύος στο πρωτεύον μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Μέσω του ελέγχου της τάσης στο πρωτεύον . Στην είσοδό του δέχεται τη διαφορά της πραγματικής και της επιθυμητής τιμής της τάσης. Και στην έξοδό του ελεγκτή έχουμε την τιμή αναφοράς της αέργου ισχύος.
- Μέσω ελέγχου του συντελεστή ισχύος. ( $Q = P \tan \phi$ )

## 4.2 Μοντέλο Ανάλυσης Μόνιμης Κατάστασης

Το δίκτυο χαμηλής τάσης έχει πολλές ιδιαιτερότητες σε σχέση με το υπόλοιπο δίκτυο. Είναι δίκτυο ακτινικό, με αφετηρία τον μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ. Από το δευτερεύον αναχωρούν οι γραμμές του δικτύου οι οποίες κατά μήκος τους έχουν διακλαδώσεις προς τους διάφορους καταναλωτές. Τόσο το φορτίο όσο και το δίκτυο κανονικά παρουσιάζουν ασυμμετρία. Το φορτίο επειδή οι καταναλωτές σε μεγάλο βαθμό είναι μονοφασικοί και παρά την προσπάθεια ισόποσης φόρτισης των φάσεων η ασυμμετρία είναι αναπόφευκτη. Επίσης ακόμα και το δίκτυο μπορεί να διεγείρεται ασύμμετρα σε περίπτωση εισαγωγής μονοφασικών μικροπηγών. Παρόλα αυτά στην παρούσα διπλωματική εργασία θα θεωρήσουμε πως το δίκτυο διανομής έχει συμμετρική 3φασική κατανομή. Επίσης σε αντίθεση με δίκτυα υψηλότερων τάσεων, οι γραμμές έχουν μεγάλη αντίσταση και μικρή αντίδραση, οπότε ο λόγος  $R/X$  θα είναι τελείως διαφορετικός από εκείνους των γραμμών μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία οι μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν, για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο, ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων που παράγουν οι αντιστροφείς δεν εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής κάποιας μάζας όπως στη σύγχρονη μηχανή αλλά τη συνθέτει ο αντιστροφέας και είτε καθορίζεται από τον έλεγχο του μετατροπέα είτε λαμβάνεται από το δίκτυο με μέτρηση. Έτσι η συχνότητα του συστήματος όταν όλες οι μονάδες χρησιμοποιούν αντιστροφείς δεν μπορεί να προκύψει από την ισορροπία παραγωγής και φορτίου που επιδρά στις στρεφόμενες μάζες καθορίζοντας την ταχύτητά τους, αλλά ως αποτέλεσμα του ακολουθούμενου ελέγχου στους αντιστροφείς. Όταν το ενδιαφέρον εστιάζεται στην εξέταση σχετικά αργών διαταραχών όπως στην μελέτη ευστάθειας, όπου το δίκτυο παριστάνεται με φασιθέτες ημιτονοειδούς μόνιμης κατάστασης, το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στο χρησιμοποιούμενο μοντέλο. Η μοντελοποίηση του δικτύου είναι στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση και έτσι οποιαδήποτε αλλαγή τάσεων και εντάσεων του δικτύου είναι στιγμιαία χωρίς να περιλαμβάνεται συνιστώσα συνεχούς ρεύματος ή αρμονικές. Στους μετατροπείς ισχύος δεν μοντελοποιείται η διακοπτική λειτουργία και οι γρήγορες βαθμίδες ελέγχου, αλλά μόνο το τελικό αποτέλεσμά τους που είναι η δημιουργία των τάσεων και ρευμάτων θεμελιώδους συχνότητας που ο μετατροπέας επιβάλλει στο δίκτυο. Έτσι είναι αρκετή η μοντελοποίηση των αντιστροφέων σαν ελεγχόμενων πηγών τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος στην βασική συχνότητα, το μέτρο και η γωνία των οποίων μπορεί να ελεγχθεί με βάση την ανταλλαγή ενεργού και αέργου ισχύος με το

δίκτυο.

Τα ρεύματα και οι τάσεις που αποτυπώνονται στις αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου βρίσκονται σε "οιωνεί ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση" περιγράφονται με μιγαδικούς αριθμούς (φασιθέτες).

Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται φαίνεται στο Σχήμα (4.3), στο οποίο ισχύουν οι νόμοι του Kirchhoff για το εναλλασσόμενο ρεύμα. Συγκεκριμένα:

$$\hat{I} = \frac{\hat{V}}{Z} \quad (4.1)$$

όπου  $\hat{V}$  είναι η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή,  $\hat{I}$  η ένταση του ρεύματος στο ακτινικό δίκτυο, και  $Z$  η συνολική σύνθετη αντίσταση, δηλαδή το άθροισμα σύνθετης αντίστασης της γραμμής και του φορτίου, το οποίο θεωρείται σύνθετη αγωγιμότητα συνδεδεμένο στο τέλος της γραμμής. Αυτό συμβαίνει επειδή στόχος του κεφαλαίου είναι να περιγραφούν οι αναγκαίες ρυθμίσεις για την ακτινική τροφοδότηση μέσω μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, και ιδίως ο έλεγχος μεγίστου φορτίου για να αποτραπεί η υπερφόρτιση του μετασχηματιστή. Έτσι δεν δίνετε σημασία στην κατανομή του φορτίου κατά μήκος της γραμμής διανομής, αλλά το φορτίο συγκεντρώνεται στο τέλος της γραμμής.

$$Z = \frac{1}{Y} + R + jX \quad (4.2)$$

Η τάση στο φορτίο βρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\hat{V}_{load} = \hat{V} - \hat{I}(R + jX) \quad (4.3)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς που καταναλώνει το φορτίο είναι η εξής:

$$P_{load} = V_{load}I \cos \phi \quad (4.4)$$

$$Q_{load} = V_{load}I \sin \phi \quad (4.5)$$

όπου  $\cos \phi$  είναι ο συντελεστής ισχύος.

Η ισχύς που παρέχεται από τον μετασχηματιστή είναι:

$$P = P_{losses} + P_{load} \quad (4.6)$$

$$Q = Q_{losses} + Q_{load} \quad (4.7)$$



όπου

$$P_{losses} = I^2 R \quad (4.8)$$

$$Q_{losses} = I^2 X \quad (4.9)$$

είναι οι ενεργές και άεργες απώλειες που έχουμε στη γραμμή διανομής.

### 4.3 Ρυθμίσεις και Όρια Κανονικής Λειτουργίας

Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας του συστήματος ο μετατροπέας του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή κρατά τη συχνότητα στην ονομαστική τιμή οπότε γίνεται έλεγχος ενεργού ισχύος. Επίσης κρατά την τάση αναχώρησης σταθερή στην τιμή αναφοράς οπότε γίνεται έλεγχος αέργου ισχύος. Σε επόμενα κεφάλαια θα δούμε ότι στην κανονική λειτουργία η συχνότητα μπορεί να διαφέρει της ονομαστικής τιμής. Επίσης θα μελετηθούν και διαφορετικές μέθοδοι ρυθμίσεως της τάσης της γραμμής διανομής.

Δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος των μετατροπέων δεν ανέχονται υπερφορτίσεις όπως οι απλοί μετασχηματιστές απαιτείται ειδικός έλεγχος ώστε η ένταση του ρεύματος  $I$  να μην υπερβαίνει την επιτρεπτή τιμή συνεχούς λειτουργίας,  $I_{lim}$ . Όπως θα δούμε και σε προσομοιώσεις στη συνέχεια της εργασίας το ρεύμα έστω και στιγμιαία ξεπερνά αυτή τιμή,  $I_{lim}$ , οπότε το  $I_{lim}$  πρέπει να είναι μικρότερο από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος που δεν προκαλεί φθορά στα ηλεκτρονικά ισχύος, δηλαδή  $I_{lim} < I_{max}$ .

Συγκεκριμένα εάν κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας προκύψει λόγω αύξησης φορτίου, ή λόγω σφάλματος, ρεύμα  $I > I_{lim}$  τότε ο έλεγχος της σταθερής τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή αντικαθίσταται από έλεγχο σταθερού ρεύματος,  $I = I_{lim}$ .

#### 4.3.1 Κανονική λειτουργία

Για να αναλυθεί η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας μέσω ενός προγράμματος Matlab ακολουθούν τα εξής βήματα:

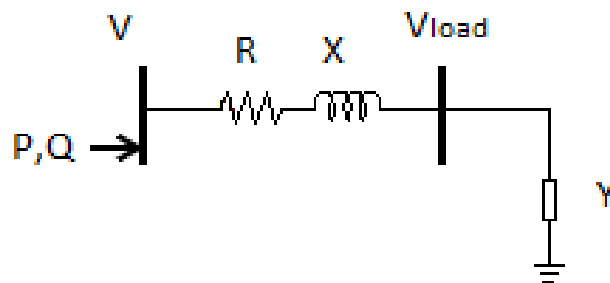
- Για κάθε τιμή της αγωγής φορτίου υπολογίζεται από τη σχέση (4.2) η συνολική σύνθετη αντίσταση  $Z$
- Στη συνέχεια για κάθε σύνθετη αντίσταση υπολογίζεται το ρεύμα μέσω της σχέσης (4.1), η τάση του δευτερεύοντος όπως ειπώθηκε κρατιέται σταθερή, και μέσω αυτού και η τάση του φορτίου, (4.3)
- Τέλος κάθε φορά γίνεται έλεγχος εάν  $I < I_{lim}$ . Σε περίπτωση που η ένταση του ρεύματος είναι μικρότερη από το όριο που έχει τεθεί σημαίνει πως το σύστημα εξακολουθεί να είναι στην κανονική λειτουργία και συνεχίζει να αυξάνεται η τιμή αγωγής του φορτίου

### 4.3.2 Έλεγχος ορίων ρεύματος

Κάθε φορά προτού αυξηθεί το φορτίο ελέγχεται εάν  $I < I_{lim}$ . Σε περίπτωση που δεν ισχύει αυτή η συνθήκη παύει να ισχύει ο έλεγχος για σταθερή τάση δευτερεύοντος και πλέον ισχύει ο έλεγχος για σταθερό ρεύμα ίσο με το όριο που έχει τεθεί. Έτσι το σύστημά μπαίνει σε μια κατάσταση εκτάκτου λειτουργίας που η τάση του δευτερεύοντος και συνακόλουθα και η τάση στο φορτίο μειώνονται προκειμένου να μπορεί να καλυφθεί η περαιτέρω αύξηση του φορτίου, δεδομένου πως το ρεύμα μένει σταθερό.

### 4.3.3 Παράδειγμα

Η εφαρμογή που υλοποιείται μέσω Matlab αφορά ακτινικό δίκτυο. Στο εν λόγω ακτινικό δίκτυο η πηγή μας είναι το δευτερεύον ενός μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε ο συντελεστής ισχύος είναι 0,9, το φορτίο αυξάνεται με βήμα  $r = 0,01$  και η οριακή τιμή του ρεύματος είναι  $I_{lim} = 1,05$  αμ για λόγους προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος του μετασχηματιστή. Η αρχική τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή είναι  $V = 1,05$  αμ. Επίσης η αντίσταση και η αντίδραση της γραμμής είναι  $R = 0,1$  αμ και  $X = 0,1$  αμ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Ακτινικό Κύκλωμα γραμμής διανομής

Αρχικά ελέγχουμε την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και τη ρυθμίζουμε ώστε να είναι  $V_o = 1,05$  αμ. Αρχικά το φορτίο είναι  $Y = 0,01$  αμ. Με την αύξηση του φορτίου αυξάνεται και το ρεύμα, καθώς κρατάμε σταθερή την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, μέχρις ότου φτάσει την οριακή του τιμή, 1,05 αμ. Σε αυτό το σημείο το φορτίο είναι 1,156 αμ.

Τα μη μεταβλητά στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1:

Η αύξηση του φορτίου σε σχέση με το χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$Y(t) = Y_o(1 + rt) \quad (4.10)$$

$V_o$	$I_{lim}$	$R$	$X$	rate(r)
1.05	1.05	0.1	0.1	1 %

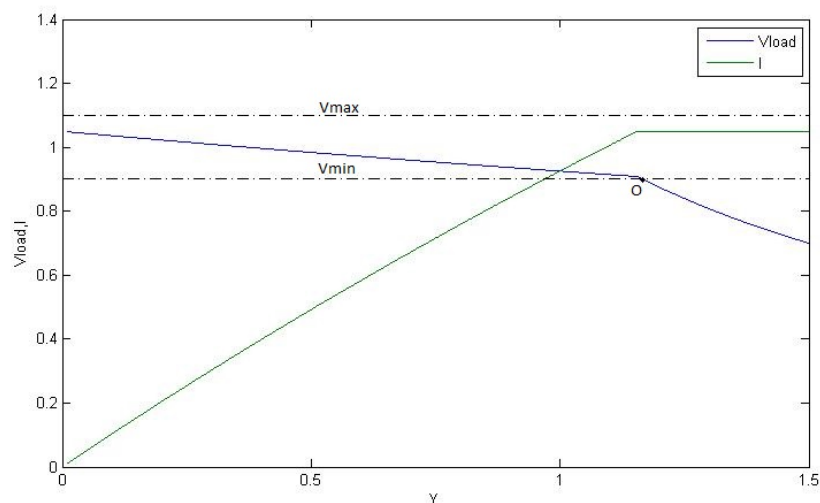
Πίνακας 4.1: Μη μεταβλητά στοιχεία ανά μονάδα

Θεωρούμε 1 αμ περίπου ίσο με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος,  $S_{nom}$ . Επίσης θεωρούμε ότι κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας μπορεί το ρεύμα να φτάσει το 105% του ονομαστικού και η τάση του δευτερεύοντος το 110% της ονομαστικής.

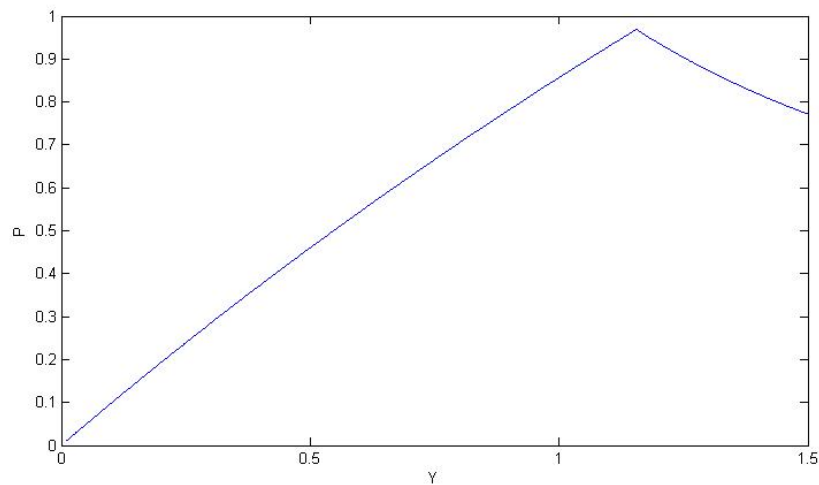
Στη συνέχεια, μόλις το ρεύμα φτάσει την οριακή τιμή του, το κρατάμε σταθερό, καθώς περαιτέρω αύξησή του ενδέχεται να προκαλέσει ζημιά στα ηλεκτρονικά ισχύος του μετασχηματιστή. Έτσι η περαιτέρω αύξηση του φορτίου μπορεί να καλυφθεί μόνο με την μείωση της τάσης, καθώς ισχύει:

$$Y_{load} = \frac{\hat{I}}{\hat{V}_{load}} \quad (4.11)$$

Σχήμα 4.4: Τάση φορτίου και ρεύμα

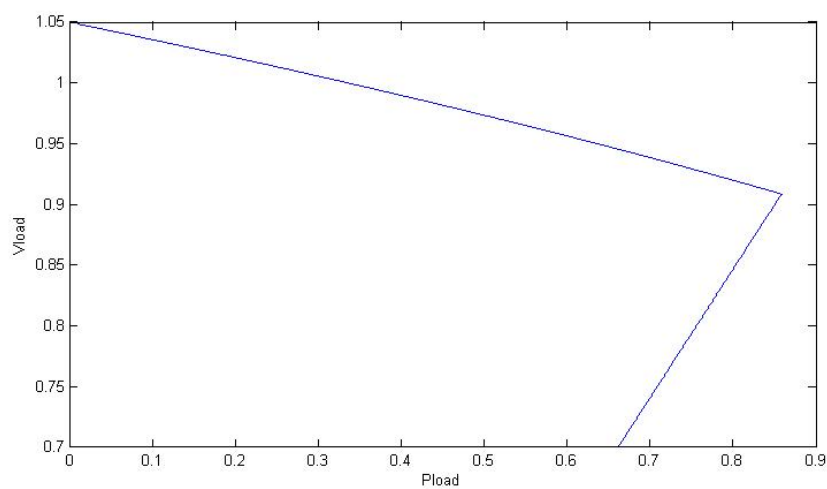


Η πτώση τάσης του φορτίου που παρατηρούμε στο Σχήμα 4.4 κατά τη διάρκεια αύξησης του ρεύματος οφείλεται στις σύνθετες αντιστάσεις της γραμμής μεταφοράς. Στο ίδιο Σχήμα φαίνεται και το μέτρο του ρεύματος του μετασχηματιστή. Αρχικά αυξάνεται έως ότου φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του και στη συνέχεια διατηρείται σταθερό. Για να καλυφθεί η ζήτηση του φορτίου, και μη έχοντας τη δυνατότητα περαιτέρω αύξησης του ρεύματος, η τάση του μετασχηματιστή μειώνεται ελεγχόμενα.

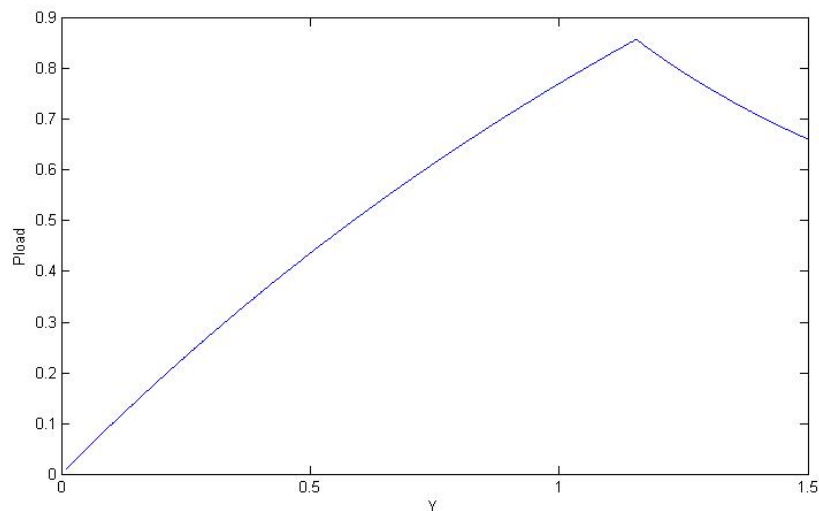


Σχήμα 4.5: Καμπύλη Ισχύος

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η καμπύλη ενεργού ισχύος που εξάγει ο μετασχηματιστής. Η παραγωγή ενεργού ισχύος αυξάνεται όσο αυξάνεται και το ρεύμα. Στη συνέχεια μειώνεται λόγω της αναγκαστικής μείωσης της τάσης για να κρατηθεί σταθερό το ρεύμα.



Σχήμα 4.6: Καμπύλη φορτίου



Σχήμα 4.7: Καμπύλη Ενεργού Κατανάλωσης Φορτίου

Στα Σχήματα 4.6 και 4.7 φαίνεται η ενεργός ισχύς στο φορτίο συναρτήσει της τάσης φορτίου και του φορτίου αντίστοιχα.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι εξής τιμές του Πίνακα 4.2:

Πίνακας 4.2: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (όριο πτώσης τάσης) (α.μ.)

$V_o$	$\Sigma I$	$P_{loadmax}$	$V_{load}$	$Y$
1.05	0.9	0.8588	0.9086	1.156

Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται και τα όρια της τάσης πτώσης και ανύψωσης τάσης. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να έχει το φορτίο είναι  $V_{max} = 1.1$  αμ και η ελάχιστη  $V_{min} = 0.9$  αμ. Με κουκκίδα στο ίδιο Σχήμα, στο σημείο O, φαίνεται το σημείο που η τάση του φορτίου βγαίνει εκτός των ορίων που έχουν τεθεί. Όπως παρατηρούμε αυτό συμβαίνει αφού τελειώσει η κανονική λειτουργία του συστήματος και ενώ βρίσκεται στην κατάσταση έκτακτης λειτουργίας. Οπότε δεν επηρεάζει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ που έχουμε υπολογίσει. Το φορτίο τη στιγμή που η τάση του φορτίου πέσει στα 0.9 αμ είναι 1.167 αμ. Μια λύση θα ήταν από τη στιγμή που η τάση του φορτίου μειωθεί κάτω από το όριο να γίνεται αποκοπή φορτίου.



## Κεφάλαιο 5

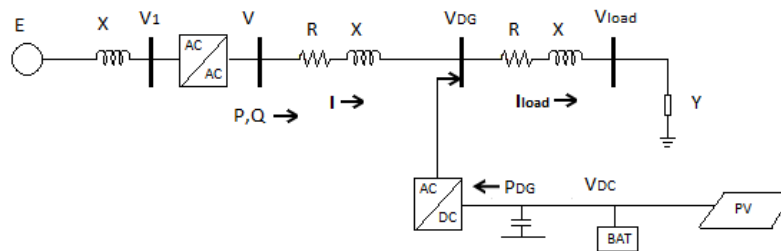
# Λειτουργία Γραμμής Διανομής με Διεσπαρμένη Παραγωγή

### 5.1 Περιγραφή Δικτύου

Σε αυτό το κεφάλαιο θεωρείται ότι στη γραμμή διανομής συνδέεται διεσπαρμένη παραγωγή, με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας, μέσω μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Η ενεργός ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής ελέγχεται από ρυθμιστή συχνότητας με στατισμό (droop control). Έτσι η ζήτηση του φορτίου δεν καλύπτεται αποκλειστικά από το σύστημα μεταφοράς, αλλά μέρος αυτής καλύπτεται από ισχύ η οποία παράγεται στο δίκτυο διανομής. Το κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Η διεσπαρμένη παραγωγή τοποθετείται στο μέσο της γραμμής διανομής.

Θεωρούμε ότι η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ και έχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω συστοιχειών (μπαταρίες). Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία φορτίζουν την μπαταρία η οποία παρέχει την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο όταν ζητηθεί, ανάλογα με την πτώση της συχνότητας.

Σε αυτό το κεφάλαιο, η ρύθμιση αέργου ισχύος του μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής προγραμματίζεται ώστε να κρατάει σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα στην έγχυση της διεσπαρμένης παραγωγής.



Σχήμα 5.1: Παράσταση Συστήματος

## 5.2 Έλεγχος Ορίων Λειτουργίας Υπερφόρτισης

### 5.2.1 Γενικά

Τα όρια λειτουργίας του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος καθορίζονται από τη μέγιστη τιμή του μέτρου του ρεύματος στο δευτερεύον. Πάνω από αυτή την τιμή για λόγους προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος του μετασχηματιστή δεν επιτρέπεται να λειτουργεί.

Η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής αρχικά είναι σταθερή, και αρχίζει να αυξάνεται όταν το ρεύμα φτάσει τη μέγιστη τιμή του έως ότου φτάσει τη μέγιστη δυνατή παροχή ενεργού ισχύος.

Η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή αρχικά διατηρείται σταθερή, εκτός εάν απαιτείται να μειωθεί για να διατηρηθεί το  $I < I_{lim}$ , το οποίο συμβαίνει όταν η διεσπαρμένη παραγωγή δεν μπορεί να παρέχει επιπλέον ενεργό ισχύ.

Επειδή ενδιαφέρεται να εξεταστούν τα όρια λειτουργίας, έχει θεωρηθεί μια κατάσταση δικτύου με αναλογικά υψηλό φορτίο. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας μπορεί να προκύψει για παράδειγμα μετά από κάποια απώλεια γραμμής διανομής που δημιουργεί ακτινική τροφοδοσία σε μεγάλη σχετική απόσταση. Κατά συνέπεια εμφανίζονται στα μέγιστα φορτία χαμηλές τάσεις.

### 5.2.2 Στάδιο Λειτουργίας

Στην κανονική λειτουργία του δικτύου η τάση του διατηρείται σταθερή από τον μετατροπέα του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύων. Ο μετασχηματιστής ισχύος μοντελοποιείται ως πηγή τάσης λαμβάνοντας υπόψιν το μικρό χρόνο απόκρισης. Εάν με την αύξηση του φορτίου, ή για άλλο λόγο, αυξηθεί το ρεύμα πάνω από τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή πρέπει να ελέγχεται πλέον η τιμή του ρεύματος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.

Για τον έλεγχο του ρεύματος ώστε να μην υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας,  $I_{lim}$ ,



στην περίπτωση που υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή υπάρχουν δύο δυνατότητες.

- Όταν η διεσπαρμένη παραγωγή παράγει ενεργό ισχύ λιγότερη από τη μέγιστη ( $P_{max}$ ) που μπορεί να πάρει από την ηλιακή ακτινοβολία και από την αποθηκευμένη ενέργεια στους συσσωρευτές, μεταβάλλεται η συχνότητα του μετατροπέα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, ώστε να αποδώσει περισσότερη ενεργό ισχύ, περιορίζοντας έτσι το ρεύμα του μετασχηματιστή.
- Όταν η διεσπαρμένη παραγωγή παράγει ενεργό ισχύ ίση με τη μέγιστη που μπορεί,  $P = P_{max}$ , παύει ο έλεγχος της τάσης. Πλέον το δίκτυο βρίσκεται σε μια κατάσταση εκτάκτου λειτουργίας όπου η τάση του δευτερεύοντος μειώνεται ώστε η τιμή του ρεύματος να μην υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.

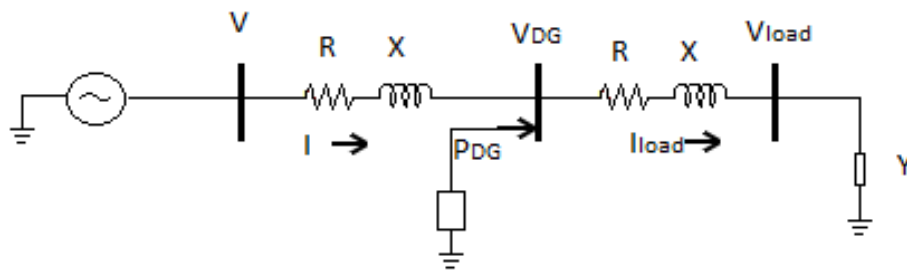
Συνεπώς το μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε τρία στάδια.

- 1<sup>ο</sup> Στάδιο: Σταθερή τάση και συχνότητα του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Διαρκεί όσο  $I \leq I_{lim}$
- 2<sup>ο</sup> Στάδιο: Σταθερή τάση μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, μεταβολή της συχνότητας για να επιτευχθεί ο έλεγχος ενεργού ισχύος μέσω των ρυθμιστών συχνότητας της διεσπαρμένης παραγωγής (droop control). Διαρκεί όσο  $P_{DG} \leq P_{DG}^{max}$
- 3<sup>ο</sup> Στάδιο: Έκτακτη λειτουργία: Περιορισμός της τάσης του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος για να μην αυξηθεί το ρεύμα πάνω από το όριο επιθυμητής λειτουργίας

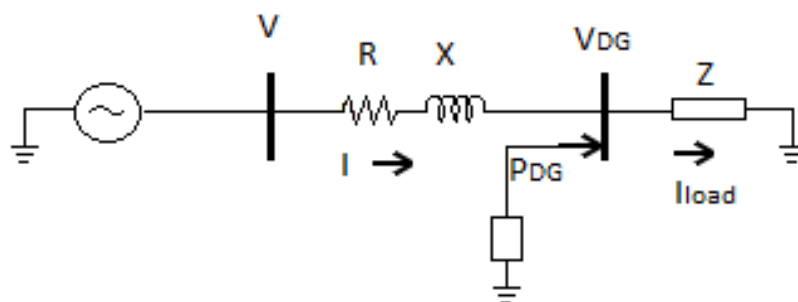
## 5.3 Ανάλυση Μόνιμης Κατάστασης

### 5.3.1 Κανονική περιοχή λειτουργίας

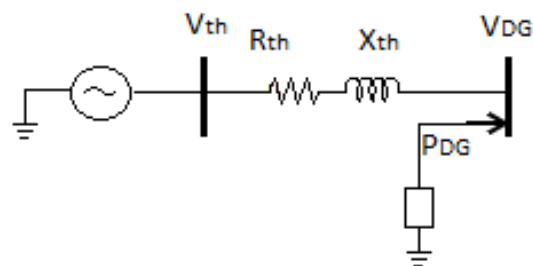
Το ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου με διεσπαρμένη παραγωγή φαίνεται στο Σχήμα 5.2 και σε απλοποιημένη μορφή στο Σχήμα 5.3. Από το κύκλωμα αυτό προκύπτει το ισοδύναμο Thevenin του Σχήματος 5.4, όπως φαίνεται από το σημείο σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής.



Σχήμα 5.2: Ισοδύναμο Κύκλωμα Γραμμής με Διεσπαρμένη Παραγωγή



Σχήμα 5.3: Απλοποιημένη παράσταση κυκλώματος



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο Κύκλωμα Thevenin

Η σύνθετη αντίσταση  $Z$  που φαίνεται στο Σχήμα 5.3 είναι :

$$Z = \frac{1}{Y} + R + jX \quad (5.1)$$

Το ισοδύναμο Thevenin, Σχήμα 5.4, όπως φαίνεται από το σημείο σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής δίνεται από τις σχέσεις :

$$\hat{V}_{th} = \frac{\hat{V}Z}{Z + R + jX} \quad (5.2)$$

$$Z_{th} = \frac{Z(R + jX)}{Z + R + jX} \quad (5.3)$$

Έτσι από το νόμο του Kirchhoff στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του Σχήματος 5.4 δεδομένου ότι θεωρείται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος στη διεσπαρμένη παραγωγή προκύπτει, όπου θεωρούμε  $\hat{V}_{DG} = V_{DG} \angle 0^\circ$ :

$$\hat{V}_{th} = V_{DG} - \frac{P_{DG}}{V_{DG}}(R_{th} + jX_{th}) \quad (5.4)$$

Από την μιγαδική σχέση (5.4) χωρίζοντας πραγματικό από φανταστικό μέρος και παίρνοντας τα μέτρα του δεξιού και του αριστερού μέλους προκύπτει η διτετράγωνη εξίσωση:

$$V_{DG}^4 - (V_{th}^2 + 2R_{th}P_{DG})V_{DG}^2 + P_{DG}^2(R_{th}^2 + X_{th}^2) = 0 \quad (5.5)$$

Από την επίλυση της (5.5) η ρίζα με το μεγαλύτερο μέτρο τάσης (κανονική λειτουργία) δίνει:

$$V_{DG}^2 = \frac{V_{th}^2 + 2R_{th}P_{DG} + \sqrt{(V_{th}^2 + 2P_{DG}R_{th})^2 - 4P_{DG}^2(R_{th}^2 + X_{th}^2)}}{2} \quad (5.6)$$

Τα ρεύματα φορτίου ( $I_l$ ) και δευτερεύοντος μετασχηματιστή ( $I$ ) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\hat{I}_l = \frac{V_{DG}}{Z} \quad (5.7)$$

$$\hat{I} = \hat{I}_l - \frac{P_{DG}}{V_{DG}} \quad (5.8)$$

Οι σχέσεις (5.4) - (5.8) δίνουν την επίλυση του δικτύου διανομής για δεδομένη τιμή της αγωγιμότητας φορτίου και τάση δευτερεύοντος μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος  $V$  μέχρι το σημείο όπου  $I \leq I_{lim}$ , δηλαδή στην κανονική λειτουργία του δικτύου.

### 5.3.2 Ρύθμιση Συχνότητας

Όταν το ρεύμα φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του ο μετατροπέας του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος πρέπει να το διατηρεί σταθερό. Σε πρώτη φάση η ισχύς που χρειάζεται το αυξανόμενο φορτίο μπορεί να προκύψει από την αύξηση της παραγωγής ενεργού

ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή. Για να συμβεί αυτό ο μετατροπέας του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος μειώνει τη συχνότητα, ούτως ώστε ο μετατροπέας της διεσπαρμένης παραγωγής να αυξήσει την παραγωγή του. Η μείωση της συχνότητας συνεχίζεται μέχρις ότου το ρεύμα του μετασχηματιστή πάρει την επιθυμητή τιμή,  $I = I_{lim}$ .

Συνεπώς στην μόνιμη κατάσταση η τιμή του ρεύματος σε αυτό το στάδιο λειτουργίας είναι δεδομένη. Η παραγόμενη ισχύς από τη διεσπαρμένη παραγωγή προκύπτει από την επίλυση του συστήματος με δύο αγνώστους που αποτελείται από την (5.6) και από την ακόλουθη σχέση:

$$I_{lim} = \left| \frac{V_{DG}}{Z} - \frac{P_{DG}}{V_{DG}} \right| \quad (5.9)$$

Το σύστημα (5.6),(5.9) λύνεται αριθμητικά.

### 5.3.3 Μετατροπέας Πηγής Ρεύματος

Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται εφόσον  $P_{DG} \leq P_{DG}^{max}$ . Όταν  $P_{DG} = P_{DG}^{max}$ , με την αύξηση του φορτίου και δεδομένου ότι το ρεύμα έχει ήδη φτάσει στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του,  $I_{lim}$ , η τάση  $V$  αναγκαστικά μειώνεται. Συγκεκριμένα επειδή ο μετασχηματιστής δεν έχει άλλο τρόπο να κρατήσει το ρεύμα στο επιθυμητό όριο, σταματά να ρυθμίζει την τάση (μετατροπέας πηγής τάσης) και λειτουργεί ως μετατροπέας πηγής ρεύματος, όπως στο Κεφάλαιο 4. Πλέον η τάση τροφοδοσίας  $V$  είναι ο άγνωστος. Οπότε το ισοδύναμο Thevenin δεν βοηθάει στην επίλυση του προβλήματος, αφού δεν μπορεί να υπολογιστεί η τάση  $V_{th}$ .

Από τη σχέση (5.9) υψώνοντάς την στο τετράγωνο, χωρίζοντας πραγματικό από φανταστικό μέρος και παίρνοντας τα μέτρα του δεξιού και του αριστερού μέλους προκύπτει η διτετράγωνη εξίσωση:

$$V_{DG}^4 - (I_{lim}^2(Z_r^2 + Z_{im}^2) + 2Z_r P_{DG})V_{DG}^2 + P_{DG}^2(Z_r^2 + Z_{im}^2) = 0 \quad (5.10)$$

όπου  $Z_r$  είναι το πραγματικό μέρος του  $Z$  και  $Z_{im}$  το φανταστικό.

Από την επίλυσή της η ρίζα με το μεγαλύτερο μέτρο τάσης (κανονική λειτουργία) δίνει:

$$V_{DG}^2 = \frac{(I_{lim}^2(Z_r^2 + Z_{im}^2) + 2Z_r P_{DG}) + \sqrt{(I_{lim}^2(Z_r^2 + Z_{im}^2) + 2Z_r P_{DG})^2 - 4P_{DG}^2(Z_r^2 + Z_{im}^2)}}{2} \quad (5.11)$$

Και από το νόμο τάσεων Kirchhoff ισχύει:

$$\hat{V} = \hat{V}_{DG} + I_{lim}(R + jX) \quad (5.12)$$

## 5.4 Εφαρμογή

### 5.4.1 Διαγράμματα Μονίμου Καταστάσεως

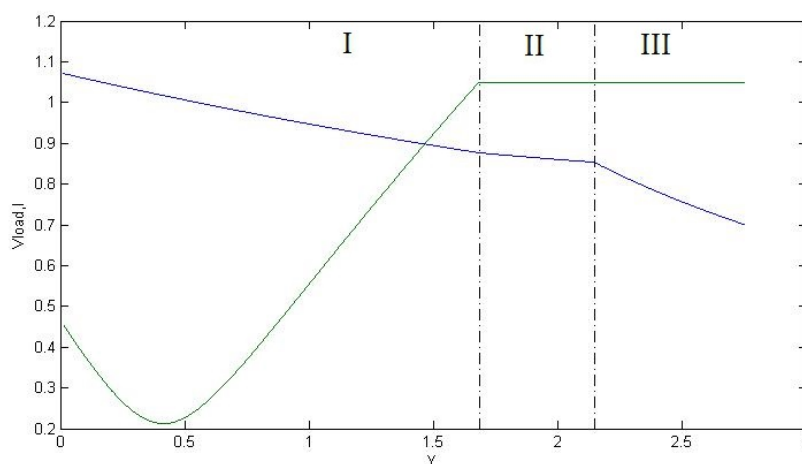
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που παρουσιάστηκε. Το ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό του Σχήματος 5.2.

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα δεδομένα του συστήματος.

Πίνακας 5.1: Δεδομένα

X	R	Σ.Ι. φορτίου	$V_o$	$I_{lim}$	$P_{DGo}$	$P_{DGmax}$	r
0.05	0.05	0.9	1.05 αμ	1.05 αμ	0.5 αμ	1 αμ	0.01

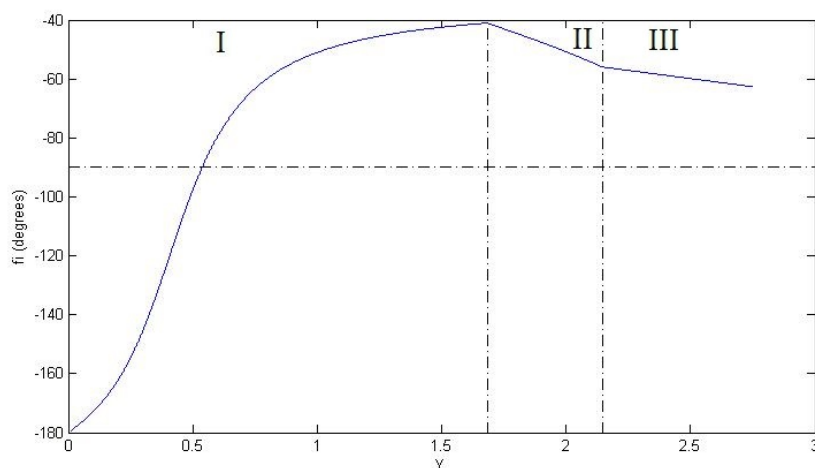
Το φορτίο αυξάνεται σύμφωνα με τη σχέση :  $Y = Y_o(1 + rt)$  με σταθερό ρυθμό  $r$ .



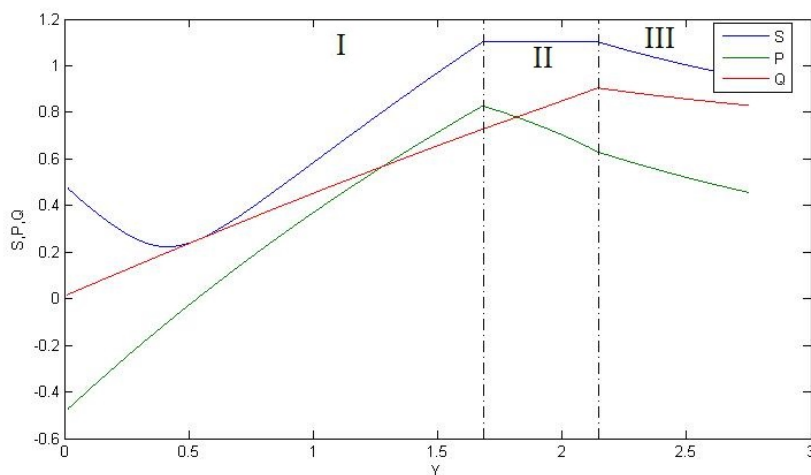
Σχήμα 5.5: Τάση φορτίου και ρεύμα μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται το μέτρο του ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή και το μέτρο της τάσης του φορτίου. Το μέτρο του ρεύματος αρχικά έχει φορά από τον ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς το ζυγό του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Μόλις το ρεύμα φτάσει την οριακή τιμή του το κρατάμε σταθερό. Δηλαδή κατά το δεύτερο και τρίτο στάδιο το ρεύμα μένει σταθερό. Η τάση του φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου πέφτει γεγονός που οφείλεται στις σύνθετες αντιστάσεις της γραμμής μεταφοράς κατά τη διάρκεια αύξησης του ρεύματος. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου λόγω της έγχυσης ενεργού ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνεται το ρεύμα του φορτίου το

οποίο προκαλεί μείωση της τάσης, όμως αυξάνεται η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής που τήνει να αυξήσει και την τάση του φορτίου. Από τα αποτελέσματα του προγράμματος βλέπουμε πως κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου τελικά η τάση του φορτίου μειώνεται αλλά με αργό ρυθμό. Στο τρίτο στάδιο η ελεγχόμενη μείωση της τάσης του μετασχηματιστή προκαλεί και μείωση στην τάση του φορτίου.



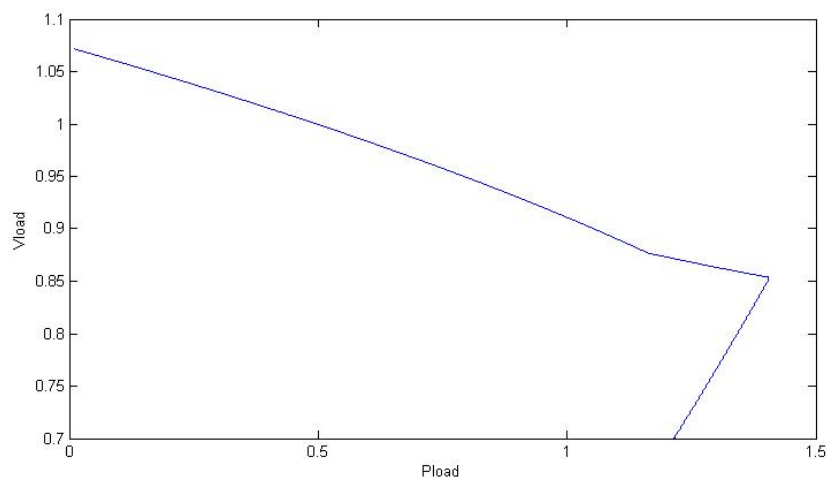
Σχήμα 5.6: Γωνία φάσεως ρεύματος



Σχήμα 5.7: Φαινόμενη, Ενεργός και Άεργος Ισχύς Μετασχηματιστή

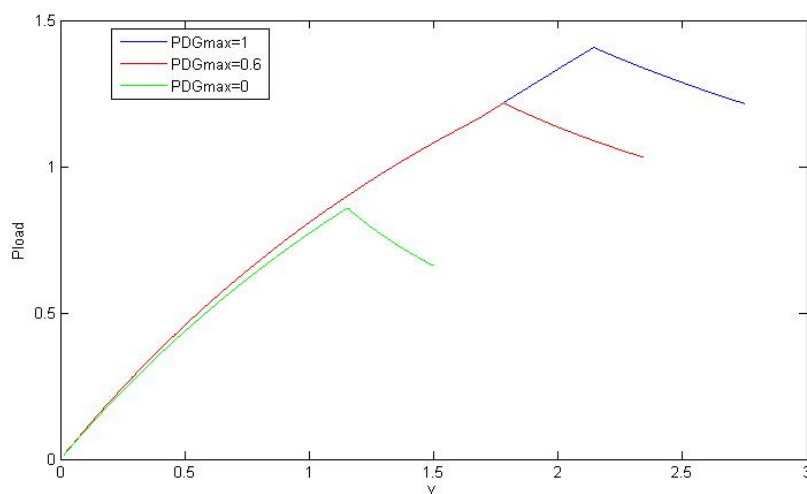
Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 5.7 ότι για μικρό φορτίο αντί να έχουμε εξαγωγή ενεργού ισχύος, έχουμε εισαγωγή ενεργού ισχύος από το μετασχηματιστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο έχει χαμηλή τιμή και η παραγωγή ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή υπερκαλύπτει τη ζήτηση. Έτσι το ρεύμα αρχικά έχει φορά από τον ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς τον ζυγό του μετασχηματιστή, (Σχήμα 5.2). Από τα Σχήματα 5.6 και 5.7 παρατηρούμε πως μόλις η γωνία φάσης του ρεύματος φτάσει τις  $-90^\circ$  τότε το δίκτυο διανομής

αρχίζει να εισάγει ενεργό ισχύ. Κατά το δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης βλέπουμε πως η φαινόμενη ισχύς του μετασχηματιστή μένει σταθερή στο 1, 1026 αμ. Η επιπλέον ζήτηση ενεργού ισχύος του φορτίου κατά το δεύτερο στάδιο καλύπτεται αποκλειστικά από τη διεσπαρμένη παραγωγή, η οποία όμως τροφοδοτεί το σύστημα μόνο με ενεργό ισχύ. Γι' αυτό η επιπλέον ζήτηση αέργου ισχύος καλύπτεται από τον μετασχηματιστή απ' όπου η εξαγωγή ενεργού ισχύος μειώνεται, δεδομένου ότι δεν μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τη φαινόμενη ισχύ. Έτσι η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει το υπόλοιπο ποσό της μειούμενης ενεργού ισχύος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχήμα 5.8: Καμπύλη PV φορτίου

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται η καμπύλη PV του φορτίου. Στο συγκεκριμένο Σχήμα φαίνεται καλύτερα η διαφορά κλίσης της τάσης του φορτίου κατά τη διάρκεια του πρώτου και δεύτερου σταδίου. Επίσης φαίνεται ότι η ενεργός ισχύς του φορτίου φτάνει στη μέγιστη τιμή του στο τέλος του δεύτερου σταδίου.



Σχήμα 5.9: Καμπύλες Ενεργού Κατανάλωσης Φορτίου

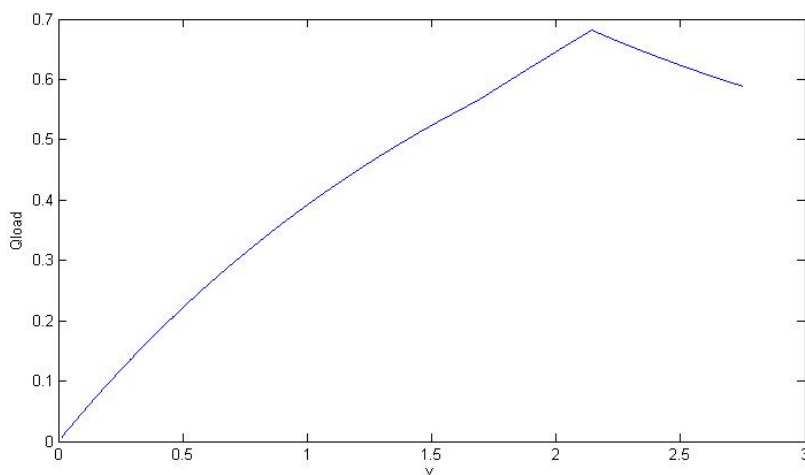
Στο Σχήμα (5.9) φαίνεται η καμπύλη ενεργού κατανάλωσης ισχύος από το φορτίο όταν η μέγιστη τιμή της παραγόμενης ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι 1 αμ , όταν είναι 0.6 αμ και όταν δεν υπάρχει καθόλου διεσπαρμένη παραγωγή. Η διαφορά στις αποκρίσεις κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου όταν δεν υπάρχει καθόλου διεσπαρμένη παραγωγή σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις οφείλεται στο γεγονός ότι στις περιπτώσεις με τη διεσπαρμένη παραγωγή εισάγεται στο δίκτυο η αρχική παραγωγή ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια που το φορτίο αυξάνεται. Ο Πίνακας (5.2) δείχνει τη μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 5.2: Μέγιστη Ενεργός Ισχύς (αμ)

Μέγιστη Διεσπαρμένη Παραγωγή	1	0.6	0
Μέγιστη Κατανάλωση Φορτίου	1.4039	1.2177	0.8588

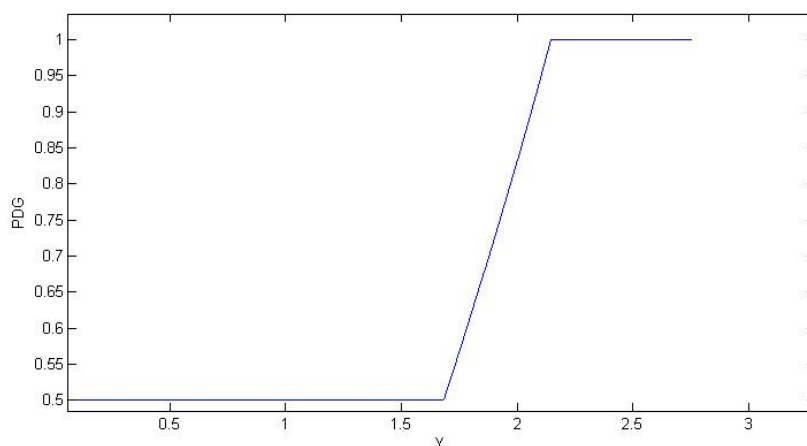
Βλέπουμε λοιπόν ότι με την ύπαρξη και διεσπαρμένης πηγής μπορεί να καλύπτεται υψηλότερη ζήτηση ισχύος .





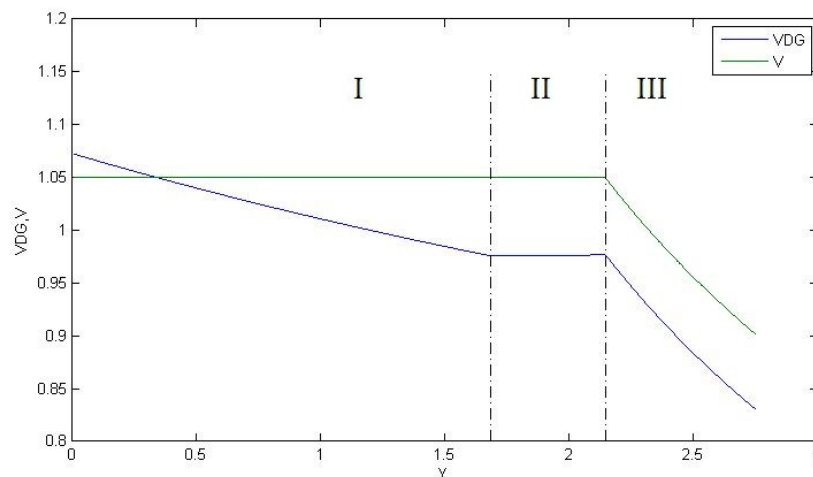
Σχήμα 5.10: Καμπύλη Αέργου ισχύος φορτίου

Στο Σχήμα 5.10 φαίνεται η καμπύλη αέργου ισχύος του φορτίου. Είναι ίδια με την καμπύλη ενεργού ισχύος αλλά η μέγιστη τιμή της αέργου ισχύος είναι σαφώς μικρότερη αφού φτάνει έως 0.6817 αμ.



Σχήμα 5.11: Παραγωγή Διεσπαρμένης Παραγωγής

Στο Σχήμα 5.11 φαίνεται η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής. Στο συγκεκριμένο Σχήμα φαίνονται με σαφή τρόπο τα τρία στάδια του μοντέλου. Στο πρώτο στάδιο έχει την αρχική παραγωγή, κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου αυξάνεται η παραγωγή έως τη μέγιστη τιμή της και στο τρίτο στάδιο μένει σταθερή στη μέγιστη τιμή.



Σχήμα 5.12: Καμπύλες τάσεων μετασχηματιστή, διεσπαρμένης παραγωγής

Στο Σχήμα 5.12 παρατηρείται ότι αρχικά υπάρχει μια υπέρταση στο ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής  $V_{DG}$ . Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μετασχηματιστής αρχικά εξάγει ενεργό ισχύ από το δίκτυο διανομής και έτσι η φορά του ρεύματος είναι από το ζυγό διεσπαρμένης παραγωγής προς το ζυγό του μετασχηματιστή. Με την αύξηση του φορτίου, και συνακόλουθα και του ρεύματος, μειώνεται το  $V_{DG}$  μέχρι το δεύτερο στάδιο. Στο δεύτερο στάδιο η τάση  $V$  είναι σταθερή όπως και οι απώλειες ισχύος μεταξύ του ζυγού του μετασχηματιστή και της διεσπαρμένης παραγωγής, λόγω του σταθερού ρεύματος  $I$ . Όμως παρατηρείται μια ελαφρά αύξηση της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής και αυτό οφείλεται στην επιπλέον ισχύ που αυτή παρέχει κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου. Στο τρίτο στάδιο υπάρχει ελεγχόμενη μείωση της τάσης του μετασχηματιστή με αποτέλεσμα ανάλογη μείωση και στην τάση της διεσπαρμένης παραγωγής.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι εξής τιμές του Πίνακα 5.3:

Πίνακας 5.3: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (όριο πτώσης τάσης) (α.μ.)

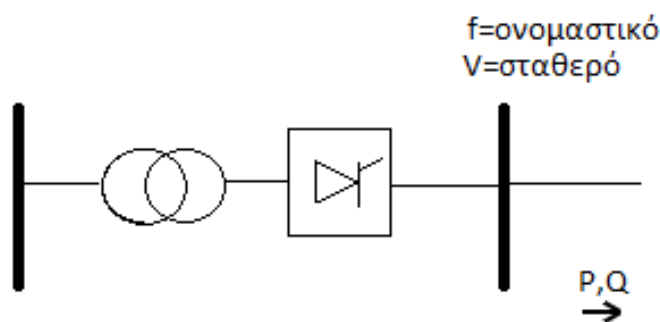
$V_o$	$\Sigma I$	$P_{load}$	$V_{load}$	$Y$
1.05	0.9	1.0548	0.9	1.447
1.05	0.9	1.4039	0.8508	2.155

Από τον Πίνακα 5.3 φαίνεται ότι με την προσθήκη διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνεται τόσο η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ όσο και το μέγιστο φορτίο κατά το οποίο το σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων τάσεων. Επίσης παρουσιάζεται και η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ ανεξαρτήτως ορίων τάσεων.

### 5.4.2 Προσομοίωση Δυναμικής Συμπεριφοράς

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, που πραγματοποιήθηκε μέσω Simulink, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά του κυκλώματος που εξετάσαμε προηγουμένως. Μέχρι τώρα εξετάστηκε μόνο η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για κάθε τιμή του φορτίου. Στην προσομοίωση θεωρείται ότι αρχικά η τάση του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος είναι ίση με την ονομαστική,  $V_o = 1$  αμ. Τα υπόλοιπα δεδομένα είναι ίδια με τον Πίνακα 5.1.

Ο έλεγχος βασίζεται στον μετατροπέα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και χωρίζεται όπως και πριν σε τρία στάδια. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου ελέγχεται η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Αυτό προκύπτει με την έγχυση αέργου ισχύος από το μετασχηματιστή.



Σχήμα 5.13: Λειτουργία πηγής σταθερής τάσεως

Το πρώτο στάδιο διαρκεί έως ότου το ρεύμα φτάσει τη μέγιστη τιμή του. Δηλαδή όσο ισχύει η ανισότητα :

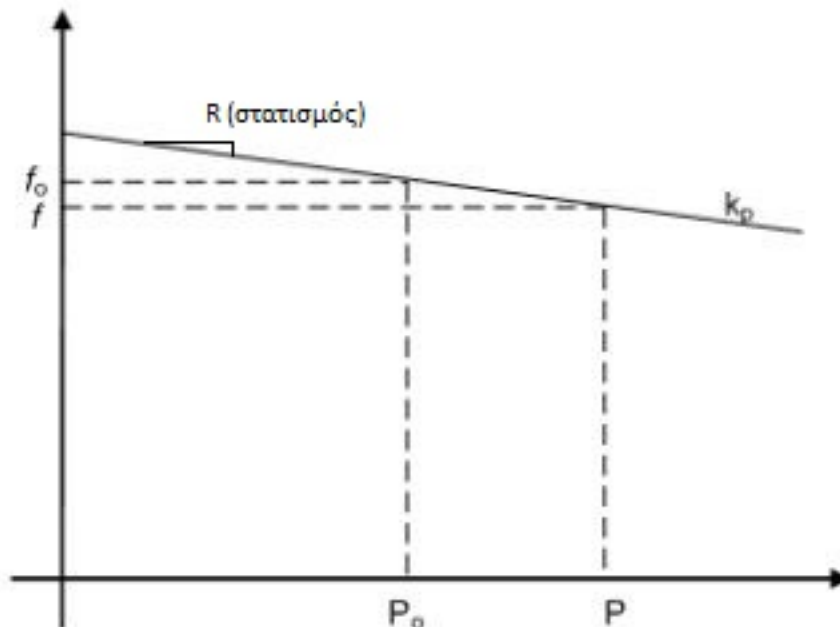
$$i_q^2 + i_d^2 < I_{lim}^2 \quad (5.13)$$

όπου  $i_d$  είναι το ενεργό ρεύμα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και  $i_q$  το άεργο ρεύμα.

Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου τόσο η συχνότητα  $f$  όσο και η τάση  $V$  του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή παραμένουν σταθερά.

Κατά το δεύτερο στάδιο, το ρεύμα έχει φτάσει στο ανώτατο επιτρεπόμενο όριο, οπότε χρειάζεται να αυξηθεί η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής για να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση. Αυτό γίνεται μέσω της συχνότητας  $f$  που ελέγχει ο μετατροπέας του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Όταν στιγμιαία το ρεύμα πάρει τιμή μεγαλύτερη του ορίου, δηλαδή  $I > I_{lim}$  τότε η συχνότητα μειώνεται. Η μείωση της συχνότητας  $f$  κάτω από την ονομαστική τιμή της δίνει σήμα στο ρυθμιστή συχνότητας της

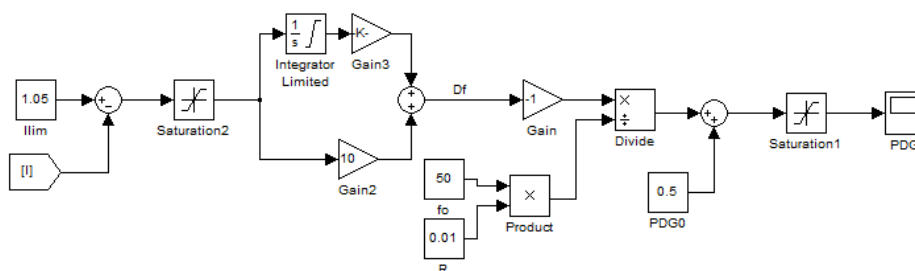
διεσπαρμένης παραγωγής να αυξήσει την παροχή ενεργού ισχύος. Η λειτουργία αυτή της διεσπαρμένης παραγωγής βασίζεται στην κλίση της χαρακτηριστικής του Σχήματος 5.14. Η κλίση αυτή ονομάζεται στατισμός (droop) και η αντίστοιχη λειτουργία ρύθμισης συχνότητας droop control.



Σχήμα 5.14: Χαρακτηριστική φορτίου συχνότητας Διεσπαρμένης Παραγωγής

Όσο η συχνότητα μειώνεται, αυξάνεται η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής, έως ότου το ρεύμα μειωθεί ώστε να ισχύει η (5.13), σε αυτή την περίπτωση η συχνότητα παραμένει στην τρέχουσα τιμή της, ή εάν φτάσει η διεσπαρμένη παραγωγή στη μέγιστη παραγωγή της (1 αμ). Στο Κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει στο δίκτυο μόνο ενεργό ισχύ, οπότε η επιπλέον μεταβολή της αέργου ισχύος καλύπτεται από το μετασχηματιστή.

Ο ρυθμιστής συχνότητας του μετατροπέα του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή λειτουργεί ως εξής: Όταν το ρεύμα ξεπεράσει στιγμιαία το όριο  $I_{lim}$  ενεργοποιείται ο αναλογικός ολοκληρωτικός έλεγχος που οδηγεί την πτώση της συχνότητας,  $\Delta f$ . Στο Σχήμα 5.15 φαίνεται ο έλεγχος κατά τη διάρκεια του δευτέρου σταδίου σε διάγραμμα Simulink. Η είσοδος του ελεγκτή είναι η τιμή του ρεύματος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.



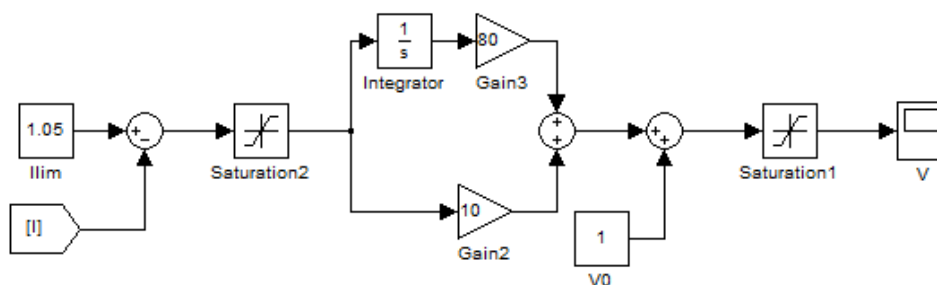
Σχήμα 5.15: Έλεγχος παραγωγής ενεργού ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής

Η διεσπαρμένη παραγωγή αποκρίνεται στην πτώση της συχνότητας μέσω του στατισμού R του Σχήματος 5.14 :

$$\frac{\Delta f}{f_N R} + P_{DG0} = P_{DG} \tag{5.14}$$

Εάν η παραγωγή ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής φτάσει στο μέγιστο διαθέσιμο όριο , δηλαδή μόλις  $P_{DG} = P_{DGmax}$ , τελειώνει το δεύτερο στάδιο ελέγχου και η συχνότητα διατηρείται σταθερή. Μια μικρή ανοχή  $\epsilon$  (π.χ.  $10^{-3}$ ) χρειάζεται για να μην υπερβεί η διεσπαρμένη παραγωγή το  $P_{max}$ .

Στο τρίτο στάδιο (Σχήμα 5.16) ο έλεγχος του ρεύματος γίνεται με την ελεγχόμενη μείωση της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.



Σχήμα 5.16: Έλεγχος τάσης δευτερεύοντος μετασχηματιστή

Η λογική είναι ίδια με το προηγούμενο στάδιο , απλά εδώ ο αναλογικός ολοκληρωτικός ρυθμιστής οδηγεί το σήμα μεταβολής της τάσης του δευτερεύοντος. Η τάση του δευτερεύοντος δίνεται από τον τύπο :

$$\Delta V + V_o = V \tag{5.15}$$

Η μόνη μεταβλητή είσοδος στον ελεγκτή του Σχήματος 5.16 είναι η τιμή του ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του κατά την διάρκεια της προσομοίωσης είναι οι εξής :

$$I_l = \frac{V_{DG}}{Z} \quad (5.16)$$

$$I = I_l - \frac{P_{DG}}{V_{DG}} \quad (5.17)$$

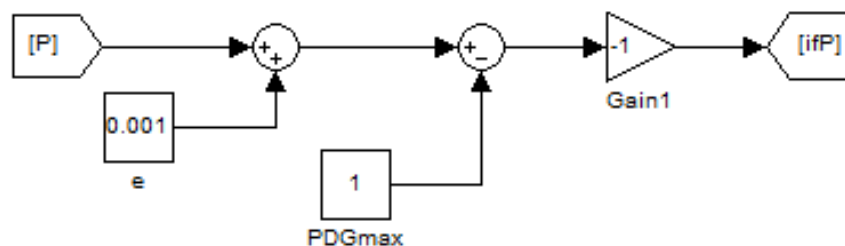
Η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής,  $V_{DG}$ , βρίσκεται όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.2.2.

Ακριβώς πριν τον αναλογικό ολοκληρωτικό έλεγχο κάθε ελεγκτή υπάρχει ένας διακόπτης ούτως ώστε οι δύο ελεγκτές να μη δουλεύουν ταυτόχρονα. Έτσι αποφεύγεται η μείωση της τάσης στην έξοδο του μετασχηματιστή προτού η διεσπαρμένη παραγωγή φτάσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων της, στην προκειμένη περίπτωση 1 αμ.

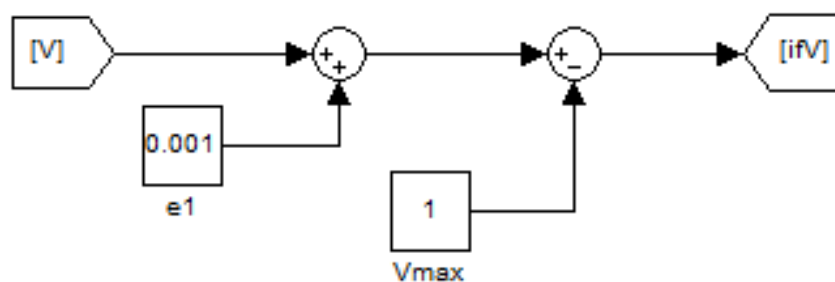
Όσο βρισκόμαστε στο δεύτερο στάδιο κατά το οποίο αυξάνεται η διεσπαρμένη παραγωγή η είσοδος στον ελεγκτή του  $P_{DG}$  είναι το  $\Delta I$  και στον ελεγκτή της τάσης είναι μηδέν. Μόλις η διεσπαρμένη παραγωγή φτάσει στη μέγιστη τιμή της αλλάζουν θέση και οι δύο διακόπτες. Πλέον η είσοδος στον ελεγκτή του  $P_{DG}$  είναι μηδέν και στον ελεγκτή της τάσης είναι  $\Delta I$ .

Αντίστοιχη διαδικασία συμβαίνει και όταν μειώνεται το φορτίο και περνάμε από το τρίτο στάδιο, που πλέον αυξάνεται η τάση μέχρι την ονομαστική τιμής της, στο δεύτερο στάδιο, που μειώνεται η έγχυση ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής. Μόλις, λοιπόν, η τάση φτάσει την ονομαστική τιμή της οι θέσεις των διακοπών αλλάζουν πάλι. Έτσι στον ελεγκτή του  $P_{DG}$  η είσοδος από μηδέν γίνεται  $\Delta I$  και στον ελεγκτή της τάσης  $V$  από  $\Delta I$  γίνεται μηδέν.

Στον μεν πρώτο διακόπτη (Σχήμα 5.17) γίνεται αλλαγή θέσης, αυξανόμενου του φορτίου, μόλις η τάση πέσει κάτω από την ονομαστική τιμή της και, κατά τη μείωση του φορτίου, μόλις η τάση φτάσει την ονομαστική τιμή της. Στον δε δεύτερο διακόπτη (Σχήμα 5.18) γίνεται αλλαγής θέσης, αυξανόμενου του φορτίου, μόλις η διεσπαρμένη παραγωγή φτάσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων της και, κατά τη μείωση του φορτίου, μόλις η διεσπαρμένη παραγωγή πέσει κάτω από το μέγιστό της.



Σχήμα 5.17: Συνθήκη αλλαγής διακόπτη controller V



Σχήμα 5.18: Συνθήκη αλλαγής διακόπτη controller PDG

### 5.4.3 Αποτέλεσμα Προσομοίωσης

Στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε το ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό του Σχήματος 5.2.

Τα μη μεταβλητά στοιχεία που χρησιμοποιούνται έχουν τις τιμές όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.4.

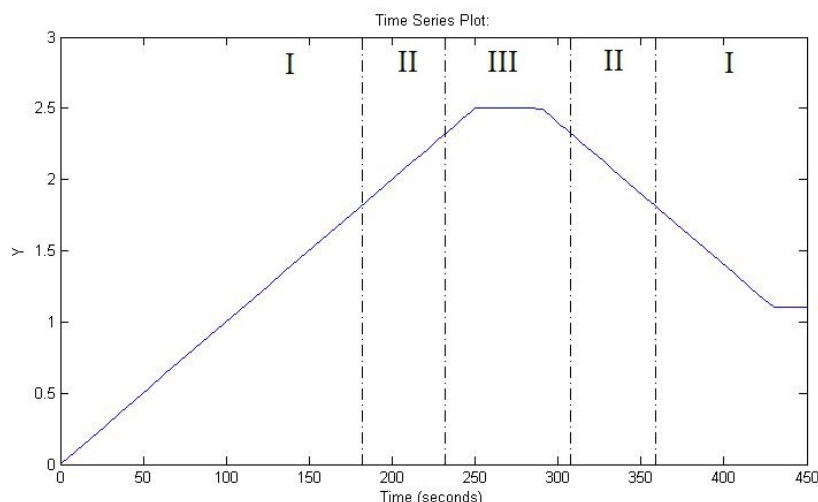
Πίνακας 5.4: Δεδομένα

$V_o$	$I_{lim}$	$P_{DGo}$	$P_{max}$	$f_N$	R (στατισμός)
1 αμ	1.05 αμ	0.5 αμ	1 αμ	50 Hz	0.01

Οι τιμές στα PI control είναι φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

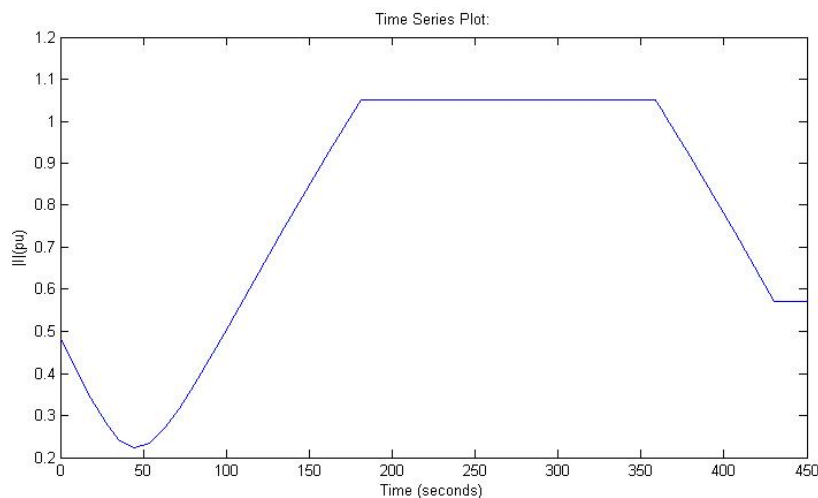
Πίνακας 5.5: τιμές για PI control

	$K_i$	$K_p$
Δεύτερο Στάδιο	200	10
Τρίτο Στάδιο	80	10



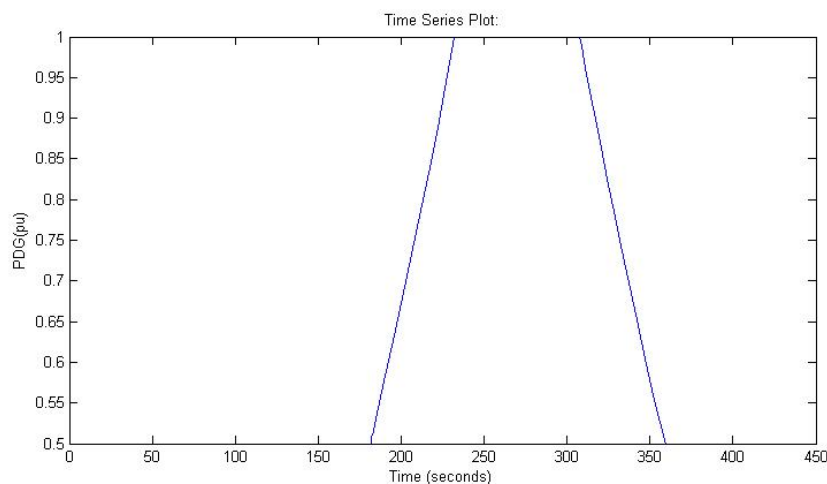
Σχήμα 5.19: Φορτίο (αγωγιμότητα)

Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η μεταβολή του φορτίου, η οποία έχει ρυθμό μεταβολής 0.01. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση το φορτίο αυξάνεται με ράμπα, φτάνει στο τρίτο στάδιο, σταθεροποιείται για μερικά δευτερόλεπτα και στη συνέχεια μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό που είχε προηγουμένως αυξηθεί, δηλαδή υπάρχει σταδιακή αποκοπή φορτίου. Ακολουθεί η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή από το τρίτο στάδιο προς το πρώτο. Πλέον η τάση της κύριας πηγής μας αυξάνεται έως ότου φτάσει την αρχική τιμή,  $V_o$ . Στη συνέχεια η διεσπαρμένη παραγωγή μας αρχίζει να μειώνεται μέχρι να φτάσει τη βασική παραγωγή της,  $P_{DGo}$ . Και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται το ρεύμα. Παρατηρούμε δηλαδή ότι ο έλεγχος που εφαρμόζουμε δουλεύει ανεξαρτήτως του αν το φορτίο αυξάνεται ή μειώνεται. Στα τελευταία δευτερόλεπτα της προσομοίωσης το φορτίο διατηρείται σταθερό. Η μέγιστη αύξηση του φορτίου φτάνει τα 2.5 αμ και στο τέλος της προσομοίωσης σταθεροποιείται στα 1.1 αμ.



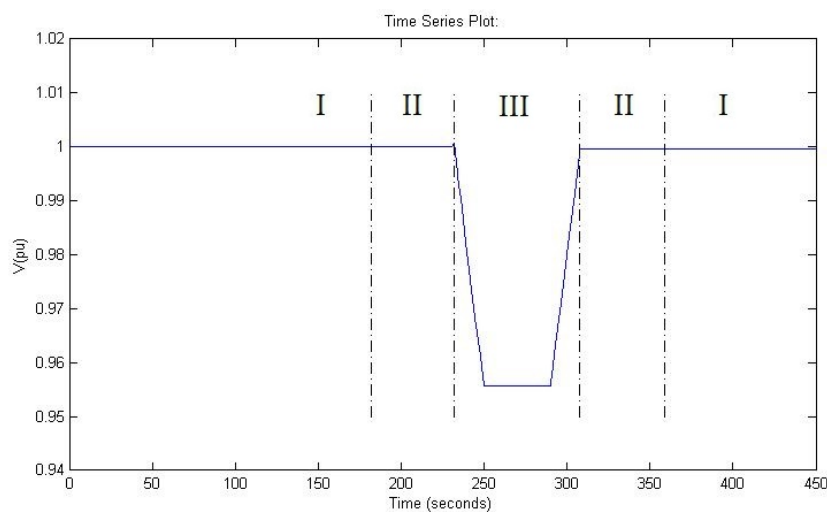
Σχήμα 5.20: Μέτρο ρεύματος δευτερεύοντος μετασχηματιστή





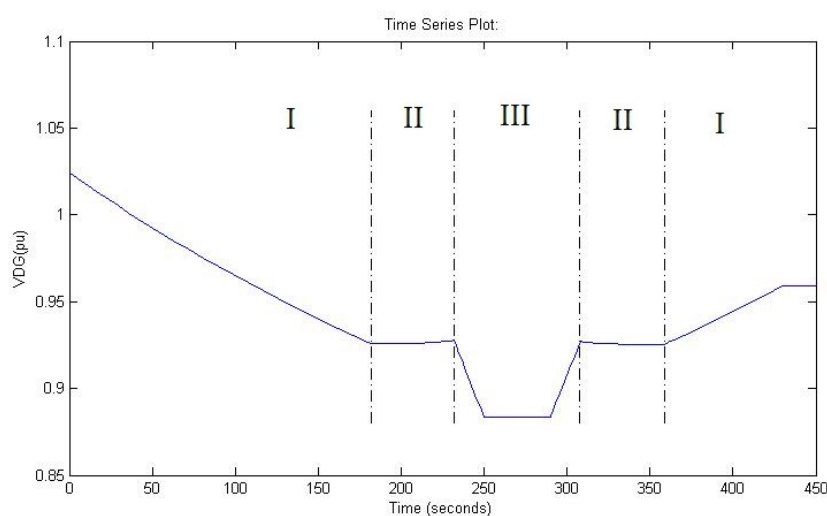
Σχήμα 5.21: Παραγωγή Διεσπαρμένης παραγωγής

Στα Σχήματα 5.20,5.21 φαίνονται το μέτρο του ρεύματος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα. Το ρεύμα, όπως και στην υποενότητα 5.4.1, αρχικά έχει φορά από τον ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς το ζυγό του μετασχηματιστή λόγω του χαμηλού φορτίου. Με την αύξηση του φορτίου μειώνεται το μέτρο του έως ότου το φορτίο φτάσει την τιμή αυτή που το ρεύμα του μετασχηματιστή αλλάζει φορά. Το μέτρο του ρεύματος συνεχίζει να αυξάνει έως ότου φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, δηλαδή έως ότου ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο, κατά τη διάρκεια του οποίου η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής παραμένει σταθερή στην αρχική τιμής της,  $P_{DG0}$ . Στο δεύτερο στάδιο αυξάνεται η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής μέχρι να φτάσει το μέγιστο των δυνατοτήτων της και στο τρίτο στάδιο μένει σταθερή στο  $P_{DGmax}$ . Το ρεύμα κατά τη διάρκεια αυτών των σταδίων παραμένει σταθερό. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σταδιακή αποκοπή φορτίου, οπότε η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής μειώνεται κατά τη διάρκεια του δευτέρου σταδίου και το ρεύμα μειώνεται κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου.

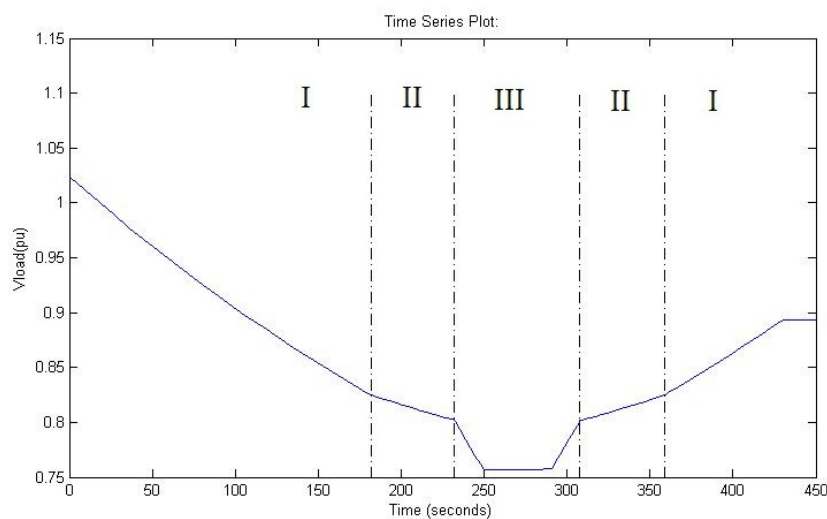


Σχήμα 5.22: Μέτρο τάσης δευτερεύοντος μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται το μέτρο της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή συναρτήσει του χρόνου. Στα δύο πρώτα στάδια διατηρείται σταθερή ίση με την ονομαστική. Μόλις το φορτίο έχει αυξηθεί τόσο ώστε το ρεύμα να είναι στην ανώτερη επιτρεπτή τιμή του και η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής να είναι η υψηλότερη δυνατή, δηλαδή μόλις ξεκινήσει το τρίτο στάδιο, η τάση του μετασχηματιστή μειώνεται ελεγχόμενα ώστε να μπορεί να καλυφθεί το φορτίο. Κατά τη χρονική διάρκεια που φαίνεται στο ίδιο Σχήμα να σταθεροποιείται η τάση μετά τη μείωσή της είναι επειδή το φορτίο μένει σταθερή για λίγο αφού φτάσει τη μέγιστη τιμή του, όπως είδαμε στο Σχήμα 5.19. Στη συνέχεια με τη σταδιακή αποκοπή του φορτίου η τάση του μετασχηματιστή ακολουθεί την αντίστροφη πορεία.



Σχήμα 5.23: Μέτρο τάσης διεσπαρμένης παραγωγής



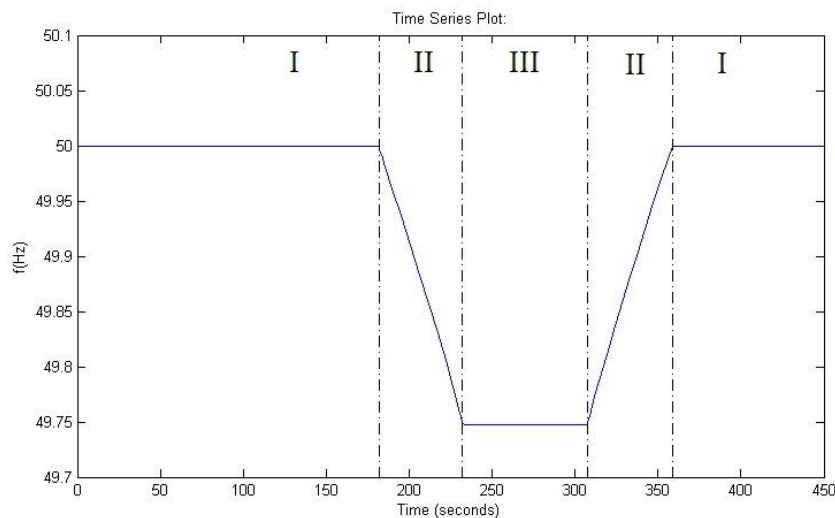
Σχήμα 5.24: Μέτρο τάσης φορτίου

Στα Σχήματα 5.23,5.24 φαίνονται το μέτρο της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής και το μέτρο της τάσης του φορτίου αντίστοιχα. Η ανύψωση τάσης στην διεσπαρμένη παραγωγή στην αρχή της προσομοίωσης οφείλεται στην αυξημένη παραγωγή ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή σε σχέση με τη ζήτηση του φορτίου. Η τάση στον μετασχηματιστή σε αυτό το σημείο είναι ίση με την ονομαστική και λόγω της φοράς που ρεύματος που εξηγήθηκε παραπάνω υπάρχει αυτή η ανύψωση τάσης. Στο πρώτο στάδιο με την αύξηση του ρεύματος αυξάνεται η πτώση τάσης στη γραμμή διανομής με αποτέλεσμα να μειώνεται η τάση στη διεσπαρμένη παραγωγή παρόλο που η τάση στον μετασχηματιστή είναι σταθερή. Στο δεύτερο στάδιο υπάρχει μια μικρή αύξηση τάσης στη διεσπαρμένη παραγωγή, παρόλο που το ρεύμα είναι σταθερής τιμής, που οφείλεται στην αύξηση της παραγωγής ενεργού ισχύος από αυτήν. Στο τρίτο στάδιο ο ρυθμός μείωσης της τάσης είναι μεγάλος αφού η τάση του μετασχηματιστή μειώνεται ελεγχόμενα. Κατά τη διάρκεια της σταδιακής αποκοπής του φορτίου ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Η τάση στο φορτίο σε κάθε στάδιο είναι μικρότερη από την τάση της διεσπαρμένης παραγωγής αφού υπάρχει επιπλέον πτώση τάσης λόγω του ρεύματος μεταξύ του ζυγού της διεσπαρμένης παραγωγής και του φορτίου.

Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται οι τιμές των τάσεων του δικτύου τη στιγμή που τελειώνει κάθε στάδιο.

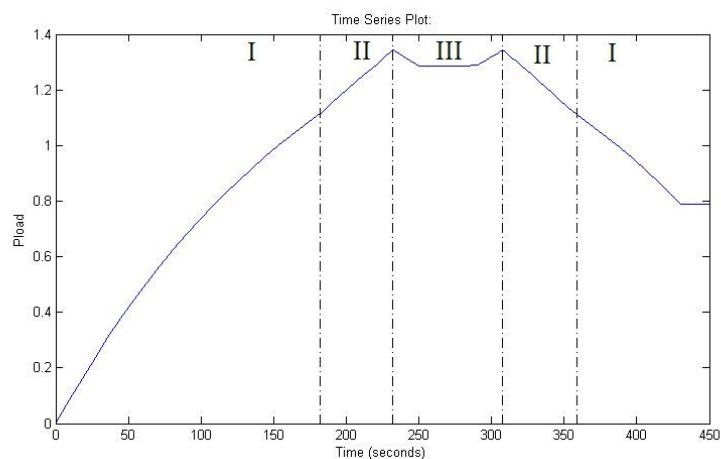
Πίνακας 5.6: Τάσεις στο τέλος κάθε σταδίου (αμ)

	$V$	$V_{DG}$	$V_{load}$
Πρώτο Στάδιο	1	0.926	0.825
Δεύτερο Στάδιο	1	0.928	0.803
Τρίτο Στάδιο	0.956	0.884	0.756



Σχήμα 5.25: Συχνότητα

Στο Σχήμα 5.25 φαίνεται η συχνότητα συναρτήσει του χρόνου. Αρχικά είναι ίση με την ονομαστική. Στο δεύτερο στάδιο, που το ρεύμα έχει ήδη φτάσει στην μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, η συχνότητα μειώνεται ώστε να δοθεί σήμα στη διεσπαρμένη παραγωγή να αυξήσει τη δικιά της παραγωγή (droop control). Στο τρίτο στάδιο που η διεσπαρμένη παραγωγή δεν έχει δυνατότητα να παρέχει παραπάνω ισχύ και υπάρχει η ελεγχόμενη πτώση τάσης του μετασχηματιστή σταθεροποιείται και η συχνότητα.



Σχήμα 5.26: Καμπύλη Ενεργού Κατανάλωσης Φορτίου

Στο Σχήμα 5.26 φαίνεται η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό του φορτίου. Παρατηρείται ότι στο πρώτο και στο δεύτερο στάδιο αυξάνεται αυξανόμενου και της αγωγιμότητας του φορτίου. Όμως στο τρίτο στάδιο είναι τέτοιος ο ρυθμός μείωσης της τάσης που η ενεργός ισχύς μειώνεται.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι εξής τιμές του Πίνακα 5.7:

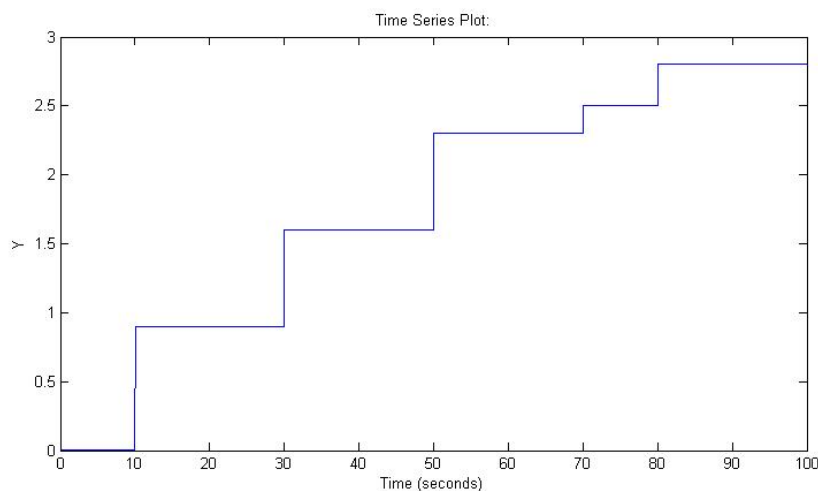
Πίνακας 5.7: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (α.μ.)

$V_o$	$\Sigma I$	$P_{load}$	$V_{load}$	$Y$
1	0.9	0.7591	0.9	1.0418
1	0.9	1.3453	0.8027	2.32

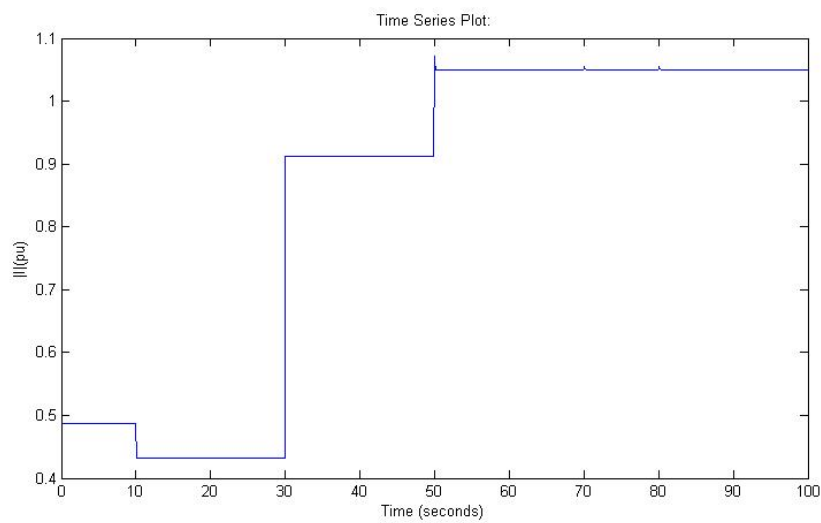
Από τον Πίνακα 5.7 φαίνεται ότι η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς εντός του ορίου πτώσεως τάσεως είναι αρκετά χαμηλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη πτώση τάσεως με αποτέλεσμα το σύστημα να βγαίνει εκτός των ορίων πτώσεως τάσεως για όχι ιδιαίτερα υψηλά φορτία. Σε Κεφάλαιο 6 θα εξεταστούν περιπτώσεις που εξαλείφεται αυτό το πρόβλημα.

#### 5.4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης βηματικής αύξησης του φορτίου

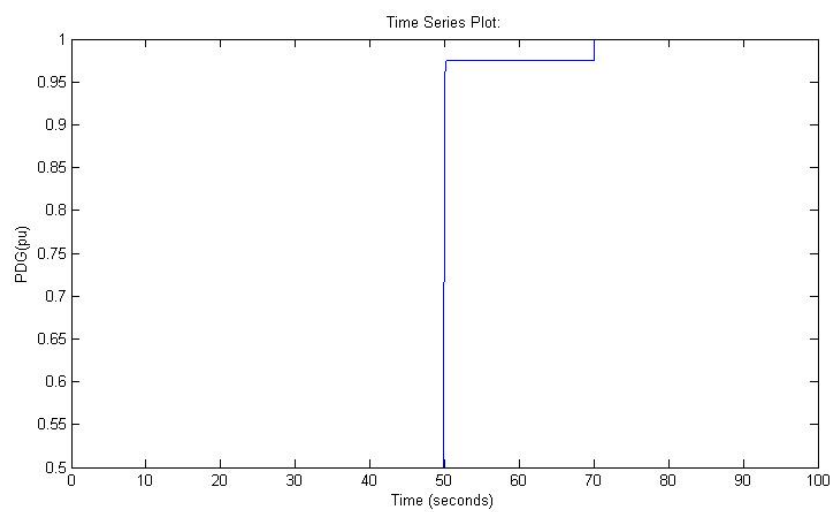
Στην ενότητα αυτή υπήρξε προσομοίωση με βηματική αύξηση του φορτίου ούτως ώστε να αποδειχθεί ότι ο έλεγχος είναι αποτελεσματικός και σε απότομες μεταβολές του φορτίου.



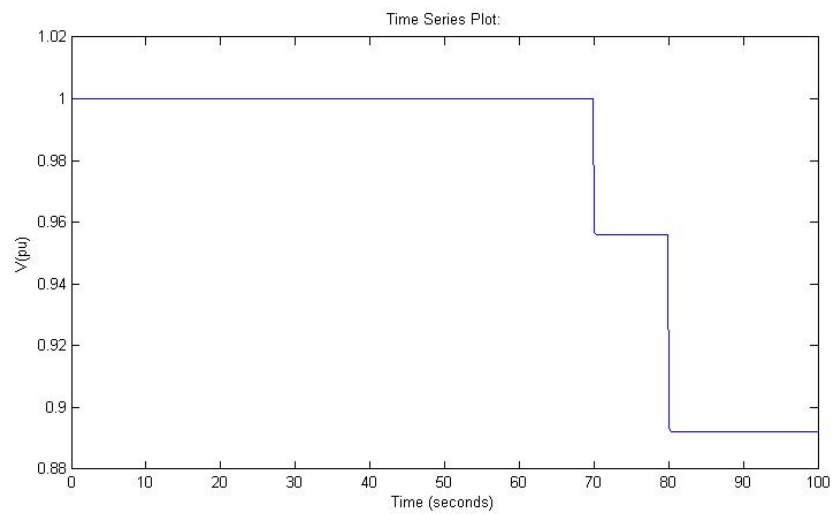
Σχήμα 5.27: Φορτίο (αγωγιμότητα)



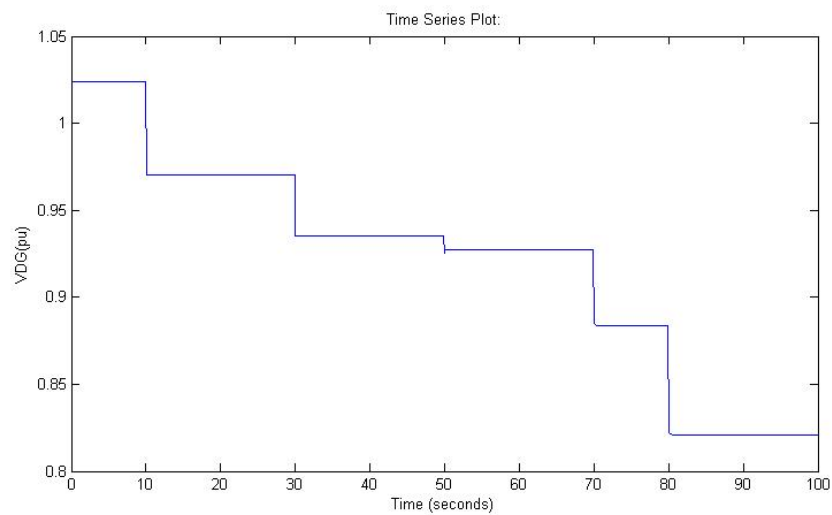
Σχήμα 5.28: Μέτρο ρεύματος μετασχηματιστή



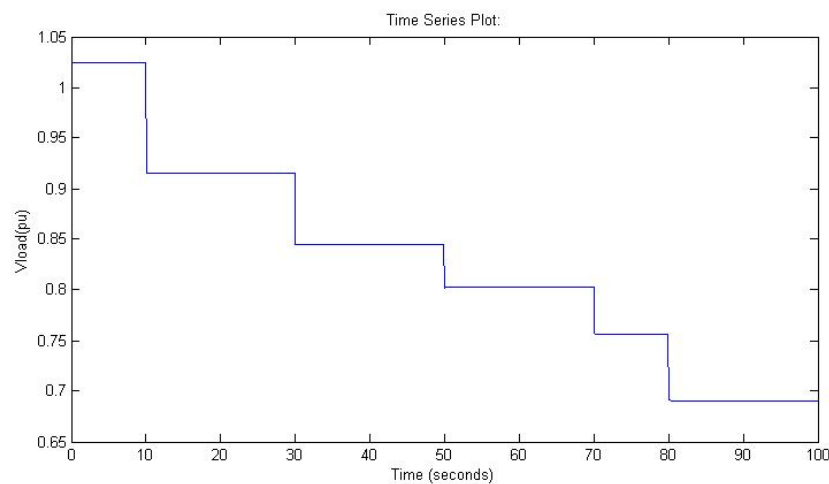
Σχήμα 5.29: Παραγωγή Διεσπαρμένης παραγωγής



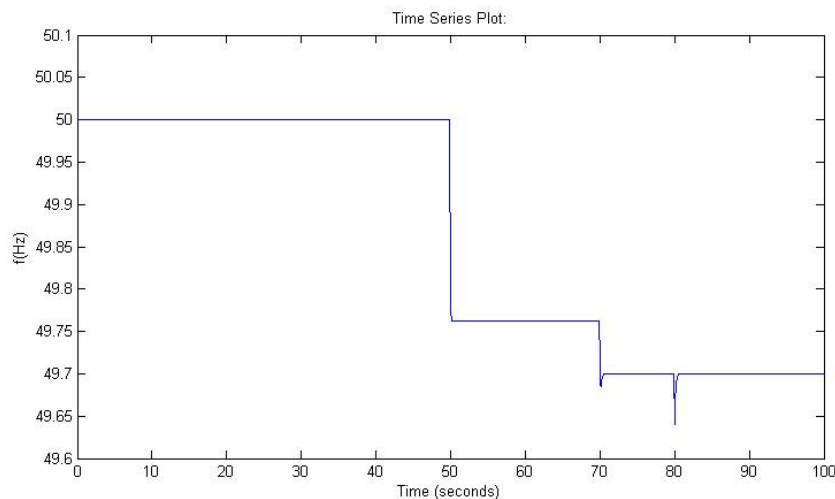
Σχήμα 5.30: Μέτρο τάσης μετασχηματιστή



Σχήμα 5.31: Μέτρο τάσης διεσπαρμένης παραγωγής



Σχήμα 5.32: Μέτρο τάσης φορτίου



Σχήμα 5.33: Συχνότητα

Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.27-5.33 ο έλεγχος είναι αποτελεσματικός και σε απότομες μεταβολές φορτίου. Κατά σειρά τα Σχήματα απεικονίζουν το φορτίο, το μέτρο του ρεύματος του μετασχηματιστή, την παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής, το μέτρο τάσης του μετασχηματιστή, το μέτρο της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής, το μέτρο τάσης του φορτίου και τη συχνότητα.

Αρχικά το φορτίο είναι πολύ χαμηλό. Σε αυτό το σημείο από το μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος εξάγεται ισχύς προς το έναντι δίκτυο, καθώς η παραγωγή από τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι τέτοια που υπερκαλύπτει τη ζήτηση. Οπότε το ρεύμα έχει φορά από το ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς το ζυγό του μετασχηματιστή και η ενεργός ισχύς της πηγής είναι αρνητική,  $P < 0$ .



Στα 10 δευτερόλεπτα διενεργείται η πρώτη βηματική αύξηση του φορτίου. Ο έλεγχος ακόμα βρίσκεται στο πρώτο στάδιο όπου η τάση στο μετασχηματιστή μένει σταθερή και ίση με την ονομαστική τιμή, η διεσπαρμένη παραγωγή δεν έχει αυξηθεί και το ρεύμα πλέον είναι ελαφρώς θετικό, δηλαδή έχει φορά από το ζυγό του μετασχηματιστή προς το ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής. Οπότε πλέον η κάλυψη της ζήτησης της ενεργού ισχύος καλύπτεται και από το μετασχηματιστή, υπάρχει δηλαδή εισαγωγή ενεργούς ισχύος στο δίκτυο.

Στα 30 δευτερόλεπτα αυξάνεται περαιτέρω το φορτίο. Ακόμα διενεργείται το πρώτο στάδιο ελέγχου. Το ρεύμα πλέον έχει αρχίσει να προσεγγίζει το ανώτατο επιτρεπτό όριο,  $I_{lim} = 1.05pu$ , όμως ακόμα η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής μας δεν έχει αυξηθεί.

Στα 50 δευτερόλεπτα αυξάνεται περαιτέρω το φορτίο. Πλέον το ρεύμα έχει φτάσει στην οριακή τιμή του οπότε διενεργείται το δεύτερο στάδιο του ελέγχου. Τώρα το ρεύμα είναι στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, η τάση στην κύρια πηγή μας διατηρείται ακόμα στην αρχική τιμή της και η διεσπαρμένη παραγωγή καλύπτει την αύξηση στη ζήτηση από το φορτίο.

Στα 70 δευτερόλεπτα αυξάνουμε περαιτέρω το φορτίο. Πλέον ο έλεγχος είναι στο τρίτο στάδιο, στην ελεγχόμενη μείωση της τάσης. Τώρα το ρεύμα είναι στη μέγιστη τιμή του και η διεσπαρμένη παραγωγή παρέχει στο δίκτυο τη μέγιστη δυνατή ενεργό ισχύ που μπορεί. Έτσι αναγκαστικά για την κάλυψη του φορτίου μειώνεται η τάση.

Στα 80 δευτερόλεπτα αυξάνεται για φορά το φορτίο. Προφανώς ακόμα η προσομοίωση είναι στο τρίτο στάδιο.

Ο Πίνακας 5.8 απεικονίζει τα αποτελέσματα της εν λόγω προσομοίωσης.

**Πίνακας 5.8:** Αποτελέσματα Προσομοίωσης Βηματικών αλλαγών φορτίου

Δευτερόλεπτα	Y(αμ)	Στάδιο	I(αμ)	$P_{DG}$ (αμ)	V(αμ)	$V_{DG}$ (αμ)	$V_{load}$ (αμ)	f(Hz)
0	0.001	1 <sup>ο</sup>	0.488	0.5	1	1.024	1.024	50
10	0.9	1 <sup>ο</sup>	0.433	0.5	1	0.97	0.915	50
30	1.6	1 <sup>ο</sup>	0.913	0.5	1	0.935	0.845	50
50	2.3	2 <sup>ο</sup>	1.05	0.975	1	0.927	0.803	49.762
70	2.5	3 <sup>ο</sup>	1.05	1	0.956	0.884	0.756	49.7
80	2.8	3 <sup>ο</sup>	1.05	1	0.892	0.821	0.691	49.7

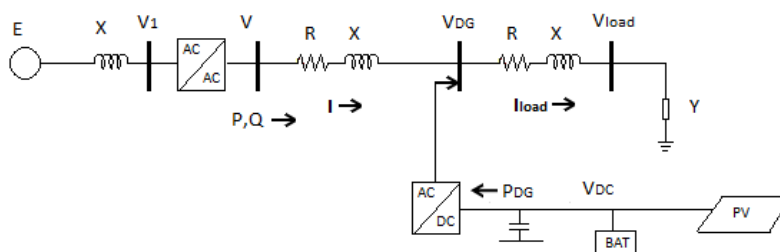


# Κεφάλαιο 6

## Επίδραση Ρύθμισης Τάσεως

### 6.1 Περιγραφή Συστήματος

Και σε αυτό το κεφάλαιο θεωρείται ότι στη γραμμή διανομής υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή ενώ εξετάζεται η επίδραση της ρύθμισης τάσεως στα όρια λειτουργίας. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται αντιστάθμιση πτώσης τάσεως από το ρυθμιστή αέργου ισχύος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος και στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει ρύθμιση τάσεως από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής. Όπως και στο Κεφάλαιο 5 η διεσπαρμένη παραγωγή τοποθετείται στο μέσο της γραμμής διανομής. Ο μετατροπέας της διεσπαρμένης παραγωγής στην πρώτη περίπτωση προγραμματίζεται να κρατάει σταθερό συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα σε αντίθεση με τη δεύτερη περίπτωση που ο συντελεστής ισχύος είναι διάφορος της μονάδας. Η διεσπαρμένη παραγωγή αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ και έχει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω συστοιχιών (μπαταρίες), Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1: Παράσταση Συστήματος

### 6.2 Αντιστάθμιση Πτώσης Τάσεως

Όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 5 ανάλογα με τη ζήτηση του φορτίου η τάση μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος της γραμμής διανομής. Ένας τρόπος για να μειώνεται αυτή η διακύ-

μανση, είναι ο ρυθμιστής της τάσεως αναχώρησης  $V$  να έχει ως είσοδο, πέρα από το μέτρο της τάσης, είτε το ρεύμα  $I$  είτε την ενεργό ισχύ  $P$ . Εξετάζονται δύο περιπτώσεις:

α) Αντιστάθμιση με βάση το μέτρο του ρεύματος και τη σύνθετη αντίσταση, οπότε ο ρυθμιστής κρατά σταθερή την τάση

$$V_o = V - ZI \quad (6.1)$$

με  $V_o = 1$  αμ.

β) Αντιστάθμιση με βάση την ενεργό ισχύ και την ωμική αντίσταση, οπότε ο ρυθμιστής κρατά σταθερή την τάση

$$V_o = V - RP \quad (6.2)$$

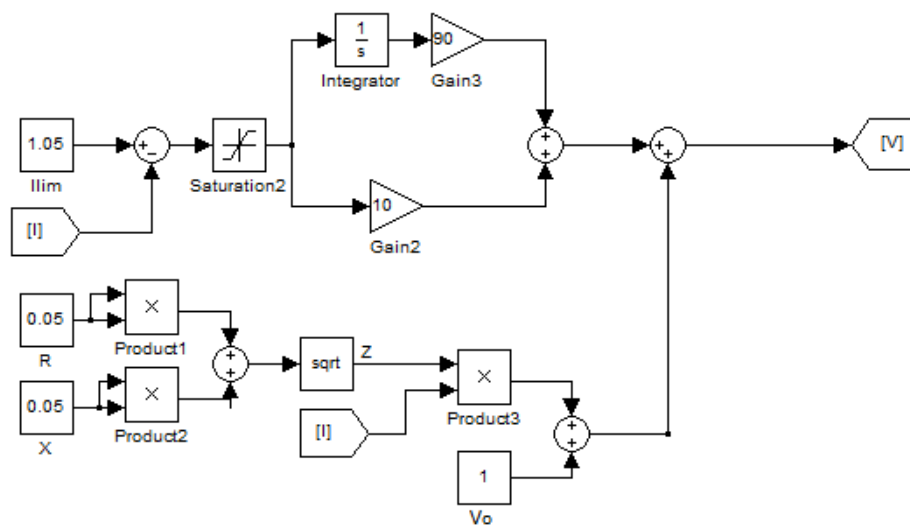
με  $V_o = 1.05$  αμ.

Με την αντιστάθμιση πτώσης τάσεως επιτυγχάνεται η τιμή της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να είναι υψηλότερη από την ονομαστική κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας. Όταν απαιτείται η τάση στη διεσπαρμένη παραγωγή αλλά και η τάση του φορτίου έχουν τιμή πιο κοντά στην ονομαστική σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος εντός των ορίων πτώσεως τάσεως για μεγαλύτερες τιμές του φορτίου.

### 6.2.1 Αντιστάθμιση πτώσης τάσεως με βάση το ρεύμα

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς είναι παρόμοια με αυτή της ενότητας 5.4.2. Προσομοιώνεται αυξομείωση του φορτίου με ράμπα, με τη διαφορά ότι η τάση εισόδου δεν είναι η ονομαστική αλλά ισχύει η σχέση (6.1), με  $V_o = 1$  αμ. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας, δηλαδή στα δύο πρώτα στάδια λειτουργίας, η τάση στη διεσπαρμένη παραγωγή,  $V_{DG}$ , αλλά και η τάση του φορτίου,  $V_{load}$ , να έχουν υψηλότερη τιμή σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις.

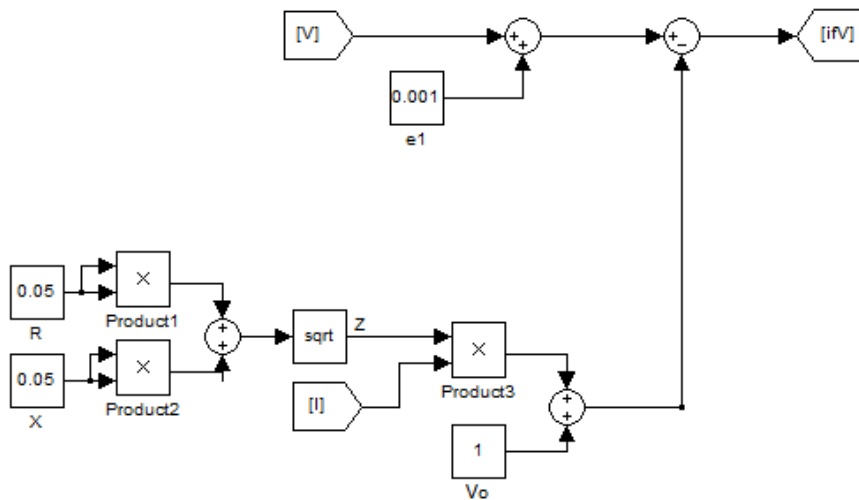
Ο έλεγχος της διεσπαρμένης παραγωγής με βάση τη συχνότητα μένει ο ίδιος με πριν, (Σχήμα 5.15), αλλά ο έλεγχος της τάσης έχει κάποιες αλλαγές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2. Πλέον ο ρυθμιστής της τάσεως αναχώρησης δεν έχει ως είσοδο την τάση του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, αλλά τη σχέση (6.1). Δεδομένου ότι η ρύθμιση είναι πολύ γρήγορη θεωρείται ακαριαία, δηλαδή η (6.1) ισχύει ως αλγεβρική σχέση.



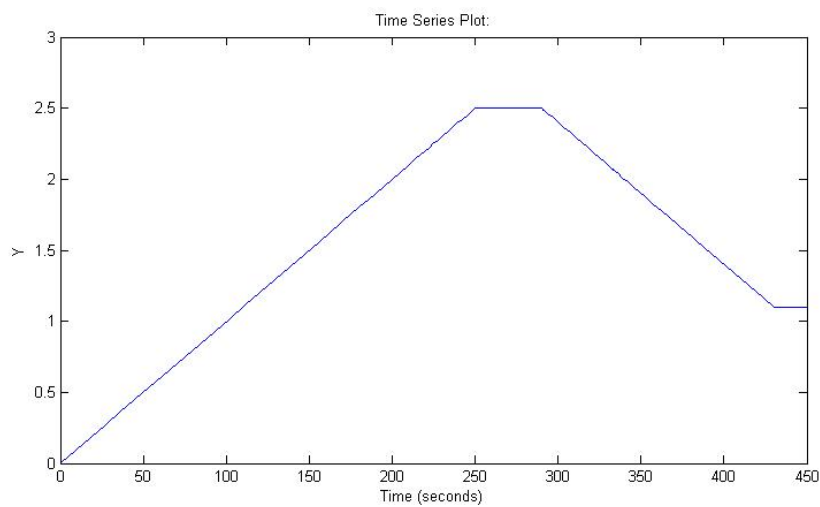
Σχήμα 6.2: Έλεγχος τάσης δευτερεύοντος μετασχηματιστή με αντιστάθμιση πτώσεως τάσεως με βάση το ρεύμα

Όπως και στην προσομοίωση της ενότητας 5.4.2 πριν από κάθε ελεγκτή, της συχνότητας και της τάσης αναχώρησης, υπάρχει ένας διακόπτης. Έτσι επιτυγχάνεται η ολοκλήρωση του δευτέρου σταδίου προτού ξεκινήσει το τρίτο στάδιο σε περίπτωση αύξησης του φορτίου και αντίστοιχα η ολοκλήρωση του τρίτου σταδίου προτού ξεκινήσει το δεύτερο σε περίπτωση μείωσης του φορτίου.

Η συνθήκη για να αλλάξει ο διακόπτης και να ξεκινήσει το τρίτο στάδιο μένει η ίδια, (Σχήμα 5.17), αφού εξαρτάται από τη ενεργό ισχύ της διεσπαρμένης παραγωγής, η συνθήκη για να ξεκινήσει το δεύτερο στάδιο είναι διαφορετική όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.

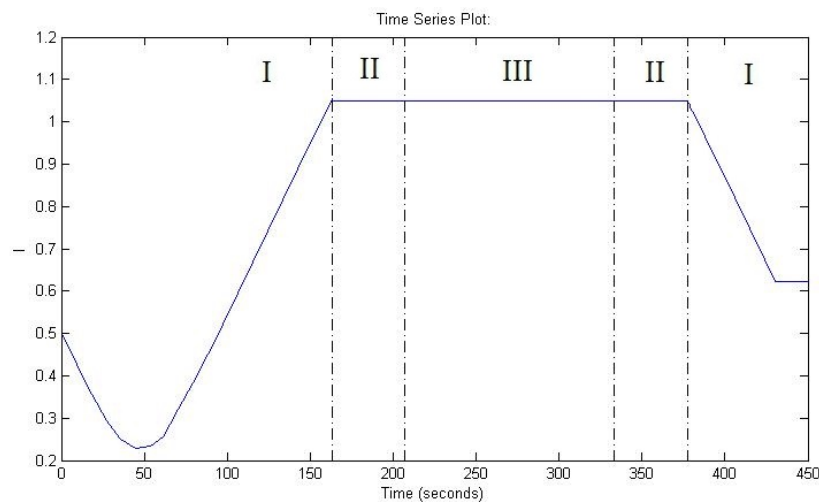


Σχήμα 6.3: Συνθήκη αλλαγής διακόπτη ελεγκτή ενεργού ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής με βάση το ρεύμα

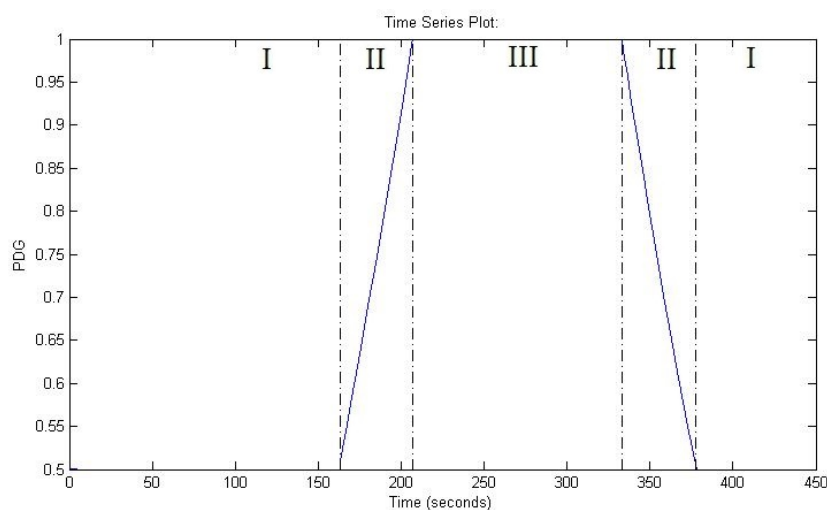


Σχήμα 6.4: Προσομοιούμενη μεταβολή φορτίου (αγωγιμότητα)

Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται η προσομοιούμενη μεταβολή της αγωγιμότητας του φορτίου.

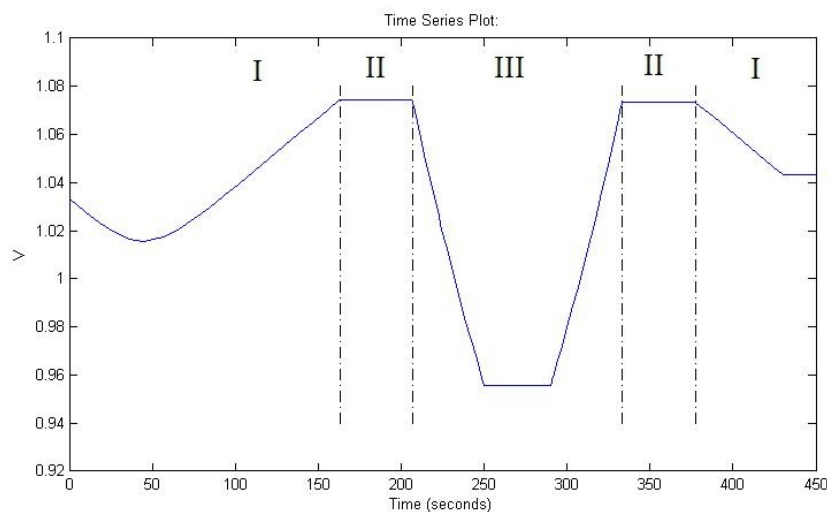


Σχήμα 6.5: Μέτρο ρεύματος Μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος



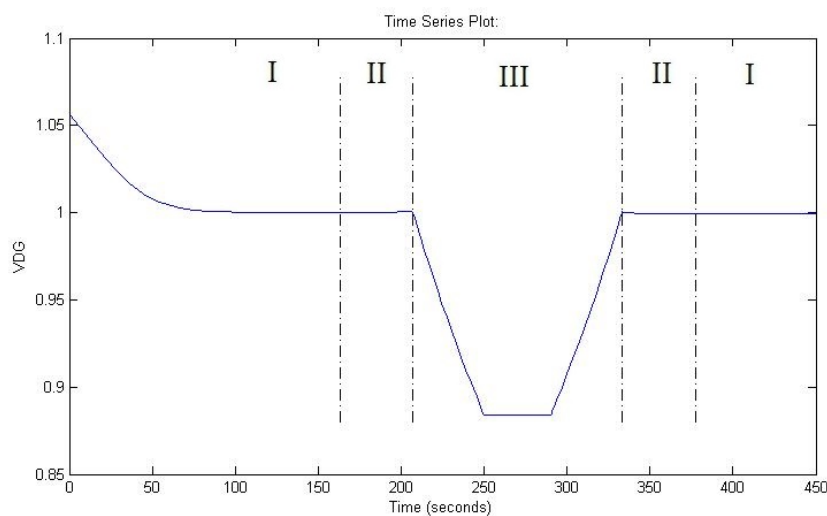
Σχήμα 6.6: Παραγωγή Διεσπαρμένης παραγωγής

Στα Σχήματα 6.5 και 6.6 φαίνονται το μέτρο του ρεύματος του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και η ενεργός ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα, κατά τη μεταβολή του φορτίου που προσομοιώνεται, (Σχήμα 6.4). Όπως και στο Κεφάλαιο 5, το ρεύμα αρχικά έχει φορά από το ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς το μετασχηματιστή και αυξανόμενο του φορτίου αλλάζει η φορά του ρεύματος. Μόλις φτάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του,  $I_{lim}$ , ενεργοποιείται ο έλεγχος ρεύματος και στα επόμενα δύο στάδια το ρεύμα παραμένει σταθερό. Η διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνει την παραγωγή της στο δεύτερο στάδιο, για να καλυφθεί η ζήτηση του φορτίου, έως ότου φτάσει στο μέγιστο των δυνατοτήτων της, οπότε μειώνεται ελεγχόμενα η τάση αναχώρησης  $V$ , (στάδιο τρίτο).



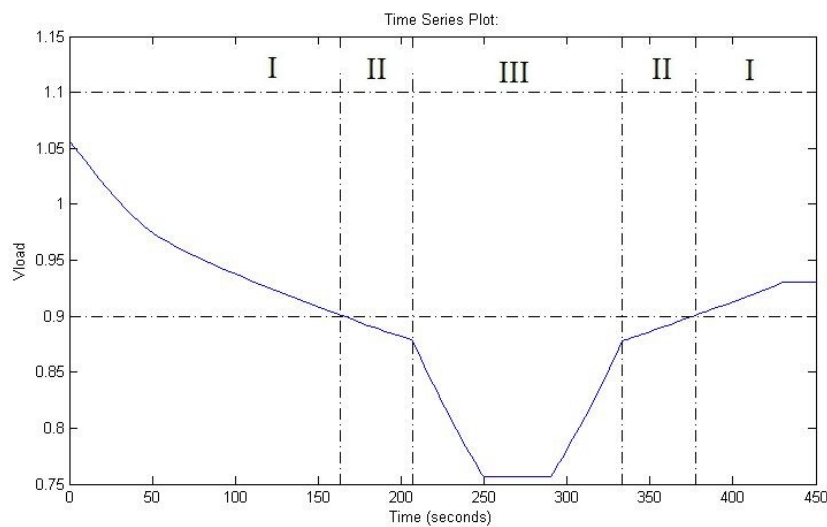
Σχήμα 6.7: Μέτρο τάσης μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται το μέτρο της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Όπως παρατηρείται στην διάρκεια κανονικής λειτουργίας, δηλαδή προτού αρχίσει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης στο τρίτο στάδιο, η μεταβολή του μέτρου της τάσης είναι ανάλογη με το μέτρο του ρεύματος, αφού η σύνθετη αντίσταση μεταξύ των ζυγών του μετασχηματιστή και της διεσπαρμένης παραγωγής μένει σταθερή. Έτσι η τάση του μετασχηματιστή,  $V$ , δεν είναι σταθερή. Στο δεύτερο στάδιο, που το ρεύμα είναι σταθερό, σταθεροποιείται και η τάση του μετασχηματιστή. Μόλις ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο ξεκινάει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης αφού το φορτίο έχει αυξηθεί τόσο που δεν γίνεται να καλυφθεί με τους περιορισμούς που έχουμε,  $I \leq I_{lim}$  και  $P_{DG} \leq P_{DG}^{max}$ . Τη στιγμή που ξεκινάει αυτό το στάδιο αλλάζουν θέση οι διακόπτες των ελεγκτών.



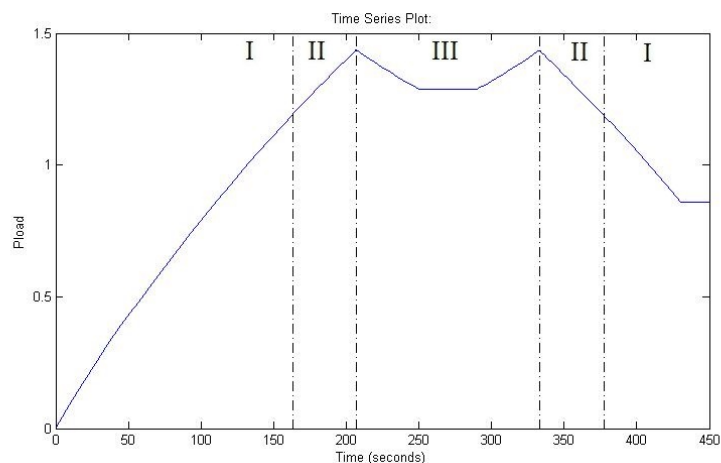
Σχήμα 6.8: Μέτρο τάσης διεσπαρμένης παραγωγής





Σχήμα 6.9: Μέτρο τάσης φορτίου

Στα Σχήματα 6.8 και 6.9 φαίνονται οι τάσεις στη διεσπαρμένη παραγωγή και στο φορτίο αντίστοιχα. Η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής αρχικά είναι μεγαλύτερης τιμής από αυτήν του μετασχηματιστή λόγω τηςφοράς του ρεύματος από τη διεσπαρμένη παραγωγή προς τον μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχήμα 6.10: Καμπύλη Ενέργου Κατανάλωσης Φορτίου

Στο Σχήμα 6.10 φαίνεται η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό του φορτίου. Η ισχύς αυξάνεται στην κανονική λειτουργία και φτάνει στη μέγιστη τιμή της όταν αρχίζει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης. Στη συνέχεια μειώνεται.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 6.1 σχετικά με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ στο φορτίο.

Πίνακας 6.1: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (α.μ.)

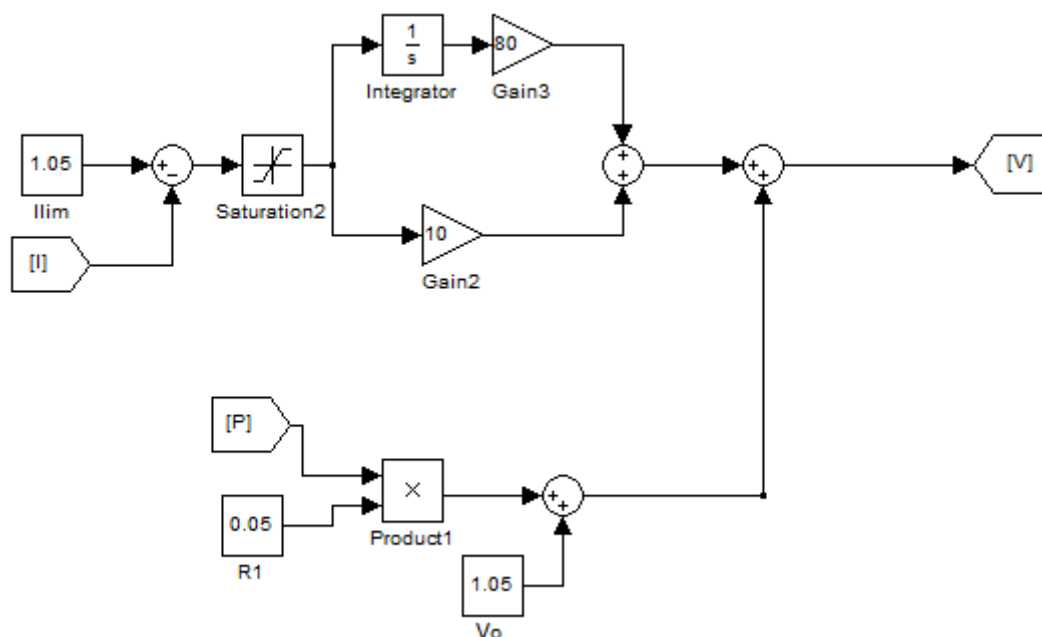
$V$	$\Sigma.I$	$P_{load}$	$V_{load}$	$Y$
1.0742	0.9	1.2069	0.9	1.6557
1.0741	0.9	1.4372	0.8787	2.0684

Στον Πίνακα 6.1 φαίνεται η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς όταν το σύστημα βρίσκεται εντός του ορίου πτώσεως τάσεως και όταν δεν βρίσκεται εντός ορίου. Χάρη στη μεγαλύτερη τιμή της τάσης στον μετασχηματιστή λόγω της αντιστάθμιση πτώσης τάσης το σύστημα είναι εντός του ορίου πτώσης τάσης για μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας του φορτίου.

### 6.2.2 Αντιστάθμιση πτώσης τάσεως με βάση την ισχύ

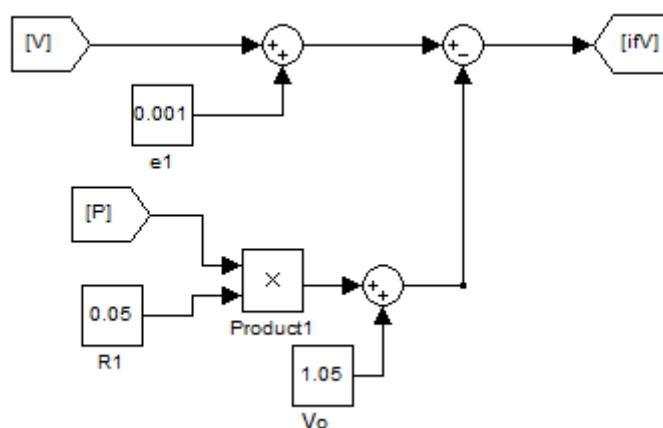
Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει αντιστάθμιση της τάσης τροφοδοσίας, απλά αντί να χρησιμοποιείται η συνθήκη (6.1) που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως τώρα ισχύει η συνθήκη (6.2). Ο λόγος που επιλέγεται  $V_o = 1.05$  αμ και όχι  $V_o = 1$  αμ είναι επειδή στην συγκεκριμένη συνθήκη δεν λαμβάνεται υπόψιν η πτώση τάσης λόγω αέργου ισχύος. Το πλεονέκτημα της χρήσης της ενεργού ισχύος είναι ότι διαφοροποιείται η περίπτωση που η γραμμή διανομής εξάγει ενεργό ισχύ ώστε να διορθωθεί η απόκριση της τάσεως σε αυτή την περίπτωση.

Αντίστοιχα με την προηγούμενη παράγραφο 6.2.1 ο έλεγχος της ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής μένει ο ίδιος, (Σχήμα 5.15), αλλά ο έλεγχος της τάσης έχει κάποιες αλλαγές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11. Πλέον ο ρυθμιστής της τάσεως αναχώρησης δεν έχει ως είσοδο την τάση του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος, αλλά τη σχέση (6.2).



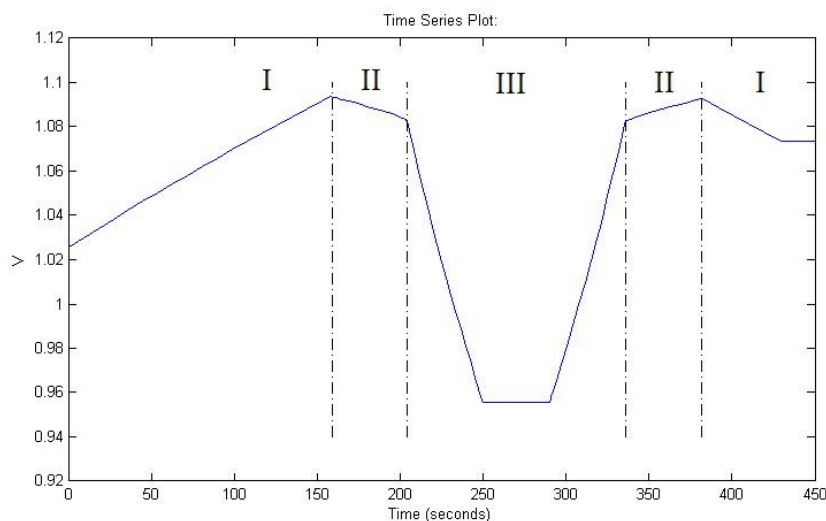
Σχήμα 6.11: Έλεγχος τάσης δευτερεύοντος μετασχηματιστή με αντιστάθμιση ισχύος

Η συνθήκη για να αλλάξει ο διακόπτης και να ξεκινήσει το τρίτο στάδιο μένει η ίδια, (Σχήμα 5.17), αφού εξαρτάται από την ενεργό ισχύ της διεσπαρμένης παραγωγής. Η συνθήκη για να αρχίσει το δεύτερο στάδιο είναι διαφορετική όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.12.

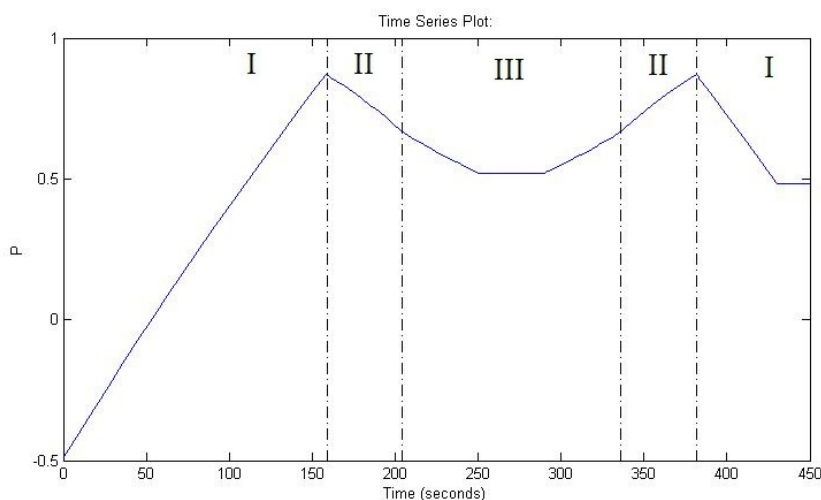


Σχήμα 6.12: Συνθήκη αλλαγής διακόπτη ελεγκτή ενεργού ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής (Διόρθωση πτώσης τάσης με βάση την ισχύ)

Η αυξομείωση του φορτίου είναι ίδια με την προηγούμενη υποενότητα 6.2.1, (Σχήμα 6.4).

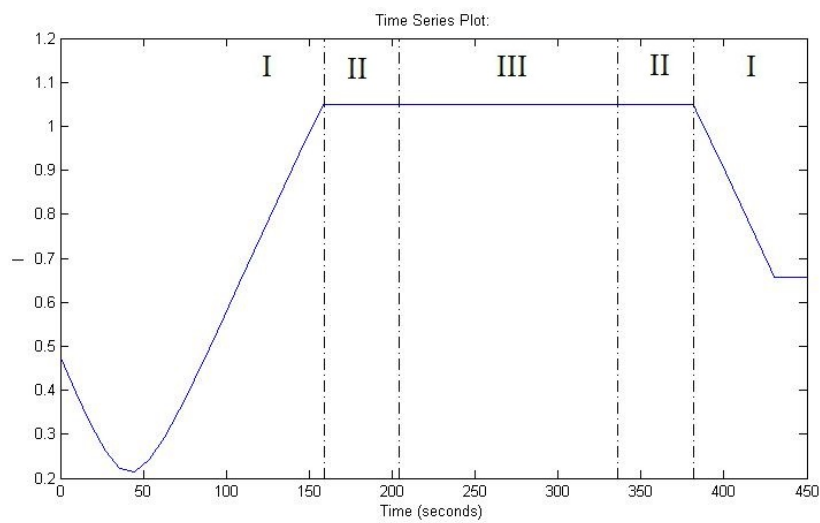


Σχήμα 6.13: Μέτρο τάσης μετασχηματιστή

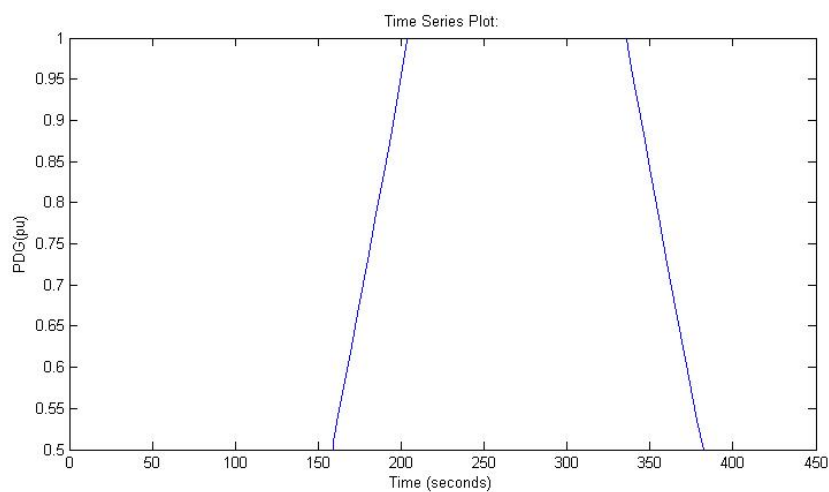


Σχήμα 6.14: Καμπύλη Ενεργού Ισχύος Μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 6.13 φαίνεται η τάση του μετασχηματιστή, όπου παρατηρείται μια αναλογία αυτής με την ενεργό ισχύ που αποδίδει ο μετασχηματιστής στο δίκτυο διανομής, Σχήμα 6.14, κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας αφού η αντίσταση  $R$  μένει σταθερή. Έτσι και τώρα η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή δεν είναι σταθερή στο πρώτο στάδιο. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση δεν είναι σταθερή ούτε στο δεύτερο στάδιο, αφού η ενεργός ισχύς του μετασχηματιστή, (Σχήμα 6.14), μειώνεται κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου με αποτέλεσμα να μειώνεται και η τάση του μετασχηματιστή. Μόλις ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο ξεκινάει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης αφού το φορτίο έχει αυξηθεί τόσο που δεν γίνεται να καλυφθεί με τους περιορισμούς,  $I \leq I_{lim}$  και  $P_{DG} \leq P_{DG}^{max}$ . Τη στιγμή που ξεκινάει αυτό το στάδιο αλλάζουν θέση οι διακόπτες των ελεγκτών.

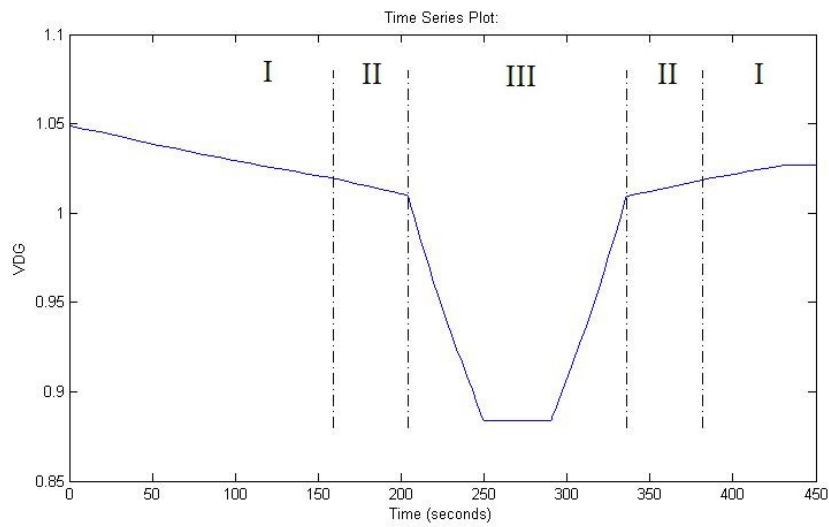


Σχήμα 6.15: Μέτρο ρεύματος Μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος

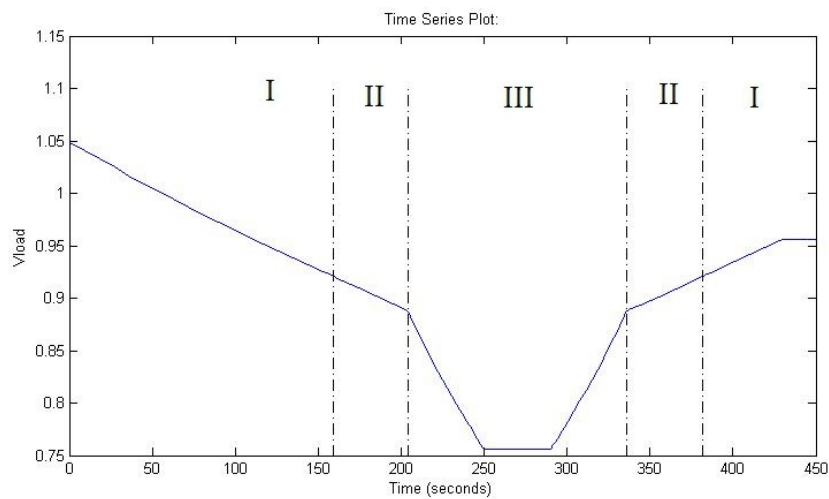


Σχήμα 6.16: Παραγωγή Διεσπαρμένης παραγωγής

Στα Σχήματα 6.15 και 6.16 φαίνονται το μέτρο του ρεύματος του μετασχηματιστή και η παραγωγή της διεσπαρμένης παραγωγής αντίστοιχα.

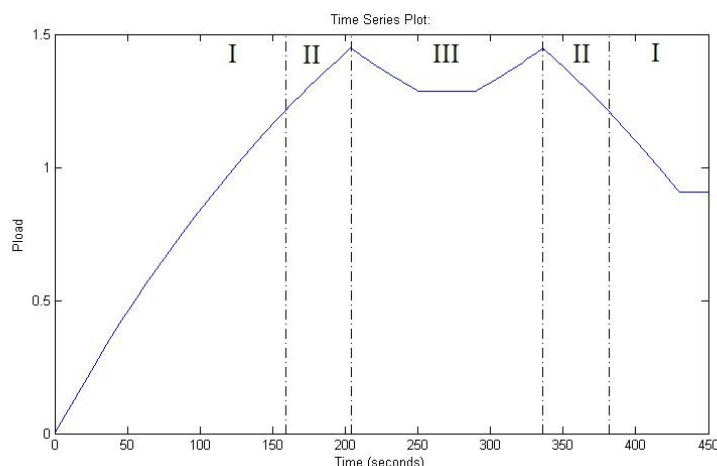


Σχήμα 6.17: Μέτρο τάσης διεσπαρμένης παραγωγής



Σχήμα 6.18: Μέτρο τάσης φορτίου

Στα Σχήματα 6.17 και 6.18 φαίνονται οι τάσεις στη διεσπαρμένη παραγωγή και στο φορτίο αντίστοιχα.



Σχήμα 6.19: Καμπύλη Ενεργού Κατανάλωσης Φορτίου

Στο Σχήμα 6.19 φαίνεται η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο ζυγό του φορτίου. Η ισχύς αυξάνεται στην κανονική λειτουργία και φτάνει στη μέγιστη τιμή της όταν αρχίζει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης. Στη συνέχεια μειώνεται.

Και στις δύο εφαρμογές αντιστάθμισης πτώσης τάσης το σύστημα λειτουργεί για μεγαλύτερα φορτία εντός των ορίων πτώσης τάσης σε σχέση με το Κεφάλαιο 5.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 6.2 σχετικά με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ στο φορτίο.

Πίνακας 6.2: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (α.μ.)

$V$	$\Sigma.I$	$P_{load}$	$V_{load}$	$Y$
1.0876	0.9	1.3672	0.9	1.8756
1.0834	0.9	1.4486	0.8883	2.07

Στον Πίνακα 6.2 φαίνεται η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς όταν το σύστημα βρίσκεται εντός του ορίου πτώσεως τάσεως και όταν δεν βρίσκεται εντός ορίου. Χάρη στη μεγαλύτερη τιμή της τάσης στον μετασχηματιστή λόγω της αντιστάθμιση πτώσης τάσης το σύστημα είναι εντός του ορίου πτώσης τάσης για μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας του φορτίου.

### 6.2.3 Σύγκριση

Στόχος της αντιστάθμισης πτώσης τάσεως είναι η μείωση της διακύμανσης των τάσεων κατά μήκος του δικτύου σε σχέση με τις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 5, καθώς και η λειτουργία του συστήματος εντός των επιτρεπόμενων ορίων της τάσης για μεγαλύτερες τιμές φορτίου. Και στις δύο περιπτώσεις επιτυγχάνονται οι στόχοι.

Οι μέγιστες τιμές των τάσεων που παρατηρούνται βρίσκονται εντός του ορίου που τέθηκε

στο Κεφάλαιο 4,  $V_{max} \leq 1.1$  αμ. Στην περίπτωση αντιστάθμισης πτώσης τάσεως με βάση το ρεύμα η μέγιστη τάση στο ζυγό του μετασχηματιστή φτάνει 1.075 αμ και στην περίπτωση με βάση την ενεργό ισχύ φτάνει 1.094 αμ.

Οι τάσεις του δικτύου παραμένουν εντός των ορίων λειτουργίας για μεγαλύτερα φορτία στην περίπτωση της αντιστάθμισης με βάση την ενεργό ισχύ. Βέβαια, δεδομένου ότι η μέγιστη τάση στο ζυγό του μετασχηματιστή στην αντιστάθμιση πτώσης τάσης με βάση το ρεύμα απέχει πιο πολύ από το μέγιστο όριο που έχει τεθεί, υπάρχει δυνατότητα να τεθεί μεγαλύτερο  $V_o$ , το οποίο θα βελτιώσει τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου παραδείγματος. Οπότε τα αποτελέσματα, όσον αφορά τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ εντός των ορίων λειτουργίας της τάσης, δεν διαφέρουν ιδιαίτερα στα δύο παραδείγματα. αντιστάθμισης πτώσης τάσης

Ο λόγος που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως καλύτερη επιλογή η αντιστάθμιση πτώσης τάσης με βάση την ενεργό ισχύ είναι ότι λόγω της φοράς του ρεύματος για χαμηλό φορτίο, και δεδομένου ότι η αντιστάθμιση γίνεται με βάση το μέτρο του ρεύματος, παρατηρούνται μη επιθυμητές διακυμάνσεις στις τάσεις των ζυγών για χαμηλό φορτίο.

## 6.3 Ρύθμιση Τάσεως Διεσπαρμένης Παραγωγής

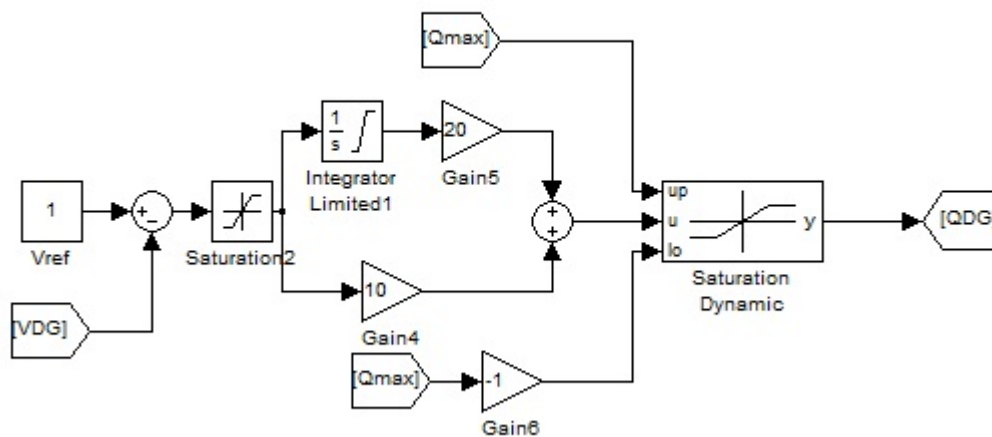
### 6.3.1 Όρια αέργου ισχύος μετατροπέα διεσπαρμένης παραγωγής

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζεται η ρύθμιση τάσεως από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής. Η τάση διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας. Η διαφορά με τις προηγούμενες προσομοιώσεις είναι η παραγωγή αέργου ισχύος και από τη διεσπαρμένη παραγωγή, αφού μόνο έτσι μπορεί να ρυθμιστεί η τάση της.

Η ρύθμιση της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής γίνεται μέσω του αναλογικού, ολοκληρωτικού ελεγκτή της αέργου ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής (Σχήμα 6.20). Ο έλεγχος της αέργου ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής έχει ως είσοδο το σφάλμα της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής,  $V_{DG}$ . Μόλις αυτή αποκλίνει από την ονομαστική τιμή η παραγωγή αέργου ισχύος προσαρμόζεται, ούτως ώστε η τάση να επαναφερθεί στην ονομαστική τιμή.

Η είσοδος των ελεγκτών που ρυθμίζουν τη ενεργό ισχύ της διεσπαρμένης παραγωγής, μέσω της συχνότητας, και της τάσης του μετασχηματιστή όπως και προηγουμένως έχουν ως είσοδο το σφάλμα του ρεύματος μεταξύ μετασχηματιστή και διεσπαρμένης παραγωγής.





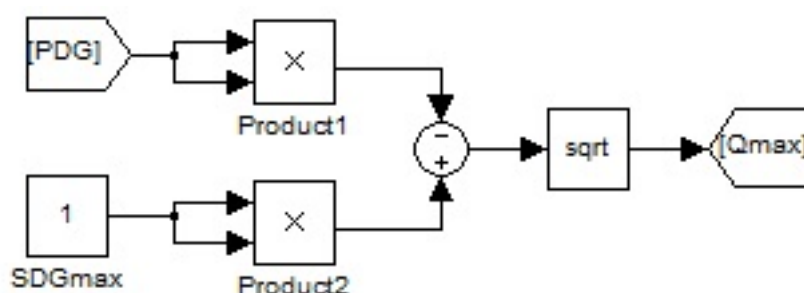
Σχήμα 6.20: Ρύθμιση αέργου ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής

Η ρύθμιση της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής πραγματοποιείται έως ότου η διεσπαρμένη παραγωγή έχει τη δυνατότητα να παρέχει την απαιτούμενη αέργο ισχύ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.20.

Η μέγιστη δυνατότητα παροχής αέργου ισχύος από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής εξαρτάται από την παραγωγή ενεργού ισχύος την εκάστοτε χρονική στιγμή. Έτσι η μέγιστη αέργος ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής προκύπτει από την σχέση:

$$Q_{DGmax} = \sqrt{S_{DGmax}^2 - P_{DG}^2} \quad (6.3)$$

όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.21.



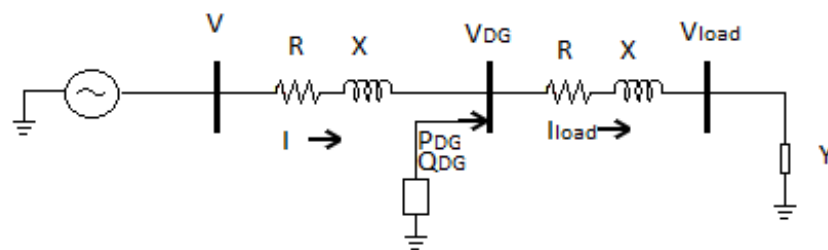
Σχήμα 6.21: Υπολογισμός μέγιστης παρεχόμενης αέργης ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή

Λόγω του ορίου αέργου ισχύος κάποια στιγμή στο δεύτερο στάδιο λειτουργίας του συστήμα-

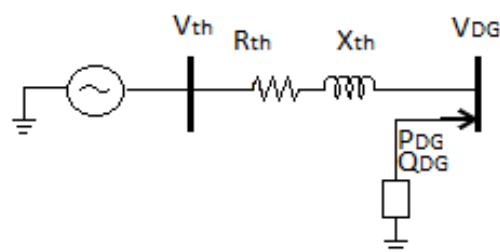
τος (αύξηση διεσπαρμένης παραγωγής) η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής θα φτάσει σε επίπεδο που δε θα επιτρέπει την παροχή επαρκούς ποσότητας αέργου ισχύος ώστε να διατηρείται στην ονομαστική τιμή η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής, με επακόλουθο την μείωση της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής προτού ξεκινήσει το τρίτο στάδιο λειτουργίας.

### 6.3.2 Εξισώσεις συστήματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα με διεσπαρμένη παραγωγή φαίνεται στο Σχήμα 6.22. Από το κύκλωμα αυτό προκύπτει το ισοδύναμο Thevenin του Σχήματος 6.23, όπως φαίνεται από το σημείο σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής.



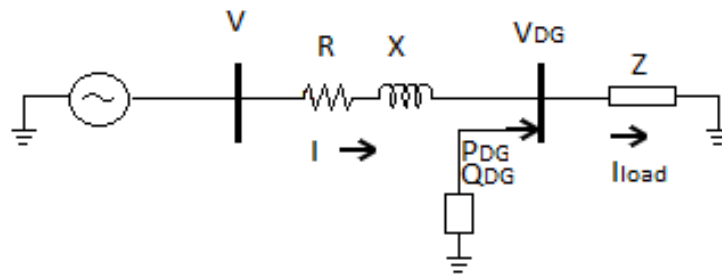
Σχήμα 6.22: Κύκλωμα με ρύθμιση τάσης διεσπαρμένης παραγωγής



Σχήμα 6.23: Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin με ρύθμιση τάσης διεσπαρμένης παραγωγής

Η σύνθετη αντίσταση  $Z$  που φαίνεται στο Σχήμα 6.24 είναι :

$$Z = \frac{1}{Y} + R + jX \quad (6.4)$$



Σχήμα 6.24: Κύκλωμα με αναπαράσταση του Z

Το ισοδύναμο Thevenin όπως φαίνεται από το σημείο σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής δίνεται από τις σχέσεις :

$$\hat{V}_{th} = \frac{\hat{V}Z}{Z + R + jX} \quad (6.5)$$

$$Z_{th} = \frac{Z(R + jX)}{Z + R + jX} \quad (6.6)$$

Έτσι από το νόμο του Kirchhoff στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin του Σχήματος 6.23 μεταξύ του μετασχηματιστή και της διεσπαρμένης παραγωγής, και δεδομένου ότι πλέον υπάρχει παραγωγή αέργου ισχύος και από τη διεσπαρμένη παραγωγή προκύπτει:

$$\hat{V}_{th} = \hat{V}_{DG} - \frac{P_{DG} - jQ_{DG}}{V_{DG}}(R_{th} + jX_{th}) \quad (6.7)$$

Από τη μιγαδική σχέση (6.7) χωρίζοντας πραγματικό από φανταστικό μέρος και παίρνοντας τα μέτρα του δεξιού και του αριστερού μέλους προκύπτει η διτετράγωνη εξίσωση:

$$V_{DG}^4 - (V_{th}^2 + 2(R_{th}P_{DG} + X_{th}Q_{DG})V_{DG}^2 + (P_{DG}^2 + Q_{DG}^2)(R_{th}^2 + X_{th}^2)) = 0 \quad (6.8)$$

Από την επίλυσή της 6.8 η ρίζα με το μεγαλύτερο μέτρο τάσης (κανονική λειτουργία) δίνει:

$$V_{DG}^2 = \frac{V_{th}^2 + 2(R_{th}P_{DG} + X_{th}Q_{DG}) + \sqrt{\Delta}}{2} \quad (6.9)$$

όπου

$$\begin{aligned} \Delta = & V_{th}^4 + 4(P_{DG}^2 R_{th}^2 + 2P_{DG}Q_{DG}R_{th}X_{th} + Q_{DG}^2 X_{th}^2) \\ & + 4V_{th}^2(P_{DG}R_{th} + Q_{DG}X_{th}) - 4(P_{DG}^2 + Q_{DG}^2)(R_{th}^2 + X_{th}^2) \end{aligned} \quad (6.10)$$

Τα ρεύματα φορτίου ( $I_l$ ) και δευτερεύοντος μετασχηματιστή ( $I$ ) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\hat{I}_l = \frac{V_{DG}}{Z} \quad (6.11)$$

$$\hat{I} = \hat{I}_l - \frac{P_{DG}}{V_{DG}} \quad (6.12)$$

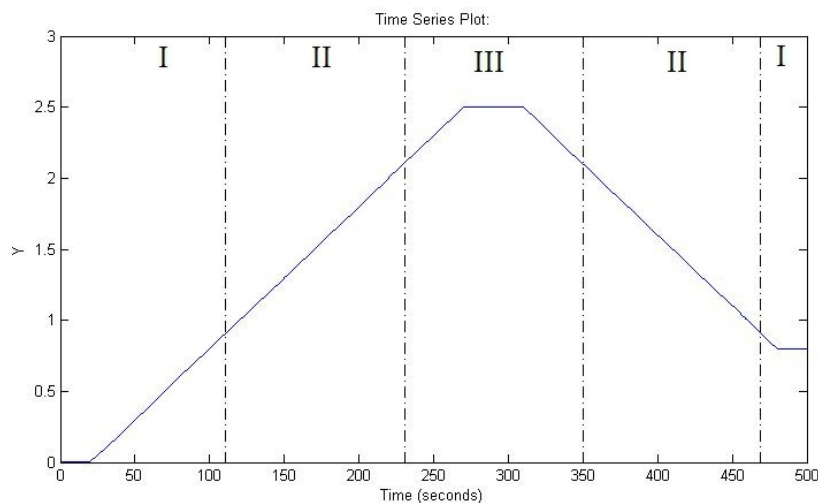
όπου θεωρούμε  $\hat{V}_{DG} = V_{DG} \angle 0^\circ$ .

### 6.3.3 Προσομοίωση Ρύθμισης Τάσεως Διεσπαρμένης Παραγωγής

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, που πραγματοποιήθηκε μέσω Simulink, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος του Σχήματος 6.22.

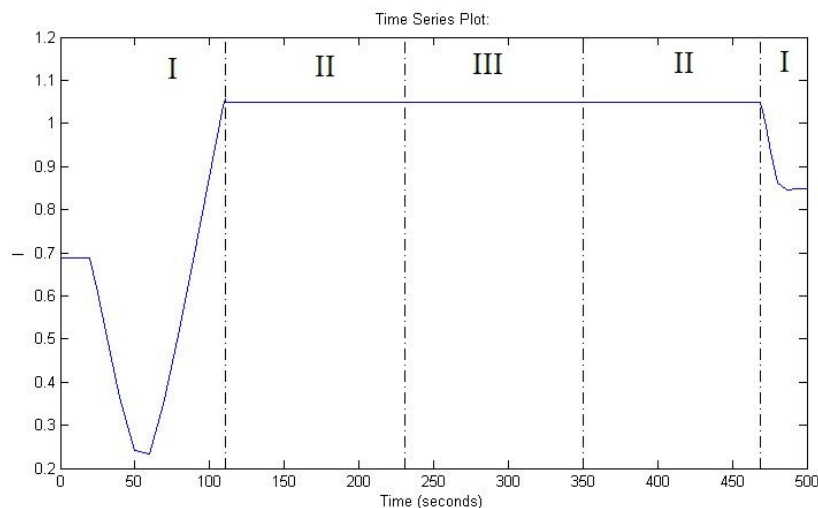
Όπως και οι προηγούμενες προσομοιώσεις έτσι και αυτή μπορεί να χωριστεί σε 3 στάδια. Στο πρώτο στάδιο με την αύξηση του φορτίου αυξάνεται το ρεύμα στην έξοδο του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος έως ότου φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του. Στο δεύτερο στάδιο η παραγωγή ενεργού ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνεται, με την ελεγχόμενη πτώση της συχνότητας, από τη βασική παραγωγή έως τη μέγιστη δυνατή. Τέλος στο τρίτο στάδιο η τάση του μετασχηματιστή ελεγχόμενα μειώνεται. Κατά τη μείωση του φορτίου έχουμε την αντίστροφη διαδικασία.

Και σε αυτήν την προσομοίωση υπάρχει αυξομείωση του φορτίου με ράμπα. Ο έλεγχος της ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής με βάση τη συχνότητα καθώς και της τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή είναι ίδιος με αυτόν της ενότητας 5.4.2. Όμως πλέον ρυθμίζεται και η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται με την παραγωγή αέργου ισχύος και από την διεσπαρμένη παραγωγή.



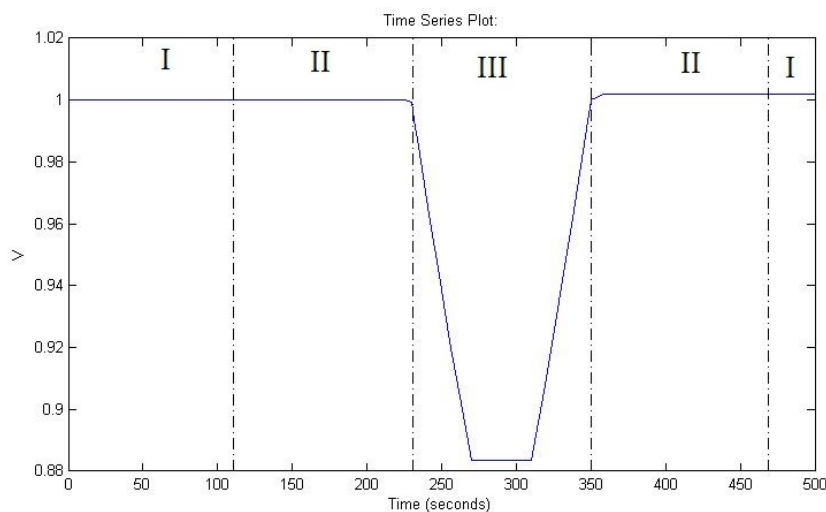
Σχήμα 6.25: Προσομοιούμενη μεταβολή φορτίου (αγωγιμότητα)

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση η αύξηση και μείωση του φορτίου έχει ως εξής, (Σχήμα 6.25). Αρχικά και για 20 δευτερόλεπτα το φορτίο είναι σταθερό  $Y_0 = 0.001$  αμ. Στη συνέχεια μέχρι τα 270 δευτερόλεπτα η αγωγιμότητα του φορτίου αυξάνεται με βήμα 0.01 αμ. Τα επόμενα 40 δευτερόλεπτα το φορτίο μένει σταθερό και στη συνέχεια μέχρι τα 480 δευτερόλεπτα η αγωγιμότητα μειώνεται με ρυθμό  $-0.01$  αμ. Τα τελευταία 20 δευτερόλεπτα μένει σταθερό.



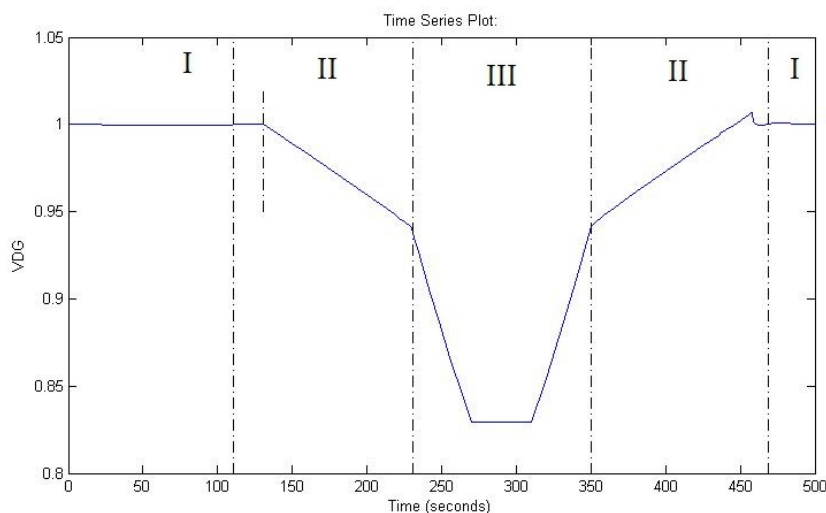
Σχήμα 6.26: Μέτρο ρεύματος μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 6.26 φαίνεται το μέτρο του ρεύματος στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Όπως και στις προσομοιώσεις που έχουν γίνει μέχρι τώρα αρχικά το μέτρο του ρεύματος είναι υψηλό για χαμηλό φορτίο και το ενεργό ρεύμα έχει φορά από το ζυγό της διεσπαρμένης παραγωγής προς το μετασχηματιστή καθώς η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής υπερκαλύπτει τη ζήτηση του φορτίου με αποτέλεσμα το δίκτυο να εξάγει ενεργό ισχύ. Η μεγαλύτερη τιμή στο μέτρο του ρεύματος του μετασχηματιστή για χαμηλό φορτίο σε σχέση με τις προηγούμενες προσομοιώσεις οφείλεται στην ύπαρξη και αέργου ρεύματος με φορά από το μετασχηματιστή προς τη διεσπαρμένη παραγωγή, καθώς αρχικά ο μετασχηματιστής εξάγει άεργο ισχύ (Σχήμα 6.33). Αυξανόμενου του φορτίου μειώνεται τόσο το ενεργό ρεύμα όσο και το άεργο. Όταν ο μετασχηματιστής αρχίζει να εισάγει στο δίκτυο ενεργό ισχύ τότε το μέτρο του ρεύματος αρχίζει να αυξάνει ξανά, έως ότου φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, όπου τελειώνει το πρώτο στάδιο. Στο δεύτερο και στο τρίτο στάδιο κρατείται σταθερό το μέτρο του ρεύματος.



Σχήμα 6.27: Μέτρο τάσης μετασχηματιστή

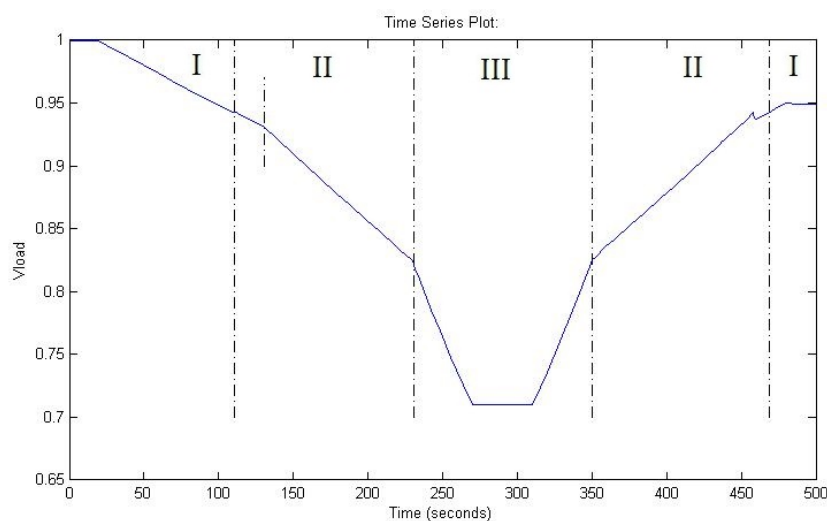
Η τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή φαίνεται στο Σχήμα 6.27. Δεδομένου ότι δεν έχουμε αντιστάθμιση πτώσης τάσης στα δύο πρώτα στάδια της προσομοίωσης η τάση κρατείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, ακριβώς όπως στο κεφάλαιο 5. Όταν το ρεύμα του μετασχηματιστή φτάσει στην μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή και η ενεργός ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής την ανώτερη δυνατή τιμή της η τάση του μετασχηματιστή μειώνεται ελεγχόμενα. Στην σταδιακή μείωση του φορτίου ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία.



Σχήμα 6.28: Μέτρο τάσης διεσπαρμένης παραγωγής

Στο Σχήμα 6.28 φαίνεται η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής. Δεδομένου ότι γίνεται ρύθμιση τάσεως στη διεσπαρμένη παραγωγή, στο πρώτο στάδιο αυτή παραμένει σταθερή στην ονομαστική τιμή. Κατά τη διάρκεια του δεύτερου σταδίου αρχικά μένει σταθερή στην ονομαστική τιμή χάρη στην έγχυση αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή. Όμως, η

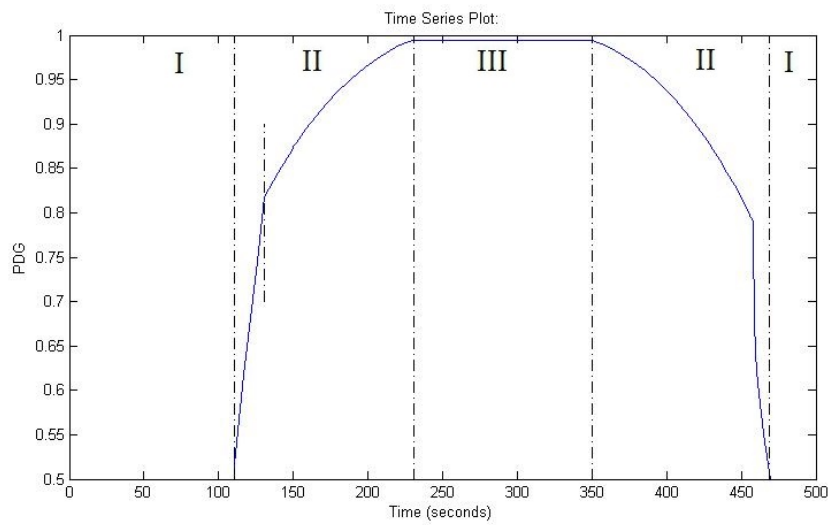
δισπαρμένη παραγωγή έχει ανώτατο όριο παραγωγής ισχύς 1 αμ, δηλαδή  $S_{DGmax} = 1$  αμ. Έτσι με την αύξηση της ενεργού ισχύος της δισπαρμένης παραγωγής περιορίζεται η ανώτερη τιμή αέργου ισχύος της δισπαρμένης παραγωγής που μπορεί να εγχύσει στο δίκτυο. Οπότε κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου κάποια στιγμή η δισπαρμένη παραγωγή δεν μπορεί να διαθέσει τόση αέργο ισχύ ώστε να διατηρηθεί η τάση της δισπαρμένης παραγωγής σταθερή, με αποτέλεσμα να αρχίσει η πτώση της προτού φτάσει το σύστημα στο τρίτο στάδιο, που ούτως ή άλλως μειώνεται ελεγχόμενα η τάση.



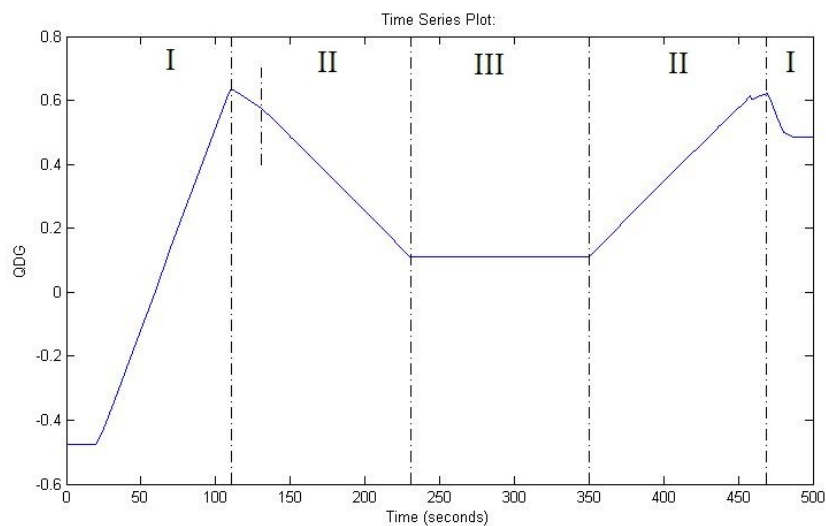
Σχήμα 6.29: Μέτρο τάσης φορτίου

Έτσι και η τάση του φορτίου (Σχήμα 6.29) μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από τη στιγμή που αρχίσει να μειώνεται η τάση της δισπαρμένης παραγωγής.

Στα Σχήματα 6.30-6.34 φαίνονται η ενεργός και η αέργος ισχύς στους διάφορους ζυγούς του δικτύου. Η διακεκομμένη γραμμή στα Σχήματα αυτής της υποενότητας που χωρίζει το δεύτερο στάδιο στα δύο, όταν αυξάνεται το φορτίο, υποδηλώνει τη στιγμή που  $Q_{DGmax} = Q_{DG}$ .

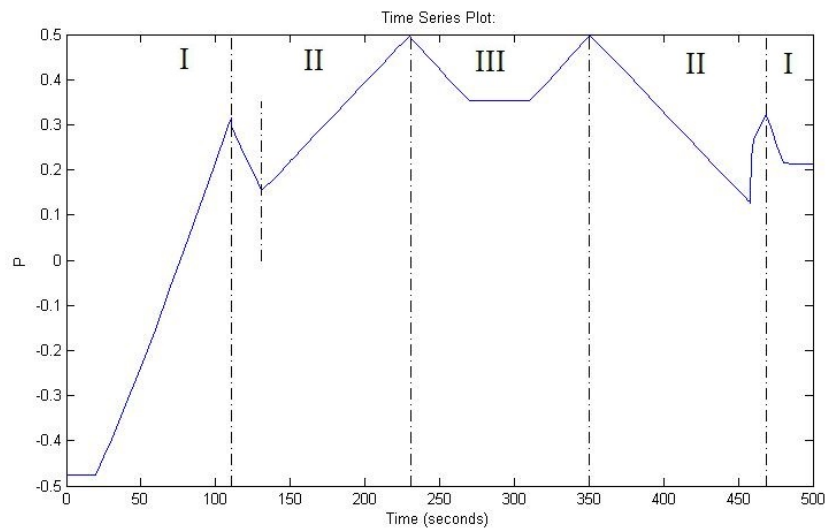


Σχήμα 6.30: Ενεργός ισχύς διεσπαρμένης παραγωγής

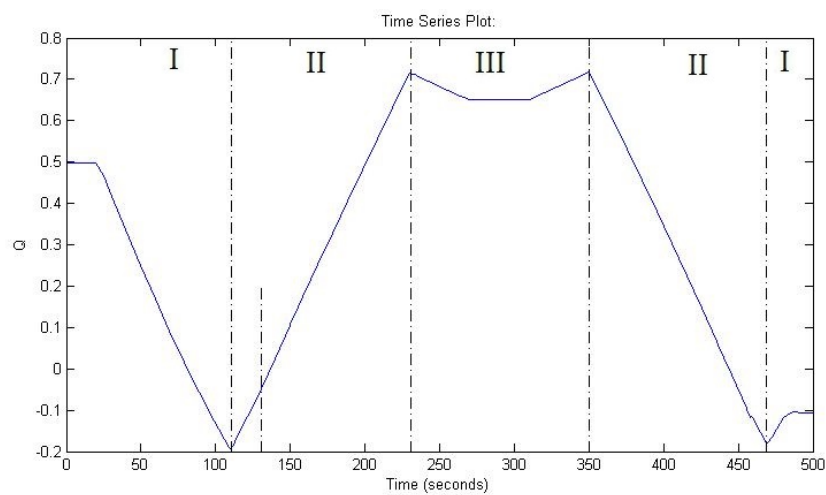


Σχήμα 6.31: Άεργος ισχύς διεσπαρμένης παραγωγής

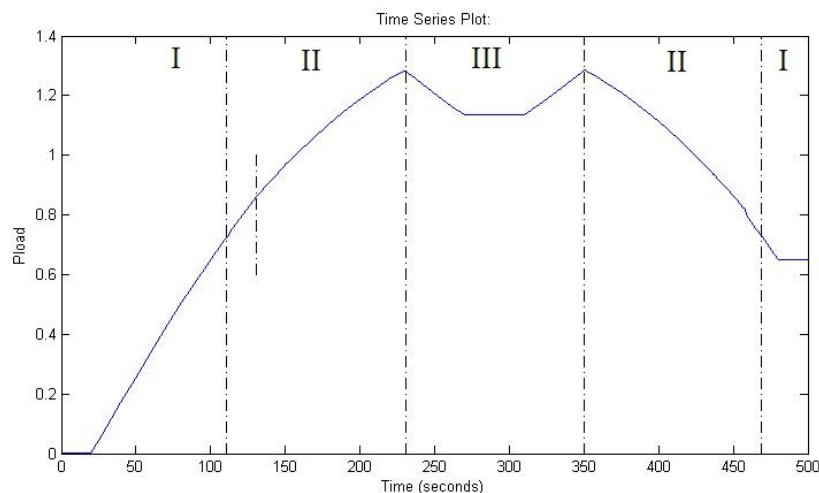




Σχήμα 6.32: Ενεργός ισχύς μετασχηματιστή



Σχήμα 6.33: Άεργος ισχύς μετασχηματιστή



Σχήμα 6.34: Καμπύλη Ενεργού Κατανάλωσης Φορτίου

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση, όπως έχουμε αναφέρει, η παραγωγή της αέργου ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής μεταβάλλεται για να διατηρείται σταθερή η τάση (Σχήμα 6.31). Αρχικά η διεσπαρμένη παραγωγή απορροφάει άεργο ισχύ από το δίκτυο για να μπορέσει να συγκρατήσει την τάση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ονομαστική τιμή. Η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής τείνει να αυξηθεί αρχικά επειδή το φορτίο είναι τόσο χαμηλό που η ενεργός ισχύς που παράγεται από τη διεσπαρμένη παραγωγή (Σχήμα 6.30) το υπερκαλύπτει με αποτέλεσμα το ρεύμα να έχει φορά από το ζυγό αυτό προς το ζυγό του μετασχηματιστή. Αυτή η άεργος ισχύς που απορροφά η διεσπαρμένη παραγωγή εισάγεται στο δίκτυο από τον μετατροπέα του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Στη συνέχεια με την αύξηση του φορτίου η άεργος ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής πλησιάζει το μηδέν, γίνεται θετική και τελικά φτάνει τη μέγιστη τιμή της, όταν αυξάνεται η ενεργός ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής. Σε αυτό το σημείο ο μετασχηματιστής απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο χαμηλής τάσης, καθώς η άεργος ισχύς που παράγει η διεσπαρμένη παραγωγή για να κρατήσει την τάση του ζυγού της στην ονομαστική τιμή είναι μεγαλύτερη από την άεργο ισχύ που χρειάζεται το φορτίο συν τις απώλειες του δικτύου.

Μόλις αρχίζει το δεύτερο στάδιο και αυξάνεται η παραγωγή ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής, η ενεργός ισχύς που εισάγεται από το δίκτυο μεταφοράς μέσω του μετασχηματιστή (Σχήμα 6.32) αρχίζει να μειώνεται. Η παραγωγή αέργου ισχύος από την διεσπαρμένη παραγωγή επίσης μειώνεται, για να διατηρηθεί η τάση στην ονομαστική τιμή, και έτσι η άεργος ισχύς που εισάγεται από το μετασχηματιστή στο δίκτυο (Σχήμα 6.33) αρχίζει να αυξάνει ξανά. Παράλληλα, με την αύξηση της ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής περιορίζεται η μέγιστη τιμή αέργου ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής, όπως εξηγήσαμε παραπάνω. Η μείωση του  $Q_{DGmax}$  είναι γρηγορότερη από τη μείωση της έγχυσης αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή, με αποτέλεσμα κάποια στιγμή, κατά τη διάρκεια

του δευτέρου σταδίου, η άεργος ισχύς της διεσπαρμένης παραγωγής να περιορίζεται από το  $Q_{DGmax}$ . Τη στιγμή που  $Q_{DGmax} = Q_{DG}$ , δηλαδή όταν αρχίζει να μειώνεται η τάση της διεσπαρμένης παραγωγής, παρατηρείται μία μείωση στο ρυθμό αύξησης της ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τη διατήρηση του ρεύματος ( $I = I_{max}$ ) στη μέγιστη τιμή απαιτείται μικρότερη μεταβολή της ενεργού ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτό έχει ως επακόλουθο να μειωθεί και ο ρυθμός μείωσης της άεργου ισχύος της διεσπαρμένης παραγωγής. Έτσι περιορίζεται και ο ρυθμός μείωσης της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Όμως η αύξηση του φορτίου προκαλεί και αύξηση της ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου (Σχήμα 6.34). Και παρόλο που η μείωση της τάσης της διεσπαρμένης παραγωγής προκαλεί ταχύτερη μείωση της τάσης του φορτίου (Σχήμα 6.29) οπότε και μείωση του ρυθμού αύξησης της ζήτησης ενεργού ισχύος στο φορτίο, δεν είναι αρκετή ώστε να καλυφθεί από την ενεργό ισχύ της διεσπαρμένης παραγωγής, που αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό σε σχέση με πριν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εισροής ενεργού ισχύος στο δίκτυο από το μετασχηματιστή, που μέχρι τώρα στο δεύτερο στάδιο μειωνόταν, όπως και σε κάθε προσομοίωση μέχρι τώρα στο δεύτερο στάδιο, για να καλυφθεί η ζήτηση της ενεργού ισχύος στο φορτίο.

Στο τρίτο στάδιο, της ελεγχόμενης μείωσης της τάσης, μειώνεται η εισροή τόσο ενεργού όσο και άεργου ισχύος στο δίκτυο από τον μετασχηματιστή, με την αύξηση του φορτίου. Αντίθετα η παραγωγή τόσο ενεργού όσο και άεργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι σταθερή.

Από τη προσομοίωση προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 6.3 σχετικά με τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ στο φορτίο.

Πίνακας 6.3: Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (όριο πτώσης τάσης) (α.μ.)

$V$	$\Sigma I$	$P_{loadmax}$	$V_{load}$	$Y$
1	0.9	1.0119	0.9	1.3882
0.9992	0.9	1.2831	0.8241	2.1007

Στον Πίνακα 6.3 φαίνεται η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς όταν το σύστημα βρίσκεται εντός του ορίου πτώσεως τάσεως και όταν δεν βρίσκεται εντός ορίου.

## 6.4 Αποτελέσματα και Σύγκριση

Στον Πίνακα 6.4 φαίνονται οι τιμές των τάσεων σε κάθε ζυγό του δικτύου, για κάθε προσομοίωση που έγινε, την στιγμή που αρχίζει η διαδικασία ελεγχόμενης μείωσης της τάσης.

Στον Πίνακα 6.5 φαίνονται οι μέγιστες αποδιδόμενες ισχείς εντός των ορίων λειτουργίας της τάσης, σε κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε.

**Πίνακας 6.4:** Τιμές τάσεων όταν αρχίζει η διαδικασία ελεγχόμενης μείωσης της τάσης (α.μ.)

	$V$	$V_{DG}$	$V_{load}$
Χωρίς αντιστάθμιση ή ρύθμιση	1	0.927	0.803
Αντιστάθμιση με βάση το ρεύμα	1.074	1.001	0.879
Αντιστάθμιση με βάση την ενεργό ισχύ	1.083	1.01	0.888
Ρύθμιση τάσης στη διεσπαρμένη παραγωγή	1	0.941	0.824

**Πίνακας 6.5:** Μέγιστες αποδιδόμενες ισχύς (όριο πτώσης τάσης) (α.μ.)

	$V_{load}$	$P_{load}$	$Y$
Χωρίς αντιστάθμιση ή ρύθμιση	0.9	0.7591	1.0418
Αντιστάθμιση με βάση το ρεύμα	0.9	1.2069	1.6557
Αντιστάθμιση με βάση την ενεργό ισχύ	0.9	1.3672	1.8756
Ρύθμιση τάσης στη διεσπαρμένη παραγωγή	0.9	1.0119	1.3882

Στους Πίνακες 6.4 και 6.5 φαίνεται πως το σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων πτώσεως τάσεως για μεγαλύτερα φορτία στις περιπτώσεις αντιστάθμισης πτώσεως τάσεως, οπότε και η μέγιστη ισχύς που μπορούν να αποδώσουν είναι μεγαλύτερη. Επίσης, θα μπορούσε, στις περιπτώσεις αντιστάθμισης πτώσης τάσης, να τεθεί  $V_o$  τέτοιο ώστε η τάση του μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος να φτάνει στο μέγιστο σημείο της πιο κοντά στο μέγιστο όριο τάσης. Έτσι η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ που θα μπορούσε να αποδώσει το σύστημα, εντός των ορίων λειτουργίας, θα ήταν ακόμα μεγαλύτερη

Σημαντική παρατήρηση είναι ότι στη περίπτωση ρύθμισης της τάσεως της διεσπαρμένης παραγωγής το σύστημα δεν λειτουργεί εντός των ορίων πτώσεως τάσεως για τόσο μεγάλες τιμές του φορτίου όσο στην αντιστάθμιση πτώσης τάσης, αλλά σαφώς μεγαλύτερες σε σχέση με την προσομοίωση του Κεφαλαίου 5.

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συνδυασμός ρύθμισης της τάσεως της διεσπαρμένης παραγωγής και αντιστάθμισης πτώσεως τάσεως μπορεί να αυξήσει περαιτέρω τη λειτουργία του συστήματος εντός των ορίων πτώσεως τάσεως, οπότε και της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος.

**Πίνακας 6.6:** Μέγιστες αποδιδόμενες ισχύς (χωρίς όριο πτώσης τάσης) (α.μ.)

	$V_{load}$	$P_{loadmax}$	$Y$
Χωρίς αντιστάθμιση ή ρύθμιση	0.8027	1.3453	2.32
Αντιστάθμιση με βάση το ρεύμα	0.8787	1.4372	2.0684
Αντιστάθμιση με βάση την ενεργό ισχύ	0.8883	1.4486	2.07
Ρύθμιση τάσης στη διεσπαρμένη παραγωγή	0.8241	1.2831	2.1007

Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται οι μέγιστες αποδιδόμενες ισχύεις ανεξάρτητα από την τιμή της τάσης του φορτίου, δηλαδή χωρίς όριο πτώσης τάσης. Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις

αντιστάθμισης πτώσης τάσης η αποδιδόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις συγκεκριμένες περιπτώσεις το φορτίο είναι μεγαλύτερο τη στιγμή που αρχίζει η ελεγχόμενη μείωση της τάσης.

---



# Κεφάλαιο 7

## Συμπεράσματα - Προοπτικές

### 7.1 Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ο έλεγχος της τάσης και της συχνότητας ενός δικτύου διανομής, το οποίο τροφοδοτείται μέσω μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Στα κεφάλαια 1,2 και 3 παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο που ήταν αναγκαίο για την κατανόηση της εργασίας. Στα κεφάλαια 4,5 και 6 παρουσιάστηκαν τα διάφορα σενάρια ελέγχου.

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάστηκε η περίπτωση τροφοδοσίας του δικτύου διανομής αποκλειστικά από το μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.1. Η προσομοίωση στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έγινε μέσω MATLAB. Για αυτήν την περίπτωση ακολουθήθηκε το μοντέλο ανάλυσης που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια. Αρχικά γίνεται ρύθμιση στην τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, έως ότου το ρεύμα φτάσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του, δηλαδή ο μετατροπέας του μετασχηματιστή λειτουργεί ως πηγή τάσης. Στη συνέχεια το ρεύμα διατηρείται σταθερό, δηλαδή ο μετατροπέας του μετασχηματιστή λειτουργεί ως πηγή ρεύματος, και η τάση μειώνεται.

Στο Κεφάλαιο 5 μελετήθηκε η περίπτωση ελέγχου του δικτύου όταν εκτός από τον μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος υπήρχε και διεσπαρμένη παραγωγή με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή χωρίς δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος. Το μοντέλο ανάλυσης περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.2. Το συγκεκριμένο μοντέλο χωρίζεται σε τρία στάδια. Στο πρώτο γίνεται ρύθμιση τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Στο δεύτερο γίνεται ρύθμιση συχνότητας ώστε να συμβάλει η διεσπαρμένη παραγωγή στην εξυπηρέτηση του φορτίου. Για το ζυγό αυτό θεωρείται ότι υπάρχει δυνατότητας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία παρέχεται στο δίκτυο εφόσον ζητηθεί. Το τρίτο είναι το στάδιο της ελεγχόμενης πτώσης τάσης στο μετασχηματιστή ηλεκτρονικών ισχύος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάστηκε η προσομοίωση μόνιμης κατάστασης που υλοποιήθηκε μέσω MATLAB, καθώς και

η προσομοίωση δυναμικής συμπεριφοράς που υλοποιήθηκε μέσω Simulink. Στη δυναμική συμπεριφορά παρουσιάστηκε η περίπτωση αύξησης του φορτίου τόσο μέσω ράμπας, όσο και βηματικά.

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάστηκε η περίπτωση ελέγχου της τάσης διανομής με αντιστάθμιση της πτώσης τάσης. Και πάλι η διεσπαρμένη παραγωγή θεωρείται ότι έχει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Αυτή η περίπτωση χωρίζεται σε δύο υποπεριπτώσεις. Στην πρώτη πραγματοποιείται αντιστάθμιση πτώσης τάσης με βάση το ρεύμα του μετασχηματιστή και στη δεύτερη με βάση την ενεργό ισχύ του μετασχηματιστή. Με την αντιστάθμιση πτώσης τάσεως επιτυγχάνεται η τιμή της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή να είναι υψηλότερη από την ονομαστική κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας. Για αυτό το λόγο η λειτουργία του συστήματος εντός των ορίων πτώσεως τάσης επιτυγχάνεται για μεγαλύτερες τιμές φορτίου. Η αποδιδόμενη ισχύς, για λειτουργία εντός των ορίων πτώσεως τάσης, αυξάνεται σημαντικά. Τα στάδια είναι ίδια με αυτά του Κεφαλαίου 5.

Το τελευταίο σενάριο που εξετάστηκε, επίσης στο Κεφάλαιο 6, ήταν η ρύθμιση της τάσης και στη διεσπαρμένη παραγωγή, η οποία επιτυγχάνεται με την έγχυση αέργου ισχύος και από τη διεσπαρμένη παραγωγή. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων πτώσης τάσης για μεγαλύτερες τιμές φορτίου σε σχέση με το παράδειγμα στο Κεφάλαιο 5, αλλά όχι για τόσο μεγάλες τιμές όσο με την αντιστάθμιση πτώσης τάσης.

Η εργασία αυτή δείχνει ότι ο έλεγχος τόσο της τάσης όσο και της συχνότητας λειτουργεί σε ένα απλοποιημένο πραγματικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα της μεθόδου έχουν γρήγορη απόκριση, αποφεύγοντας υπερβάσεις στο ρεύμα, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, δεδομένου ότι τα ηλεκτρονικά ισχύος των μετατροπέων δεν ανέχονται υπερφορτίσεις όπως οι απλοί μετασχηματιστές. Έτσι η παρούσα εργασία δείχνει πως θα μπορούσε να γίνει ο έλεγχος ενός συστήματος τροφοδοτούμενου από μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος χωρίς να υπάρχουν υπερφορτίσεις.

Η μελέτη ενός τέτοιου συστήματος είναι σημαντική επειδή οι μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος ενδέχεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα διανομής. Αποσκοπούν όχι μόνο στην αντικατάσταση του παραδοσιακού μετασχηματιστή, αλλά και να παρέχουν επίσης βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο, χάρη στην μεγαλύτερη ευελιξία που προσφέρονται από τα ηλεκτρονικά ισχύος.

## 7.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Είναι φανερό ότι υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας εργασίας στο μέλλον.

Καταρχάς στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο. Στην πράξη όμως



τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά πιο πολύπλοκα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των σεναρίων που εξετάστηκαν. Ρεαλιστικότερα αποτελέσματα λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν αν η μελέτη της παρούσας εργασίας πραγματοποιηθεί σε ένα δίκτυο με περισσότερες αναχωρήσεις και διακλαδώσεις.

Επίσης στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε τόσο το δίκτυο όσο και το φορτίο συμμετρικά. Στην πραγματικότητα και τα δύο παρουσιάζουν ασυμμετρία, είτε επειδή πολλοί καταναλωτές είναι μονοφασικοί είτε επειδή κάποια πηγή μπορεί να είναι μονοφασική. Σε μελλοντική εργασία μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά ενός ασύμμετρου δικτύου.

Στα σενάρια που εξετάστηκαν δεν υπήρχε χρονική καθυστέρηση λόγω της γρήγορης απόκρισης των ηλεκτρονικών ισχύος. Σε περίπτωση εισαγωγής μιας μικρής χρονικής καθυστέρησης το μοντέλο θα είναι πιο ρεαλιστικό διότι θα αναπαρίστανται οι χρονικές καθυστερήσεις των ρυθμιστών.

Ειδικότερα στο παράδειγμα της αντιστάθμισης πτώσης τάσης με βάση την ενεργό ισχύ θα μπορούσε να γίνεται με βάση και της αέργου ισχύος, η οποία παραλείφθηκε για λόγους απλότητας. Δηλαδή η συνθήκη του  $V_o$  θα ήταν  $V_o = V - (RP + XQ)$ .

Τέλος, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε το δίκτυο διανομής τροφοδοτούμενο από μετασχηματιστές ηλεκτρονικών ισχύος. Αντίστοιχο ενδιαφέρον θα είχε μια μελλοντική εργασία να εξέταζε το δίκτυο μεταφοράς που τροφοδοτεί έναν τέτοιο μετασχηματιστή.



# Βιβλιογραφία

- [1] Β. Κ. Παπαδιά, Κ. Βουρνά, *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [2] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 2010.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1996.
- [4] Ν. Σακελλαρίδης, *Εφαρμογές μη γραμμικής δυναμικής στην ανάλυση ευστάθειας τάσης*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αθήνα 2010.
- [5] J. A. Peças Lopes, A. Mendonça, N. Fonseca, L. L. A. Seca, , "Voltage and Reactive Power Control Provided by DG Units", CIGRE Symposium, Power Systems with Dispersed Generation, Athens, Greece, 13-16th April, 2005.
- [6] H. Ye, A. N. Michel, "Stability Theory for Hybrid Dynamical Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, No 4, April 1998.
- [7] C. Li, X. Yunxiang, L. Xiang, W. Zhiping, "The Topology Analysis and Compare of High-frequency Power Electronic Transformer", IEEE, APPEEC, Asia-Pacific, March 2012.
- [8] J. Martin-Arnedo, F. Gonzalez, J. A. Martinez, S. Alepuz, "Development and Testing of a Distribution Electronic Power Transformer Model", IEEE, PES GM, 2012.
- [9] H. She, R. Burgos, W. Gangyao, W. Fei, A. Q. Huang, "Review of Solid State Transformer in the Distribution System: From Components to Field Application", IEEE, FREEDM Systems Center, ABB Corporate Research, NC, US, 2012.
- [10] O. Vodyakho, M. Steurer, C. Edrington, G. Karady, B. Chowdhury, S. Bhattacharya, "Design of a solid state fault isolation device for implementation in power electronics based distributions systems", IEEE, NAPS, 2009.
- [11] Σ. Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Εκδόσεις Συμμετρίας, Αθήνα 2012.

- [12] Ν. Α. Σουλτάνης, *Συμβολή στον έλεγχο και στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος χαμηλής τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αθήνα 2008.
- [13] C. Du, M. H. J. Bollen, "Power-Frequency Control for VSC-HVDC during Island Operation", IET, 2006.
- [14] Γ. Κορρές, *Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς*, Αθήνα 2007.
- [15] Xiao-Ping Zhang, Rehtanz C., Pal B., *Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control*, Springer, 2006.
- [16] Katiraei F., Iravani M. R., Lehn P. W., *Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process*, IEEE, 2005.
- [17] Κ. Δ. Παγώνης, *Επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός Μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αθήνα 2011.
- [18] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for Analysing MicroGrids Islanded Operation", IEEE, PES Power Tech, St Petersburg, Russia, 2007.
- [19] G. Tsoukaris, B. M. Nomikos, C. D. Vournas, *Effect of wind parks with doubly fed asynchronous generators on small-signal stability*, Electric Power Systems Research 79 (2009) 190-200.
- [20] Α. Ε. Α. Δημέας, *Συμβολή στον Κατανεμημένο Έλεγχο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Μονάδες Διεσπαρμένης Παραγωγής στην Χαμηλή Τάση*, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Αθήνα 2006.
- [21] G. Díaz, C. G. Morán, J. G. Aleixandre, A. Diez, "Scheduling of Droop Coefficients for Frequency and Voltage Regulation in Isolated Microgrids", IEEE, Transactions on Power Systems Vol. 25, No. 1, February 2010.
- [22] S. H. Hosseini, M. B. B. Sharifian, A. Y. Goharrizi, G. B. Gharehpetian, "Bi-Directional Power Electronic Transformer Based Compact Dynamic Voltage Restorer", IEEE/PES, GM 2009.
-

- 
- [23] C.M. Colson, M. H. Fellow, "Comprehensive Real-Time Microgrid Power Management and Control With Distributed Agents", IEEE, Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 1, March 2013.
- [24] P. Tatcho, Y. Jiang, H. Li, "A Novel Line Section Protection for the FREEDM System based on the Solid State Transformer", IEEE/PES, GM 2011.
-