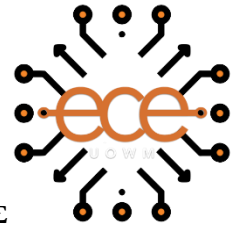




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Νανοδίκτυα-Μικροδίκτυα και Σύνδεση τους με το  
Δίκτυο Διανομής

---

ZARKA ROMALDO

A.M.: 7405

Επιβλέπων: Δρ. Άγγελος Σ. Μπουχουράς, Επίκουρος Καθηγητής

*(Υπογραφή)*

.....

**ZARKA ROMALDO**

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ  
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ (ΠΡΩΗΝ ΤΕΙ)

© 2022 – All rights reserved

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στον σύγχρονο κόσμο, η ηλεκτρική ενέργεια είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μορφή ενέργειας. Χρησιμοποιείται για να διευκολύνει την επίτευξη εργασιών στις οικίες, σε επαγγελματικούς χώρους, στις μεταφορές-μετακινήσεις κλπ. Εύκολα παρατηρείται ότι η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ολοένα και περισσότερο, αντιθέτως οι βασικότεροι πόροι ( πετρέλαιο, αέριο, λιγνίτης κλπ.) λόγω υπερβολικής ζήτησης, καθώς και μεγάλου βαθμού ρύπανσης της ατμόσφαιρας του πλανήτη, μειώνεται ραγδαία η ποσότητα και το επίπεδο χρήση τους. Όλα τα παραπάνω επιτάσσουν την ανάπτυξη και την διαχείριση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Αυτή η πτυχιακή έχει σαν στόχο, να αναφερθεί σε ενδεχόμενους τρόπους διασύνδεσης καταναλωτών με παραγωγούς από ΑΠΕ, την παρουσίαση κάποιων τεχνικών για την προστασία συστημάτων που διασυνδέονται μέσω DC δίαυλων όπως και τις προκλήσεις που προκύπτουν, καθώς και την απευθείας σύνδεση των συσσωρευτών συνεχούς ρεύματος με τον τελικό καταναλωτή σε ένα μικροδίκτυο. Όλο αυτό επάγεται στην χρήση DC σύνδεσης μεταξύ κοντινών παραγωγών και καταναλωτών που αποτελούν ένα νανοδίκτυο και σε μεγαλύτερη έκταση ένα μικροδίκτυο. Η διασύνδεση αυτών με το AC δίκτυο διανομής, δημιουργούν ένα υβριδικό σύστημα AC-DC, με κύριο στόχο να γίνει μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, καλύτερη απόδοση μετατροπών καθώς και μια πιο πράσινη λογική στην χρήση ενέργειας. Ένα παρόμοιο σύστημα αναπτύχθηκε και στο Simulink για την μελέτη της λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης.

**Λέξεις Κλειδιά:** ΑΠΕ, μικροδίκτυα, DC σύνδεση, εξοικονόμηση ενέργειας, μετατροπείς ισχύος, πράσινη ενέργεια.



## ABSTRACT

In the modern world, electricity is probably the most widespread form of energy. It is used to facilitate the achievement of tasks in homes, in business premises, in transport-movements, etc. It is easily observed that the demand for electricity is increasing more and more, on the contrary, the most basic resources (oil, gas, lignite, etc.) due to excessive demand, as well as a high degree of pollution of the planet's atmosphere, their quantity and level of use is rapidly decreasing. All of the above dictates the development and management of renewable energy sources (RES). The aim of this thesis is to refer to possible ways of connecting consumers with producers from RES, the presentation of some techniques for the protection of systems that are interconnected through DC buses as well as the challenges that arise, as well as the direct connection of direct current accumulators to the end consumer in a microgrid. All this is induced by the use of DC connection between nearby producers and consumers that constitute a nano-grid and to a greater extent a micro-grid, and interconnection of these with the distribution network, creating a hybrid AC-DC system, with the main goal of maximum energy saving, better performance conversions as well as a greener logic in the use of energy. This whole system was also developed in Simulink to study the operation of such an arrangement.

**Keywords:** RES, microgrids, DC link, Energy saving, power conversions, green energy



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Δρ. Άγγελο Μπουχουρά καθώς και τον κ. Νίκο Κελεπούρη για την διαρκή τους και πάντα άμεση στήριξη, η οποία κατέστη καθοριστική για την συγγραφή αυτής της πτυχιακής.





# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	i
Abstract .....	iii
Ευχαριστίες .....	v
Πίνακας Περιεχομένων .....	vii
Πίνακας Εικόνων.....	ix
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
Εισαγωγή.....	1
Κεφάλαιο 1: ΑΠΕ και μικροδίκτυα-νανοδίκτυα και σύνδεση τους με το σύστημα διανομής μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Ηλεκτρονικά ισχύος και σύνδεση τους με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....	3
1.2.1 Φωτοβολταϊκά και σύνδεση τους με τα ηλεκτρονικά ισχύος.....	4
1.2.2 Ανεμογεννήτριες και σύνδεση τους με τα ηλεκτρονικά ισχύος .....	11
1.2.3 Άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που θα μπορούσαν να ενταχθούν σε ένα σύστημα DC ζυγού .....	14
1.3 Σύνδεση AC διανομής με μικροδίκτυο DC.....	14
1.4 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή DC .....	15
1.5 DC φορτία .....	16
1.5.1 Κέντρα δεδομένων .....	17
1.5.2 Ηλεκτρικά οχήματα.....	17
Κεφάλαιο 2: DC μικροδίκτυο σχεδίαση και ασφάλεια.....	19
2.1 Δυνατότητες συστημάτων DC.....	19
2.2 Σχεδίαση DC συστήματος.....	20
2.3 Ευστάθεια.....	27
Κεφάλαιο 3: Προστασία μικροδικτύων .....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Ανάλυση Σφαλμάτων DC ρεύματος.....	30
3.3 Επίδραση του συστήματος γείωσης στην προστασία των DC μικροδικτύων.....	34
3.4 Τεχνικές προκλήσεις προστασίας μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος.....	35
3.5 Προκλήσεις προστασίας λόγω χαρακτηριστικών ρεύματος σφάλματος DC .....	35
3.5.1 Δυναμικό μέγεθος ρεύματος σφάλματος.....	35
3.5.2 Σφάλμα αμφίδρομου ρεύματος .....	36
3.5.3 Πρόβλημα διακοπής σφάλματος λόγω απουσίας φυσικού ρεύματος μηδενικής διέλευσης	36
3.6 Προστασία DC μικροδικτύων .....	37
3.7 Προστασία με βάση το ρεύμα .....	37
3.7.1 Προστασία από υπερένταση.....	37
3.7.2 Προστασία με βάση τα παράγωγα του ρεύματος .....	39
3.7.3 Προστασία διαφορικού ρεύματος.....	40
3.8 Προστασία με βάση την τάση .....	41
3.9 Προστασία με βάση την ενέργεια ελέγχου του μετατροπέα .....	41
3.10 Μέθοδος χειραψίας .....	42
3.11 Προστασία μετατροπέα DC- DC σε συστήματα διανεμημένης παραγωγής.....	44
Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση DC συστήματος με την βοήθεια του Simulink .....	47
4.1 Εισαγωγή.....	47
4.2 Παρουσίαση βασικών συσκευών του προγράμματος .....	47
4.2.1 Σύστημα Φ/Β μονάδας .....	47
4.2.2 Δίκτυο AC και σύνδεση του με το DC νανοδίκτυο.....	52

4.2.3	Μπαταρία και σύνδεση της με τον DC ζυγό .....	55
4.3	Μετρήσεις κατά την λειτουργία του προγράμματος .....	59
4.3.1	Λειτουργία προσομοίωσης και δεδομένα εξόδου .....	59
4.3.2	Σενάρια προσομοίωσης για σύστημα με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από την διανομή.62	
4.3.3	Σενάριο προσομοίωσης για σύστημα χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από την διανομή.69	
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
	Βιβλιογραφία.....	75

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Φ/Β μοντέλο με δυο παραμέτρους.....	6
Εικόνα 2: Φ/Β μοντέλο με τρεις παραμέτρους.....	6
Εικόνα 3: Φ/Β μοντέλο με τέσσερις παραμέτρους.....	7
Εικόνα 4: P(Watt) και V(Volt) συνάρτηση προσπίπτουσας ακτινοβολίας.....	8
Εικόνα 5: P(Watt) και V(Volt) συνάρτηση θερμοκρασίας.....	8
Εικόνα 6: Σημείο λειτουργίας φωτοβολταϊκής μονάδας με διαφορετικό ωμικό φορτίο.....	10
Εικόνα 7: Διάγραμμα σύνδεσης A/Γ στον άπειρο ζυγό.....	13
Εικόνα 8: Διάγραμμα σύνδεσης A/Γ σε DC ζυγό.....	14
Εικόνα 9: Χρόνος εκφόρτισης/ Ισχύς λειτουργίας ανάλογα με το μέσο αποθήκευση.....	16
Εικόνα 10: Μορφή δικτύου για τα κέντρα δεδομένων.....	22
Εικόνα 11: Πολικότητα DC μικροδικτύου (a) Μονοπολικό (b) Διπολικό.....	27
Εικόνα 12: Σφάλμα DC a) Φάση-Φάση b) Φάση-Γη.....	31
Εικόνα 13: Ρεύμα σφάλματος DC (a) Βλάβη καλωδίου DC σε VSC (b) Στάδιο – 1: Εκφόρτιση πυκνωτή (c) Στάδιο – 2: Δίοδος ελευθέρως ροής (d) Στάδιο – 3: Τροφοδοσία ρεύματος από την πλευρά του δικτύου AC.....	32
Εικόνα 14: Σύστημα γείωσης DC μικροδικτύου (a) TT, (b) IT, (c) TN-C, (d) TN-S, (e) TN-C-S.....	35
Εικόνα 15: Προστασία με βάση τον έλεγχο του μετατροπέα.....	42
Εικόνα 16: Απεικόνιση της μεθόδου χειραγίας (a) αναγνώριση της γραμμής που έχει το σφάλμα (b) άνοιγμα της γραμμής με σφάλμα (c) επαναφόρτιση DC πυκνωτών (d) ξανά κλείσιμο του DC διακόπτη.....	44
Εικόνα 17: Φ/Β στο simulink.....	48
Εικόνα 18: Παράμετροι Φ/Β.....	48
Εικόνα 19: Καμπύλες V-I και V-P για το καθορισμένο μοντέλο.....	49
Εικόνα 20: DC-DC μετατροπέας για MPP.....	51
Εικόνα 21: Σύστημα ελέγχου για MPP.....	51
Εικόνα 22: Πρόγραμμα για την εύρεση Duty Cycle για MPP.....	52
Εικόνα 23: Σύνδεση AC ζυγού με τον DC.....	53
Εικόνα 24: Ρύθμιση των παραμέτρων AC.....	53
Εικόνα 25: Ανορθωτής Thyristor.....	54
Εικόνα 26: Έλεγχος ανόρθωσης Thyristor.....	55
Εικόνα 27: Έλεγχος συμμετοχής δικτύου, για την προσφορά ενέργειας στο σύστημα DC.....	55
Εικόνα 28: Μπαταρία και παράμετροι.....	56
Εικόνα 29: Κύκλωμα ελέγχου φόρτισης και αποφόρτισης μπαταρίας.....	56
Εικόνα 30: PID σύγκριση τάσης αναφοράς με τάση ζυγού για την δημιουργία ρεύματος αναφοράς.....	57
Εικόνα 31: PID για την σύγκριση ρεύματος μπαταρίας με το ρεύμα αναφοράς για τον καθορισμό παλμού φόρτισης ή αποφόρτισης.....	58
Εικόνα 32: DC-DC μετατροπέας δύο κατευθύνσεων.....	58
Εικόνα 33: Καμπύλη ημέρας.....	59
Εικόνα 34: Αποτέλεσμα 1 από καμπύλη ημέρας.....	60
Εικόνα 35: Αποτέλεσμα 2 από καμπύλη ημέρας.....	60
Εικόνα 36: Αποτέλεσμα 3 από καμπύλη ημέρας.....	61
Εικόνα 37: Προσομοίωση περίπτωση 1, γενική εικόνα.....	63
Εικόνα 38 Προσομοίωση περίπτωση 1, χρόνος απόκρισης κατά την εκκίνηση του συστήματος.....	64
Εικόνα 39: Προσομοίωση περίπτωση 1, χρόνος εναλλαγής μπαταρίας με τον AC-DC μετατροπέα... ..	64
Εικόνα 40: Προσομοίωση περίπτωση 1, σταμάτημα AC-DC μετατροπέα και τροφοδότηση μέσω του Φ/Β.....	65
Εικόνα 41: Προσομοίωση περίπτωση 2, γενική εικόνα.....	66
Εικόνα 42: Προσομοίωση περίπτωση 2, χρονικό απόκρισης από 200W/m <sup>2</sup> σε 600W/m <sup>2</sup> .....	66

Εικόνα 43: Προσομοίωση περίπτωση 2, χρόνος απόκρισης στην εναλλαγής κατάστασης της μπαταρίας από αποφόρτιση σε φόρτιση.....	67
Εικόνα 44: Προσομοίωση περίπτωση 3, γενική εικόνα .....	68
Εικόνα 45: Προσομοίωση περίπτωση 3, χρόνος μετάβασης από 600W/m <sup>2</sup> σε 200W/m <sup>2</sup> .....	68
Εικόνα 46: Χρόνος απόκρισης της μπαταρίας 1mSec .....	69
Εικόνα 47: Γενικά αποτελέσματα, σύστημα χωρίς μπαταρία .....	70
Εικόνα 48: Απόκριση φόρτισης μπαταρίας απο τα Φ/Β .....	70
Εικόνα 49: Συμπεριφορά του συστήματος σε απότομη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας .....	71
Εικόνα 50: Απόκριση μπαταρίας, σε απότομη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	71
Εικόνα 51: Περίπτωση εισαγωγής δεύτερου φορτίου 2kW γενική μορφή .....	72
Εικόνα 52: Χρόνος απόκρισης μπαταρίας και συμπεριφορά συστήματος κατά την εισαγωγή επιπλέον 2kW φορτίου στην έξοδο .....	73

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι και τιμές κυψέλης Φ/Β .....	4
Πίνακας 2: Κυψέλη Φ/Β ονοματολογία .....	4
Πίνακας 3: Πόλωση τροφοδοσίας μικροδικτύου DC.....	24
Πίνακας 4: Σύγκριση διαφορετικών τοπολογιών DC μικροδικτύων .....	25
Πίνακας 5: Σενάρια προσομοίωσης (Κατάσταση φόρτισης/Ακτινοβολία W/m <sup>2</sup> ).....	62

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, το μεγαλύτερο πρόβλημα ήταν για τον ποιο τρόπο παραγωγής και μεταφοράς, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρική ενέργεια. Οι δύο μεγαλύτεροι ανταγωνιστές ήταν ο N.Tesla ο οποίος υποστήριζε το εναλλασσόμενο ρεύμα εναντίον του T. Edison που ήταν υπέρ του συνεχούς.

Όπως γνωρίζουμε, η άποψη που τελικά υπερίσχυσε ήταν αυτή του AC, διότι τα περισσότερα συστήματα μέχρι τώρα ασπάζονται αυτήν, αυτό συνέβη βέβαια λόγω της τότε τεχνογνωσίας και δυνατοτήτων. Ένας βασικός λόγος που υπερίσχυσε ήταν η ευκολία μετατροπής της τάσης στο εναλλασσόμενο ρεύμα, που στην τότε εποχή αυτό ήταν ακατόρθωτο για την DC. Επιπλέον, η εφεύρεση των τριφασικών μηχανών, βοήθησε και αυτή στην περεταίρω χρήση του AC καθώς μέχρι τότε οι DC γεννήτριες ήταν μονόδρομος. Τα παραπάνω όμως δεν κατάφεραν να καταργήσουν κάθε μορφή χρήσης του DC συστήματος, καθώς ακόμα και σήμερα παρατηρείται σε ένα παλιό κομμάτι του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς όπου χρησιμοποιείται από την Pacific Gas and Electric (PG&E) στο Σαν Φρανσίσκο για την τροφοδοσία DC κινητήρων με μεταβλητή ταχύτητα για παλιούς ανελκυστήρες σε κτήρια. Επίσης καινούριες μελέτες αναφέρονται συχνά σε σύγχρονα συστήματα ισχύος που περιλαμβάνουν DC ζυγούς σε μικροδίκτυα.

Στα χρόνια μας, συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρκετούς σκοπούς στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Μια ευρέως γνωστή συσκευή ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιείται είναι ο μετατροπέας (inverter) που απαιτείται για την μετατροπή του DC ρεύματος παραγωγής από φωτοβολταϊκά, σε AC ίδιας τάσης και συχνότητας με το δίκτυο της εκάστοτε χώρας ή ανάγκης. Ένα ακόμα παράδειγμα αφορά τους μετατροπείς (converters) δυο κατευθύνσεων που συνδέουν τις μπαταρίες, ενός μικροδικτύου με το υπόλοιπο σύστημα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (DC Link), ώστε να πραγματοποιείται φόρτιση και εκφόρτωση των συσσωρευτών ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Εν συνέχεια είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αυτές οι συσκευές δεν μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς την άσκηση κάποιου τύπου ελέγχου, για αυτό σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητος ο σαφής προσδιορισμός των αναγκών της κάθε εγκατάστασης, ώστε να προσφέρει αδιάλειπτη και ασφαλή λειτουργία μέσω κατάλληλου ελέγχου.

Αναφορικά με τα σύγχρονα συστήματα ισχύος, τα DC μικροδίκτυα είναι ένα πολύ βασικό κεφάλαιο που τα αποτελεί, λόγω της δυνατότητας που έχει να διασυνδέεται με DERs (Distributed energy resource) με τους κατανεμημένους ενεργειακούς πόρους, SST (Solid state

transformer) μετασχηματιστές στερεάς κατάστασης (AC-DC-DC-AC), ESS (Energy storage system) συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, (data center loads) φορτία σε κέντρα δεδομένων (κυρίως μεγάλα ups, ηλεκτρονικά κλπ) , EVC (Electrical vehicle charging) φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων κλπ.

Τέλος, είναι ουσιώδες να αναφερθεί η συμμετοχή όλων αυτών των συσκευών μετατροπής και ελέγχου της ισχύος, με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις παραγωγής, αποθήκευσης αλλά και κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και όλη αυτή η διαδικασία να είναι όσο το δυνατόν ασφαλή για τον άνθρωπο όπως και για τις ίδιες τις συσκευές που το αποτελούν. [4]

# **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΑΠΕ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ-ΝΑΝΟΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**

## ***1.1 Εισαγωγή***

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ίσως ένας από τους βασικότερους παράγοντες στην ανάπτυξη των ΑΠΕ, στον έλεγχο και γενικότερα στην σωστή διαχείριση της μεταφοράς ισχύος στα σύγχρονα μικροδίκτυα. Τα ηλεκτρονικά ισχύος μπορούμε να πούμε ότι συνδέουν την ισχύ, τα ηλεκτρονικά, και τον έλεγχο. Ο έλεγχος απασχολείται με στατικά και δυναμικά συστήματα, ανοιχτού ή κλειστού βρόχου, και ο κύριος παράγοντας που τον καθιστά απαραίτητο για το σύστημα, είναι ότι χάρη σε αυτόν, ένα σύστημα με πολλές μεταβολές παράγει ένα επιθυμητό αποτέλεσμα στην έξοδο. Η ισχύς έχει να κάνει με τον εξοπλισμό ο οποίος είναι απαραίτητος για την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρονικά ασχολούνται με ένα πολύ σημαντικό κομμάτι, το οποίο είναι η άντληση και η επεξεργασία των σημάτων μέσω αισθητήρων και κυκλωμάτων, ώστε να καταφέρουν να προσφέρουν τα κατάλληλα δεδομένα στο σύστημα ελέγχου. Γενικότερα τα ηλεκτρονικά ισχύος θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ένας βασικός παράγοντας για τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος. Αυτά έχουν μπει βαθιά στην καθημερινότητα μας, το φάσμα που καλύπτουν είναι στα πεδία που απαιτείται μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να είναι της τάσης, της συχνότητας, είτε και των δύο μαζί. Στα επόμενα υποκεφάλαια θα δούμε και στην πράξη μερικά πεδία εφαρμογής τους.

## ***1.2 Ηλεκτρονικά ισχύος και σύνδεση τους με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας***

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ηλεκτρονικά ισχύος, έχουν παίξει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην αρμονική σύνδεση αυτών με το κυρίως δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς, διανομής, αποθήκευσης και στην συγκεκριμένη πτυχιακή, στην κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν μερικές εναλλακτικές μορφές ενέργειας, αλλά και με το πως συνδέονται στενά με την απαραίτητη παρουσία των ηλεκτρονικών ισχύος. Έπειτα θα γίνει αναφορά στους συσσωρευτές.



### 1.2.1 Φωτοβολταϊκά και σύνδεση τους με τα ηλεκτρονικά ισχύος

Στην σύγχρονη αυτή εποχή που διανύουμε τα φωτοβολταϊκά είναι πολύ διαδεδομένα στην ζωή μας, καθημερινά τα βλέπουμε σε στέγες, σε χωράφια ακόμα και σε μικρότερες συσκευές, όπως προβολείς, αριθμομηχανές, ρολόγια χειρός κλπ. Οι φωτοβολταϊκές αυτές μονάδες ουσιαστικά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρικό ρεύμα, που χρησιμοποιείται είτε απευθείας είτε μετατρέπεται στην επιθυμητή τάση και συχνότητα για την εκάστοτε λειτουργία. Μια φωτοβολταϊκή μονάδα, είναι το αποτέλεσμα σύνδεσης παράλληλα και σε σειρά, πολλών μικρών κυψελών. Αυτές είναι φτιαγμένες από ημιαγωγούς, σχεδιασμένους έτσι ώστε, όταν αυτοί χτυπηθούν από ένα φωτόνιο να παράγουν τάσεις, συνήθως 0.6-0.7 V DC. Σε γενική μορφή η μαθηματική ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος είναι μια μη γραμμική εξίσωση, κάτι που το καθιστά περίπλοκο, καθώς εμπλέκονται οι παράγοντες της θερμοκρασίας, της ποσότητας της ακτινοβολίας κλπ. Παρακάτω θα γίνει μια σχετική αναφορά στο μαθηματικό αυτό μοντέλο ώστε να προσδιοριστεί η λειτουργία του και να γίνει σαφής η ανάγκη των ηλεκτρονικών ισχύος στην επίτευξη βέλτιστου αποτελέσματος.

Πίνακας 1: Παράμετροι και τιμές κυψέλης Φ/Β

A/A	Παράμετροι	Τιμές
1	Vocs	0.6
2	Iccs	3.45
3	Rsh	11592
4	Rs	0.018
5	$\Delta voc$	-0.0022
6	Gs	1000
7	Ts	298
8	A	1.2
9	K	$1.3806 \times 10^{-23}$
10	$\Delta icc$	0.00095
11	Q	$1.60217733 \times 10^{-19}$

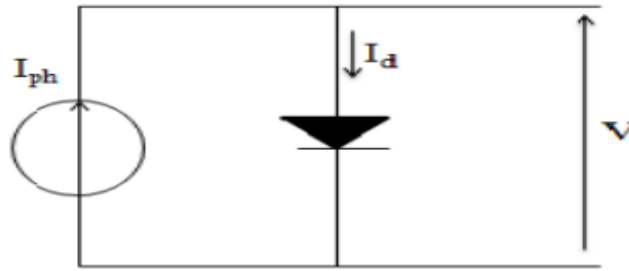
Πίνακας 2: Κυψέλη Φ/Β ονοματολογία

V	cell output voltage (V).
---	--------------------------

Voc	open circuit voltage (V).
Ipv	cell output current (A).
Iph	solar cell photocurrent (current generated by the incident light and it is directly proportional to the sun irradiation) (A).
Isat	reverse saturation or leakage current of the diode (A).
Id	diode current (A).
Ts	solar cell absolute reference temperature at STC = 298 K.
T	solar cell absolute operating temperature (K).
A	diode ideality factor.
K	Boltzmann constant = $1.3806 \times 10^{-23}$ J/K.
q	Electron charge = $1.60217733 \times 10^{-19}$ C.
Rs	Cell intrinsic series resistance.
Rsh	Cell intrinsic shunt or parallel resistance.
g	Total solar radiation absorbed at the plane of array (POA), W/m <sup>2</sup>

Στους Πίνακες 1 και 2 αναφέρθηκαν οι ονοματολογίες και οι παράμετροι που απαιτούνται για την κυκλωματική και μαθηματική ανάλυση των κυψελών. Στην συνέχεια θα δείξουμε τρεις περιπτώσεις κυκλωμάτων από την πιο απλή στην πιο σύνθετη μορφή τους και το απαραίτητο τυπολόγιο για τον προσδιορισμό των αποτελεσμάτων εξόδου.

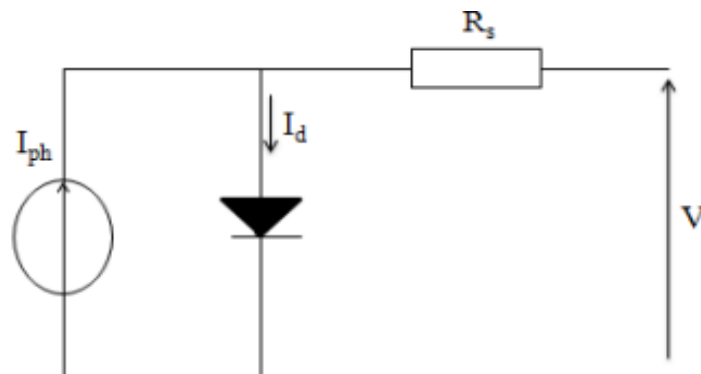
Στο κύκλωμα (Εικόνα 1) οι δυο παράμετροι είναι τα I<sub>ph</sub> και I<sub>d</sub>



Εικόνα 1: Φ/Β μοντέλο με δυο παραμέτρους<sup>1</sup>

1.  $I_{pv} = I_{ph} - I_d$
2.  $I_{ph} = iccs \cdot \frac{g}{g_s} \cdot (1 - \Delta iccs(T_s - T))$
3.  $I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{v}{T A k}} - 1 \right)$
4.  $I_{sat} = \frac{A \cdot k \cdot I_{ph} \cdot I_{ph}}{e^{q-1} \cdot V_{oc}}$
5.  $V_{oc} = V_{ocs} - \Delta V_{oc} \cdot (T_s - T)$

Στο κύκλωμα (Εικόνα 2), οι τρεις παράμετροι είναι τα  $I_{ph}$ ,  $I_d$  και  $R_s$



Εικόνα 2: Φ/Β μοντέλο με τρεις παραμέτρους<sup>2</sup>

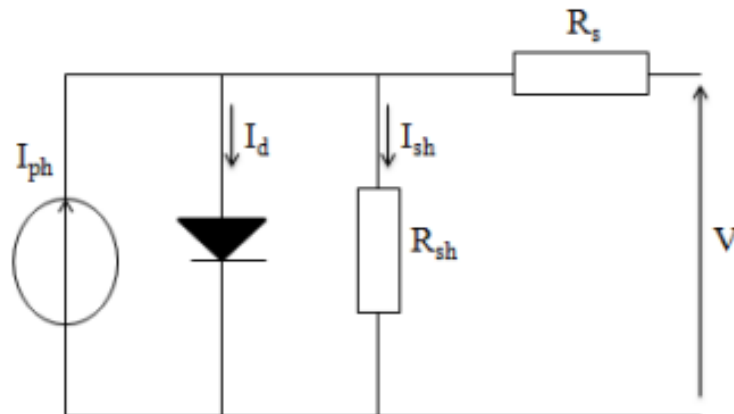
1.  $I_{pv} = I_{ph} - I_d$
2.  $I_{ph} = iccs \cdot \frac{g}{g_s} \cdot (1 - \Delta iccs(T_s - T))$
3.  $I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{v + I R_s}{T A k}} - 1 \right)$
4.  $I_{sat} = \frac{A \cdot k \cdot I_{ph} \cdot I_{ph}}{e^{q-1} \cdot V_{oc}}$

<sup>1</sup> Βλ. [1]

<sup>2</sup> Βλ. [1]

$$5. Voc = Vocs - \Delta Voc \cdot (Ts - T)$$

Τέλος, στο κύκλωμα (Εικόνα 3), οι τέσσερις παράμετροι είναι τα  $I_{ph}$ ,  $I_d$ ,  $R_s$  και  $R_{sh}$



Εικόνα 3: Φ/Β μοντέλο με τέσσερις παραμέτρους<sup>3</sup>

$$1. I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh}$$

$$2. I_{ph} = iccs \cdot \frac{g}{gs} \cdot (1 - \Delta iccs(Ts - T))$$

$$3. I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{v + I R_s}{A k T q}} - 1 \right)$$

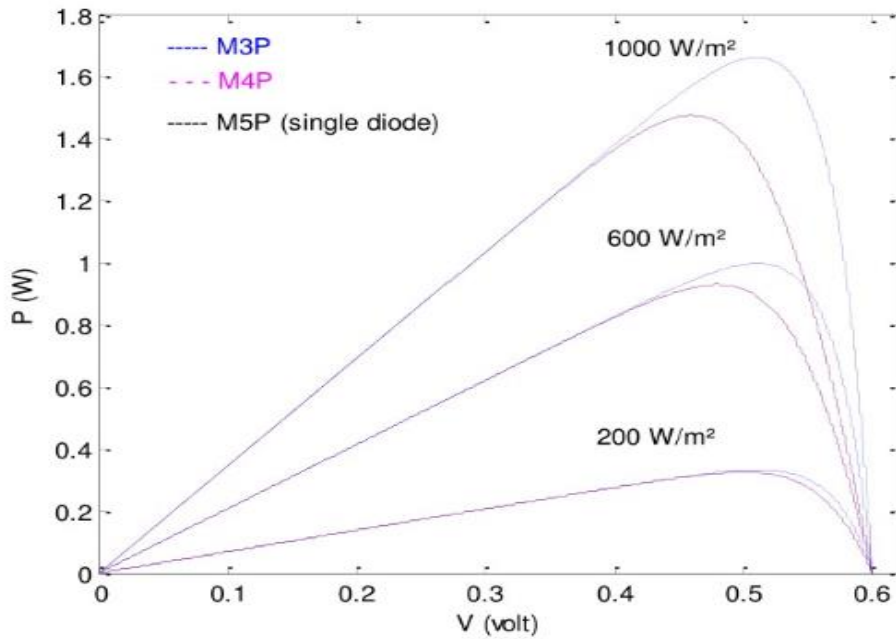
$$4. I_{sat} = \frac{I_{ph} \cdot R - Voc}{R \cdot \left( e^{\frac{Voc}{A k T q}} - 1 \right)}$$

$$5. Voc = Vocs - \Delta Voc \cdot (Ts - T)$$

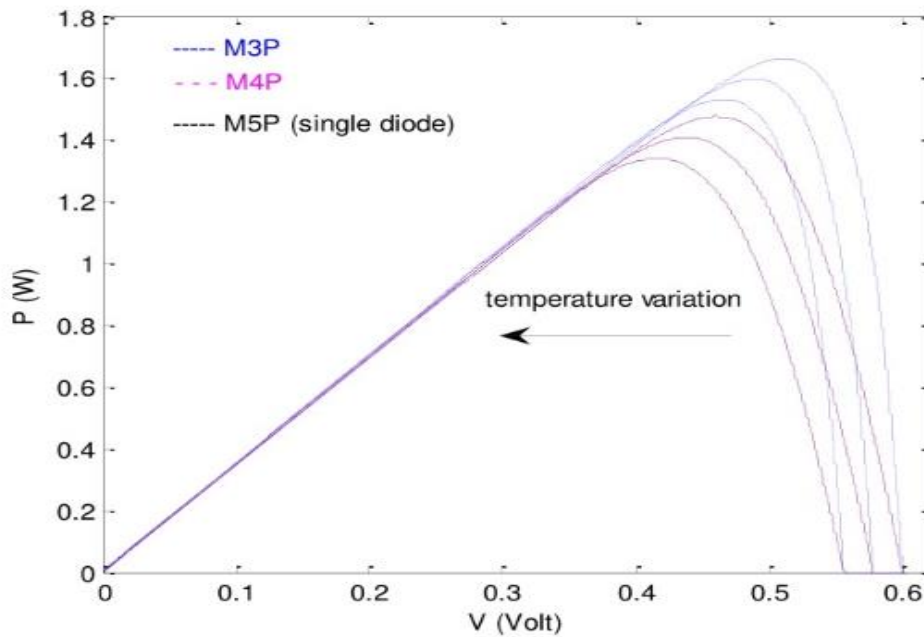
$$6. I_{sh} = \frac{V + I_s \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Με βάση τα τρία προηγούμενα μαθηματικά μοντέλα, με την βοήθεια του Matlab προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα:

<sup>3</sup> Βλ. [1]



Εικόνα 4: P(Watt) και V(Volt) συνάρτηση προσπίπτουσας ακτινοβολίας<sup>4</sup>



Εικόνα 5: P(Watt) και V(Volt) συνάρτηση θερμοκρασίας<sup>5</sup>

Από τα παραπάνω σχεδιαγράμματα, γίνεται αντιληπτή η παρατήρηση που έγινε προηγουμένως, ότι οι παράμετροι της τάσης, της έντασης αλλά και γενικότερα της ισχύος είναι μη γραμμικά μοντέλα, σε συνάρτηση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία και την θερμοκρασία.

<sup>4</sup> Βλ. [2]

<sup>5</sup> Βλ. [2]

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, σε μία πραγματική εφαρμογή την απαραίτητη παρουσία ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και τον έλεγχο αυτών. Όπως βλέπουμε στην Εικόνα 4 συνάρτηση ( $V, P$ ) σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, καθώς και με την χρήση των τριών μαθηματικών τύπων, παρατηρούμε ότι η τάση κάθε κυψέλης δεν εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την ισχύ της προσπίπτουσας σε αυτήν ακτινοβολίας, πάρα αυτά όμως μπορούμε εύκολα να εντοπίσουμε ότι όσο μεγαλώνει η ακτινοβολία τόσο η τάση στα άκρα του Φ/Β μικραίνει, και η ισχύς που δίνει στην έξοδο του αυξάνεται. Στην Εικόνα 5 βλέπουμε ότι όσο η θερμοκρασία αυτή μεγαλώνει, τόσο η τάση όσο και γενικότερα η συνολική ισχύς μειώνονται. Αυτοί οι δύο παράγοντες καθιστούν δύσκολη την ανεξάρτητη παρουσία των Φ/Β στοιχείων, και επιτάσσουν κάποια στάδια ελέγχου και μετατροπής της τάσης εξόδου.

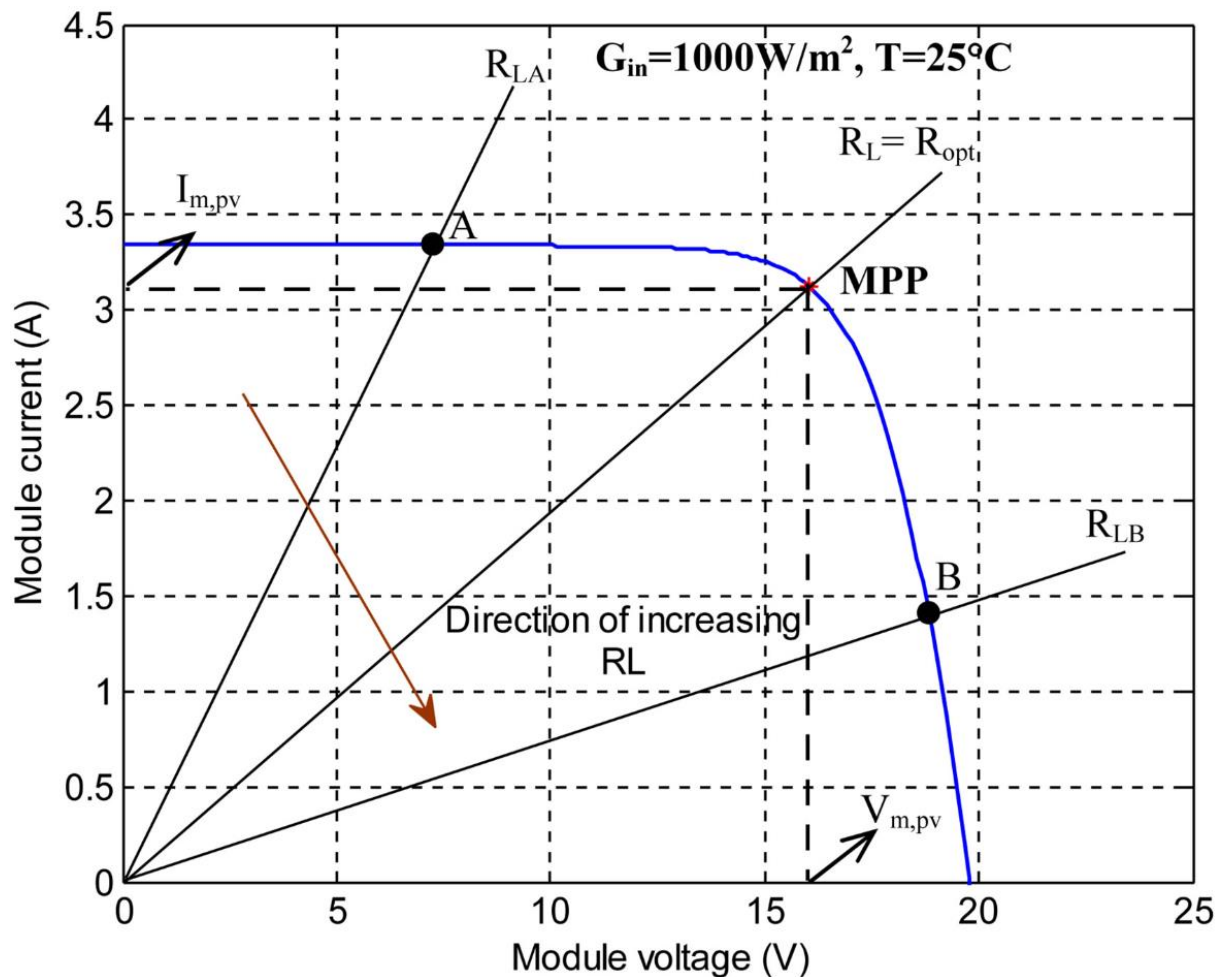
Στην περίπτωση των Φ/Β τα βασικότερα στάδια ελέγχου και μετατροπής είναι το DC-DC για την επίτευξη μέγιστης μεταφοράς ισχύος αλλά και καλύτερης ποιότητας τάσης εξόδου. Καθώς και το DC-AC μετατροπέα ισχύος για την μετατροπή της εκάστοτε DC τάσης ισχύος σε AC (εναλλασσόμενη) ίδιου μέτρου και συχνότητας με του εκάστοτε δικτύου σύνδεσης. Οι DC-DC μετατροπείς χρησιμοποιούνται ουσιαστικά σαν μέσω σύνδεσης των Φ/Β μονάδων με τα φορτία. Αυτοί οι μετατροπείς θα πρέπει να επιλέγονται-παράγονται ώστε να μπορούν να συσχετίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP) μιας μονάδας Φ/Β όταν οι κλιματικές συνθήκες αλλάξουν, καθώς και με την αλλαγή της αντίστασης φορτίου.

Σαφώς, οι DC-DC μετατροπείς πρέπει να συνοδεύονται με έναν ελεγκτή εύρεσης της μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT) ώστε να μειώσουν τις απώλειες στο παγκόσμιο Φ/Β σύστημα. Πιο κάτω έχουμε ένα παράδειγμα, όπως βλέπουμε στην Εικόνα 6, όταν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι απευθείας συνδεδεμένο με ένα φορτίο αντίστασης  $R_{LA}$  το σημείο ισχύος λειτουργίας είναι το Α. Για διαφορετική τιμή της αντίστασης φορτίου  $R_{LB}$  το σημείο λειτουργίας θα είναι το Β. Σε ένα τέτοιο φάσμα φορτίων, μόνο σε ένα σημείο το σύστημα Φ/Β προσφέρει μέγιστη μεταφορά ισχύος (MPP), και αυτό είναι όταν η αντίσταση του φορτίου, είναι ίση με την βέλτιστη τιμή (αντίσταση φορτίου στην μέγιστη μεταφορά ισχύος  $R_L = R_{βελτ}$ ). Είναι βέβαια πολύ δύσκολο να επιλέξουμε ένα φορτίο στην ιδανική τιμή για να πετύχουμε αυτό το αποτέλεσμα, και αν πούμε ότι κάτι τέτοιο θα ήταν δυνατόν, δεν θα ήταν σε καμία περίπτωση εφικτό να προκαθορίσουμε τις κλιματικές παραμέτρους, όπως είδαμε στις Εικόνες 4 και 5.

Για να παρέλθει αυτό το πρόβλημα, ένας ελεγκτής εύρεσης μέγιστης ισχύος (EEMI) θα πρέπει να τοποθετηθεί, ώστε να επιβάλει στο Φ/Β σύστημα να λειτουργεί με μέγιστη μεταφορά ισχύος (MMI). Ο EEMI μπορεί να καταφέρει εξαγωγή του 97% της ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα. Ο στόχος του (EMMI) είναι να ισοβαθμίζει την αντίσταση του φορτίου με την

αντίσταση της πηγής. Ο ΕΕΜΙ χρησιμοποιεί τον DC-DC μετατροπέα για διάφορους λόγους, όταν αυτός παρεμβάλλεται ανάμεσα στην Φ/Β μονάδα και το φορτίο, τότε το σημείο που ενεργεί είναι αυτό της αντίστασης που φαίνεται από το Φ/Β το οποίο εξαρτάται από δύο παράγοντες. Ο ένας είναι από το φορτίο  $R_L$  και ο άλλος από τον κύκλο λειτουργίας (Duty cycle).

Έτσι, κάτω από διαφορετικά φορτία, ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να προσαρμοστεί για να αλλάξει το  $R_{in}$  ώστε να ταιριάζει με το  $R_{βελτ}$ , σε οποιαδήποτε κλιματική κατάσταση. Ωστόσο, το μέγεθος των παραμέτρων των διαφορετικών τοπολογιών μετατροπέων DC-DC δεν έχει μελετηθεί ευρέως, αν και αυτό το μέγεθος επηρεάζει σημαντικά τη βέλτιστη λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Για παράδειγμα, η κακή επιλογή του μετατροπέα ανάλογα με το φορτίο κάνει το MPPT λιγότερο χρήσιμο και αυτό επηρεάζει την απόδοση του μετατροπέα. Επίσης, το λανθασμένο μέγεθος επιλογής του μετατροπέα επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή του.



Εικόνα 6: Σημείο λειτουργίας φωτοβολταϊκής μονάδας με διαφορετικό ωμικό φορτίο<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Βλ. [2]

Όσον αφορά τον έλεγχο στο Φ/Β σύστημα θα αναφερθούμε στο τελευταίο κεφάλαιο που θα παρουσιαστεί μαζί με την προσομοίωση του συστήματος (Καταναλωτές, Φ/Β και Άπειρος Ζυγός).

### **1.2.2 Ανεμογεννήτριες και σύνδεση τους με τα ηλεκτρονικά ισχύος**

Η κινητική ενέργεια των ανέμων είναι τόσο μεγάλη ώστε αν την εκμεταλλευόμασταν πλήρως, θα μπορούσαμε να πράξουμε την διπλάσια ενέργεια από αυτήν που έχουμε ανάγκη [3]. Αυτή την ενέργεια μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε με διάφορους τρόπους, άμεσα να κινήσουμε έναν κινητήρα (μετατροπή της αιολικής σε μηχανική) και έμμεσα να εκμεταλλευτούμε π.χ την κίνηση των κυμάτων. Αναφορικά με τον πρώτο τρόπο οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση την θέση του άξονα τους.

- Κατακόρυφου άξονα, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την οριζόντια επιφάνεια του εδάφους.
- Οριζόντιου άξονα, στον οποίο ο άξονας του είναι παράλληλος με την γη.

Το μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμογής έχουν οι (Α/Γ) οριζόντιου άξονα καθώς, είναι πιο στιβαρές και έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Με την τοποθέτηση των πτερυγίων κάθετα στον άνεμο η περιστροφή αυτών είναι πιο ισχυρή σε σχέση με του κατακόρυφου άξονα και έτσι μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ [3]. Για τον λόγο αυτό οι Α/Γ οριζόντιου άξονα καταλαμβάνουν περίπου το 90% των διαθέσιμων συστημάτων αιολικής ενέργειας. Εκτός από την κατηγοριοποίηση με βάση την θέση του άξονα, οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την κατασκευή του κινητήρα τους. Αυτές οι δυο κατηγορίες είναι:

- Ασύγχρονες
- Σύγχρονες

Δύο τύποι σύγχρονων μηχανών χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες:

- σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα
- σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες μπορεί να είναι:

- βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage)
- δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor)

Οι κύριοι τύποι γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι

- οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (σύστημα optislip)
- οι γεννήτριες διπλής τροφοδότησης (double fed).



Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια είναι η ασύγχρονη. Παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως στιβαρότητα, κατασκευαστική απλότητα και χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι ο στάτης χρειάζεται ένα άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Συνοψίζοντας, οι Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν, σύμφωνα με την λειτουργία και τις αρχές ελέγχου τους, ως:

1. η σταθερών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής (no load compensated)
2. η εν μέρει μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής εξόδου με μεταβλητή αντίσταση δρομέα
3. η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ελεγχόμενη από μετατροπέα (back-to-back)
4. η μεταβλητών στροφών Α/Γ εφοδιασμένη με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας.

Λόγω του γεγονότος ότι οι Α/Γ σταθερής ταχύτητας δεν μετατρέπουν σε κανένα στάδιο την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν (DC), δεν θα περιγράψουμε καθόλου την λειτουργία τους εδώ. Έτσι θα αναφερθούμε μόνο σε αυτές της μεταβλητής ταχύτητας.

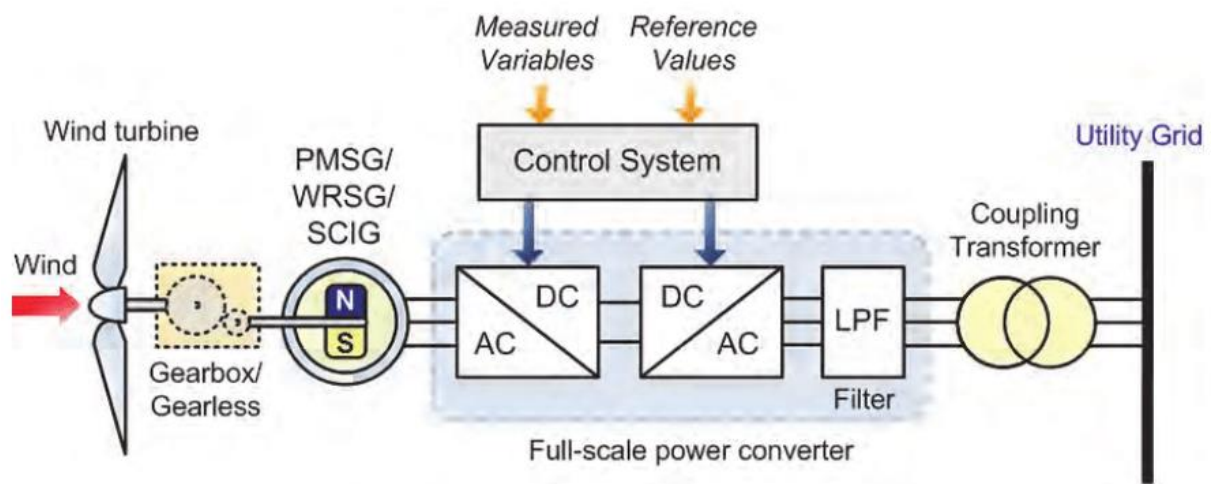
### ➤ **Ανεμογεννήτριες Μεταβλητής Ταχύτητας**

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σχεδιάζονται ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Με την λειτουργία μεταβλητών στροφών γίνεται εφικτή η προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου.

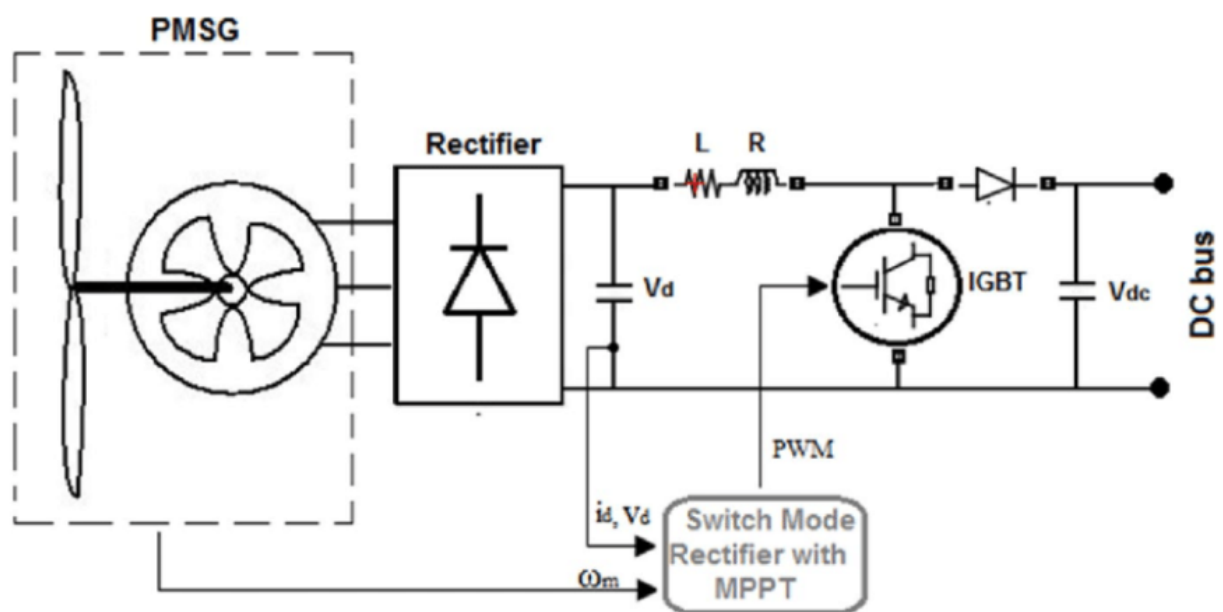
Σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας, η διάταξη που επιτρέπει μεταβλητές στροφές διατηρεί σχεδόν σταθερή την ροπή της και οποιαδήποτε διακύμανση λόγω της ταχύτητας του ανέμου, αποσβένεται μέσω αλλαγής της ταχύτητας στο σημείο που είναι κουμπωμένος ο δρομέας.

Το ηλεκτρικό σύστημα μιας Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι αρκετά περίπλοκο, χρησιμοποιεί κινητήρες επαγωγικούς και σύγχρονους, αλλά κατά κύριο λόγο επαγωγικούς. Έτσι, συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος. Σε αυτό το σημείο ουσιαστικά είναι που θέλουμε να ενσωματώσουμε και την σύνδεση των ανεμογεννητριών στην ευρύτερη διάταξη των DC μικροδικτύων.

Στην κλασική μορφή τους, τα συστήματα Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, πέρα από τα πλεονεκτήματα που έχουν στην μεγαλύτερη απομάστευση ισχύος, την μικρότερη καταπόνηση των μηχανικών μερών και την καλύτερη ποιότητα ισχύος. Το μείζον αρνητικό είναι ουσιαστικά η απώλεια ισχύος στους μετατροπείς λόγω μετατροπών δύο σταδίων AC-DC και DC-AC όπως φαίνεται και στην εικόνα 7 με το γενικό διάγραμμα σύνδεσης. Αφού δεν έχει χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο ανεμογεννήτρια δεν θα γίνει εις βάθος αναφορά στο σύστημα ελέγχου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8, ένα βασικό σημείο, όπως και στα Φ/Β είναι ένα σύστημα ελέγχου μέγιστης μεταφοράς ισχύος, καθώς και σε πολλές περιπτώσεις ένας DC-DC μετατροπέας.



Εικόνα 7: Διάγραμμα σύνδεσης Α/Γ στον άπειρο ζυγό<sup>7</sup>



<sup>7</sup> Βλ. [5]

### Εικόνα 8: Διάγραμμα σύνδεσης A/Γ σε DC ζυγό<sup>8</sup>

#### 1.2.3 Άλλες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας που θα μπορούσαν να ενταχθούν σε ένα σύστημα DC ζυγού

Με κίνητρο τις περιβαλλοντικές αλλά και τις οικονομικές εξελίξεις, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν και θα συνεχίσουν να αποτελούν ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στο δίκτυο ισχύος. Δύο ακόμα βασικές πηγές ΑΠΕ που θα μπορούσαν να συμμετέχουν σε έναν DC ζυγό είναι οι κυψέλες καυσίμου, καθώς και οι μικροτουρμπίνες οι οποίες θα ήταν ευκολότερο να ενταχθούν στο συνεχές δίκτυο, αφού από μόνες τους παράγουν εναλλασσόμενη τάση μεγάλης συχνότητας, κάτι που απαιτεί πάλι μετατροπή AC-DC-AC.

#### 1.3 Σύνδεση AC διανομής με μικροδίκτυο DC

Για την διασύνδεση δύο συστημάτων με διαφορετική συχνότητα είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός DC διαύλου, και έπειτα ανάλογα με την ροή ισχύος, η μετατροπή της DC σε ίδιο μετρό και συχνότητα της κατανάλωσης. Σε αυτήν την πτυχιακή, δεν θα αναλυθεί η DC-AC μετατροπή καθώς υποθέτουμε ότι υπάρχει ένας μετατροπέας AC-DC για αδιάληπτη παροχή ισχύος στο μικροδίκτυο. Όπως και η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ καταναλώνεται ή αποθηκεύεται χωρίς καμία μετατροπή σε DC φορτία ή μονάδες αποθήκευσης. Έτσι στην συνέχεια θα αναφερθούμε μόνο στον AC-DC μετατροπέα ισχύος.

Οι πιο κοινοί ελεγχόμενοι τριφασικοί μετατροπέες AC-DC είναι αυτοί που αποτελούνται από τρανζίστορ ισχύος και μία αντιπαράλληλη δίοδο, συνήθως είναι (MOSFET ή IGBT) λόγω μεγάλης διακοπτικής συχνότητας Εικόνα 12α. Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα AC/DC με διαμόρφωση εύρους παλμών (pulse width modulation, PWM) βασίζεται στη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος υψηλής συχνότητας, που ονομάζεται φέρον σήμα (carrier signal) και συμβολίζεται  $v_{car}$ , από ένα ημιτονοειδές σήμα χαμηλής συχνότητας και ίση με την επιθυμητή θεμελιώδη συχνότητα, το οποίο ονομάζεται σήμα αναφοράς (reference signal) και συμβολίζεται ως  $v_{ref}$ . Όταν η στιγμιαία τιμή του  $v_{ref}$  είναι μεγαλύτερη από του  $v_{car}$  η έξοδος του συγκριτή είναι θετικός παλμός, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητικός παλμός. Ελέγχοντας το πλάτος του σήματος αναφοράς μεταβάλλεται κατάλληλα η τάση στην είσοδο του μετατροπέα, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει τη συνεχή τάση στην έξοδο του, ενώ μεταβάλλοντας την αρχική φάση του σήματος αναφοράς αλλάζει η φάση του εναλλασσόμενου

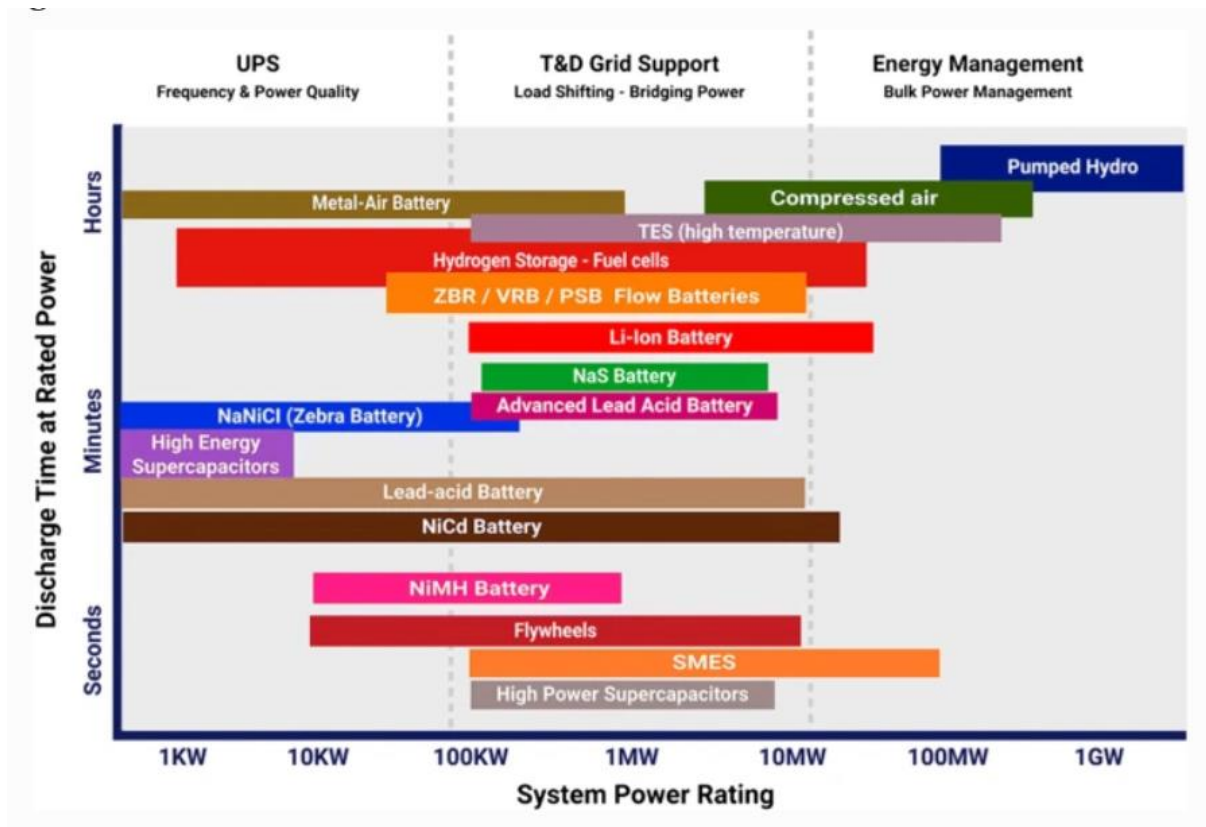
---

<sup>8</sup> Βλ. [6]

ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα, ελέγχοντας έτσι το συντελεστή ισχύος της διάταξης [87].

#### ***1.4 Αποθήκευση ενέργειας σε μορφή DC***

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα του DC ζυγού είναι το γεγονός ότι, μπορεί να συνδεθεί αρκετά εύκολα με μονάδες αποθήκευσης, καθώς τα κυριότερα αποθηκευτικά μέσα είναι DC. Μερικά από αυτά είναι οι κλασικές μπαταρίες που γνωρίζουμε, οι υπερ - πυκνωτές (ultra-capacitors), ακόμα και οι σφόνδυλοι (flywheels) οι οποίοι αποθηκεύουν την ενέργεια σε μηχανική μορφή, συνδέονται ως επί το πλείστον με ένα σύγχρονο μηχανήμα μόνιμου μαγνήτη (PMSM) που είναι ενσωματωμένο στη διανομή μέσω σύνδεσης DC. Μια μελέτη που εκπονήθηκε από τον Nippon, η Telegraph and Telephone Corporation (NTT), μια ιαπωνική εταιρεία τηλεπικοινωνιών, για σύγκριση μεταξύ ενός AC αδιάλειπτης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος (UPS) και DC, από άποψη διαθεσιμότητας, δείχνει ότι η αξιοπιστία της παροχής DC είναι υψηλότερη [91]. Γενικά η ενέργεια που μπορεί να δοθεί από τους συσσωρευτές και ο χρόνος προσφοράς της ποικίλει ανάλογα με τον τύπο τους, στην Εικόνα 9 φαίνονται μερικοί τύποι συσσωρευτών σε σχέση με το μέγεθος της ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν και τον χρόνο που χρειάζονται για πλήρη εκφόρτιση.



Εικόνα 9: Χρόνος εκφόρτισης/ Ισχύς λειτουργίας ανάλογα με το μέσο αποθήκευση<sup>9</sup>

### 1.5 DC φορτία

Πάρα πολλά από τα φορτία στο δίκτυο μας τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα. Τέτοιες είναι μικρές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούμε στο σπίτι ή και την δουλειά μας, όπως κινητά τηλέφωνα, υπολογιστές, φούρνοι μικροκυμάτων, τηλεόραση, φωτισμός κλπ. Συνεχές ρεύμα χρησιμοποιείται επίσης και στην βιομηχανία, σε οδηγούς μεταβλητής ταχύτητας (Variable Speed Drives VSD) για αντλίες, στην θέρμανση, σε συστήματα εξαερισμού, στην ψύξη, σε ανελκυστήρες, σε μύλους, σε συστήματα έλξης κλπ. Επιπλέον στην βιομηχανία χάλυβα χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις φούρνοι που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα καθώς καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τους αντίστοιχους εναλλασσόμενου ρεύματος και δεν παράγουν ανεπιθύμητους σπινθηρισμούς. Η βιομηχανία που ασχολείται με ηλεκτροχημικά προϊόντα χρησιμοποιεί σχεδόν καθολικά DC ρεύμα στις εφαρμογές της. Για να τροφοδοτήσουμε τα παραπάνω φορτία από το παρόν δίκτυο μας, χρήζει μετατροπή η AC ισχύ σε DC για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, κάτι το οποίο δεν είναι αποδοτικό αλλά και προσθέτει αρκετή αναποτελεσματικότητα σε όλη αυτή την αλυσίδα. Από διάφορες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, φάνηκε ότι περίπου το 30% της ενέργειας που

<sup>9</sup> Βλ.[90]

καταναλώνεται διέρχεται μέσα από μετατροπής ισχύος ( AC/DC) πριν φτάσει στα τελικά φορτία. Το ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνεται γενικά εξαρτάται αλλά κυμαίνεται γύρω στο 10-25%. Μια άλλη μελέτη έδειξε ότι αν δημιουργούνταν ένα DC σύστημα τότε, θα αυξανόταν η αποδοτικότητα του δικτύου κατά 8%, και με την αφαίρεση κάθε κυκλώματος ανόρθωσης μια επιπλέον εξοικονόμηση 25%. [7-12]

### **1.5.1 Κέντρα δεδομένων**

Στα κέντρα δεδομένων ένα από τα βασικότερα στοιχεία είναι η αξιοπιστία του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, τα κέντρα δεδομένων είναι εξοπλισμένα με συστήματα UPS τα οποία απαιτούν πολλαπλά στάδια μετατροπής, έτσι ώστε οι μπαταρίες να συνδεθούν σε μια DC γραμμή ( DC bus). Έτσι σαν αποτέλεσμα να έχει πρόκληση μεγάλων απωλειών , κάτι το οποίο θα μπορούσαμε να αποφύγουμε αν το δίκτυο ήταν εξαρχής DC. Κατά συνέπεια, θα γλυτώναμε περίπου το 20% της ενέργειας που καταναλώνεται. [13-15]

Την επανεμφάνιση της ιδέας για την χρήση DC συστήματος μεταφοράς την είδαμε το 2006, όπου τότε υπήρχαν 5 πιθανά πρότυπα για την αξιοπιστία των κέντρων δεδομένων (δυο βασισμένα σε εναλλασσόμενο ρεύμα και τρία σε συνεχές) .Το LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) παρουσίασε ακόμα μια έρευνα η οποία δημοσιεύτηκε το 2008, αυτή έδειξε ότι μετατρέποντας την ισχύ από εναλλασσόμενη σε συνεχής στα κέντρα δεδομένων, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση της τάξης μέχρι και 28%. Το LBNL σε μία ακόμα μελέτη που έκανε για τα κέντρα δεδομένων, δόθηκε έμφαση στην σημαντικότητα της μετατροπής της κύριας εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχής, για την αύξηση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας των κέντρων δεδομένων υψηλής απόδοσης. Οι συγγραφείς προώθησαν με αυτόν τον τρόπο την χρήση DC τάσης για τα κέντρα δεδομένων.[16]

### **1.5.2 Ηλεκτρικά οχήματα**

Η παγκόσμια έκκληση για την μείωση του CO<sub>2</sub>, τα μεγάλα ποσά επενδύσεων στην βιομηχανία της ηλεκτροκίνησης (ηλεκτρικά αυτοκίνητα ή υβριδικά) αλλά και το πρόβλημα με την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και την σταθερότητα της οικονομίας, έχουν οδηγήσει στην μεγάλη αύξηση της παραγωγής και χρήσης οχημάτων βασισμένα στην ηλεκτροκίνηση. Το πρόβλημα του μεγάλου όγκου οχημάτων στην διαδικασία φόρτισης έχει τραβήξει εξαρχής

την προσοχή των επιστημόνων και έχει γίνει σοβαρό αντικείμενο έρευνας μέχρι και σήμερα [17-18].

Ακόμα και αυτήν την στιγμή δεν γνωρίζουμε πως ακριβώς θα διαχειριστούμε την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, αν αυτά θα φορτίζουν στο σπίτι μας όπως οι υπόλοιπες οικιακές συσκευές, αν θα υπάρχουν συγκριμένα μέρη με φορτιστές ταχείας φόρτισης και θα λειτουργούν σαν τα σημερινά βενζινάδικα ή ακόμα και αν μπορέσουν να διαμορφωθούν χώροι οι οποίοι απλά θα αντικαθιστούν την αποφορτισμένη μπαταρία-μπαταρίες με φορτισμένες και θα πληρώνεται ένα αντίστοιχο τίμημα, ή αν τελικά θα δημιουργηθούν έξυπνα πάρκα, που θα τοποθετούνται τα οχήματα και κάθε στιγμή θα αποφασίζεται για το ποιος έχει ανάγκη για φόρτιση, και να υποστηρίζει επίσης και επιστροφή ισχύος στο δίκτυο, όχημα σε όχημα και όχημα στο δίκτυο (V2V and V2G). Κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις έχει και τους υποστηρικτές αλλά και τις αντιπαραθέσεις της για διάφορους σκοπούς, κάτι το οποίο αυτήν την στιγμή δεν είναι αντικείμενο εξέτασης. Σαν τελικό συμπέρασμα, η τελευταία μέθοδος σύμφωνα με τους επιστήμονες που συμμετέχουν σε αυτήν, βρίσκει εφαρμογή στα DC δίκτυα και θα μπορούσαν όλα αυτά τα κέντρα να λειτουργούν μεταξύ τους σαν ένα μικροδίκτυο και να μπορούν να συνδεθούν σε αυτά και άλλες συσκευές DC [19-26].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: DC ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ

### 2.1 Δυνατότητες συστημάτων DC

Η δυνατότητα για την χρήση DC στο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μελετάται έντονα από τους επιστήμονες τα τελευταία χρόνια. Ένας από τους μεγαλύτερους παράγοντες που κρίθηκε η υπεροχή του DC ενάντια στο AC είναι η αποδοτικότητα. Επομένως, συγκρίνοντας το DC με το AC σχετικά με την αποδοτικότητα, τις απώλειες και τα οικονομικά προβλήματα, έλαβαν ιδιαίτερη προσοχή.

Ο Donald J. Hammerstrom [27], παρουσίασε ένα μοντέλο το οποίο σύγκρινε την αποδοτικότητα ανάμεσα στα AC και DC, συγκεκριμένα για τοπολογίες δικτύων για καταναλωτές στα σπίτια. Σύμφωνα με την έρευνα του συγγραφέα, και στις δύο περιπτώσεις, εμφανίζεται περίπου 2,5% απώλεια από την ενέργεια που μετατρέπεται. Αποδείχθηκε ότι τα DC μικροδίκτυα που περιλαμβάνουν κυψέλες καυσίμου ή και άλλες μορφές παραγωγής, σημείωσαν λιγότερες απώλειες μετατροπής.

Σε άλλη μελέτη των Seo et al. [28], παρουσίασαν ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο προσομοιάζει τις απώλειες από τα εξαρτήματα που συμμετέχουν στο DC σύστημα μεταφοράς. Ένα βασικό κομμάτι που αποδείχθηκε ήταν ότι με την αύξηση του φορτίου (κατανάλωσης) αυξάνεται και η συνολική αποδοτικότητα του συστήματος μετατροπής.

Σε άλλη περίπτωση, δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικά μοντέλα για AC και DC, σε μεγάλο δίκτυο μεταφοράς, το οποίο περιείχε 714 γραμμές και 235 φορτία. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι για τον ίδιο αγωγό, το συνεχές ρεύμα μπορεί να είναι κατά 1.22 φορές μεγαλύτερο από το εναλλασσόμενο και να παρουσιάζει παρά ταύτα, τις ίδιες απώλειες αγωγιμότητας. Αν και το μοντέλο αυτό ήταν πολύ απλοποιημένο, για το γεγονός ότι δεν λάμβανε υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο. [29]

Σε διαφορετική έρευνα, συσχετιστήκαν τα AC και DC με την μορφή τύπου, βρέθηκε η παρακάτω σχέση:

$$R_{ac} = \left[ \frac{\pi \cdot r^2}{\pi \cdot r^2 - \pi \cdot (r - \delta)} \right] \cdot R_{dc}$$

Όπου  $R_{ac}$  και  $R_{dc}$  είναι οι AC και DC αντιστάσεις. Το  $r$  είναι η ακτίνα του αγωγού και το  $\delta$  είναι το επιδερμικό φαινόμενο του αγωγού, το οποίο εξαρτάται από την συχνότητα. Από την παραπάνω σχέση μπορούμε πολύ εύκολα να διακρίνουμε ότι η AC αντίσταση θα είναι πάντα



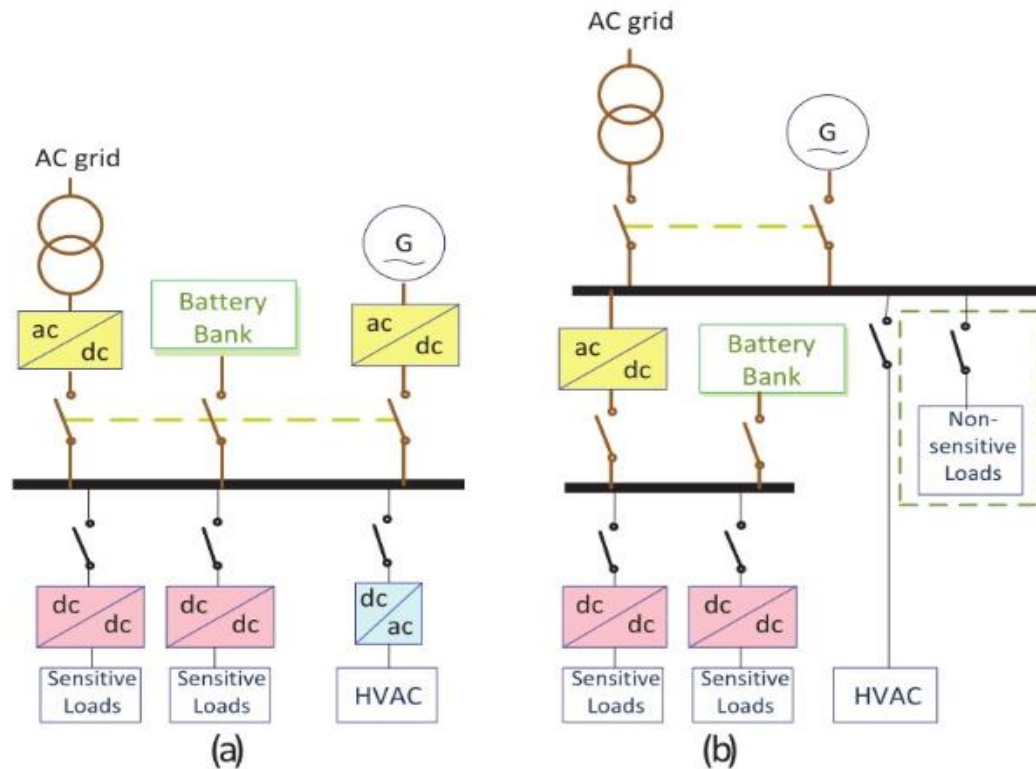
μεγαλύτερη της DC. Όσο η συχνότητα μεγαλώνει, τόσο η διαφορά ανάμεσα στην AC και DC αντίσταση αυξάνεται, δηλαδή από τα 60 Hz μέχρι τα 400 Hz παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση της AC αντίστασης άρα μιλάμε και για μεγαλύτερες απώλειες. Για την καλύτερη κατανόηση αυτής της θεωρίας οι συγγραφείς έκαναν μια λίστα και για τις δύο αυτές κατηγορίες. Από τα αποτελέσματα βγήκε ότι για διαμέτρους καλωδίων από 4mm<sup>2</sup> μέχρι 95 mm<sup>2</sup> η AC αντίσταση είναι μεγαλύτερη κατά 19% της DC. Για μεγαλύτερες διαστάσεις καλωδίων δηλαδή από διαμέτρους > 95 mm<sup>2</sup> η AC είναι ανώτερη της DC σε ένα εύρος από 21 – 37% . Όλη αυτή η ανάλυση έγινε στο να φανεί ότι σε ένα DC σύστημα δυο πόλων μπορεί να μειωθούν οι απώλειες στις τάξεις 40-50%. Ο Larruskain et al. [30] πρότεινε την μετατροπή των ήδη εγκατεστημένων δικτύων σε DC για την αύξηση της ενέργειας που μπορούν να μεταφέρουν οι γραμμές. Επιπλέον, φάνηκε ότι το DC ρεύμα ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί σε εμπορικά κτίρια, τα οποία εμπεριέχουν ευαίσθητα φορτία. Κατ' εξακολούθηση, παρουσιάστηκε ότι η διανομή DC οδηγεί σε πλεονεκτήματα, που σχετίζονται με μειωμένες απώλειες, όπως ασφάλεια, μείωση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, και βελτίωση ποιότητας ισχύος [31-32]. Σε διαφορετική έρευνα, αναλύθηκε η εφαρμογή του DC ρεύματος σε βιομηχανικές περιοχές. Έτσι φάνηκε ότι το DC μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βιομηχανικές εφαρμογές, και οι προκλήσεις που δημιουργούνται μπορούν να διαχειριστούν από ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα. Τέλος έρευνες έδειξαν ότι η σύνδεση πολλών AC μικροδικτύων μέσω ενός DC μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία και βιωσιμότητα του συστήματος[33-34].

## **2.2 Σχεδίαση DC συστήματος**

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές αναφορές, σχετικά με τα DC συστήματα μεταφοράς. Διάφοροι παράγοντες πρέπει να συμπεριληφθούν κατά την διάρκεια του σχεδιασμού ενός DC συστήματος διανομής, ειδικά στην περίπτωση όπου ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι σχεδιασμένος για AC εφαρμογές. Το βασικότερο ζητούμενο για να είναι αξιόπιστο το σχέδιο, είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται να περιέχει απλουστευμένη την συμπεριφορά του φορτίου σε DC τάση.

Σε μία μελέτη οι συγγραφείς δημιούργησαν μια σταθερή κατάσταση αλλά και μια μεταβλητή για εξήντα τρία φορτία. Έγινε φανερό ότι τα φορτία που παράγουν θερμότητα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν (στα σταθερά) σαν καθαρή αντίσταση ή σαν φορτίο που παράγει φωτισμό. Έτσι αυτά μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν φορτία εξαρτημένα από την θερμοκρασία. Το σταθερό μοντέλο σε μια γενική περίπτωση ηλεκτρικής μηχανής είναι μια μεταβλητή πηγή που χαρακτηρίζεται από τον τύπο  $I = Y_0U + I_0$ . Επίσης η ίδια μελέτη έδειξε

ότι για τα φορτία που απαιτούν διακοπτικά μέσα (τροφοδοτικά) συμπεριφέρονται ως σταθερά φορτία ισχύος, το οποίο σημαίνει ότι καταναλώνουν το ίδιο ποσό ισχύος ανεξάρτητα από την τάση τροφοδοσίας [35]. Ύστερα από διερεύνηση, σχεδιάστηκε ένα σύστημα ελέγχου προσαρμοσμένο για τα DC μικροδίκτυα που είναι εγκατεστημένα στα κέντρα δεδομένων. Έγινε σύγκριση δύο διαφορετικών διαμορφώσεων για τα δίκτυα δεδομένων Εικόνα 10. Γενικά, το (α) πλάνο είναι καλύτερο από το (β) γιατί δεν χρειάζεται να επιτευχθεί συγχρονισμός στις γεννήτριες, αλλά υπάρχει και καλύτερος έλεγχος της ροής ισχύος. Όσο και το (β) μπορεί να είναι καλύτερο της (α), στα σημεία που έχουν να κάνουν με τις απώλειες ισχύος και το μέγεθος του μετατροπέα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το (β) πλάνο είναι καλύτερο και στα σημεία όπως (1) συνδέοντας HVAC στην DC γραμμή, όχι μόνο αυξάνει το μέγεθος του μετατροπέα αλλά μεγαλώνει και το μέγεθος της αποθηκευμένης ενέργειας άρα με την σειρά του και το κόστος της εγκατάστασης. Επιπλέον αυξάνει τον βαθμό περιπλοκότητας στην ασφάλεια, την διαχείριση και τον τρόπο μετάδοσης, (2) πρακτικά όμως δεν προτιμάται να συνδέονται μεγάλα φορτία (πχ μηχανές) στην ίδια DC γραμμή με ευαίσθητα φορτία, για να μειωθούν όσο το δυνατόν οι διακυμάνσεις τάσεων. Το κεντρικό σημείο αυτής της μελέτης ήταν ο έλεγχος αλλά και η λειτουργία του όλου συστήματος. Η μελέτη έδειξε ότι μεταξύ οκτώ πιθανών τρόπων λειτουργίας και είκοσι τριών μεταβάσεων, οι πιο ενδιαφέροντες ορίστηκαν και συζητηθήκαν [35]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι η συνεχόμενη τροφοδοσία σε ευαίσθητα DC φορτία ήταν εγγυημένη με το να συντονίζονται οι δύο κύριοι μετατροπείς. Οι συγγραφείς έδωσαν μεγάλη έμφαση στην γρήγορη ανίχνευση της πτώσης του AC και απευθείας εναλλαγή.



Εικόνα 10: Μορφή δικτύου για τα κέντρα δεδομένων<sup>10</sup>

Σύμφωνα με τους Sannino et al. [36] προτείνεται ένα απλοποιημένο σχεδιασμό για το DC δίκτυο διανομής στο οποίο χρειάζεται ένας μικρός αριθμός από μετατροπείς για να μπορεί να αυξηθεί η συνολική αποδοτικότητα του δικτύου. Αυτοί μελέτησαν την εφαρμογή στη δική τους ερευνητική εγκατάσταση και χρησιμοποίησαν 4 βαθμίδες DC τάσεων : 48 V , 120 V , 230 V και 326 V. Υπολογίστηκε η πτώση τάσης αλλά και οι απώλειες ισχύος σε σύγκριση με το σύστημα που έχουμε ήδη. Επιπλέον το σύστημα ήταν οικονομικό στην εγκατάσταση αλλά και στο κόστος λειτουργίας του.

Τα τελικά αποτελέσματα ήταν: (1) Η DC τροφοδοσία μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα πλεονεκτήματα εάν γίνει κατάλληλη επιλογή της τάσης λειτουργίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα 326 V ήταν η επιλογή που ταίριαζε σε γενικές γραμμές καλύτερα. ( Πρέπει να αναφερθεί ότι αυτή η μελέτη έγινε για το ευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς και ότι δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι ισχύει ακριβώς το ίδιο για τα υπόλοιπα συστήματα που χρησιμοποιούνται από άλλες χώρες κλπ). (2) Με την προσθήκη “τράπεζας” αποθήκευσης ενέργειας, αυξήθηκε κατά πολύ η εγγύηση του συστήματος στο κομμάτι που έχει να κάνει με την παροχή ενέργειας στα σημαντικά φορτία. Με αυτόν τον τρόπο τα διατηρούσαν για μεγαλύτερο χρόνο αλλά και

<sup>10</sup> Βλ. [35]

φθηνότερα σε σύγκριση με τα UPS του εμπορείου. (3) Αποδείχθηκε ότι υπάρχουν στο εμπόριο διακόπτες ισχύος που μπορούν να διακόψουν κυκλώματα DC σχετικά αρκετά μεγάλων ρευμάτων αλλά και να απομονώσουν μεγάλα βραχυκυκλώματα.

Οι Amin et al. [37] σύγκριναν στην μελέτη τους μεταξύ χαμηλής DC τάσης (24 V & 48 V ) και AC 230 V στην οποία χρησιμοποίησαν διάφορες συσκευές που βρίσκονται σε ένα σπίτι, οι απώλειες στους αγωγούς αλλά και στις συσκευές μετρήθηκαν και καταχωρήθηκαν για κάθε σύστημα ξεχωριστά. Χρησιμοποίησαν έναν κανόνα για τις τιμές των καλωδίων που χρειάστηκαν για την εγκατάσταση και τις απώλειες σε κάθε περίπτωση καλωδίου. Η έρευνα έδειξε ότι το DC 48 V έχει την χαμηλότερη ενεργειακή απώλεια σε σύγκριση με το DC 24 V που έχει την μεγαλύτερη σε σχέση εγκατάσταση- απωλειών καλωδίου. Αυτό το συμπέρασμα ήταν βέβαια αναμενόμενο για ένα τελικό φορτίο 8 KW συνδεδεμένο με τόσο μικρές τάσεις. Σε μία ακόμα μελέτη των Techakittiroj et al. [92] χρησιμοποίησαν κλασικά προϊόντα που βρίσκονται στα supermarkets συνδεδεμένα σε DC σύστημα μεταφοράς χωρίς να διενεργηθεί κάποια αλλαγή των προϊόντων. Διοχέτευσαν τον χώρο με λάμπες φθορίου, λάμπες LED, τηλεόραση, υπολογιστή και ένα μικρό DC κινητήρα. Από την έρευνα αυτή βγήκαν θετικά αποτελέσματα σχετικά με την ποιότητα ισχύος, τα οποία επιβεβαίωσαν την πιθανότητα χρήσης απευθείας σύνδεση των συσκευών αυτών σε DC τάση. Οι συγγραφείς υποστήριξαν και τους δύο τρόπους διαχείρισης- μετάδοσης της ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα ( AC- DC ) μέχρι τελικής αλλαγής σε DC.

Ακόμα, παρουσιάστηκε από τους Kakigano et al. [38] ένα τοπικό DC μικροδίκτυο. Το σύστημα αποτελούνταν από συμπαραγωγή, συνδεδεμένη σε ένα σύστημα μεταφοράς (3 καλωδίων +/- 170 V). Υπερπυκνωτές ήταν συνεχώς συνδεδεμένοι στο σύστημα ως μονάδες κύριας αποθήκευσης. Το σύστημα είχε την δυνατότητα σύνδεσης με τον άπειρο ζυγό αλλά είχε επίσης την δυνατότητα να λειτουργεί απομονωμένα (λειτουργία νησιδοποίησης). Κατασκεύασαν ένα πειραματικό δίκτυο εργαστηρίου στο οποίο, δοκίμασαν την σύνδεση και την αποσύνδεση αυτού με το κυρίως δίκτυο και παρατήρησαν την συμπεριφορά του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να τροφοδοτούμε συνεχόμενα τα φορτία και με υψηλής ποιότητας ισχύ.

Τέλος, παρακάτω θα αναφερθούμε σε μερικές ακόμα τοπολογίες, οι οποίες σχολιάζονται σε μορφή πίνακα για καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους. Ο Πίνακας 1 απεικονίζει τις χρησιμοποιούμενες πολικότητες τροφοδοσίας για τα φορτία, όπου οι τοπολογίες μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος περιγράφονται στον Πίνακα 2. Λόγω της διαλείπουσας φύσης της παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα πιθανά οφέλη του μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος θα βελτιστοποιηθούν μόνο όταν οι επιμέρους καταναεμημένες

πηγές DC θα συνδεθούν με ένα κοινό πλέγμα συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον, η αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα και η προσβασιμότητα της παροχής θα αναβαθμιστούν, όταν το δίκτυο DC θα διασυνδεθεί με το δίκτυο AC. Διαφορετικός τύπος διεπαφής μικροδικτύου DC με το βοηθητικό AC περιγράφονται στην μελέτη [40].

**Πίνακας 3: Πόλωση τροφοδοσίας μικροδικτύου DC<sup>11</sup>**

Πολικότητες	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μονοπολικό Εικόνα 11α	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οι πηγές και τα φορτία των καταναλωτών συνδέονται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού πόλου από το DC ζυγό.</li> <li>• Η ισχύς μεταδίδεται σε ένα επίπεδο τάσης.</li> <li>• Χρησιμοποιείται αποτελεσματικά σε απομακρυσμένες περιοχές για την τροφοδοσία σπιτιών εκτός δικτύου λόγω μη διαθεσιμότητας υποδομών δικτύου.</li> </ul>	<p>Δεν υπάρχει ασυμμετρία μεταξύ των πόλων DC.</p> <p>Απλή και ευέλικτη δομή.</p>	<p>Οποιοσδήποτε σφάλμα στο σύστημα οδηγεί σε ολόκληρο το σύστημα τερματισμός λειτουργίας.</p> <p>Περιορισμένη εφαρμογή για συσκευές.</p> <p>Υλοποίηση για υψηλά επίπεδα τάσης κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλο κόστος για τους μετατροπείς και μεγαλύτερος κίνδυνος για την ασφάλεια.</p>

<sup>11</sup> Βλ. [39]

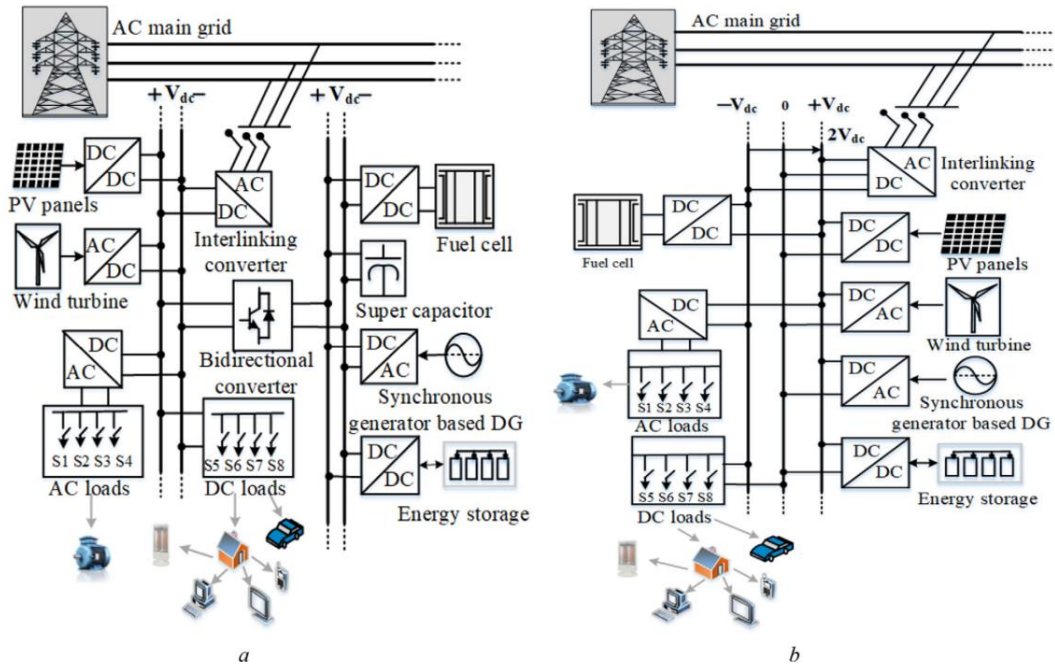
<p>Διπολικά Εικόνα 11b</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εισάγει τρεις διαφορετικές δυνατότητες τάσης στις οποίες μπορεί να συνδεθεί ο πελάτης <math>+V_{dc}</math>, <math>-V_{dc}</math> και <math>2V_{dc}</math>, το οποίο παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στη σύνδεση των φορτίων.</li> <li>• Υψηλός κύκλου-ζωής τελικού πελάτη και μετατροπέα (inverter) λόγω υψηλότερης ονομαστικής τάσης.</li> </ul>	<p>Με τη μετάβαση του φορτίου στον υγιές πόλο κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος αυξάνει η αξιοπιστία.</p>	<p>Λόγω άνισης κατανομής φορτίου, εμφανίζει ανισορροπία συστήματος.</p> <p>Επιπλέον κύκλωμα εξισορροπητή τάσης</p>
--------------------------------	--	---	--

**Πίνακας 4: Σύγκριση διαφορετικών τοπολογιών DC μικροδικτύων<sup>12</sup>**

Τοπολογία	Περιγραφή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<p>Μικροδίκτυο DC ενός δίαυλου +- </p>	<p>Χρησιμοποιείται κυρίως για την αύξηση της λειτουργικής ευελιξίας του συστήματος DC.</p> <p>Βελτιώνει τη ρύθμιση της τάσης του δικτύου DC</p> <p>Εάν το ESS είναι συνδεδεμένο στο δίαυλο LVDC μέσω κατάλληλου μετατροπέα, επιτρέπει πολλαπλούς διαύλους σύνδεσης.</p>	<p>Τεκμηριώνουν τη δυναμική σταθερότητα του συστήματος.</p> <p>Βοηθά στην αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος με σύνδεση πολλαπλών μονάδων μπαταρίας.</p>	<p>Υποφέρει από μη ρυθμισμένη φόρτιση μπαταρίας και ανεξέλεγκτη τάση δικτύου DC.</p> <p>Η παράλληλη λειτουργία των μετατροπέων παρουσιάζει ανομοιόμορφο ρεύμα φόρτωσης και κυκλοφορίας.</p>

<sup>12</sup> Βλ. [39]

<p>Μικροδίκτυο DC πολλαπλών διαύλων +-</p>	<p>Χρησιμοποιεί σειριακά ή παράλληλα συνδεδεμένα μικροδίκτυα για να επιτρέψει την ικανότητα κατανομής ισχύος μεταξύ μεμονωμένων μικροδικτύων για να παρέχει υψηλότερη αξιοπιστία. Υπό σφάλμα, διευκολύνεται η αποσύνδεση από τις διανεμημένες πηγές. Τα συστήματα διανομής LVDC μπορούν να διασυνδεθούν με το ηλεκτρικό δίκτυο MVAC μέσω SST.</p>	<p>Η χρήση πολλαπλών διαύλων επιτρέπει σε κάθε μικροδίκτυο να απορροφά ή να εγγείει ισχύ από το γειτονικό του μικροδίκτυο όταν υπάρχει έλλειψη ή πλεόνασμα ισχύος.</p>	<p>Στην περίπτωση των συνδεδεμένων μικροδικτύων, ορισμένοι κατεστραμμένοι δίαυλοι μπορούν να απομονωθούν αυτόματα κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, το οποίο μπορεί να μειώσει την ευελιξία του συστήματος.</p>
<p>Με δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης</p> <p>1) Τύπος κυκλικής γραμμής .</p> <p>2) Τύπος με πολλαπλά άκρα.</p>	<p>Η εναλλακτική διαδρομή ροής ισχύος διευκολύνεται με επαναδιαμόρφωση τοπολογία βασισμένη σε ring bus κατά την ελαττωματική κατάσταση.</p> <p>Παρέχει πολλαπλές διαδρομές ροής ισχύος, οι οποίες εκδηλώνονται πιο αξιόπιστες από τις προαναφερθείσες επαναδιαμορφώσιμες τοπολογίες.</p>	<p>Τα φορτία μπορούν να τροφοδοτηθούν αμφίδρομα λόγω ότι είναι συνδεδεμένα με τον κοινό δίαυλο DC. Μπορεί να παρέχει μια εναλλακτική διαδρομή κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος.</p> <p>Πιο ευέλικτο καθώς παρέχει πολλαπλές διαδρομές ροής ισχύος για το σύστημα. Παρέχουν υψηλή αξιοπιστία και πλεονάζουσα λειτουργία.</p>	<p>Αν και παρέχει καλή αξιοπιστία, ο περιορισμός τάσης και ισχύος είναι ένα από τα εμπόδια για την αύξηση αυτής της εφαρμογής.</p> <p>Σε σύγκριση με τα συμβατικά ακτινικά δίκτυα, η ροή ισχύος σε ακτινική διαμόρφωση είναι πιο περίπλοκη</p>



Εικόνα 11: Πολικότητα DC μικροδικτύου (a) Μονοπολικό (b) Διπολικό<sup>13</sup>

### 2.3 Ευστάθεια

Ένα από τα σημαντικότερα κομμάτια που ερευνούν οι μηχανικοί σχετικά με το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς, είναι η ευστάθεια του όλου αυτού συστήματος. Η ευστάθεια για το AC σύστημα παραγωγής είναι καλά μελετημένη και εφαρμοσμένη σε αντίθεση με το DC που μελετάται ακόμα και σήμερα.

Μια από τις έρευνες σχετικά με την ευστάθεια επισημαίνεται από τους Sokal [41] και Middlebrook [42] η οποία πραγματοποιήθηκε το 1970, αναδεικνύει ότι οι DC μετατροπείς έχουν μια αντίσταση ανατροφοδότησης ( feedback) αν στην συγκεκριμένη περίπτωση η αντίσταση εισόδου ξεπεράσει αυτήν την αντίσταση, τότε το LC σύστημα μεταβαίνει σε κατάσταση αστάθειας. Ακόμα ο Middlebrook [43] μελέτησε και ανέδειξε το πρόβλημα της αρνητικής αντίστασης εισόδου στις χαμηλές συχνότητες. Για να αποφύγει τις ταλαντώσεις, αναδείχθηκε η σχεδίαση ενός διακοπτικού switch-mode converter και του φίλτρου του. Σε αυτήν την περίπτωση η αντίσταση εξόδου του φίλτρου κράτησε μικρότερη τιμή από αυτήν στην είσοδο του μετατροπέα για να κρατηθεί το σύστημα σε ευστάθεια.

<sup>13</sup> Βλ. []



Στηριγμένος στην ίδια ανάλυση της αντίστασης, οι Feng et al. [44], κατηγοριοποίησαν ένα απαγορευτικό εύρος αντίστασης, εάν η αντίσταση εξόδου προς της εισόδου παραμείνει έξω από την περιοχή αυτή, τα κριτήρια ευστάθειας του Nyquist δεν παραβιάζονται και έτσι το σύστημα παραμένει ευσταθές. Βασισμένοι στην απαγορευμένη αυτή περιοχή, τα πιο συγκεκριμένα στοιχεία αυτής της αντίστασης για τα μικροσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο DC σύστημα μεταφοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε λεπτομέρεια σχετικά με την απαγορευτική περιοχή αλλά και με την τιμή της αντίστασης, ήταν για κάθε φορτίο ξεχωριστά και όχι για όλα συγκεντρωτικά. Επίσης αυτές οι απαιτήσεις εφαρμόστηκαν για κυκλώματα με πηγές τάσης. Μία άλλη μελέτη που αφορά κυκλώματα με πηγές ρεύματος, έδειξε ότι για να υπάρξει ευστάθεια στο σύστημα θα πρέπει να ισχύουν εντελώς τα αντίθετα δεδομένα. Σε ακόμη μία έρευνα, παρουσιάστηκε η ανάλυση για την ευστάθεια ενός DC-DC μετατροπέα με το φίλτρο εισόδου χρησιμοποιώντας το κριτήριο Routh-Hurwitz. Περιληπτικά, για μετατροπείς που χρησιμοποιούν πηγή τάσης, το σύστημα είναι ευσταθές εάν ο λόγος της αντίστασης φορτίου προς την αντίσταση της πηγής, είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Για τις πηγές ρεύματος ισχύει το αντίθετο, δηλαδή ο λόγος αυτός να είναι μικρότερος της μονάδας [45].

Στην [46] προτάθηκε μια ενεργή τεχνική σταθεροποίησης για την διατήρηση της ευστάθειας σε ένα μικροδίκτυο απομονωμένο από το κυρίως σύστημα, στο οποίο συνδεόταν απευθείας επαγωγικός κινητήρας ως φορτίο. Μετά την εξαγωγή σημάτων φάνηκε ότι υπάρχει μια σχέση αναντιστοιχίας πηγής-φορτίου, η τάση πηγής του Inverter από την μία μεριά και ο επαγωγικός κινητήρας από την άλλη. Αυτή η αναντιστοιχία οδήγησε σε μια αστάθεια μέσης συχνότητας, κατά την διαδικασία εφαρμογής και παραβίασης των κριτηρίων του Nyquist. Η τεχνική για την ευστάθεια του συστήματος στην (ανταπόδοση-αναδιατύπωση) της συνάρτησης μεταφοράς και την εκ νέου χαρτογράφηση της μικρής διακύμανσης στο σύστημα ανοιχτού βρόγχου σε αυτήν του συστήματος κλειστού βρόγχου (ανατροφοδότηση). Η απόδοση αυτών των τεχνικών ευστάθειας, επιβεβαιώθηκε και από πειραματικά αλλά και από αποτελέσματα προσομοίωσης. Αυτή η έρευνα πραγματοποιήθηκε με κυρίαρχα φορτία επαγωγικές μηχανές (IMs) οι οποίες τροφοδοτούνταν από DC πηγή ή εν μέσω (VSIs, Voltage source Invertes) μετατροπής τάσης πηγής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος αναπτύσσεται τόσο γρήγορα, καθώς προσφέρει πολλά οφέλη σε σχέση με το σύστημα AC (τάση, ρύθμιση συχνότητας, προβλήματα συγχρονισμού μειώνονται εγγενώς), ενώ η αξιοπιστία και η ποιότητα ισχύος του ενισχύεται εκτενώς. Το σύστημα DC μειώνει την απώλεια ισχύος και επιτρέπει 1,41 ( $\sqrt{2}$ ) φορές περισσότερη ροή ισχύος από το σύστημα AC, λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Όπως και τα ζητήματα πτώσης τάσης από την επίδραση της άεργου ισχύος εξαφανίζονται εγγενώς. Η μείωση σε στάδια μετατροπής ισχύος, η ευκολότερη ενσωμάτωση στους καταναμημένους ενεργειακούς πόρους και φορτία, έχουν κυρίως αυξήσει την απόδοση του συστήματος και παρέχουν εξαιρετική λειτουργική ευελιξία. Αυτά τα προαναφερθέντα οφέλη αναδεικνύουν τα DC μικροδίκτυα ως ουσιαστική λύση για διάφορους τύπους εφαρμογών, όπως σύστημα πρόωσης, συστήματα τηλεπικοινωνιών, εφαρμογές έλξης, ηλεκτρικές εφαρμογές πλοίων κ.λπ. Ωστόσο, η πολλά υποσχόμενη ανθεκτικότητα που παρέχουν τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος έχει υποβαθμιστεί. Η προστασία είναι και πάλι πρόκληση λόγω της παρουσίας πολλαπλών πηγών όπως και των εγκατεστημένων ESS (Energy storage system), που τροφοδοτεί το ρεύμα σφάλματος (Alexis Kwasinski, Effects of System Architecture and Converter Topology Design). Η προσέγγιση περιορισμού του ρεύματος σφάλματος από τον πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα ισχύος για την ασφάλεια του είναι μία από τις προτεινόμενες τεχνικές διακοπής. Ωστόσο, γενικά οι OCR (Overcurrent Relay) ηλεκτρονόμοι υπερέντασης, δεν μπορούν να προσδιορίσουν την εμφάνιση σφάλματος λόγω του μικρού μεγέθους του (ρεύμα σφάλματος). Εκτός από αυτό, μία από τις κύριες προκλήσεις είναι η ιλιγγιώδης αύξηση του αρχικού ρεύματος σφάλματος DC σε πολύ μικρή διάρκεια, εξαιτίας της ταχείας εκφόρτωσης των πυκνωτών στην DC γραμμή. Η χαμηλή αντίσταση της γραμμής αυξάνει περαιτέρω αυτό το φαινόμενο. Επομένως, η βλάβη πρέπει να εντοπιστεί και να αποκατασταθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα για την ασφάλεια του εξοπλισμού. Για την επίλυση του προβλήματος, απαιτούνται μόνο ταχείας δράσης PD (Protection device) συσκευές προστασίας. Οι φυσικές μηδενικές διελεύσεις στο ρεύμα σφάλματος AC βοηθούν αποτελεσματικά τους ACCB (AC Circuit breaker) διακόπτες απόζευξης να σβήσουν το ρεύμα σφάλματος στη μηδενική διέλευση. Αντίθετα, η απουσία φυσικού σημείου μηδενικής διέλευσης του ρεύματος σφάλματος DC εμποδίζει την αύξηση της εφαρμογής των DCCB (DC Circuit breaker).

Στο σύστημα μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος, υπάρχουν πολλά επίπεδα τάσης και διαφορετικές διαμορφώσεις όπου εφαρμόζονται κυρίως σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Η μη ολοκληρωμένη γνώση στη ρύθμιση και την τυποποίηση είναι ένα μη αμελητέο εμπόδιο για την εφαρμογή του συστήματος μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος. Έτσι, ενώ το μικροδίκτυο DC παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ευελιξία και τη βιωσιμότητα, η εφαρμογή του μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος υπονομεύεται από των αναπόφευκτων προκλήσεων που προκύπτουν λόγω της προστασίας. Η έλλειψη της εμπειρίας και της τεχνογνωσίας στην προστασία αποτελεί ουσιαστικό εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας DC. Ως εκ τούτου, σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται διεξοδικά αρκετές τεχνικές προστασίας που έχουν αναπτυχθεί για μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος. Από αυτή τη σε βάθος ανάλυση, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η υπορουτίνα προστασίας για μικροδίκτυο DC μπορεί να αξιολογηθεί με βάση τα ακόλουθα κύρια χαρακτηριστικά την ταχύτητα, επιλεκτικότητα, ευαισθησία και την αξιοπιστία των αναπτυσσόμενων στρατηγικών.

Πριν από την εφαρμογή οποιουδήποτε συστήματος προστασίας, είναι απαραίτητο να τεκμηριωθεί η απόδοση αυτής της στρατηγικής με τις τεχνικές λεπτομέρειες που αναφέρονται παραπάνω και πρέπει να επαληθευτεί από διαφορετικά σενάρια σφαλμάτων. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων αυτών των συστημάτων προστασίας προσδιορίζονται για να προβλεφθεί το ορατό εύρος προηγμένων και γρήγορων συστημάτων, που μπορεί να είναι κατάλληλα για την αξιόπιστη προστασία των μικροδικτύων DC. Το περιεχόμενο αυτού του κεφαλαίου θα βοηθήσει ουσιαστικά τους ερευνητές να αμβλύνουν τις ελλείψεις και να ανακαλύψουν νέες τεχνικές για να ενισχύσουν την εφαρμογή της τεχνολογίας DC στο μέλλον.

### **3.2 Ανάλυση Σφαλμάτων DC ρεύματος**

Η ανάλυση του ρεύματος σφάλματος στο μικροδίκτυο συνεχούς ρεύματος είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό ενός κατάλληλου σχεδίου προστασίας. Τα σφάλματα που σχετίζονται με το μικροδίκτυο DC είναι δύο τύπων, PP και PG, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12. Το σφάλμα τύπου PP είναι γενικά LIF (Low impedance fault) σφάλμα χαμηλής αντίστασης καθώς οι αγωγοί φάσης βρίσκονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους. Το σφάλμα PG είναι HIF (High impedance fault) σφάλμα υψηλής αντίστασης, καθώς και οι δύο ή ένας από τους αγωγούς πέφτουν στο έδαφος. Τα σφάλματα μπορεί να εντοπιστούν είτε στην DC γραμμή, είτε στους τροφοδότες. Μπορεί επίσης να προκύψει εσωτερικό σφάλμα στο εσωτερικό των VSC (Voltage Source

Converters) και των μπαταριών [48]. Το σφάλμα στον δίαυλο επηρεάζει άμεσα τους μετατροπείς και τις μπαταρίες, ενώ το σφάλμα του τροφοδοτικού αποτελεί εμπόδιο στη συνέχιση της παροχής των γραμμών [49,50]. Το ρεύμα σφάλματος αποτελείται από δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά, από την παροδική και την σταθερή κατάσταση [51]. Το μεταβατικό ρεύμα εγγέεται από την εκφόρτιση του καλωδίου των μετατροπέων και τον πυκνωτή DClink, ενώ το τμήμα σταθερής κατάστασης οφείλεται σε πόρους ισχύος. Το ρεύμα σφάλματος του μετατροπέα είναι ασταθές και απότομο λόγω εκφόρτισης των πυκνωτών. Ωστόσο, διατηρείται για μικρή διάρκεια και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_{cap}(t) = \frac{V_{dc}}{2R_{cap}} e^{\frac{-t}{\tau_{cap}}}$$

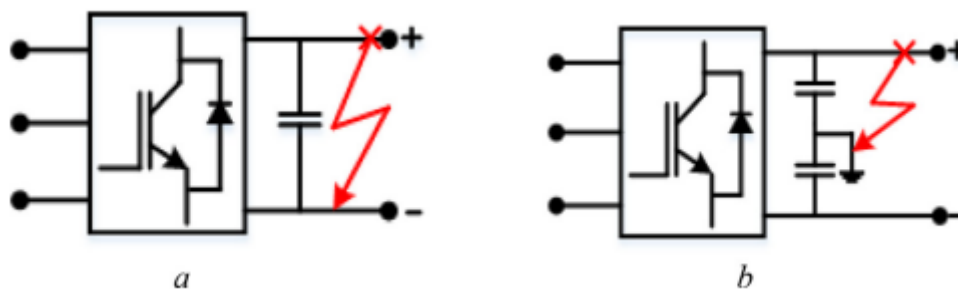
όπου,  $\tau_{cap} = R_{cap} \cdot C_{cap}$  είναι η ενεργός σταθερά χρόνου του μετατροπέα. Τα  $R_{cap}$ ,  $C_{cap}$  είναι η αντίσταση και η χωρητικότητα σειράς του κυκλώματος πυκνωτή. Το ρεύμα σφάλματος της μπαταρίας αποτελείται από την σύνθετη αντίσταση του καλωδίου καθώς και της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης της ίδιας της μπαταρίας, που εκφράζεται ως:

$$I_{batt} = \frac{V_{batt}}{R_{batt} + R_{lb}} \left( 1 - e^{\frac{-t}{\tau_{batt}}} \right)$$

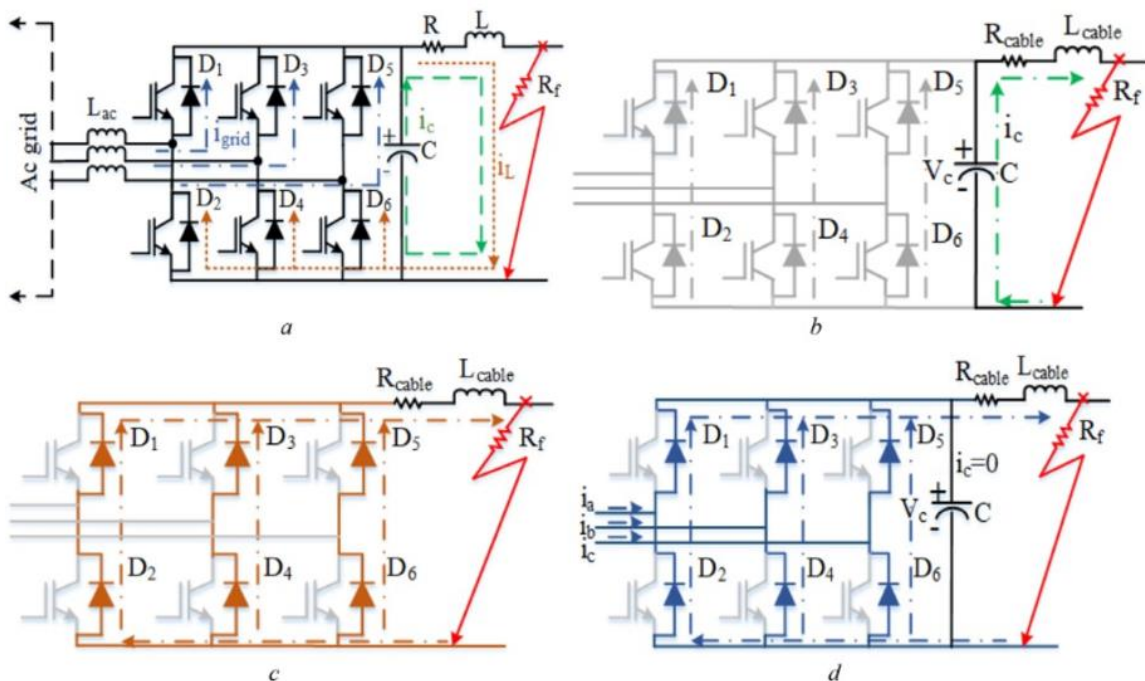
Οπού

$$\tau_{batt} = \frac{L_{batt} + L_{cable}}{R_{batt} + R_{cable}}$$

Το  $\tau_{batt}$  είναι η σταθερά χρόνου του συστήματος μπαταρίας και του καλωδίου γραμμής, το  $L_{cable}$  είναι η επαγωγή γραμμής, και το  $R_{cable}$  είναι η αντίσταση του καλωδίου αντίστοιχα. Τα  $L_{batt}$ ,  $R_{batt}$  είναι η αυτεπαγωγή και η αντίσταση της μπαταρίας, αντίστοιχα. Επομένως, το συνολικό ρεύμα σφάλματος είναι το άθροισμα του ρεύματος του μετατροπέα και του ρεύματος εκφόρτισης της μπαταρίας. Γίνεται μια σύντομη εξήγηση για να γίνει αντιληπτή η απόκριση σφάλματος VSC. Όταν ξεκινήσει το σφάλμα, τα IGBT θα μεταβούν στην περιοχή αποκοπής για αυτοπροστασία και οι διόδοι θα αντιμετωπίσουν σημαντική υπερένταση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 13, επιλέγεται μια βασική δομή μετατροπέα για την κατανοήση των συνεπειών της απόκρισης σφάλματος VSC. Το ρεύμα σφάλματος και η έκφραση της τάσης σύνδεσης DC, έχουν καθιερωθεί για τρία στάδια λειτουργίας VSC [48, 52–54].



Εικόνα 12: Σφάλμα DC a) Φάση-Φάση b) Φάση-Γη



**Εικόνα 13: Ρεύμα σφάλματος DC (a) Βλάβη καλωδίου DC σε VSC (b) Στάδιο – 1: Εκφόρτιση πυκνωτή (c) Στάδιο – 2: Δίοδος ελευθέρως ροής (d) Στάδιο – 3: Τροφοδοσία ρεύματος από την πλευρά του δικτύου AC**

➤ Στάδιο – 1: Εκφόρτιση πυκνωτή

Το ρεύμα εκφόρτισης πυκνωτή του VSC ξεκινά κυρίως το ρεύμα σφάλματος στην πλευρά DC. Το ισοδύναμο κύκλωμα εκφόρτισης πυκνωτή φαίνεται στην Εικόνα 13a. Πριν από την εξαγωγή της έκφρασης τάσης και ρεύματος του πυκνωτή, έχουμε υποθέσει μια αρχική κατάσταση,  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  κάτω από τη φυσική κατάσταση ένα σφάλμα έχει συμβεί στο  $t_0$

όπου,  $V_c(t_0) = V(0)$ , και  $I_{cable}(t_0) = I(0)$  έτσι αποδίδονται οι παρακάτω εκφράσεις

$$V_c = \frac{V_0 * \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{\omega C} e^{-\delta t} \sin \omega t$$

$$I_{cable} = C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{I_0 * \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega t$$

όπου  $\delta = \frac{R}{2L}$ ,  $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2}$  και  $\beta = \arctan\left(\frac{\omega}{\delta}\right)$ .

Ο χρόνος που χρειάζεται ο πυκνωτής για να εκφορτιστεί η τάση του στο 0, δίνεται από την σχέση

$$t_1 = t_0 + \frac{\pi - \gamma}{\omega}$$

όπου  $\gamma = \arctan\left(\frac{V_0 * \omega_0 * C * \sin \beta}{V_0 * \omega t * C * \cos \beta - I_0}\right)$

➤ Στάδιο – 2: Δίοδος ελευθέρως ροής (Diode freewheeling)

Όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί εντελώς και  $V_c = 0$ , τότε η αυτεπαγωγή στους αγωγούς οδηγεί ένα ρεύμα που περιστρέφεται στα καλώδια, η οποία μετατρέπεται κατά φυσική ελεύθερη ροή μέσω των διόδων. Αυτό το στάδιο είναι πολύ κρίσιμο για τις διόδους να χειριστούν αυτό το ξαφνικό υψηλού μεγέθους υπερέντασης. Επίσης η προηγούμενη παραδοχή που λαμβάνεται ως αρχικό ρεύμα καλωδίου είναι  $I_{cable}(t_1) = I'0$ . Το στιγμιαίο ρεύμα στους αγωγούς καθώς και στην δίοδο μπορεί να αποδοθεί ως εξής,

$$I_{cable} = I'0 * e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}, ID1 = \frac{I_{cable}}{3}.$$

➤ Στάδιο – 3: Τροφοδοσία ρεύματος από την πλευρά του δικτύου AC

Σε αυτό όταν η τροφοδοσία των IGBTs είναι απενεργοποιημένη και ο πυκνωτής εξόδου στον DC δίαυλο δεν είναι απαραίτητα εκφορτισμένος, ένα εξαναγκασμένο ρεύμα προκύπτει. Αυτό προέχεται από την AC μεριά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13d. Για την περιγραφή του σφάλματος τροφοδοσίας ρεύματος στην AC πλευρά, θα χρησιμοποιηθεί μόνο η πρώτη φάση σαν αναφορά. Η εξίσωση σφάλματος που προκύπτει είναι:

$$V_{ga} = V_g * \sin * (\omega s * t + a)$$

Όπου  $V_{ga}$  και  $V_g$ , είναι οι μετά σφάλμα φασική τάση δικτύου και το μέγεθος της τάσης δικτύου, αντίστοιχα. Το  $\omega s$  δηλώνει την σύγχρονη γωνιακή συχνότητα,  $a$  είναι η γωνία της τάσης στην πρώτη φάση την χρονική στιγμή  $t_1$ . Κατ' επέκταση, η εξίσωση του ρεύματος που προκύπτει για την φάση  $a$ , είναι:

$$\begin{aligned} I_{ga} &= I_g * \sin(\omega s * t + a - \varphi) + [I_g|0| * \sin(a - \varphi_0) - I_g * \sin(a - \varphi)] \\ &= I_g * \sin(\omega s * t + a - \varphi) + I_g * e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

Όπου το  $\varphi = \arctan\left(\frac{\omega s(Lac+L)}{R}\right)$ ,  $\tau = \frac{Lac+L}{R}$ ,  $Lac$  είναι η επαγωγή γραμμής στην πλευρά του δικτύου,  $I_g|0|$  και  $\varphi_0$  υποδηλώνουν το αρχικό ρεύμα δικτύου κατά μέγεθος και την γωνία φάσης, αντίστοιχα (denote the initial grid current magnitude and phase angle). Εδώ εμφανίζεται μόνο η συμβολή σφάλματος από τη φάση- $a$  της πλευράς του δικτύου AC. Ωστόσο, το συνολικό συνεισφερόμενο ρεύμα είναι το άθροισμα και των τριών φάσεων ρεύματος που φαίνεται ως

$$I_{vsi} = ID1 + ID2 + ID3 = I_{ga}, (> 0) + I_{gb}, (> 0) + I_{gc}, (> 0)$$

Επιπλέον, το σφάλμα γείωσης VSC DC μπορεί επίσης να αναλυθεί παρόμοια [16]. Για τη διερεύνηση του σφάλματος τόξου σειράς DC, έχουν αναφερθεί διάφορες προσεγγίσεις σε άλλες έρευνες [41-44]. Μια ακόμη μελέτη για την ανίχνευση HIF(High impedance fault) σε μικροδίκτυο DC είχε απασχολήσει στο παρελθόν τον J.Sun [45].

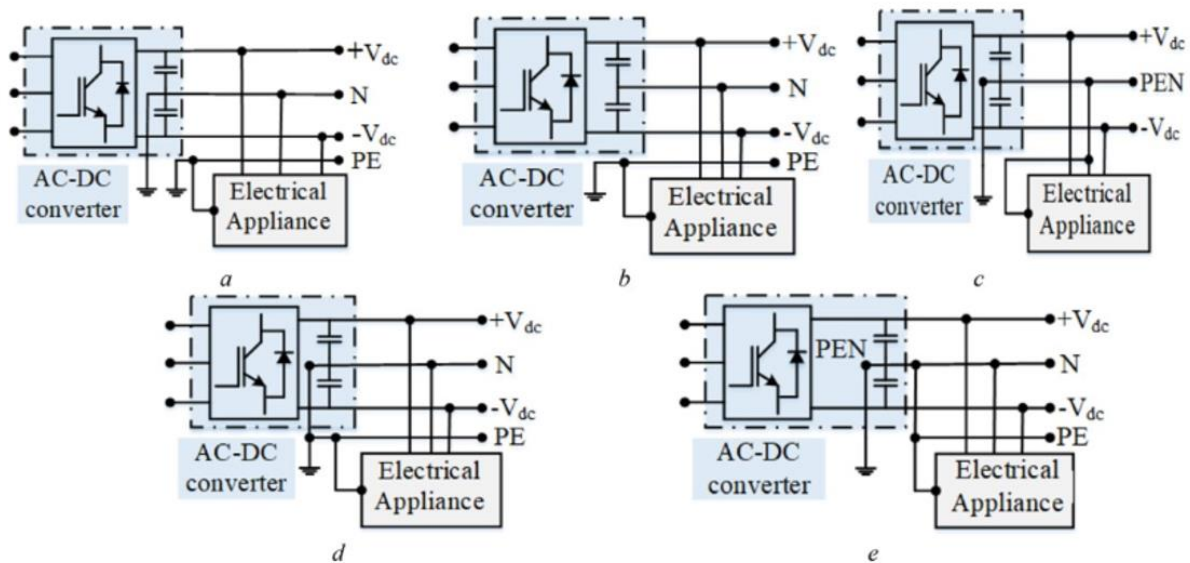
### 3.3 Επίδρασή του συστήματος γείωσης στην προστασία των DC μικροδικτύων

Η γείωση είναι απαραίτητη για την υλοποίηση του σχεδιασμού του μικροδικτύου με κύρια προοπτική τη διευκόλυνση της ανίχνευσης σφαλμάτων, τις απαιτήσεις προστασίας, την ασφάλεια για τον εξοπλισμό και τα άτομα (μείωση τάσης αφής), ελαχιστοποίηση των ρευμάτων διαρροής (ρεύμα γείωσης από τον αγωγό) και μείωση του επιπέδου CMV (Common mode voltage) ή αλλιώς τάση κοινής λειτουργίας. Το IEC 60364 έχει αναπτύξει τρεις τύπους διαμορφώσεων γείωσης, συγκεκριμένα TN, TT και IT. Για το σύστημα γείωσης TT, (εμφανίζεται Εικόνα 14(α)), η σημαντικά υψηλή σύνθετη αντίσταση σφάλματος στον βρόχο ρεύματος περιορίζει το ρεύμα σφάλματος να κυκλοφορεί μεταξύ του πελάτη της εγκατάστασης και του προμηθευτή [55]. Αυτό το σύστημα μπορεί να περιέχει πολλά σημεία γείωσης. Στην περίπτωση του συστήματος IT, τα αγωγίμα μέρη γειώνονται είτε στον θετικό είτε στον αρνητικό πόλο, ενώ το καλώδιο τροφοδοσίας είναι γειωμένο με πολύ υψηλή αντίσταση ή και καθόλου γειωμένο, κάτι το οποίο, μειώνει σημαντικά την τάση αφής. Λόγω της υψηλής αντίστασης, το μέγεθος του σφάλματος γίνεται πολύ μικρότερο, γεγονός που επιβάλλει μια άπιαστη πρόκληση για την ανίχνευση σφαλμάτων [55].

Για μονοπολική γείωση IT, η αντίσταση γείωσης ελέγχει τόσο το σφάλμα όσο και το ρεύμα του σώματος (πλαίσιο). Για τη γείωση διπλού πόλου IT, και οι δύο πόλοι αποτελούνται από υψηλές αντιστάσεις και λειτουργούν ως διαιρέτης τάσης, αλλά αυτό δεν βοηθά στη μείωση της τάσης αφής και της βλάβης ή το ρεύμα του σώματος. Για το TN, τα αγωγίμα εξαρτήματα και η γραμμή ισχύος είναι γενικά γειωμένα μέσω των αντίστοιχων μεσαίων σημείων τους. Η αντίσταση σφάλματος που σχετίζεται με το σύστημα TN είναι μικρότερη. Έτσι, εμφανίζει ανιχνεύσιμο ρεύμα σφάλματος. Ωστόσο, το όριο της τάσης αφής μπορεί να ξεπεραστεί. Η συμβατότητα και το ανώτερο ανιχνεύσιμο ρεύμα σφάλματος ορίζουν το σύστημα TN ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή για το μικροδίκτυο DC [56]. Το σύστημα TN επιτρέπει περαιτέρω τη χρήση RCD (Residual current device) για την επιβεβαίωση της ασφάλειας για τα άτομα. Περαιτέρω υποδιαιρείται σε TN-C, TN-S και TN-C-S, με βάση τον προσανατολισμό της σύνδεσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 14(c-e). Το σύστημα TN-S διαχωρίζει τους αγωγούς PE και N, προσφέρει ασφάλεια και υψηλότερη ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, ενώ το TN-C συνδυάζει αγωγό PE και N σε PEN για να τεκμηριώσει μια οικονομικά αποδοτική διαμόρφωση γείωσης. Ωστόσο, για να επιτευχθούν τα μέγιστα οφέλη, η τοπολογία γείωσης TN-CS δημιουργείται συνδυάζοντας το σύστημα TN-C και TN-S.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των τριών διαμορφώσεων γείωσης παρουσιάζονται στις μελέτες [55,57,58–60]. Εκτός από τις διαμορφώσεις γείωσης, οι συσκευές

γείωσης (μη γειωμένοι, γειωμένοι σταθερά, με αντίσταση, με δίοδο, με θυρίστωρ) επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση σφάλματος.



Εικόνα 14: Σύστημα γείωσης DC μικροδικτύου (a) TT, (b) IT, (c) TN-C, (d) TN-S, (e) TN-C-S<sup>14</sup>

### 3.4 Τεχνικές προκλήσεις προστασίας μικροδικτύων συνεχούς ρεύματος

Η διάδοση της τεχνολογίας DC αντιμετωπίζει ορισμένες αναπόφευκτες δυσκολίες κατά τη λειτουργία και την προστασία της. Αρχικά, η πολύ μεγάλη αύξηση του ρεύματος σφάλματος DC σε σύντομη διάρκεια καθιστά τη στρατηγική προστασίας πιο περίπλοκη και αυξάνει το μέγεθος και τη χωρητικότητα του διακόπτη. Επιπλέον, η έλλειψη κανονισμών και η πληρότητα των προτύπων για διαφορετικά επίπεδα τάσης προς την γη, είναι ένα μη αμελητέο εμπόδιο για το επιταχυνόμενο μέλλον του. Πρόσφατα, διάφοροι οργανισμοί όπως οι EMerge Alliance, ETSI, IEC, IEEE κ.λπ. εργάζονται ενεργά για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων προτύπων για το μικροδίκτυο DC. Εδώ αναλύονται μερικές από τις κύριες προκλήσεις προστασίας για καλύτερη υλοποίηση.

### 3.5 Προκλήσεις προστασίας λόγω χαρακτηριστικών ρεύματος σφάλματος DC

#### 3.5.1 Δυναμικό μέγεθος ρεύματος σφάλματος

Διαφορετικοί τύποι σφάλματος (PP, PG) δημιουργούν ξεχωριστό μέγεθος ρεύματος σφάλματος. Η σταθερή ρύθμιση του OCR (overcurrent relay) ή αλλιώς ηλεκτρονόμου υπερέντασης για μια συγκεκριμένη κατάσταση σφάλματος δημιουργεί δυσλειτουργία σε άλλους τύπους σφαλμάτων. Τα συμβατικά OCR στο μικροδίκτυο συνεχούς ρεύματος

<sup>14</sup> Βλ. [61]



υποφέρουν από δυναμικά ρεύματα σφάλματος λόγω της διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο AC. Όπως και στην περίπτωση σφάλματος, η τροφοδοσία από την πλευρά του δικτύου AC αλλάζει αποτελεσματικά το επίπεδο βραχυκυκλώματος. Επιπλέον, η απομακρυσμένη λειτουργία του μικροδικτύου DC σε αυτόνομη λειτουργία έχει διαφορετικό επίπεδο σφάλματος από τη λειτουργία σύνδεσης στο δίκτυο. Ωστόσο, οι μετατροπείς περικόπτουν κυρίως το ρεύμα σφάλματος για την δική τους ασφάλεια, το οποίο επίσης εμποδίζει την προστασία βάσει υπερέντασης λόγω του μικρού μεγέθους του ρεύματος σφάλματος [62,63]. Για να ξεπεραστεί αυτό, απαιτείται μια προσαρμοστική ρύθμιση για τα OCR.

### **3.5.2 Σφάλμα αμφίδρομου ρεύματος**

Τα μικροδίκτυα συνεχούς ρεύματος διασυνδέονται με το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω αμφίδρομων μετατροπέων που επιτρέπουν τη ροή ισχύος και από τις δύο κατευθύνσεις. Η θέση των διανεμημένων παραγωγών παρουσιάζει επίσης ρεύμα σφάλματος και από τις δύο κατευθύνσεις. Οι αλλαγές τοπολογίας προωθούν αμφίδρομο ρεύμα σφάλματος, το οποίο υπονομεύει τη λειτουργία μη κατευθυντικού ρελέ. Για να ενισχυθεί η επιλεκτικότητα, το χαρακτηριστικό κατεύθυνσης πρέπει να ενσωματωθεί στις φιλοσοφίες προστασίας.

### **3.5.3 Πρόβλημα διακοπής σφάλματος λόγω απουσίας φυσικού ρεύματος μηδενικής διέλευσης**

Η διακοπή του ρεύματος σφάλματος συνεχούς ρεύματος είναι μεγάλο εμπόδιο, καθώς δεν περιέχει φυσικές μηδενικές διασταυρώσεις. Ασφάλεια μπορεί να εφαρμοστεί για να κόψει το ρεύμα σφάλματος, για ένα σύστημα χαμηλής αντίστασης εάν η σταθερά χρόνου του κυκλώματος συνεχούς ρεύματος είναι χαμηλή (λιγότερο από 2,5 ms), μια μεγάλη σταθερά χρόνου (πάνω από 6 ms) αυξάνει τον χρόνο λειτουργίας της ασφάλειας. Επομένως, το τόξο κατάσβεσης δεν είναι δυνατό [64,65]. Η παροδική υπέρταση αποτελεί επίσης εμπόδιο στη λειτουργία της ασφάλειας.

Η εκφόρτιση πυκνωτών του μετατροπέα (σύνδεσμος DC), πυκνωτές φίλτρου γραμμής, δημιουργεί μια ταχεία απότομη αύξηση ρεύματος έως και 50 kA για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα [66]. Αυτή η ποσότητα ρεύματος αποτελεί απειλή για τα PD. Παρόλο που το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος είναι μεγάλο, η μικρότερη βιωσιμότητα αυτού του υψηλού μεγέθους συχνά αποτυγχάνει να ξεκινήσει τη λειτουργία των DCCB. Επιπλέον, το τόξο οδηγεί σε διάβρωση επαφής των DCCB και μειώνει τη διάρκεια ζωής τους. Τα παραδοσιακά DCCB έχουν μικρότερη ικανότητα FRT (Fault ride-through), γεγονός που οδηγεί σε ακατάλληλο συντονισμό χρονοδιαδρομών των παραδοσιακών DCCB. Για να μετριαστεί αυτό, προτείνονται

τα CB χαμηλής τάσης να περνούν μέσω της αρχικής εκφόρτισης του πυκνωτή και να αυξάνουν επαρκώς τη διαδικασία διακοπής ρεύματος [67-69].

### **3.6 Προστασία DC μικροδικτύων**

Πριν γίνει αναφορά στις στρατηγικές προστασίας για το μικροδίκτυο DC, πρέπει να διευκρινιστεί η ιδέα της προστασίας τύπου μονάδας και μη μονάδας. Τα συστήματα προστασίας μονάδων εφαρμόζονται ειδικά για την προστασία σταθερών ζωνών ενός μικροδικτύου συνεχούς ρεύματος και χρησιμοποιούνται για την προστασία διαύλου DC, μετατροπέων, συσκευών αποθήκευσης ενέργειας, φορτίων κ.λπ. Όμως δεν μπορούν να παρέχουν εφεδρική προστασία. Η τρέχουσα διαφορική προστασία είναι η πιο συχνά εφαρμοσμένη προστασία μονάδας.

Από την άλλη πλευρά, η προστασία μη μονάδας βασίζεται σε προκαθορισμένες ρυθμίσεις κατωφλίου ηλεκτρικών μεγεθών για λειτουργία. Παρέχει ουσιαστικά μεγάλη περιοχή κάλυψης προστασίας και ελεύθερης λειτουργίας για PDs για γειτονική ζώνη (εάν χρειάζεται). Η προστασία εκτός μονάδας περιλαμβάνει σχήματα υπερέντασης, υπό/υπέρτασης, ρεύματος και παραγώγων τάσης, AIE (Εκτίμηση ενεργής σύνθετης αντίστασης) κ.λπ. Η προστασία της μονάδας επιτυγχάνει την ταχύτητα και την ακρίβεια, εκτός εάν η περίπτωση σοβαρής διακοπής επικοινωνίας υπονομεύει την αποτελεσματικότητά της. Η μη -μονάδας δυνητικά διασφαλίζει την αξιοπιστία της προστασίας και την απαραίτητη διάκριση [70,71].

Μια άλλη έννοια είναι η προστασία ενός άκρου και διπλού άκρου [72]. Η προστασία ενός άκρου περιλαμβάνει συστήματα παραγώγου ρεύματος, TW (Travelling wave) κ.λπ. και βασίζεται σε τοπική μέτρηση σημάτων τάσης και ρεύματος για την ανίχνευση σφαλμάτων. Το σύστημα προστασίας διπλού άκρου ενσωματώνει συσκευές προκαταρκτικής ανίχνευσης με υποβοήθηση επικοινωνίας και IED(Intelligent electronics device) ευφυής ηλεκτρονική συσκευή. Περιλαμβάνει σχήματα διαφορικού ρεύματος διαμήκους της γραμμής DC [72]. Όλα τα πιθανά συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούνται για το μικροδίκτυο συνεχούς ρεύματος έχουν αναλυθεί αναλυτικά σε αυτήν την ενότητα.

### **3.7 Προστασία με βάση το ρεύμα**

#### **3.7.1 Προστασία από υπερένταση**

Οποιαδήποτε θεμελιώδης στρατηγική προστασίας εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην πανταχού παρούσα προστασία υπερέντασης, εκτός εάν κάποιος παράγοντας επηρεάζει το μέγεθος του ρεύματος ή αλλάξει το επίπεδο βραχυκυκλώματος στοχαστικά. Η πιο

κοινή και διάχυτη συσκευή προστασίας για το σύστημα LVDC ή MVDC είναι το OCR [73]. Λόγω της ταχείας μεταβατικής φύσης του ρεύματος σφάλματος DC, η ρύθμιση TCC (Time-current curve) και ο κατάλληλος συντονισμός των OCR καθίστανται δύσκολες. Τα ανάντη (πριν το σημείο αναφοράς) και τα κατόντη (μετά το σημείο αναφοράς) OCR πρέπει να ακολουθούν ένα συγκεκριμένο περιθώριο χρονικής καθυστέρησης για να διασφαλίζεται η επιλεκτικότητα. Ως αναπόσπαστο μέρος της προστασίας, οι σύγχρονοι μετατροπείς εξοπλισμένοι με OCR μπορούν να συμπεριφέρονται ως CB περιορισμού ρεύματος ταχείας δράσης για γρήγορη διακοπή ρεύματος σφάλματος [74]. Μπορούν να ενσωματωθούν ρελέ στους μετατροπείς για να επιτευχθεί γρήγορη αναγνώριση σφαλμάτων μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου.

Για HRF σε μικροδίκτυο DC, το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος είναι πολύ χαμηλό. Έτσι, η αναγνώριση σφαλμάτων γίνεται μια πολύ επίπονη εργασία, ενώ το LIF παρουσιάζει πολύ υψηλό μέγεθος ρεύματος σφάλματος. Σύμφωνα με τους Saleh et al. [75], ένα υβριδικό παθητικό OCR εξοπλισμένο με επαγωγέα και πυκνωτή ανιχνεύει υψηλό μέγεθος ρεύματος για LIF. Από την άλλη πλευρά, για την ανίχνευση HRF, το μεταβατικό επίπεδο τάσης μιας συγκεκριμένης γνωστής απόσβεσης συχνότητας που παράγεται από τον επαγωγέα και τον πυκνωτή που είναι εξοπλισμένοι με OCR αξιολογείται χρησιμοποιώντας τεχνική DWT (Discrete Wavelet Transform) σε πραγματικό χρόνο. Η διαμόρφωση DC με βρόχο προάγει απρόσκοπτα το αμφίδρομο ρεύμα σφάλματος, για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη επιλογή και ο συντονισμός ρελέ, προτείνεται ένα DOOCR (Directional overcurrent relaying) με υποβοήθηση επικοινωνίας. Μια νέα στρατηγική χρησιμοποιείται σε κάθε τμήμα γραμμής για να αποφασίσει ποιοι ηλεκτρονόμοι θα ρυθμιστούν για σύνδεση στο δίκτυο και για αυτόνομη λειτουργία. Επιπλέον, η αναβάθμιση της ρύθμισης του ρελέ υποβοηθάται από την επικοινωνία. Η λειτουργία παρεμπόδισης της κατεύθυνσης βελτιώνει επίσης την επιλεκτικότητα του ηλεκτρονόμου και επιτρέπει στα ρελέ του ενός άκρου να στέλνουν ένα σήμα διακοπής στα CB και των δύο άκρων ενός τμήματος προστατευμένης γραμμής. Επίσης, δημιουργείται ένας αλγόριθμος προστασίας με βάση την αλλαγή στην κατεύθυνση του ρεύματος σφάλματος για την ανίχνευση και τον εντοπισμό του ακριβούς σημείου. Η στρατηγική που βασίζεται σε κατευθυντικό υπέρνταση αυξάνει επίσης τον πλεονασμό προστασίας. Ως εκ τούτου, οι προσεγγίσεις προστασίας υπέρντασης με διαφορετικά χαρακτηριστικά έχουν εκπληρώσει τις απαραίτητες απαιτήσεις προστασίας εκτός από την περίπτωση ταχέως παροδικού ρεύματος σφάλματος DC που δημιουργεί σφάλμα μέτρησης ρεύματος λόγω της μη επιθυμητής επαγωγής του DCCB. Μια βελτιωμένη μέτρηση ρεύματος σφάλματος μπορεί ενδεχομένως να μειώσει το τρέχουσα περίπτωση σφάλματος.

### 3.7.2 Προστασία με βάση τα παράγωγα του ρεύματος

Το χαρακτηριστικό του γρήγορου ρυθμού ανάπτυξης ρεύματος σε σύντομο χρονικό διάστημα διασφαλίζει την εμφάνιση σφάλματος. Το σχήμα τρέχουσας παραγώγου έχει χρησιμοποιήσει το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος για την ανίχνευση και τον εντοπισμό σφαλμάτων. Λειτουργεί όταν η υπολογιζόμενη διαφορά ρεύματος υπερβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου. Ωστόσο, το μήκος της γραμμής, η φόρτιση της και η σύνθετη αντίσταση σφάλματος έχουν άμεσο αντίκτυπο στην παράγωγο ρεύματος σφάλματος. Η επιλογή ενός κατάλληλου ορίου είναι επίσης πρόκληση για μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας. Οι παράγωγοι πρώτης και δεύτερης τάξης του ρεύματος σφάλματος στο συνεχές ρεύμα μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας μια μέθοδο προσέγγισης πεπερασμένων διαφορών προς τα πίσω [61].

$$\frac{di}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{i(t_0 + \Delta t) - i(t_0)}{\Delta t} = \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$\Delta i = i_k - i_{k-1}$  και  $\Delta^2 i = \Delta i_k - \Delta i_{k-1}$  επιπλέον το  $\Delta^2 i$  μπορεί να γραφεί ως  $\Delta^2 i = i_k - 2i_{k-1} + i_{k-2}$

όπου,  $k$  είναι η στιγμή δειγματοληψίας, και  $i_k$ ,  $i_{k-1}$  και  $i_{k-2}$  είναι τα τρέχοντα και προηγούμενα δειγματοληπτικά ρεύματα γραμμής, αντίστοιχα. Θεωρείται ότι το σφάλμα έχει συμβεί στο  $k=0$  και η τιμή του  $k$  αυξάνεται σε κάθε χρονική στιγμή. Υπό τις συνθήκες σφάλματος, η φύση του ρεύματος σφάλματος μελετάται για να υπολογιστεί ο χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα φθάνει στην μέγιστη τιμή του για διαφορετικές θέσεις. Για την αξιολόγηση της περιόδου δειγματοληψίας, επιλέγεται περίπου το 1/10 του ελάχιστου χρόνου για την επίτευξη της μέγιστης τιμής του ρεύματος σφάλματος. Περαιτέρω για τον προσδιορισμό του σήματος ενεργοποίησης, η τιμή του  $\Delta^2 i$  συγκρίνεται με την τιμή κατωφλίου και όταν υπερβαίνει το προκαθορισμένο όριο, ένα σήμα διακοπής αποστέλλεται στο αντίστοιχο προστατευτικό ρελέ. Παρά την αποτελεσματικότητα αυτής της τεχνικής, ο υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας των αισθητήρων για τη μέτρηση της παραγώγου ρεύματος, ενισχύει τον θόρυβο και συχνά προωθεί την λανθασμένη ενεργοποίηση. Για να εξαιρεθεί αυτό, είναι απαραίτητο το σωστό φιλτράρισμα με δυνατότητα ακύρωσης θορύβου. Ωστόσο, η προστασία βάσει  $di/dt$  είναι σχετικά ταχύτερη από την προστασία υπερέντασης βάσει κατωφλίου. Μια άλλη μέθοδος έχει δείξει την αξιοπιστία της στην ανίχνευση και τον εντοπισμό σφαλμάτων χρησιμοποιώντας ρυθμό μεταβολής του ρεύματος ( $di/dt$ ) και της τάσης  $dv/dt$  αμφότερα. Κάτω από τη λειτουργία περιορισμού και αποκλεισμού των μετατροπέων, η ανίχνευση σφαλμάτων γίνεται μια επίπονη πρόκληση λόγω του χαμηλού ρεύματος σφάλματος. Έτσι, αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί  $dv/dt$

για τον εντοπισμό του σφάλματος και  $di/dt$  για τη θέση του σφάλματος, ενώ το γινόμενο των  $di/dt$  και  $dv/dt$  χρησιμοποιείται για την εξασφάλιση συντονισμού προστασίας μεταξύ των ρελέ. Η θέση σφάλματος και η εκτίμηση της απόστασης σφάλματος με τη μέθοδο παραγώγου ρεύματος βελτιώνεται περαιτέρω όταν ένας μικρός επαγωγέας έχει ουσιαστικά χρησιμοποιηθεί σε κάθε άκρο του δικτύου για να ληφθεί  $di/dt$  [61]. Κατά τη διάρκεια σφάλματος σε ένα σύστημα βρόχου συνεχούς ρεύματος, το  $di/dt$  υπολογίζεται μέσω πτώσης τάσης στον επαγωγέα, η οποία δυνητικά έχει αυξήσει την ακρίβεια από άλλες συμβατικές προσεγγίσεις.

### 3.7.3 Προστασία διαφορικού ρεύματος

Η απόκριση του δικτύου DC είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην αντίσταση σφάλματος. Οι περισσότερες από τις αναπτυγμένες τεχνικές προστασίας μη μονάδας έχουν παραβλέψει αυτό το γεγονός, το οποίο μειώνει αποφασιστικά την εφαρμογή τους λόγω της μη βέλτιστης διάκρισης σφαλμάτων για πιο σύνθετες διαμορφώσεις δικτύου. Η προστασία μη μονάδας μερικές φορές οδηγεί σε σχετικά μεγαλύτερη αποσύνδεση της περιοχής και χρειάζεται περισσότερος χρόνος για την εκκαθάριση σφαλμάτων. Επομένως, συνιστάται η προστασία μονάδας για να διασφαλιστεί η καλύτερη διάκριση σφαλμάτων εντός του δικτύου [67]. Η υψηλή επιλεκτικότητα και η ταχύτερη λειτουργία προβλέπουν ότι η διαφορική προστασία ρεύματος είναι μια βιώσιμη λύση προστασίας για πολύπλοκα μικροδίκτυα DC. Ωστόσο, επιβάλλει μια άπιαστη πρόκληση λόγω του πρόσθετου κόστους επικοινωνίας και της προηγμένης τεχνολογίας αναμετάδοσης. Για το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος, η ανάγκη για μέτρηση μεμονωμένου ρεύματος φάσης και σύγκριση φάσεων αυξάνει τον χρόνο λειτουργίας (περίπου 20 ms), ενώ, για το σύστημα συνεχούς ρεύματος, χρειάζεται να συγκριθεί μόνο το μέγεθος του ρεύματος, το οποίο βελτιώνει αποτελεσματικά τον χρόνο απόκρισης (περίπου 2 ms). Η μέτρηση του ρεύματος σφάλματος DC χρησιμοποιώντας μετατροπέα ρεύματος βοήθησε στη διευκόλυνση της εξόδου του να ενσωματωθεί εύκολα με τις ψηφιακές συσκευές επεξεργασίας. Υπό συνθήκες υψηλού  $di/dt$ , το πρόβλημα που σχετίζεται με το συγχρονισμό των μετρήσεων ρεύματος και τη δημιουργία σήματος αποστολής μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό πλαίσιο από τη σύγκριση των τρεχουσών μετρήσεων είναι δύο ουσιαστικά ζητήματα. Μια καλή λύση για τα προαναφερθέντα ζητήματα επιτυγχάνεται με σημαντική μείωση του χρόνου ανίχνευσης σφαλμάτων. Η διαφορική προστασία ρεύματος μπορεί περαιτέρω να ενισχυθεί με μια προστασία υπερέντασης ως εφεδρική προστασία φορτίου και πηγής ενός συστήματος MVDC με νησίδα [61].

### **3.8 Προστασία με βάση την τάση**

Τα φαινόμενα της εκτεταμένης πτώσης τάσης του συστήματος, της διακύμανσης τάσης και του ρυθμού μεταβολής της τάσης κατά τη διάρκεια της βλάβης χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία στρατηγικής προστασίας με βάση την τάση. Για να τεκμηριωθεί η καλύτερη ευαισθησία προστασίας, το σημείο εντοπισμού σφάλματος και η κατάσταση λειτουργίας του μικροδικτύου μπορούν να γίνουν ανεξάρτητα, ενώ έχει διαμορφωθεί η ρύθμιση του κατωφλίου λήψης. Το σύστημα προστασίας με βάση την τάση είναι ένα μονό-άκρο, τοπικό σύστημα μέτρησης, το οποίο δεν χρειάζεται καμία υποδομή επικοινωνίας. Καθώς η τεχνική προστασίας με βάση την τάση εξαρτάται εξ ολοκλήρου από το μέγεθος της τάσης, είναι ένα σχετικά γρήγορο σχέδιο προστασίας. Ωστόσο, η αδυναμία διάκρισης σε προσωρινά και μόνιμα σφάλματα υπονομεύει την ευρεία εφαρμογή του. [62]

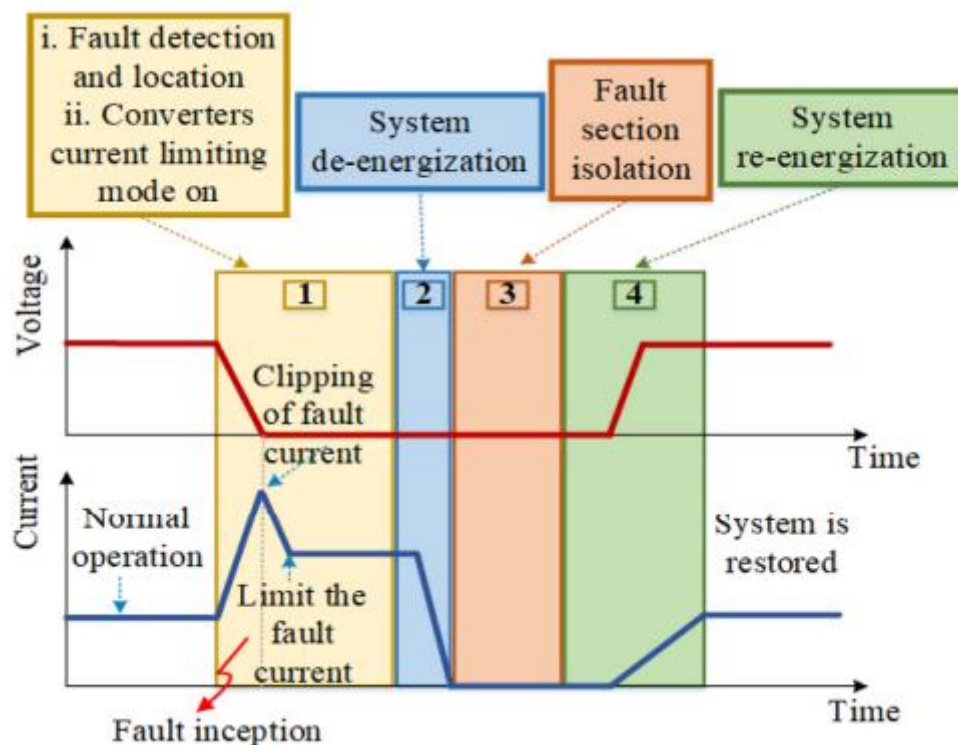
### **3.9 Προστασία με βάση την ενέργεια ελέγχου του μετατροπέα**

Οι μετατροπείς ισχύος διασυνδέουν τα DER με επαρκή δυνατότητα ελέγχου. Υπό συνθήκες σφάλματος, ο μετατροπέας είτε μπορεί να εξαλείψει το σφάλμα περικόπτοντας το ρεύμα σφάλματος και να συμμετάσχει στην υπορουτίνα προστασίας για την αποφυγή καταστροφικών ζημιών του συστήματος, είτε μπορεί να χάσει τη δυνατότητα ελέγχου και να χρειαστεί να εξασφαλίσει τη δική του προστασία χρησιμοποιώντας CB ταχείας δράσης και περιοριστές ρεύματος. Τα VSC back-to-back, οι απομονωμένοι μετατροπείς τύπου buck, τα MMC (Modular multilevel converter) Full Bridge και οι μετατροπείς παρόμοιων τύπων είναι ικανοί να ελέγχουν το μέγεθος του ρεύματος σφάλματος, να παρέχουν εξαιρετική ανθεκτικότητα και μακροζωία. Ένας ακόμη βασικός τρόπος για την απομόνωση σφαλμάτων σε μία αρχιτεκτονική που δεν περιλαμβάνει διακόπτες ισχύος συνεχούς ρεύματος αναφέρεται παρακάτω για πλήρως ελεγχόμενους μετατροπείς. Η αυτόνομη λειτουργία πλήρως ελεγχόμενων μετατροπέων για απομόνωση βλαβών, μειώνει αποφασιστικά την απώλεια ισχύος για γραμμές χωρίς σφάλματα, ειδικά όταν η αποκατάσταση του συστήματος απαιτεί χρόνο. Αυτό το προτεινόμενο σχήμα αποτελείται από τέσσερα διαδοχικά στάδια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 15.

1. Όταν εντοπιστεί το σφάλμα, ο μετατροπέας ενεργοποιεί το ρεύμα περιοριστικής λειτουργία αμέσως και ένας κατάλληλος αλγόριθμος φέρεται να εντοπίζει το σφάλμα.
2. Με τον έλεγχο του μετατροπέα, το υπερβολικό ρεύμα σφάλματος αρχικά περιορίζεται και μηδενίζεται έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να απενεργοποιηθεί.

3. Ο κατάλληλος συντονισμός των μετατροπέων τεκμηριώνει το άνοιγμα των επαφών και απομονώνει το ελαττωματικό τμήμα.
4. Μετά την αποσύνδεση του ελαττωματικού τμήματος, οι μετατροπείς ενεργοποιούνται ξανά το σύστημα και επιστρέφουν στην κανονική λειτουργία.

Αν και αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει την πιθανή αποτελεσματικότητα χωρίς κανένα DCCB, η τρέχουσα περιοριστική ικανότητα των μετατροπέων προκαλεί ανησυχία. Τέλος όπως γνωρίζουμε, δεν είναι ικανοί όλοι οι μετατροπείς να ελέγχουν επαρκώς τη δράση τους [61].



Εικόνα 15: Προστασία με βάση τον έλεγχο του μετατροπέα<sup>15</sup>

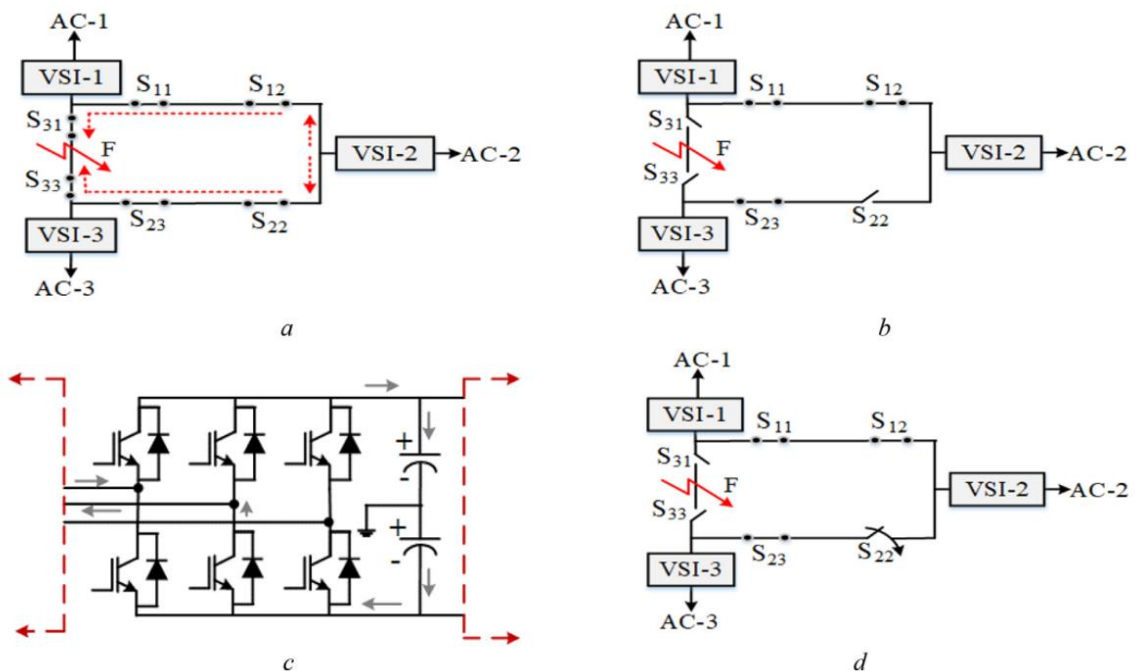
### 3.10 Μέθοδος χειραγίας

Μια οικονομική και αποδοτική λύση για τα DCCB, λιγότερο αποτελεσματική για σφάλματα μικροδικτύου MTDC (Multiterminal DC) που οδηγούνται από VSC επιτυγχάνεται με διακόπτες DC ταχείας δράσης και μέσω της λειτουργίας ACCB (ήδη εξοπλισμένα στην πλευρά AC). Υπό συνθήκες σφάλματος, ο πυκνωτής DC-link εκφορτίζεται και η τάση μειώνεται σταδιακά. Μια αθροιστική και διαδοχική λειτουργία έχει πραγματοποιηθεί από τα ACCB και τους διακόπτες DC ταχείας δράσης για τον χειρισμό του σεναρίου σφάλματος. Αρχικά οι διακόπτες AC που υπάρχουν προ εγκατεστημένοι στον δίκτυο διανομής αποκόπτουν

<sup>15</sup> Βλ.[61]

την τροφοδοσία του συστήματος, στην συνέχεια οι διακόπτες DC που είναι εγκατεστημένοι και στις δύο πλευρές θα πρέπει να ανοίξουν ώστε να αποκοπεί το σφάλμα DC. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, όταν και αν το σφάλμα παρέλθει θα πρέπει οι DCCBs να ξανά επανέλθουν, μια μέθοδος που προτείνεται η οποία δεν απαιτεί μέσα επικοινωνίας αναφέρεται στην συνέχεια.

Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μέθοδος «χειραγίας» ανιχνεύει και απομονώνει τη γραμμή σφάλματος του συστήματος MTDC χρησιμοποιώντας κατεύθυνση ρεύματος σφάλματος από τοπικά όργανα μέτρησης[76]. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 16, οι σταθμοί VSC παρακολουθούν αποκλειστικά και τις τρεις γραμμές DC. Κάθε σταθμός VSC μπορεί να επιλέξει μόνο έναν διακόπτη DC που αναδύεται από αυτόν για να εκτελέσει τη λειτουργία ανοίγματος. Η επιλογή του ανοίγματος του διακόπτη DC εξαρτάται από το ποιος διακόπτης DC φέρει τη μεγαλύτερη ποσότητα θετικού ρεύματος σφάλματος DC. Αυτή η μέθοδος εκτελεί μερικά συγκεκριμένα στάδια λειτουργίας για να εξασφαλίσει σημαντική αξιοπιστία προστασίας. Πρώτα επιλέγεται η γραμμή με σφάλμα και ανοίγει ο διακόπτης DC που αντιστοιχεί σε αυτήν. Μετά την απομόνωση του σφάλματος DC, τα ACCB μπορούν να κλείσουν ξανά, γεγονός που επιτρέπει στους πυκνωτές DC να ξεκινήσουν επαναφόρτιση μέσω των αντιπαράλληλων διόδων του VSC από τροφοδοσία AC 3 φάσεων. Τέλος, ο διακόπτης DC επιτρέπεται να ξανακλείνει μόνο εάν η άλλη πλευρική τάση του διακόπτη DC φτάσει μέχρι το επίπεδο τάσης DC των ακροδεκτών VSC. Αν και η μέθοδος χειραγίας αρχικά απαιτεί τεχνική ανίχνευσης έναρξης σφάλματος, ο χρόνος αποκατάστασης δεν αλλάζει εάν το μέγεθος του MTDC αυξηθεί.





**Εικόνα 16: Απεικόνιση της μεθόδου χειραψίας (a) αναγνώριση της γραμμής που έχει το σφάλμα (b) άνοιγμα της γραμμής με σφάλμα (c) επαναφόρτιση DC πυκνωτών (d) ξανά κλείσιμο του DC διακόπτη<sup>16</sup>**

### **3.11 Προστασία μετατροπέα DC- DC σε συστήματα διανεμημένης παραγωγής**

Στα στάδια μετατροπής ισχύος για την δημιουργία και περάτωση DG, οι απομονωμένοι και μη απομονωμένοι μετατροπείς DC-DC χρησιμοποιούνται ουσιαστικά ως αναπόσπαστο μέρος της τεχνολογίας DC, ειδικά σε ολοκληρωμένα συστήματα HVDC και MVDC στις DG. Ενώ οι VSC (Voltage Source Converters) είναι απαραίτητοι στη διασύνδεση μικροδικτύου DC με το δίκτυο διανομής, οι μετατροπείς DC-DC χρησιμοποιούνται σε ενδιάμεσα στάδια για τη σύνδεση ηλιακών φωτοβολταϊκών, BESS (Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών) κ.λπ. στο δίκτυο DC. [77-80]

Παρόμοια με τα VSC, οι μετατροπείς DC-DC παρουσιάζουν επίσης μια χαρακτηριστική συμπεριφορά σφάλματος για σφάλματα PP και PG. Επομένως, πρέπει να εξεταστούν χωριστά [53,81]. Εκτός από τα εξωτερικά σφάλματα συστήματος, οι μετατροπείς DC-DC μπορούν επίσης να εμφανίσουν εσωτερικά SCF (Σφάλμα βραχυκυκλώματος) και OCF (Σφάλμα ανοιχτού κυκλώματος) στους διακόπτες και/ή τους οδηγούς πύλης.

Οι εσωτερικοί μέθοδοι ανίχνευσης OCF και SCF των μετατροπέων (επεξεργασία σήματος και αλγόριθμοι διάγνωσης σφαλμάτων βάσει μοντέλου) αποτελούν ξεχωριστό πεδίο έρευνας και ένας σημαντικός αριθμός δημοσιεύσεων έχει ήδη προταθεί στη βιβλιογραφία για αρκετούς μετατροπείς DC-DC. Ωστόσο, η απόκριση των μετατροπέων DC-DC για εξωτερικές βλάβες προκαλεί ανησυχία. Η επιλογή του μετατροπέα DC-DC από την άποψη προστασίας είναι αρκετά σημαντική, οι μετατροπείς που είναι απομονωμένοι (μόνωση) παρέχουν αισθητά πλεονεκτήματα έναντι των μη απομονωμένων μετατροπέων λόγω ασφάλειας και γείωσης. Παρέχουν γαλβανικό διαχωρισμό και αναστέλλουν την εμφάνιση υψηλής τάσης στην πλευρά LV, επίσης αποδίδουν εγγενώς την ικανότητα αποκλεισμού σφαλμάτων DC [77]. Επιπλέον, με τη χρήση του λόγου μετασχηματισμού, μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί προσαρμογή τάσης. Η βιωσιμότητα του γαλβανικού διαχωρισμού, η υψηλή απόδοση, ο μετασχηματισμός επιπέδου τάσης, η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος και το FTC (Fault-tolerant capability) καθιστούν τον μετατροπέα DAB (dual active bridge converter) ως κατάλληλη λύση για την τεχνολογία διασύνδεσης δικτύου ΔΠ (διανεμημένης παραγωγής) [82-83]. Επιπλέον, μπορεί να γίνει αναβάθμιση του μετατροπέα DAB σε μετατροπέα MMDAB (Modular multilevel DAB), με εγγενή ικανότητα περιορισμού ρεύματος σε καταστάσεις βραχυκυκλώματος. Έτσι, αποδεικνύεται ουσιαστικά ως μια ικανή λύση για το σύστημα MVDC (ως βασικός μετατροπέας

---

<sup>16</sup> Βλ. [76]

DC-DC) και για τα συστήματα αποθήκευσης (BESS) σε εφαρμογές MVDC [84-85]. Περαιτέρω τροποποίηση του μετατροπέα DAB τον παρουσιάζει ως μετατροπέα πολλαπλών ενεργών γεφυρών με ανοχή σφαλμάτων, ο οποίος χρησιμοποιείται σε έξυπνους μετασχηματιστές [86].

Αν και η κύρια ανάγκη διασύνδεσης των μετατροπέων είναι ο έλεγχος της ροής ισχύος και της μετατροπής τάσης, ώστε να ταιριάζει με διαφορετικά επίπεδα τάσης δικτύου, το πρόσθετο όφελος της ασφάλειας μπορεί να επιτευχθεί εάν οι μετατροπείς είναι εγγενώς ενεργοποιημένοι με FTC (Δυνατότητα ανοχής σε σφάλματα). Η ανοχή σφαλμάτων έχει σαν συνέπεια τη συνέχιση της μετατροπής ισχύος μετά από σφάλμα. Μπορεί να εφαρμοστεί στους μετατροπείς ενσωματώνοντας πρόσθετα στοιχεία υλικού, ρυθμίζοντας τη μετατόπιση φάσης, παρακάμπτοντας το-α ελαττωματικό-α στοιχεία της δομής, προωθώντας αλλαγές στους παλμούς πύλης στους μη επηρεασμένους από το φαινόμενο διακόπτες ημιαγωγών.

Καθώς η παραγωγή φωτοβολταϊκών, παρουσιάζει περισσότερη προσοχή στην αναδυόμενη τεχνολογία συνεχούς ρεύματος λόγω της εγγενούς της ικανότητας παραγωγής συνεχούς ρεύματος, αρκετοί μετατροπείς DC-DC εφαρμόζονται στο Φ/B σύστημα για βελτίωση της αξιοπιστίας. Επιπλέον, λόγω των πλεονεκτημάτων της υψηλής απόδοσης και την εξομάλυνση του κυματισμού ρεύματος εξόδου, οι παρεμβαλλόμενοι μετατροπείς DC-DC (buck, boost, αμφίδρομη buck-boost) διασυνδέονται αποφασιστικά με το Φ/B σύστημα [61].

Σε εφαρμογές HVDC, το να διακοπεί ένα σφάλμα ρεύματος και γενικά το να περιοριστεί από έναν συντονισμένο μετατροπέα DC-DC έχει αποσαφηνιστεί στο D. Joncic [93]. Κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, ο μετατροπέας μειώνει τη ροή ισχύος εσωτερικά, γεγονός που διατηρεί τις μεταβλητές σφάλματος (τάση, ρεύμα) περίπου στην ονομαστική τιμή. Αυτή η ιδέα παρέχει συνεχή λειτουργία του μετατροπέα ακόμη και υπό συνθήκες σφάλματος. Μια διαφορετική ιδέα ενσωματώνει τον μετατροπέα F2F (Front-to-Front), ο οποίος κατασκευάζεται από τα σετ MMC (Modular multilevel converter) και υλοποιείται αποτελεσματικά ως μετατροπέας HVDC-DC για την εξάλειψη του σφάλματος A. Schon [94]. Ο μετατροπέας HVDC-DC που βασίζεται σε F2F έχει τη δυνατότητα να μειώνει το ρεύμα σφάλματος, όταν το ρεύμα του μετατροπέα υπερβαίνει το ονομαστικό. Επιπλέον, για να εξασφαλιστεί πιο ισχυρή προστασία για το διασυνδεδεμένο δίκτυο MVDC-HVDC, προτείνεται μια πλεονάζουσα δομή υβριδικού μετατροπέα TLC-MMC (Two-level converters) με ανοχή σε σφάλματα στο [80]. Ο περιορισμός του ρεύματος σφάλματος μπορεί να τοποθετηθεί εκ των υστέρων με την εφαρμογή μετατροπέων ανοχής σε σφάλματα ή με τη χρήση εξωτερικής προστασίας μέσω DCCB. Ωστόσο, έχει διερευνηθεί πειραματικά ότι η προστασία που βασίζεται σε μετατροπέα DC-DC

με ανοχή σε σφάλματα παρουσιάζει υψηλότερο ποσοστό αστοχίας από την προστασία που βασίζεται σε DCCB.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ DC ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ SIMULINK

## 4.1 Εισαγωγή

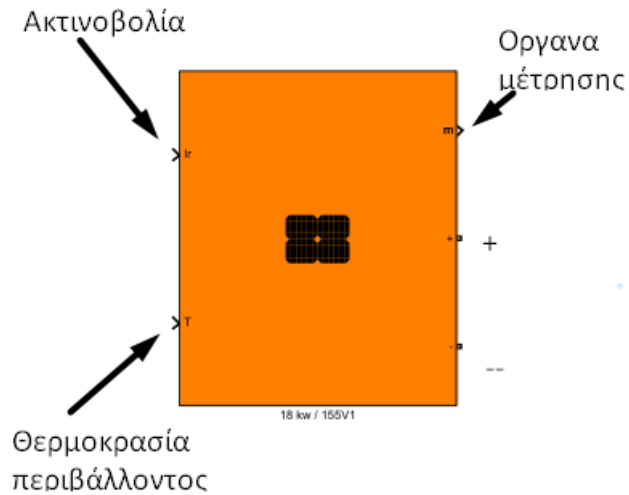
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί, ένα μοντέλο μικροδικτύου το οποίο διεκπεραιώθηκε με την εφαρμογή Simulink, σε αυτό συμμετέχουν συσκευές στις οποίες έγινε αναφορά στα παραπάνω κεφάλαια. Στόχος του μοντέλου είναι να δείξει σε αναπαράσταση προσομοίωσης, το πώς θα μπορούσε να συμπεριφέρεται ένα DC μικροδίκτυο το οποίο συνδέεται με το δίκτυο διανομής (μόνο σαν καταναλωτής), με σύστημα αποθήκευσης ( μέσω αμφίδρομου μετατροπέα, επιτρέπει την φόρτιση και την εκφόρτιση μπαταρίας), με Φ/Β το οποίο εκπροσωπεί τις ΑΠΕ, και ενός dc καταναλωτή στον ζυγό συνεχούς τάσης, καθώς και διάφορους τύπους ελεγκτών.

## 4.2 Παρουσίαση βασικών συσκευών του προγράμματος

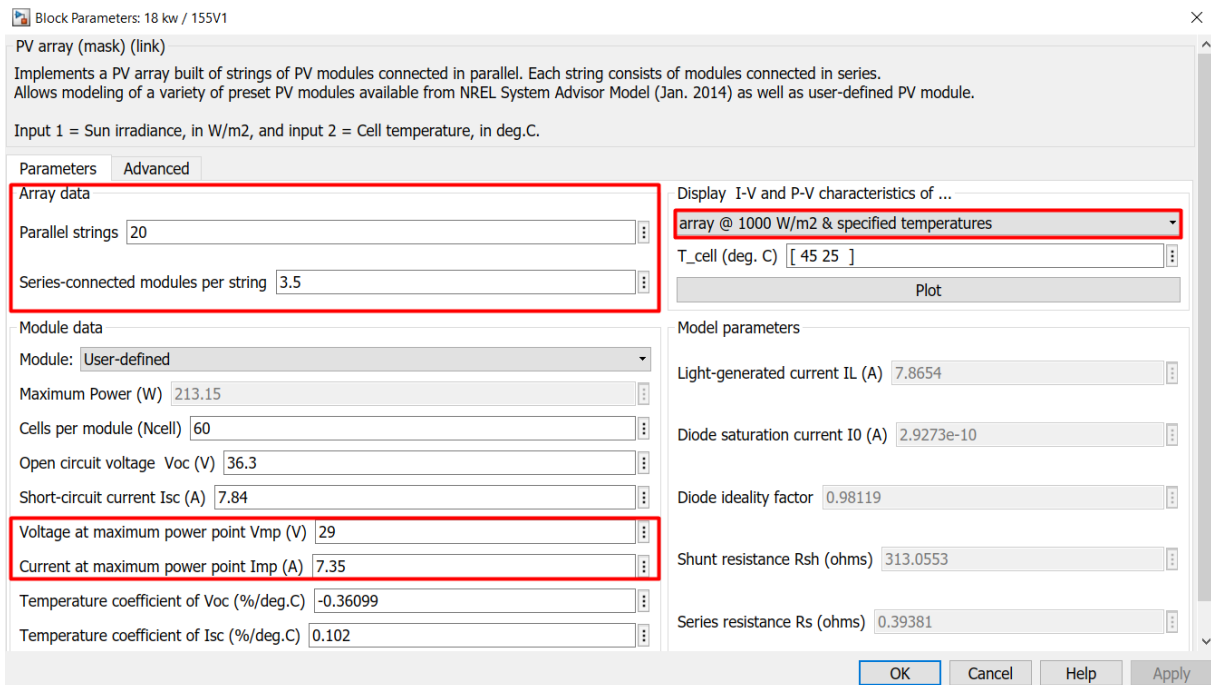
Παρακάτω θα γίνει αναφορά στις συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν, και στον τρόπο με τον οποίο συμβάλουν για να προσφέρουν ένα αρμονικό αποτέλεσμα κατά την λειτουργία του προγράμματος. Καθώς και στις δυνατότητες που προσφέρει το SIMULINK για την εκτέλεση τέτοιου είδους ερευνών.

### 4.2.1 Σύστημα Φ/Β μονάδας

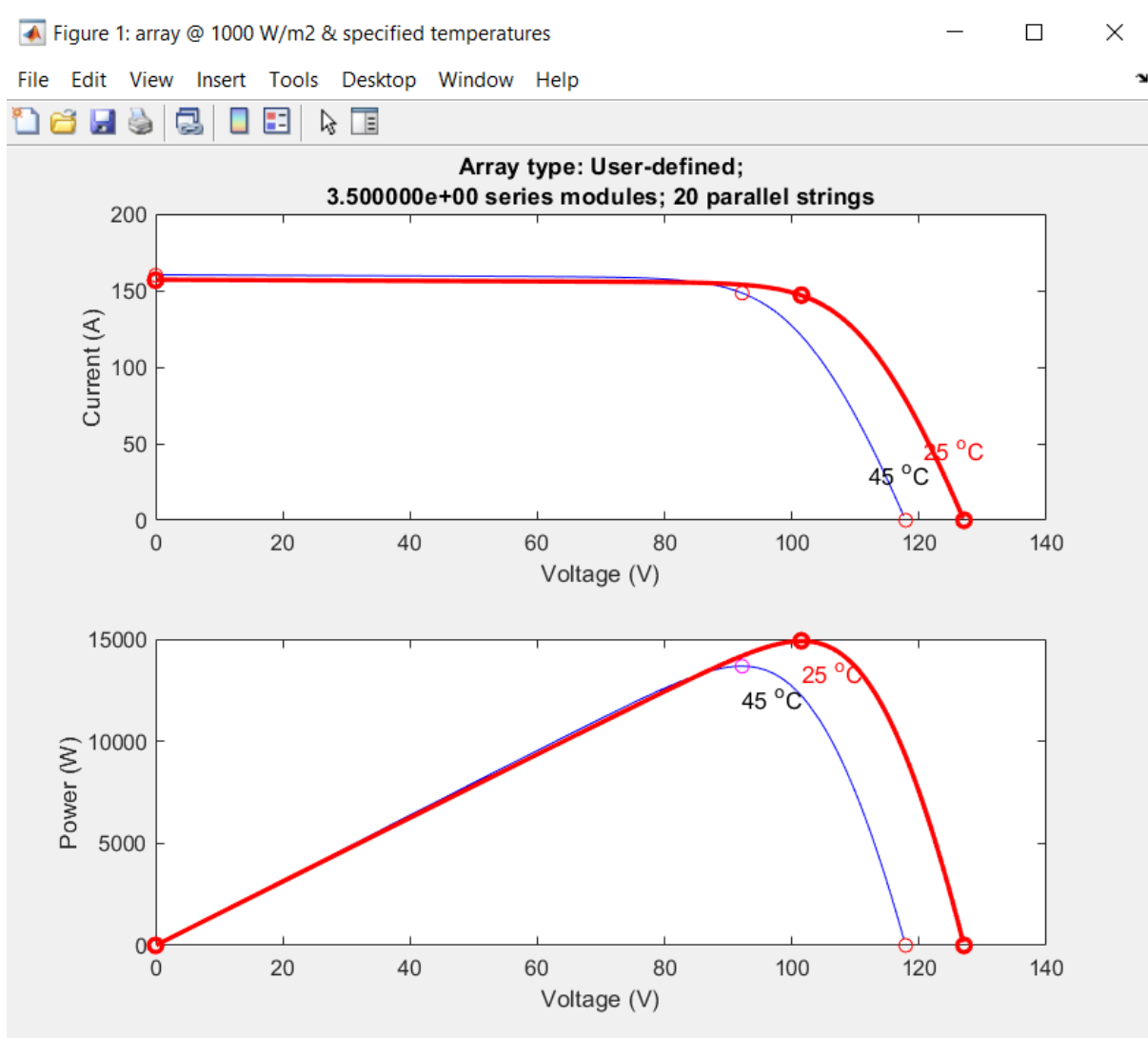
Η αναπαράσταση της φωτοβολταϊκής μονάδας στο simulink είναι της μορφής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 17. Μπαίνοντας εκεί μπορούμε ουσιαστικά να επιλέξουμε τι είδους Φ/Β στοιχείου χρειαζόμαστε για το μοντέλο, επίσης μας δίνει να φτιάξουμε εμείς ένα μοντέλο Εικόνα 18. Το Φ/Β αυτό έχει σαν είσοδο θερμοκρασία, καθώς και ακτινοβολία του ήλιου, δηλαδή τους δυο παράγοντες που καθορίζουν την ισχύ εξόδου Εικόνα 19. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, η θερμοκρασία αφέθηκε στους 25 βαθμούς κελσίου, και για την ακτινοβολία, σε ένα μέρος του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά στοιχεία ημέρας, καθώς και για λόγους ταχύτητάς και τιμές εισαγόμενες από το πληκτρολόγιο.



Εικόνα 17: Φ/Β στο simulink



Εικόνα 18: Παράμετροι Φ/Β



Εικόνα 19: Καμπύλες V-I και V-P για το καθορισμένο μοντέλο

Στην συνέχεια, το Φ/Β αυτό συνδέεται με ένα σύστημα για την μέγιστη μεταφορά ισχύος Εικόνα 20. Αυτό όπως και θα δούμε είναι ουσιαστικά ένας DC-DC μετατροπές, για να επιτύχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος. Όπως αναφερθήκαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει η αντίσταση εισόδου του Φ/Β να είναι ίδια με την αντίσταση εξόδου. Αυτό το πετυχαίνουμε ουσιαστικά με την ρύθμιση του παλμού έναυσης στο IGBT (Εικόνα 19). Για την ρύθμιση του παλμού έναυσης δημιουργήθηκε ένα σύστημα ελέγχου Εικόνα 21, που ελέγχεται από το πρόγραμμα που φαίνεται στην Εικόνα 22, το οποίο βρίσκει για κάθε περίπτωση θερμοκρασίας, ισχύος ακτινοβολίας και καταναλωτή τον κύκλο λειτουργίας του μετατροπέα (Duty cycle) ώστε να παραμένει η αντίσταση εξόδου η ίδια με την είσοδο, έπειτα αυτό το σήμα που παράγεται, ενέχεται σε έναν μετατροπέα PWM ο οποίος ο ρόλος του είναι να καθορίζει το

ποσοστό της περιόδου παλμού στην οποία είναι ενεργοποιημένη η έξοδος (P), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 20.

Υπολογισμός μεγεθών μετατροπέα:

Ο DC-DC μετατροπέας, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα είναι σχεδιασμένος να αλλάζει τον κύκλο λειτουργίας με σκοπό να μετατρέπει φαινομενικά την εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος. Για να γίνει αυτό ορθά θα πρέπει να υπολογιστούν οι σωστές τιμές των συσκευών που αποτελούν αυτό το κύκλωμα. Το  $C_{in}$  ( πυκνωτής εισόδου ) και το  $C_{out}$  ( πυκνωτής εξόδου ) κρατάνε την τάση εισόδου και εξόδου ομαλή και το  $L_{pv}$  (πηνίο) μειώνει την κυμάτωση του ρεύματος.

Η επιλογή του πηνίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$1. L = \frac{V_i \cdot (V_{out} - V_i)}{\Delta i_L \cdot F_s \cdot V_{out}}$$

Οπού το  $\Delta i_L = 0,05 \cdot I_{outm}$ , δηλαδή η κυμάτωση να είναι το 5% του ρεύματος εξόδου. Στην συνέχεια υπολογίζεται η κρίσιμη επαγωγή, την οποία ουσιαστικά θα πρέπει να την λάβουμε υπόψιν σαν οριακή τιμή, δηλαδή για να λειτουργήσει με συνεχόμενο ρεύμα ο μετατροπέας μας θα πρέπει η τιμή αυτή να είναι λίγο μεγαλύτερη.

$$2. L_c = \frac{D \cdot (1-D)^2 \cdot R_{out}}{2 \cdot F_s}$$

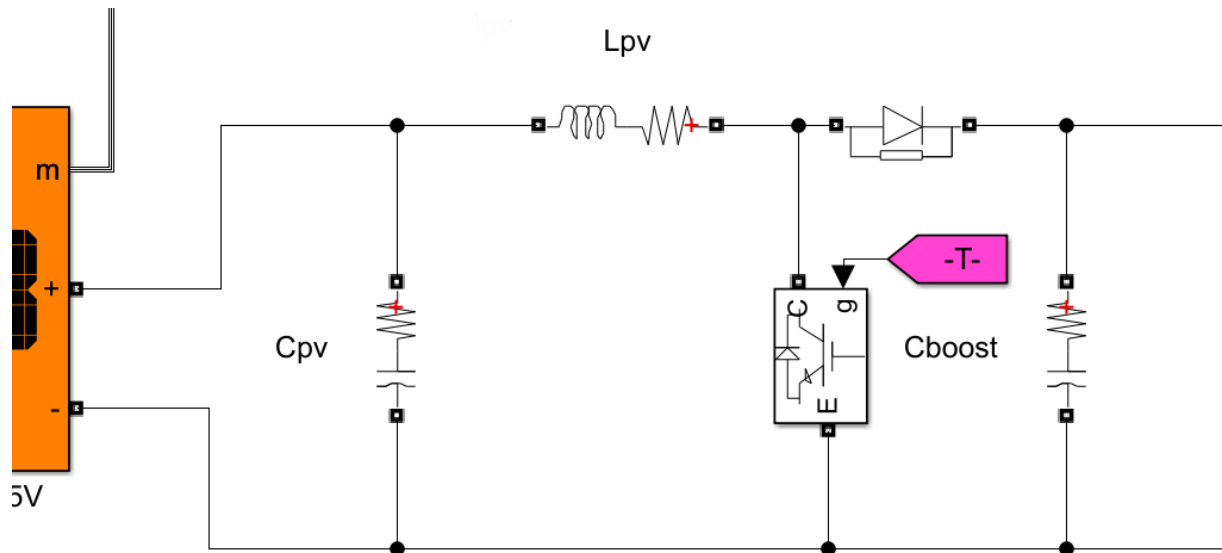
Οπού  $R_{out}$  η αντίσταση εξόδου. Έπειτα έχει σειρά η επιλογή του πυκνωτή εξόδου, ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση.

$$3. C_{out} = \frac{D}{R_o \cdot F_s \cdot \frac{\Delta V}{V}}$$

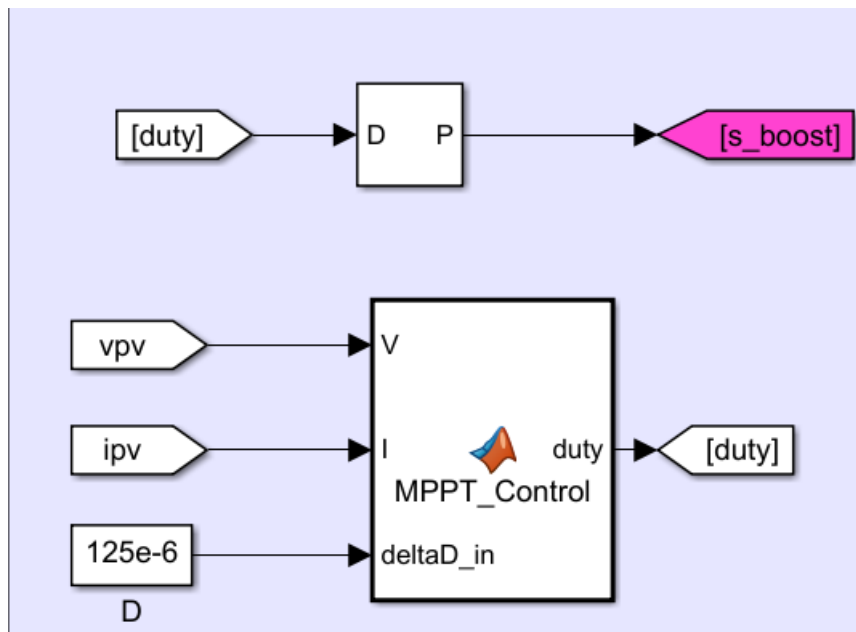
Όπου  $\frac{\Delta V}{V}$  είναι το ποσοστό κυμάτωσης που θέλουμε να έχει η τάση εξόδου, π.χ για ποσοστό 5% θα πρέπει να είναι 0,05. Το D είναι το Duty Cycle και αντιστοιχείται από το MPPT και υπολογίζεται από την σχέση.

$$4. D = \frac{\sqrt{Z_m}}{\sqrt{Z_{out}}}$$

Όπου το  $Z_m$  είναι η αντίσταση στο MPP και υπολογίζεται από την σχέση  $Z_m = \frac{V_{in}}{I_{in}}$ .



Εικόνα 20: DC-DC μετατροπέας για MPP



Εικόνα 21: Σύστημα ελέγχου για MPP



```

1  function duty =MPPPT_Control(V ,I, deltaD_in)
2
3  duty_init=0.05;
4  duty_min=0;
5  duty_max=0.75;
6
7  persistent Vold Pold duty_old;
8
9  if isempty(Vold)
10     Vold=0;
11     Pold=0;
12     duty_old=duty_init;
13 end
14 P=V*I;
15 dV=V-Vold;
16 dP=P-Pold;
17 duty=duty_old;
18 deltaD=deltaD_in;
19
18 deltaD=deltaD_in;
19
20 if dP~=0
21     if dP<0
22         if dV<0
23             duty=duty_old-deltaD;
24         else
25             duty=duty_old+deltaD;
26         end
27     else
28         if dV<0
29             duty=duty_old + deltaD;
30         else
31             duty=duty_old - deltaD;
32         end
33     end
34 end
35 if duty >= duty_max
36     duty=duty_max;
37 elseif duty<duty_min
38     duty=duty_min;
39 end
40
41 duty_old= duty;
42 Vold=V;
43 Pold=P;
44

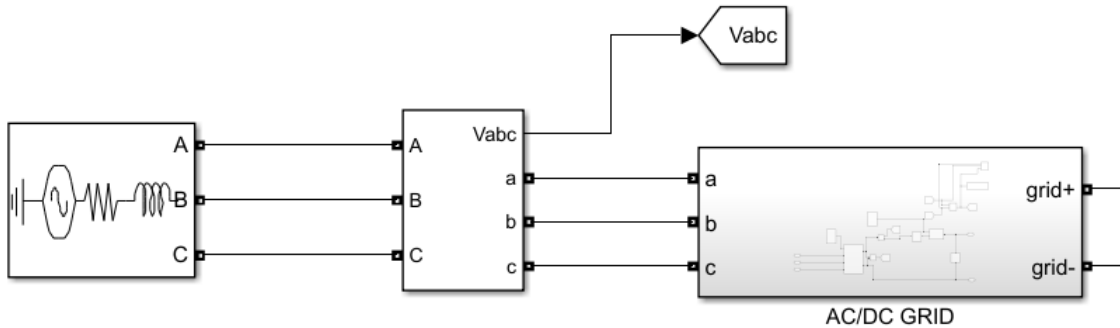
```

Εικόνα 22: Πρόγραμμα για την εύρεση Duty Cycle για MPP

#### 4.2.2 Δίκτυο AC και σύνδεση του με το DC ναοδίκτυο

Για την δημιουργία του 3~ AC ζυγού σε σύνδεση με τον DC Εικόνα 23, χρησιμοποιήθηκε η εισαγωγή μοντέλου από το Simulink το οποίο ουσιαστικά μας δίνει μια τριφασική πηγή, στην οποία μπορούμε να ρυθμίσουμε τάση και συχνότητα Εικόνα 24. Έπειτα για την ανόρθωση των τριφασικών τάσεων χρησιμοποιήθηκε ένας τριφασικός ανορθωτής από Thyristor Εικόνα 25, και για την ρύθμιση της τάσης του ένας ελεγκτής κλειστού βρόγχου, ο οποίος διαχειρίζεται τον παλμό έναυσης Εικόνα 26. Σε αυτό το κομμάτι του κυκλώματος, έγινε ακόμα ένα σύστημα ελέγχου για το πότε θα φορτίζει η μπαταρία από το κεντρικό δίκτυο, στο οποίο μπορούμε να εισάγουμε από το πληκτρολόγιο ανώτερη τιμή φόρτισης της μπαταρίας και κατώτερη αποφόρτισης για να συμμετάσχει το δίκτυο, καθώς και ο εξαναγκασμός του κύκλου φόρτισης και αποφόρτισης μέσω του δικτύου στις προκαθορισμένες τιμές ( δηλαδή η μπαταρία για να ξεκινήσει να φορτίζει από το δίκτυο θα πρέπει να έχει φτάσει το κατώτατο όριο που έχουμε ορίσει, και στην συνέχεια εφόσον δεν υπάρχει εισαγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, να εισαχθεί ο μετατροπέας για να φορτίσει την μπαταρία, μέχρι την ανώτερη τιμή που έχουμε ορίσει) Εικόνα 27. Τέλος ένα ακόμα κομμάτι που πρέπει να αναφέρουμε όσον αφορά το δίκτυο και τον μετατροπέα είναι, ότι πάντα υπάρχουν για να προσφέρουν ότι ενέργεια δεν μπορεί να καλύψουν

οι ΑΠΕ, αυτό έχει ρυθμιστεί με ένα ακόμα σύστημα ελέγχου που βρίσκεται στον κομμάτι του μετατροπέα.



Εικόνα 23: Σύνδεση AC ζυγού με τον DC

Εικόνα 24: Ρύθμιση των παραμέτρων AC

Block Parameters: thiristor
✕

**Universal Bridge (mask) (link)**

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance  $L_{on}$  of diodes and thyristors should be set to zero

**Parameters**

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms)  
1e5

Snubber capacitance  $C_s$  (F)  
inf

Power Electronic device Thyristors

Ron (Ohms)  
1e-3

$L_{on}$  (H)  
0

Forward voltage  $V_f$  (V)  
0.7

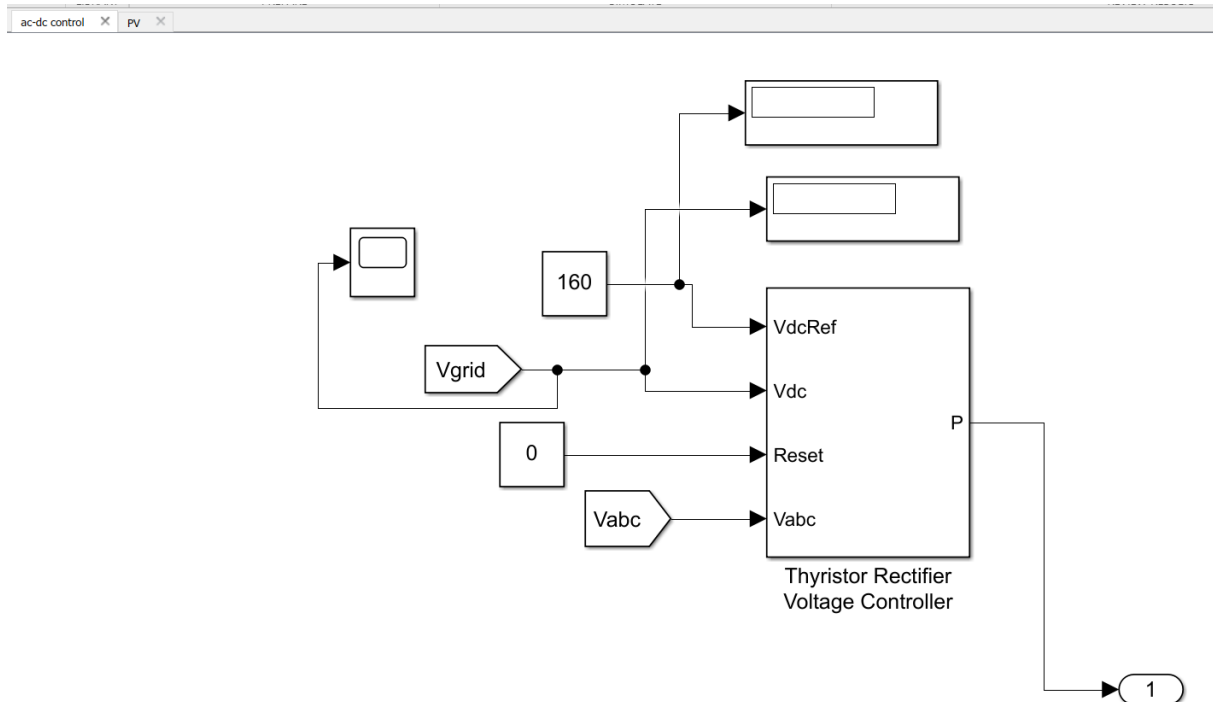
Measurements Device voltages

OK
Cancel
Help
Apply

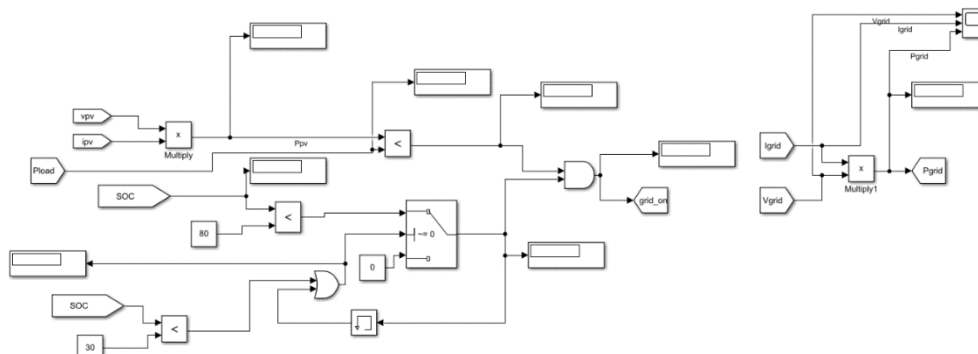
Elegxos

thyristor

Εικόνα 25: Ανορθωτής Thyristor



Εικόνα 26: Έλεγχος ανόρθωσης Thyristor

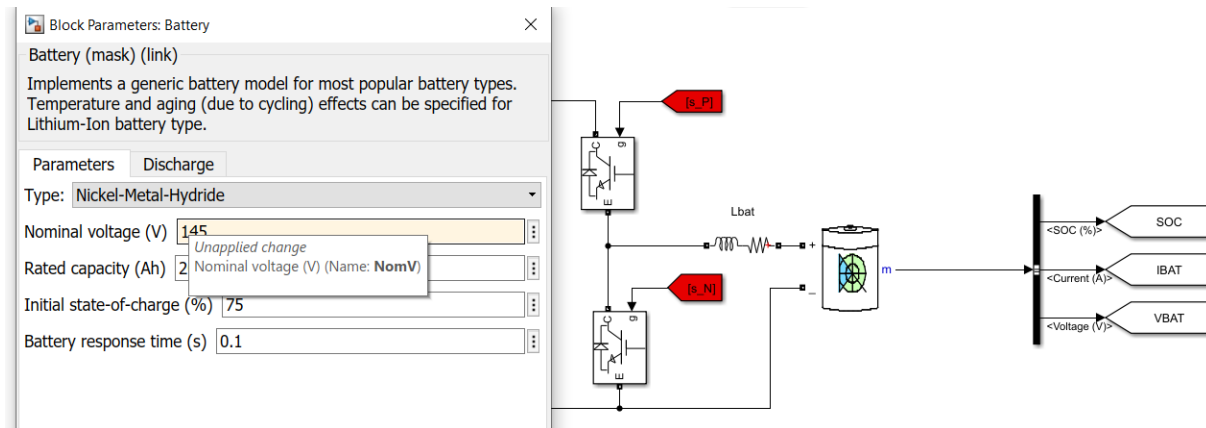


Εικόνα 27: Έλεγχος συμμετοχής δικτύου, για την προσφορά ενέργειας στο σύστημα DC

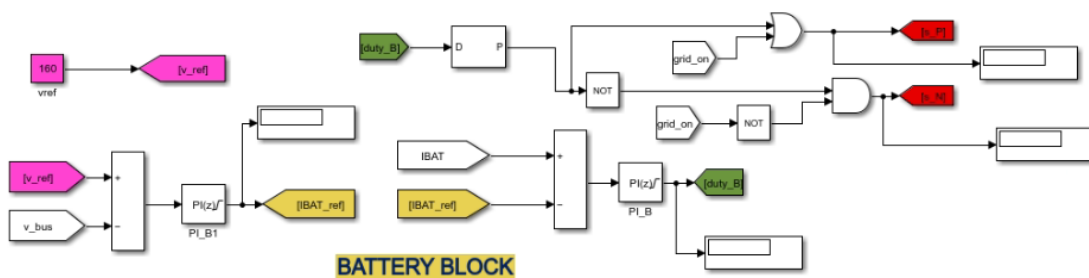
#### 4.2.3 Μπαταρία και σύνδεση της με τον DC ζυγό

Για την εισαγωγή της μπαταρίας στο σύστημα μας, επιλέχθηκε μια έτοιμη βιβλιοθήκη στο Simulink που ουσιαστικά, προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα επιλογής του είδους της μπαταρίας, καθώς και άλλα χαρακτηριστικά όπως, τάση φόρτισης και αποκοπής, ρεύμα φόρτισης, χρόνος αντίδρασης κλπ. Εικόνα 28. Στην συνέχεια ένα ακόμα βασικό στοιχείο για την σύνδεση της μπαταρίας με τον DC ζυγό είναι ο ελεγκτής που θα καθορίζει για το πότε θα φορτίζει και πότε όχι Εικόνα 29. Αυτός δέχεται σαν αναφορά την τάση του ζυγού με έναν PID Εικόνα 30 ελεγκτή μετατρέπουμε την τάση αυτήν σε ισοδύναμο ρεύματος (καθώς ο

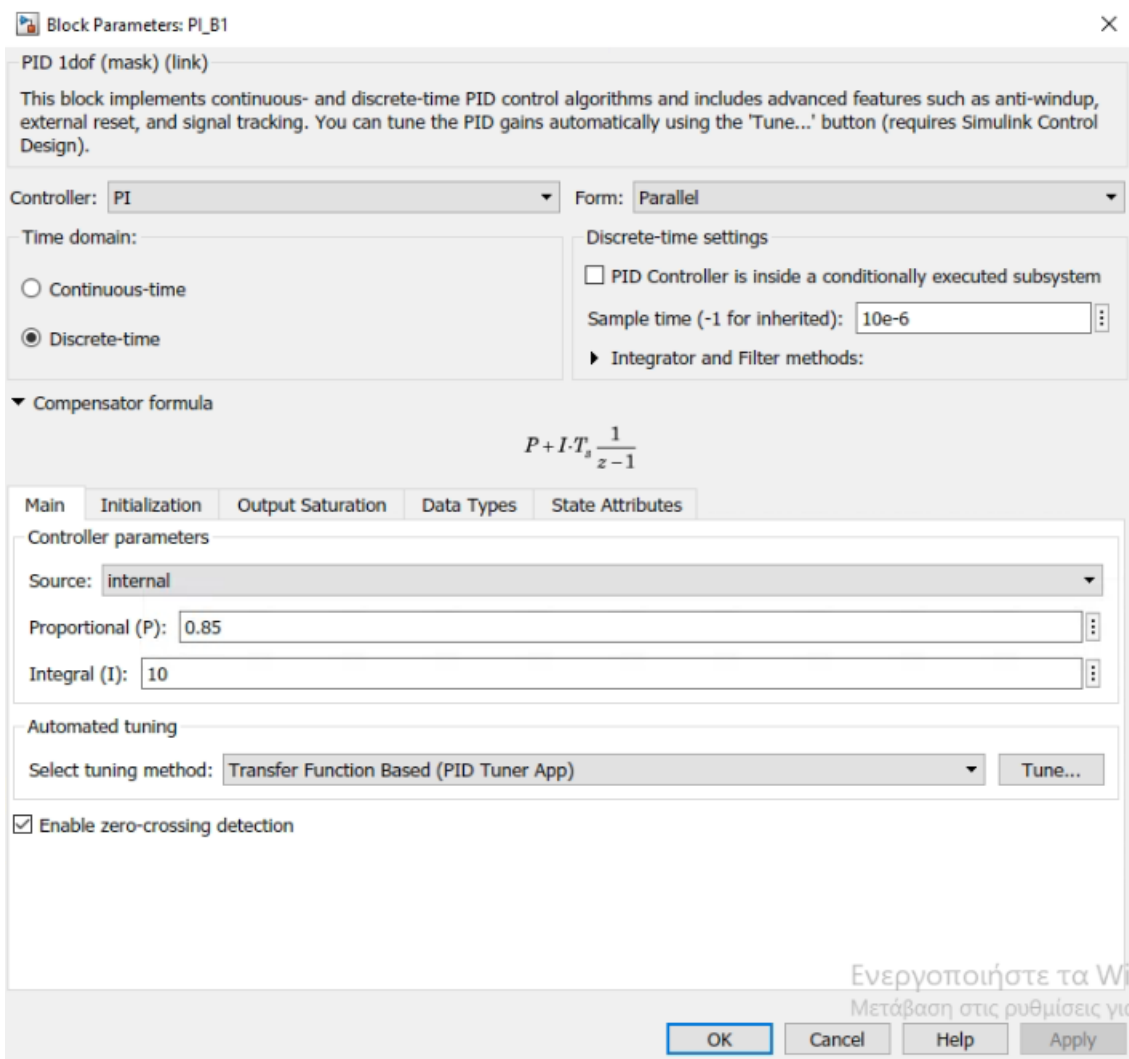
καθορισμός του αν η μπαταρία είναι φορτισμένη ή όχι εξαρτάται από το ρεύμα) κατ' επέκταση εισάγουμε αυτό το ρεύμα σε έναν ακόμα PID Εικόνα 31 για τον καθορισμό, του αν ο DC-DC μετατροπέας δυο κατευθύνσεων Εικόνα 32 θα φορτίζει την μπαταρία ή όχι.



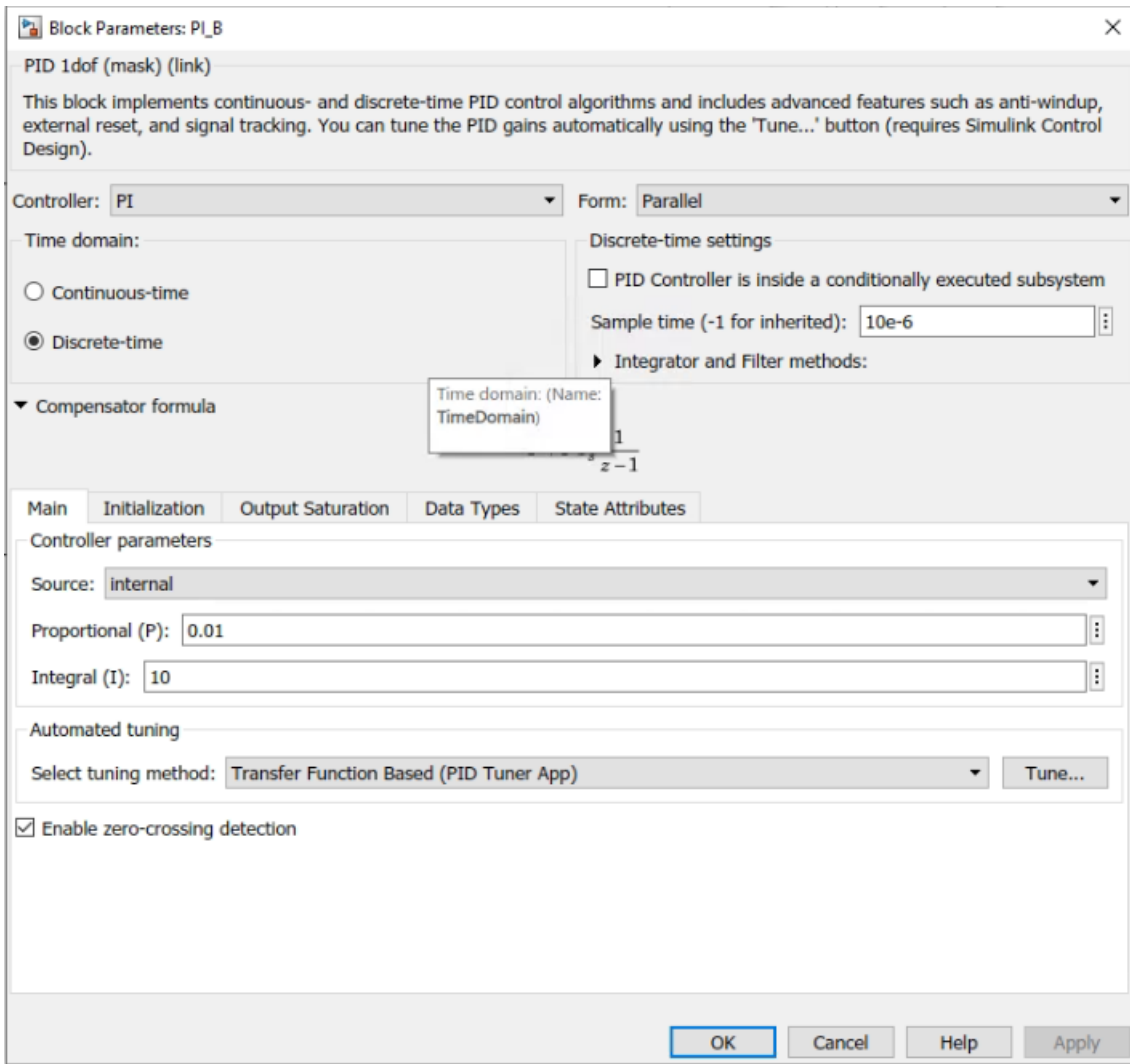
Εικόνα 28: Μπαταρία και παράμετροι



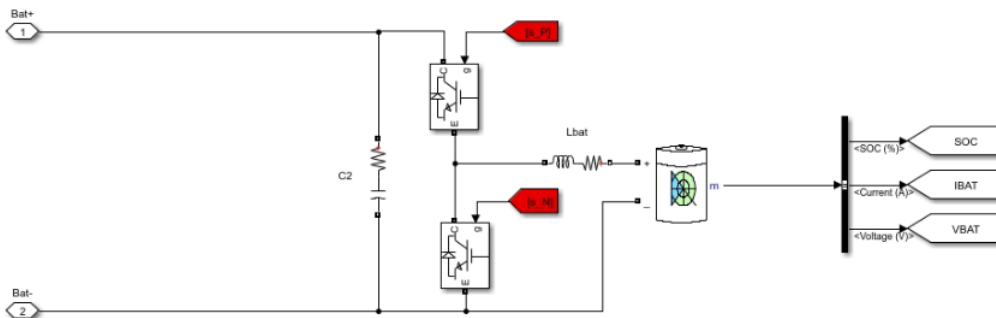
Εικόνα 29: Κύκλωμα ελέγχου φόρτισης και αποφόρτισης μπαταρίας



**Εικόνα 30: PID σύγκριση τάσης αναφοράς με τάση ζυγού για την δημιουργία ρεύματος αναφοράς**



Εικόνα 31: PID για την σύγκριση ρεύματος μπαταρίας με το ρεύμα αναφοράς για τον καθορισμό παλμού φόρτισης ή αποφόρτισης



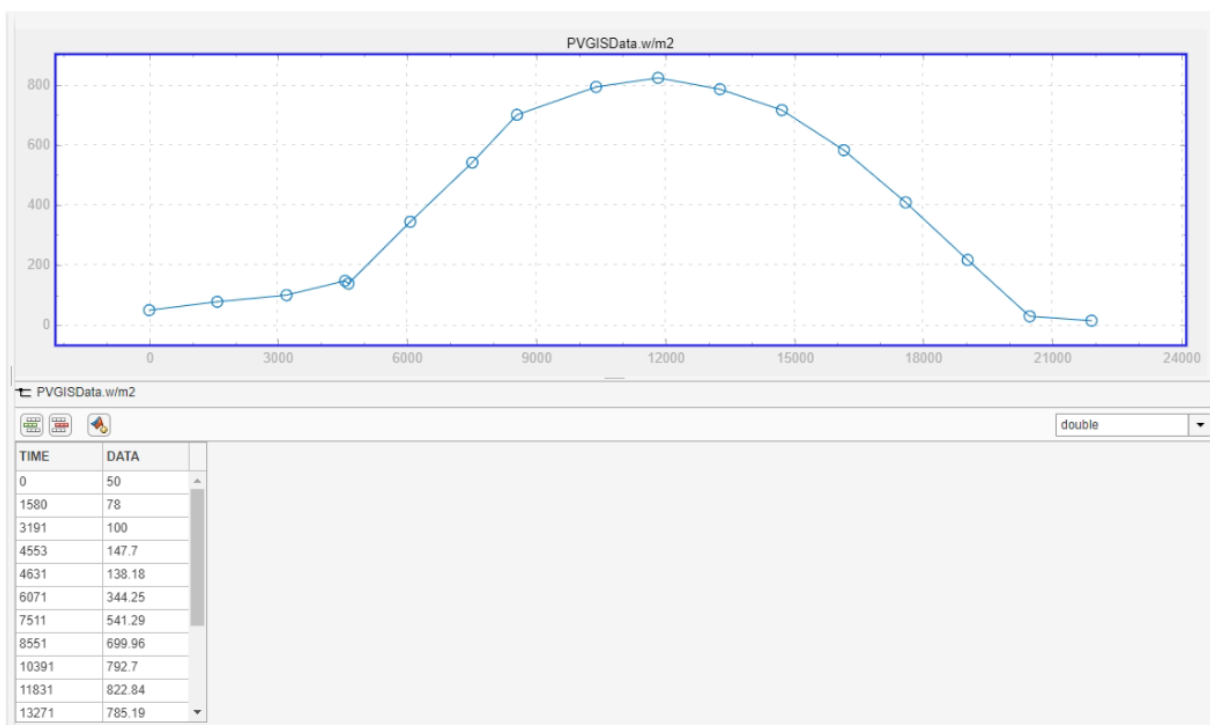
Εικόνα 32: DC-DC μετατροπείας δύο κατευθύνσεων

### 4.3 Μετρήσεις κατά την λειτουργία του προγράμματος

Σε αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στις μετρήσεις που πήραμε κατά την λειτουργία του προγράμματος, αρχικά θα παρουσιαστεί η καμπύλη της ακτινοβολίας από πραγματικές μετρήσεις, έπειτα θα δούμε την συμπεριφορά του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις εξαρτημένες από εισαγωγή δεδομένων από το πληκτρολόγιο (κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, ακτινοβολία κλπ) καθώς και θα δημιουργήσουμε μία κατάσταση στην οποία μειώνεται η ακτινοβολία σε μεγάλο βαθμό πχ ένα σύννεφο και τέλος μία περίπτωση στην οποία ενώ λειτουργεί το φορτίο σε κανονικές συνθήκες να μπει ένα ακόμα παράλληλα ώστε να τραβάνε περισσότερη ισχύ από ότι μπορεί να δώσει το Φ/Β.

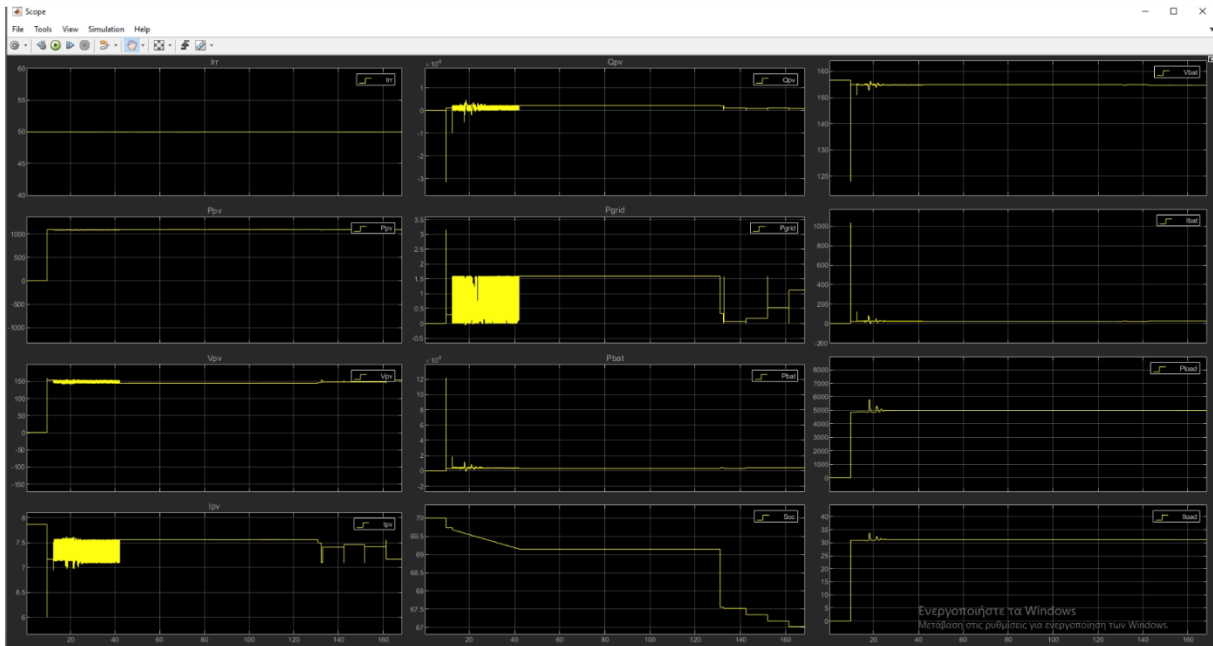
#### 4.3.1 Λειτουργία προσομοίωσης και δεδομένα εξόδου

Στην πρώτη προσομοίωση, εισάχθηκαν τα πραγματικά δεδομένα με την μορφή καμπύλης ημέρας Εικόνα 33, κατά την λειτουργία του προγράμματος πήραμε τις εξόδους που φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες 34,35,36.

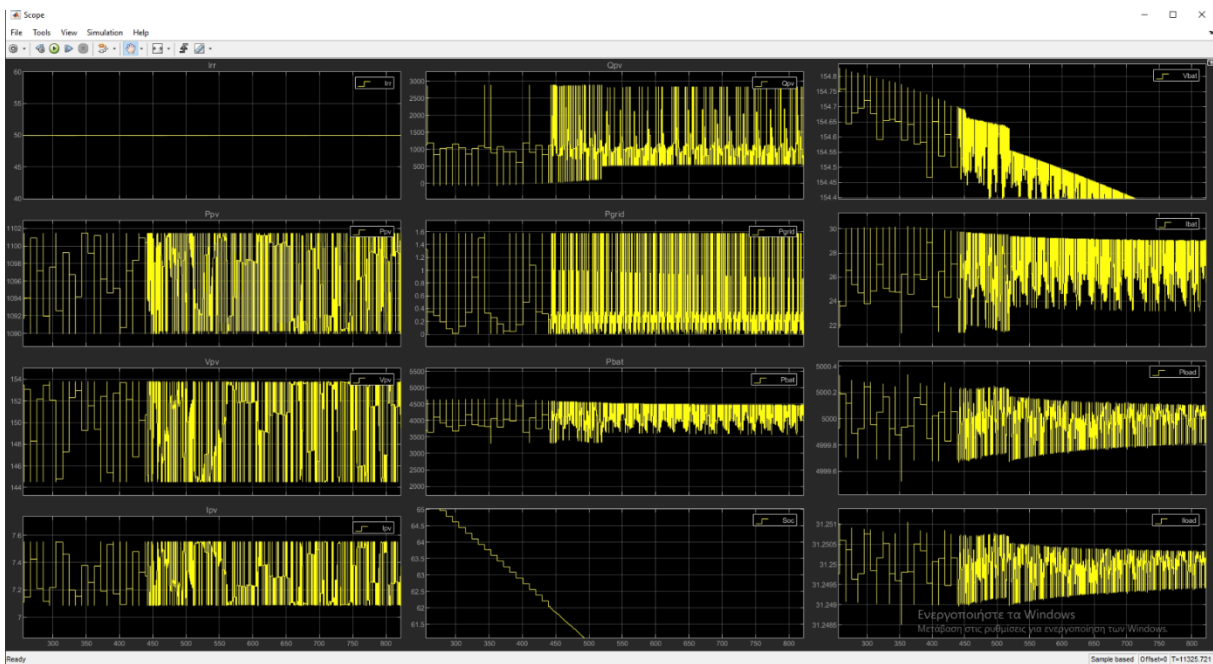


Εικόνα 33: Καμπύλη ημέρας

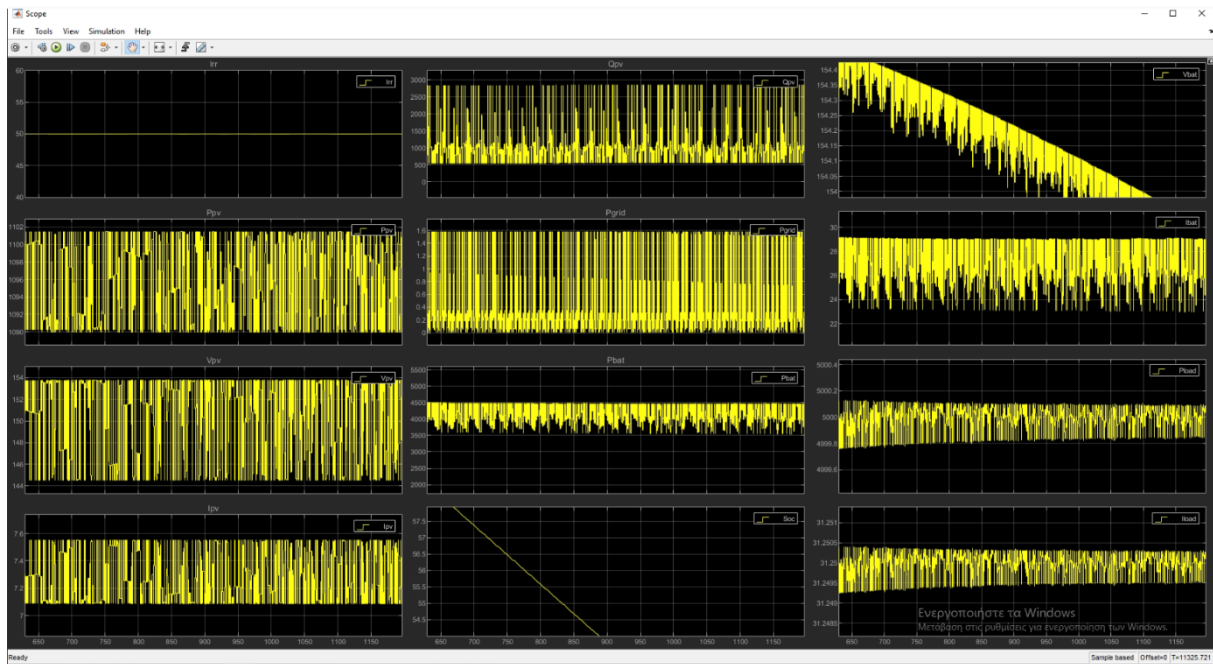




**Εικόνα 34: Αποτέλεσμα 1 από καμπύλη ημέρας**



**Εικόνα 35: Αποτέλεσμα 2 από καμπύλη ημέρας**



**Εικόνα 36: Αποτέλεσμα 3 από καμπύλη ημέρας**

Στις παραπάνω εικόνες, βλέπουμε την είσοδο της ακτινοβολίας και την προσφορά ισχύος από το Φ/Β (Qrv), την προσφορά ισχύος του δικτύου (Pgrid) (ουσιαστικά είναι μηδενική), καθώς και την προσφορά ισχύος από τις μπαταρίες (Pbat), η οποία όλη την διάρκεια του συγκεκριμένου χρονικού είναι η μεγαλύτερη και συμπληρώνει αυτήν του Φ/Β. Επίσης κάτι άλλο που μπορούμε να παρατηρήσουμε στο συγκεκριμένο σύστημα είναι ότι ουσιαστικά ξεκινάει να αποκρίνεται στα 10 sec (Όλοι οι χρόνοι που φαίνονται είναι σε Sec). Το παραπάνω κομμάτι που προσομοιώθηκε με πραγματικές μετρήσεις ήταν πολύ μεγάλο ( διάρκεια προσομοίωσης μεγαλύτερη των 24 ωρών καθώς και αρκετές επαναλαμβανόμενες μετρήσεις) και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την μεγάλη ζήτηση RAM > 128 GB καθώς χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής με 128 GB αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την διακοπή της προσομοίωσης σε αρκετά αρχικό στάδιο. Αυτά τα προβλήματα είχαν σαν αποτέλεσμα την εξαναγκαστική χρήση σεναρίων.

#### 4.3.2 Σενάρια προσομοίωσης για σύστημα με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από την διανομή.

Να σημειωθεί ότι στα παρακάτω σενάρια, οι παράμετροι του φορτίου και της θερμοκρασίας είναι σταθερές. Επιπλέον ότι το κατώτερο όριο αποφόρτισης της μπαταρίας, έχει προγραμματιστεί να είναι το 30%, καθώς και το ανώτερο της 80%. Αυτό το σενάριο δημιουργήθηκε με σκοπό, όταν δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια από ΑΠΕ να μπορεί ένα μικροδίκτυο να αποθηκεύει ενέργεια στους συσσωρευτές του ώστε να γίνεται πλήρη και σωστός κύκλος φόρτισης-αποφόρτισης των μπαταριών, καθώς και νυχτερινές ώρες που υπάρχει μικρότερη ζήτηση ενέργειας να μπορούν να φορτίσουν πλήρως, για να μπορούν να υποστηρίξουν ή να εξαλείψουν το σύστημα από ώρες αιχμής, αυτές οι μπαταρίες προφανώς μπορεί να είναι και ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

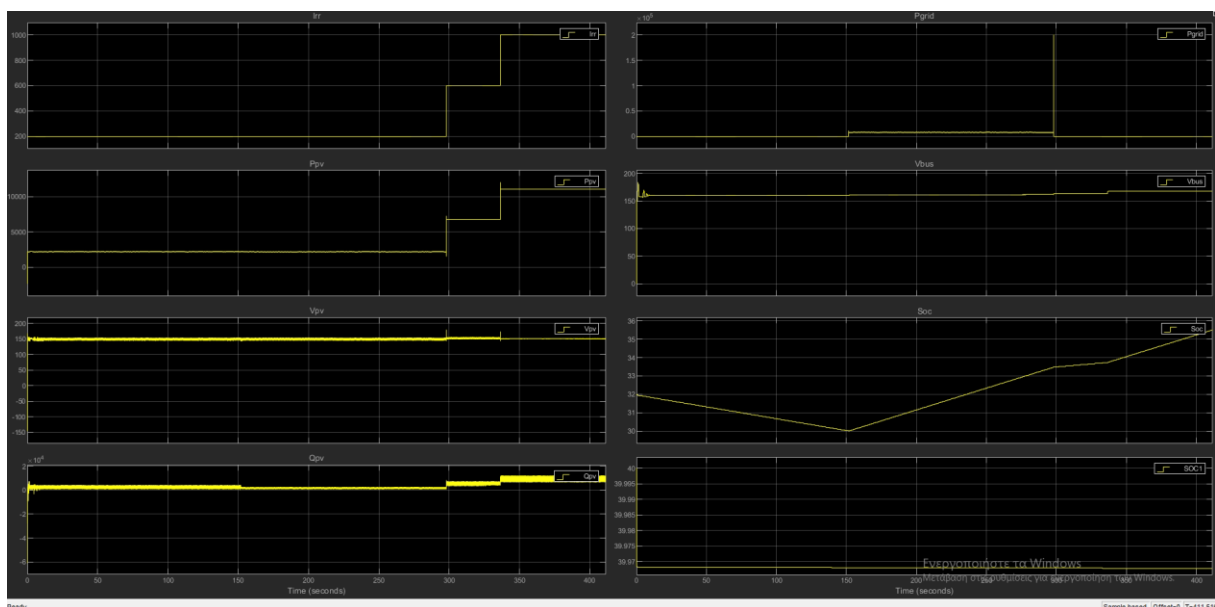
**Πίνακας 5: Σενάρια προσομοίωσης (Κατάσταση φόρτισης/Ακτινοβολία W/m<sup>2</sup>)**

Κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας	Ακτινοβολία W/m <sup>2</sup>
32 %	200
	600
	1000
50%	200
	600
	1000
78%	1000
	600
	200

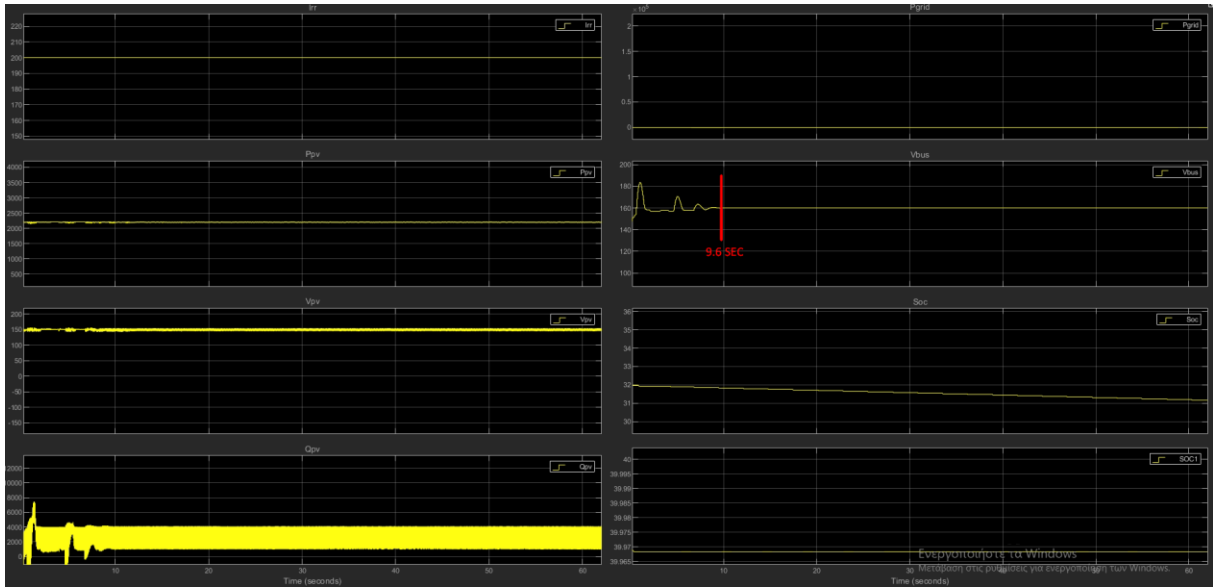
##### Περίπτωση 1:

Για την πρώτη περίπτωση, χρησιμοποιήσαμε όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6, αρχική τιμή φόρτισης της μπαταρίας στο 32% και ισχύς ακτινοβολίας 200 W/m<sup>2</sup>, έπειτα κάθε φορά που το σύστημα ισορροπούσε μετά τις αλλαγές προσθέτουμε μεγαλύτερη ακτινοβολία. Στην Εικόνα 37, φαίνεται μία γενική μορφή της προσομοίωσης. Καθώς και στην Εικόνα 38 φαίνεται το χρονικό της απόκρισης του συστήματος, όταν ορίζονται σαν μηδενικός χρόνος εκκίνησης μας αυτές οι παράμετροι. Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε πως στην αρχική κατάσταση στο 32% SOC και 200 W/m<sup>2</sup> ότι η μπαταρία ξεκινάει να δίνει στο σύστημα μας ενέργεια της μορφής DC, μέχρι το σημείο που έχει οριστεί ως το επίπεδο κατώτατης αποφόρτισης, το οποίο

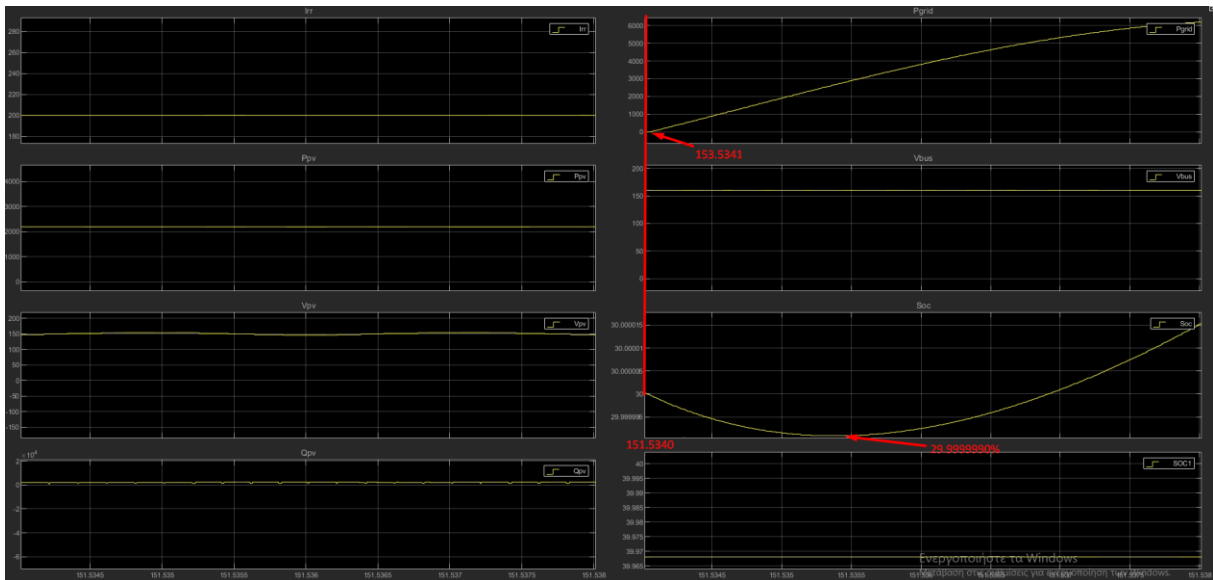
έχει ρυθμιστεί στο 30% ( μέσω του ελεγκτή που έχει δημιουργηθεί στο κυρίως δίκτυο ο οποίος συνδέετε με την μπαταρία αυτή). Την στιγμή που ουσιαστικά η μπαταρία φτάσει αυτό το κατώτατο επίπεδο, δίνει εντολή ο ελεγκτής για την εισαγωγή του AC-DC μετατροπέα, δηλαδή την έγχυση ενέργεια μέσω μετατροπής από τον άπειρο ζυγό (Αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να συμβεί και διαφορετικά, δηλαδή το σύστημα μας να συνδέεται με κάποιο άλλο σύστημα π.χ ανεμογεννήτρια κουμπωμένη σε DC ζυγό ενός γείτονα, και εφόσον το σύστημα του είχε περίσσια ενέργειας, να προσέφερε σε εμάς απευθείας σε DC, κάτι παρόμοιο θα το δούμε παρακάτω στα σενάρια μας). Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 39, η απόκριση του συστήματος είναι τόσο γρήγορη, τόσο ώστε η εισαγωγή ενέργειας από το δίκτυο να γίνεται σε χρόνο περίπου  $0.1 \times 10^{-3}$  sec, και το ποσοστό της αποφόρτισης της μπαταρίας είναι της τάξης  $0.1 \times 10^{-6}$  %. Τέλος όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις Εικόνα 36 και Εικόνα 39, στο σύστημα μας, ανάλογα με την ακτινοβολία εισόδου, η τάση μας είναι της τάξης από 158-172 V, ενώ η τάση αναφοράς μας είναι της τάξης των 165 V. Είναι βασικό να αναφερθεί ότι σε αυτό κύριο ρόλο παίζει ο DC-DC μετατροπέας. Τέλος όπως φαίνεται στην Εικόνα 40, μόλις η ακτινοβολία του ήλιου αποδώσει ενέργεια ίση και ελαφρώς μεγαλύτερη του φορτίου τότε διακόπτεται η τροφοδοσία από τον μετατροπέα και δίνει το Φ/Β στο μικροδίκτυο αυτό. Σε περίπτωση που η ενέργεια του Φ/Β είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του δικτύου το σύστημα μας προσφέρει όλη την ενέργεια στο φορτίο. Και ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης μπορεί να φορτίσει την μπαταρία μέσω του μετατροπέα.



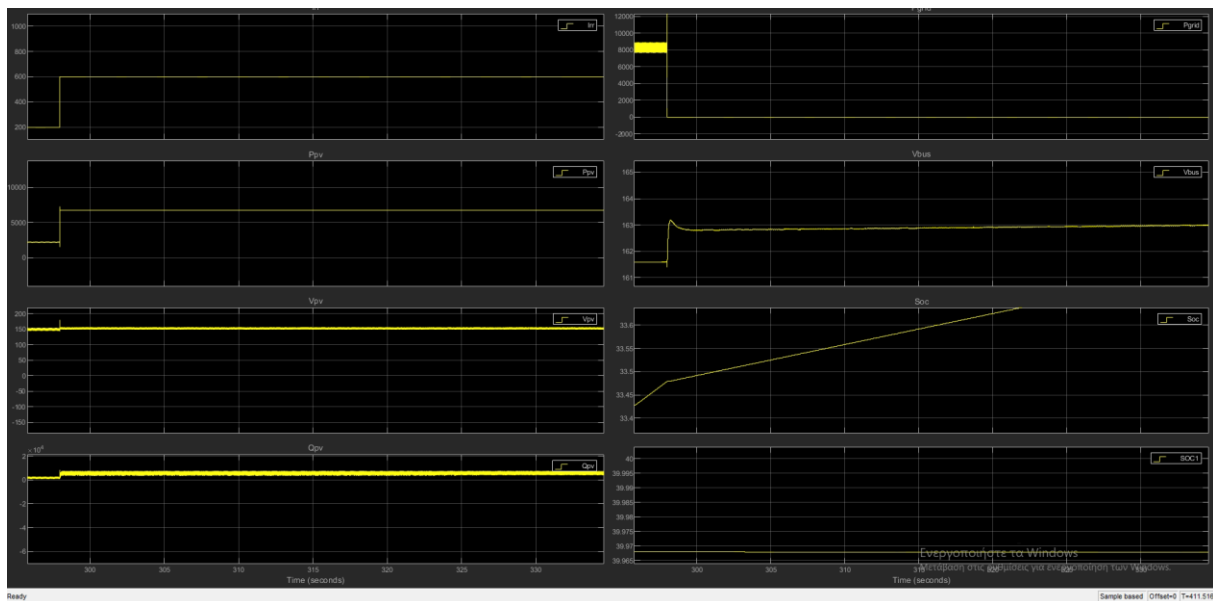
Εικόνα 37: Προσομοίωση περίπτωση 1, γενική εικόνα



**Εικόνα 38 Προσομοίωση περίπτωση 1, χρόνος απόκρισης κατά την εκκίνηση του συστήματος**



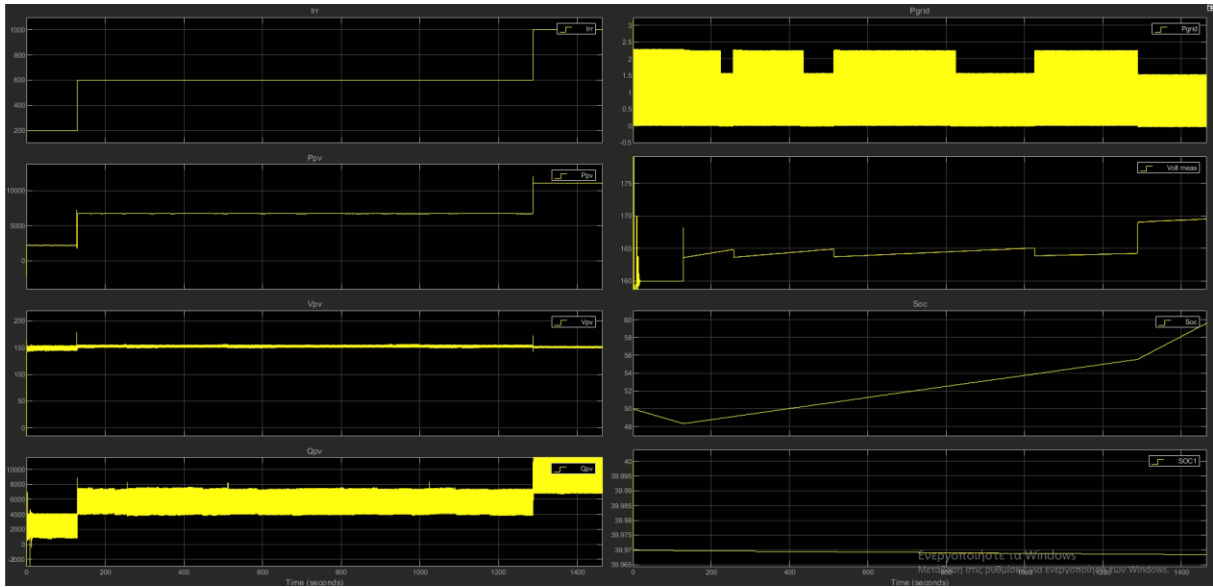
**Εικόνα 39: Προσομοίωση περίπτωση 1, χρόνος εναλλαγής μπαταρίας με τον AC-DC μετατροπέα**



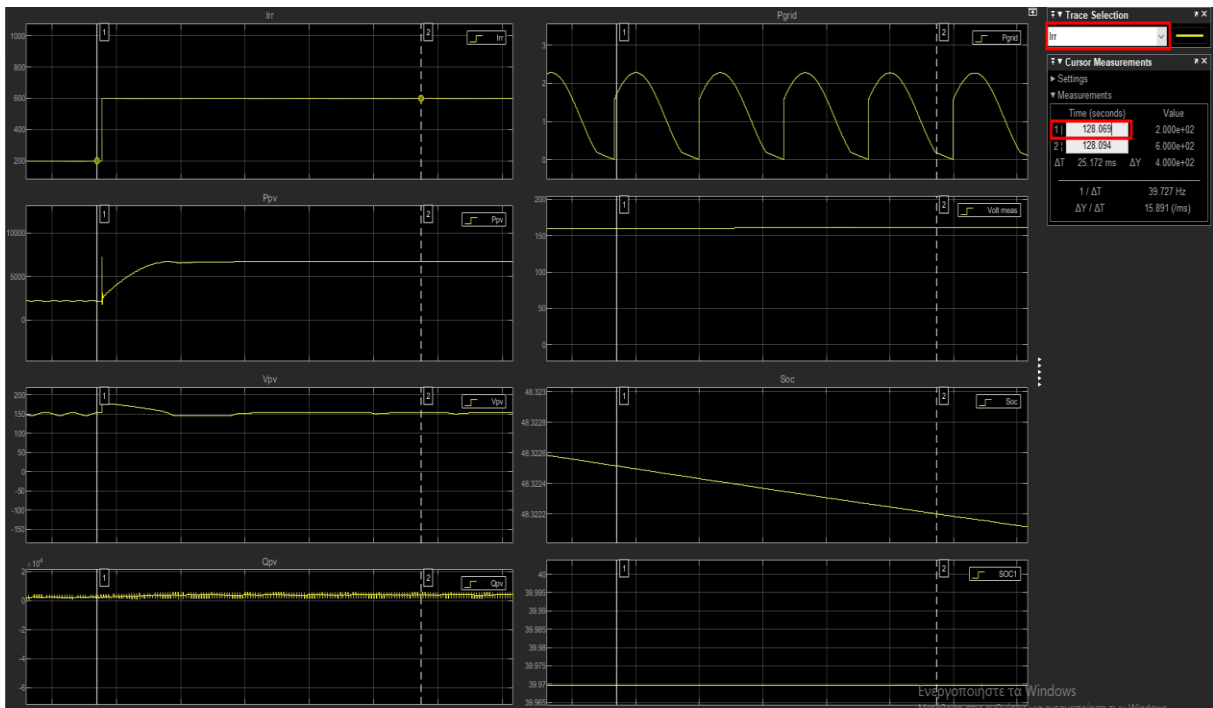
**Εικόνα 40: Προσομοίωση περίπτωση 1, σταμάτημα AC-DC μετατροπέα και τροφοδότηση μέσω του Φ/B**

#### Περίπτωση 2:

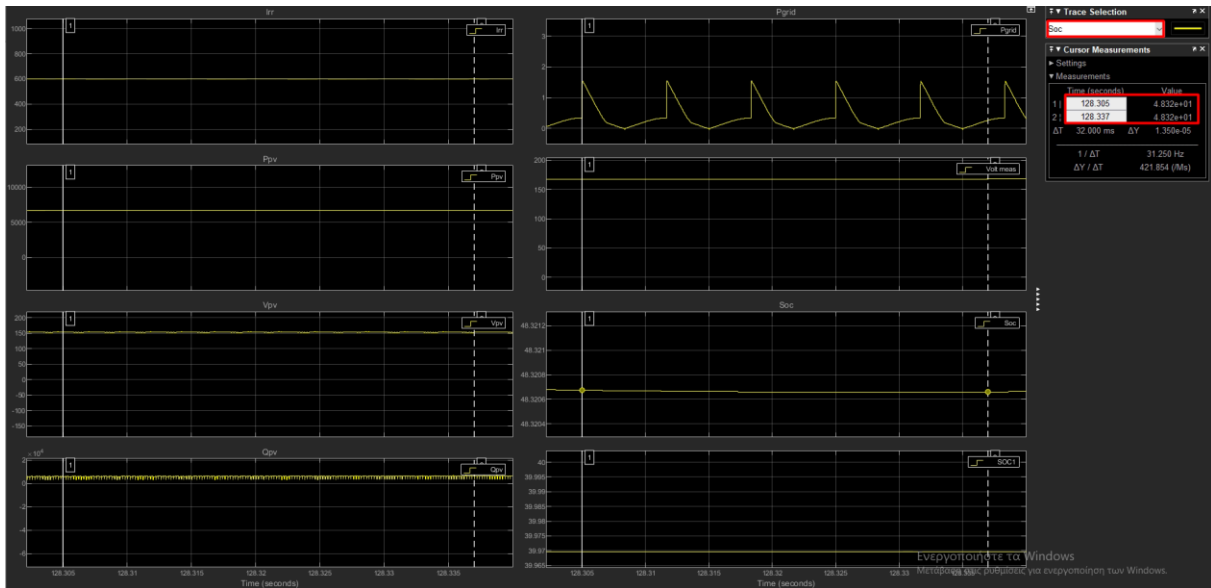
Κατά την δεύτερη περίπτωση το σύστημα, είχε στην αρχή μία μπαταρία φορτισμένη στο 50% της και αρχική τιμή ακτινοβολίας 200W/m<sup>2</sup>. Στην Εικόνα 41 βλέπουμε την γενική κατάσταση των μετρήσεων που προέκυψε κατά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, αυτό που παρατηρείται από αυτήν, είναι ότι αρχικά η ισχύς που έδινε η Φ/B μονάδα ήταν τόσο λίγη ώστε το φορτίο να προμηθεύεται ενέργεια και από την μπαταρία του συστήματος. Στην δεύτερη περίπτωση καθώς η ισχύς της ακτινοβολίας αυξήθηκε στα 600 W/m<sup>2</sup>, Εικόνα 42 και χρονική στιγμή 128.0696 Sec το Φ/B ξεκινάει σχεδόν ακαριαία (0.1mSec) να προσφέρει μεγαλύτερη ισχύ στο δίκτυο από αυτήν που έχει ανάγκη το φορτίο, έτσι βλέπουμε στην Εικόνα 43 ότι στο χρονικό 128.337 Sec να ξεκινάει η μπαταρία να φορτίζει, δηλαδή σε λιγότερο από 300mSec η μπαταρία έχει ξεκινήσει και φορτίζει. Τέλος κάτι που παρατηρήθηκε στην τελευταία κατάσταση ήταν ότι κατά την εισαγωγή ακτινοβολίας 1000W/m<sup>2</sup> η μπαταρία αποκρίθηκε για την αποθήκευση της επιπλέον ενέργεια σε χρόνο της τάξης msec ή ίσως και μικρότερο και δεν κατέστη δυνατόν να παρουσιαστή σε μορφή εικόνας.



Εικόνα 41: Προσομοίωση περίπτωση 2, γενική εικόνα



Εικόνα 42: Προσομοίωση περίπτωση 2, χρονικό απόκρισης από 200W/m<sup>2</sup> σε 600W/m<sup>2</sup>

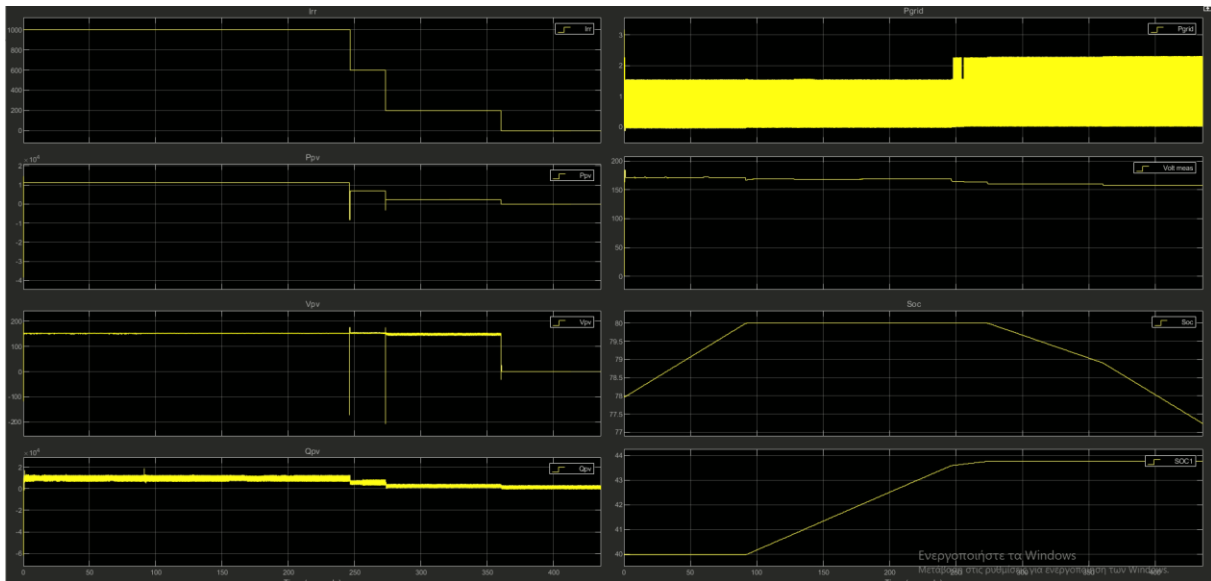


**Εικόνα 43: Προσομοίωση περίπτωση 2, χρόνος απόκρισης στην εναλλαγής κατάστασης της μπαταρίας από αποφόρτιση σε φόρτιση**

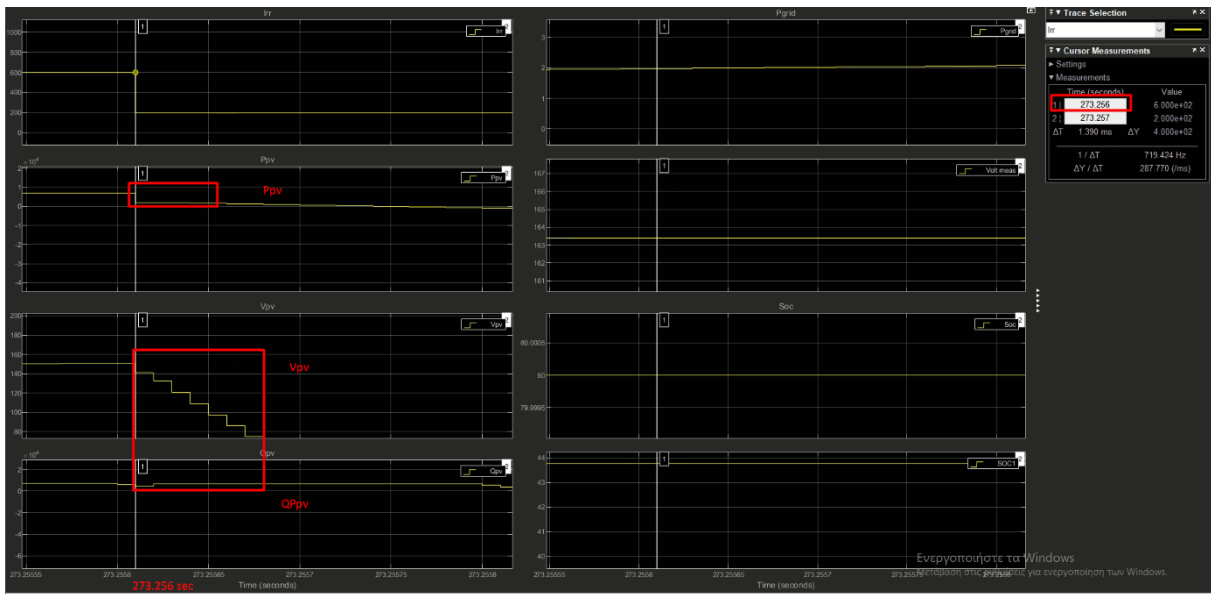
### Περίπτωση 3:

Κατά την τρίτη περίπτωση η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας στο σύστημα μας ήταν στο 78% καθώς και η ακτινοβολία  $1000 \text{ W/m}^2$ , αυτό φαίνεται και στην Εικόνα 44 η οποία παρουσιάζει το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι η μπαταρία φορτίζει με γρήγορο ρυθμό στο 80% το οποίο είναι και το ανώτερο επίπεδο που έχουμε θέσει για την διακοπή φόρτισης της. Για να εκμεταλλευτούμε όμως αυτήν την επιπλέον παραγόμενη ενέργεια, και το σύστημα να παραμείνει σε ευστάθεια, ο δίαυλος συνδέεται σε μία άλλη μπαταρία του μικροδικτύου ( αυτή θα μπορούσε να προσδιορίζεται από κάποιον αλγόριθμο ή κάποια συσκευή ). Η επιλογή και η σύνδεση με αυτήν την μονάδα αποθήκευσης έχει καθοριστεί από ένα σύστημα ελέγχου που όταν η μπαταρία του τοπικού συστήματος ξεπεράσει το 79.9% να συνδέεται κάποια γειτονική, αυτό ρυθμίστηκε ως εξής για τον λόγο ότι, όταν το τοπικό αυτό δίκτυο είχε περίσσια ενέργειας και δεν είχε που να την διοχετεύσει το σύστημα γινόταν ασταθές και η τάση ξεπερνούσε τα  $230 \text{ V DC}$ . Εν συνεχεία καθώς αλλάζουμε την ακτινοβολία εισόδου σε  $600 \text{ W/m}^2$  η μόνη διαφορά όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις είναι στο να φορτίζει η δεύτερη μπαταρία με πιο αργούς ρυθμούς. Τέλος όταν η μπαταρία πέσει στα επίπεδα  $200 \text{ W/m}^2$  Εικόνα 45-46 και κατ' επέκταση στα  $0 \text{ W/m}^2$  παρατηρούμε την συμμετοχή της μπαταρίας για την τροφοδοσία του φορτίου πάλι σε ταχύτητα της τάξης του  $1 \text{ mSec}$ .

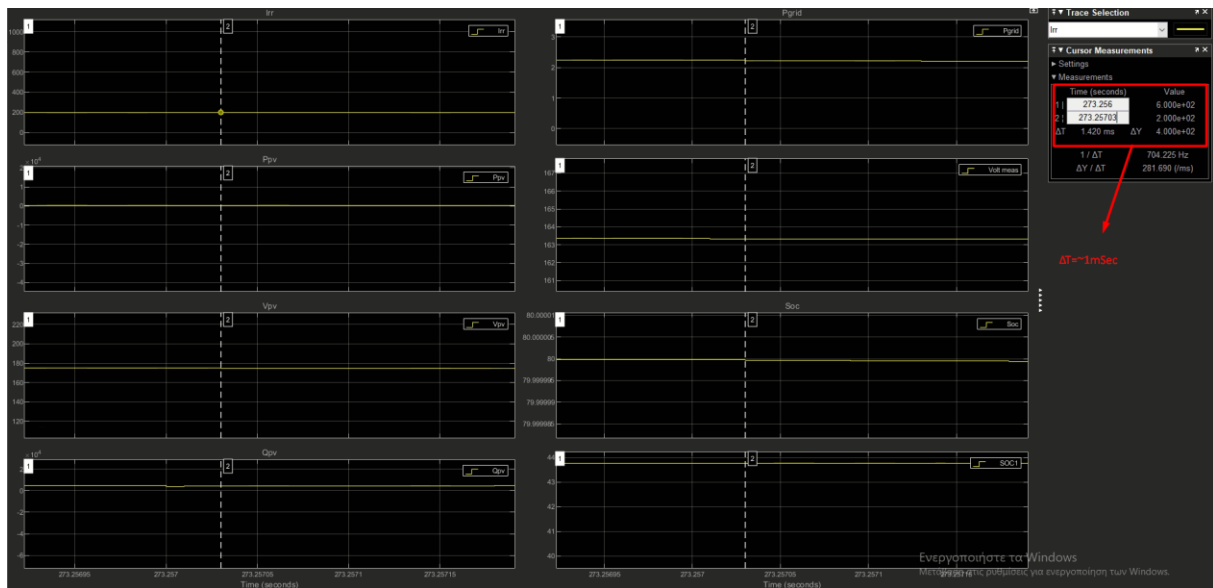




Εικόνα 44: Προσομοίωση περίπτωση 3, γενική εικόνα



Εικόνα 45: Προσομοίωση περίπτωση 3, χρόνος μετάβασης από 600W/m2 σε 200W/m2

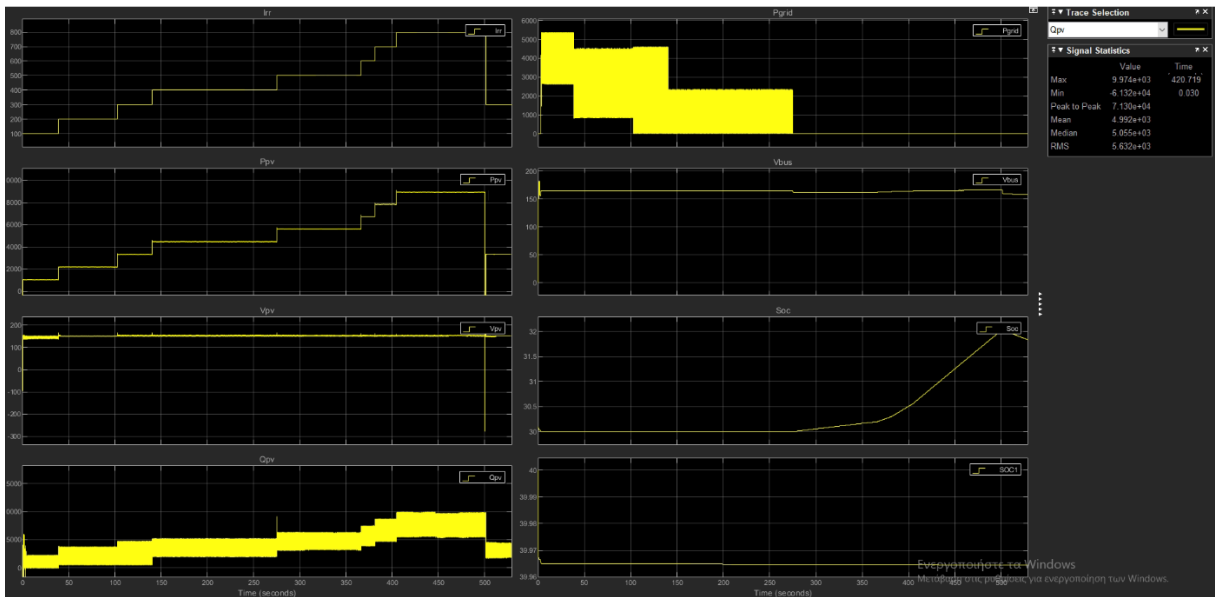


Εικόνα 46: Χρόνος απόκρισης της μπαταρίας 1mSec

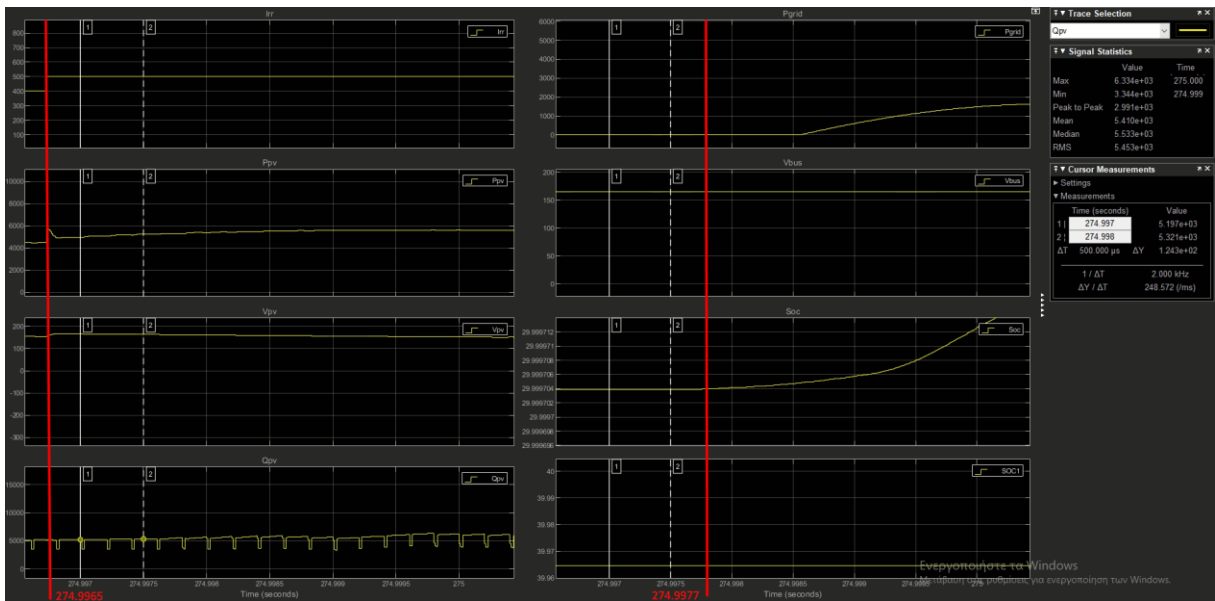
### 4.3.3 Σενάριο προσομοίωσης για σύστημα χωρίς δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από την διανομή.

Σε αρκετές περιπτώσεις το δίκτυο διανομής απαγορεύεται να χρησιμοποιηθεί για την φόρτιση συσσωρευτών ενέργειας, έτσι σε κάθε περίπτωση που συμμετέχει, οι μπαταρίες πρέπει να είναι αποσυνδεδεμένες. Για την παραπάνω περίπτωση, μορφοποιήθηκε κατάλληλα το σύστημα ελέγχου που αναφέρθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Έτσι στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, η ακτινοβολία πήρε διαδοχικές τιμές από 100W/m<sup>2</sup> μέχρι και 800 W/m<sup>2</sup> με βήμα 100W/m<sup>2</sup> ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του συστήματος αλλά και οι χρόνοι απόκρισης των συσκευών, επίσης στο συγκριμένο σύστημα δοκιμάστηκε η απότομη σύνδεση ενός φορτίου μεγαλύτερο από αυτό που μπορεί να υποστηρίξει το Φ/Β με την εκπίπτουσα ακτινοβολία.

Αρχικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 47, η ακτινοβολία 100W/m<sup>2</sup>, καθώς και η μπαταρία βρίσκεται στο κατώτατο όριο 30% κατάσταση φόρτισης, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ελεγκτές του συστήματος να εισάγουν ενέργεια από το δίκτυο διανομής ώστε να τροφοδοτήσουν το φορτίο, στην Εικόνα 47 μπορεί εύκολα κάποιος να διακρίνει ότι κάθε φορά που η ακτινοβολία αυξάνεται, αυξάνεται ανάλογα και η ισχύς που αποδίδεται στο όλο σύστημα από τις Φ/Β μονάδες, καθώς και αντίστροφος ανάλογα μειώνεται και η ισχύς του δικτύου. Κάποια στιγμή όταν η ισχύς προσφοράς από το Φ/Β έγινε μεγαλύτερη από την ζήτηση τότε σχεδόν ακαριαία (σε 1.2mSec) η μπαταρία άρχισε να φορτίζει Εικόνα 48.



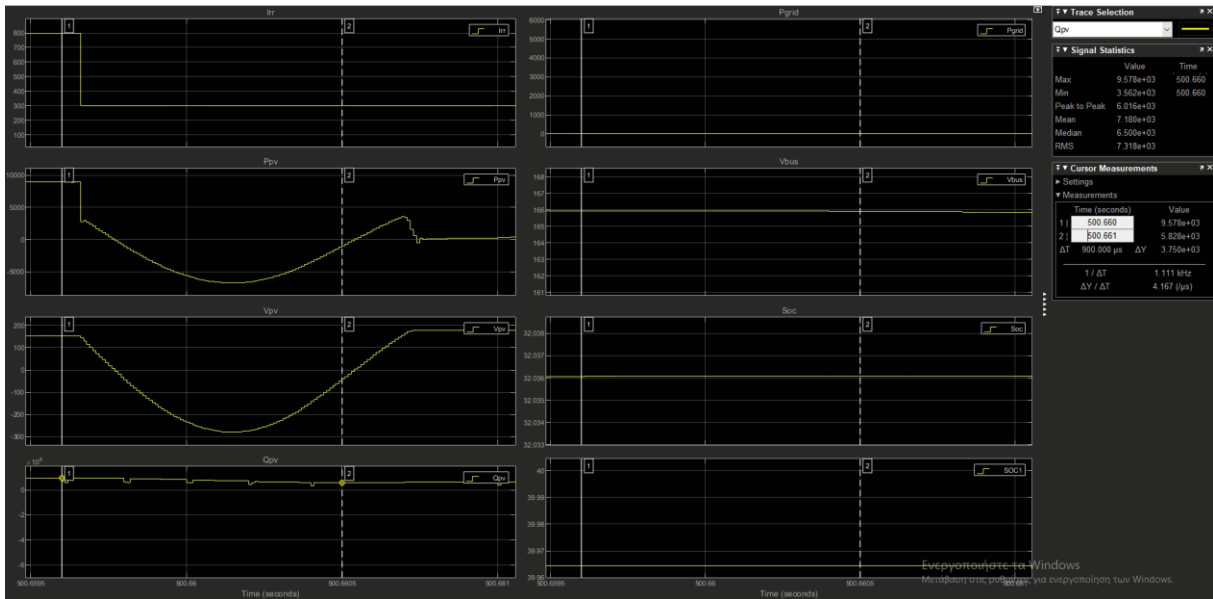
**Εικόνα 47: Γενικά αποτελέσματα, σύστημα χωρίς μπαταρία**



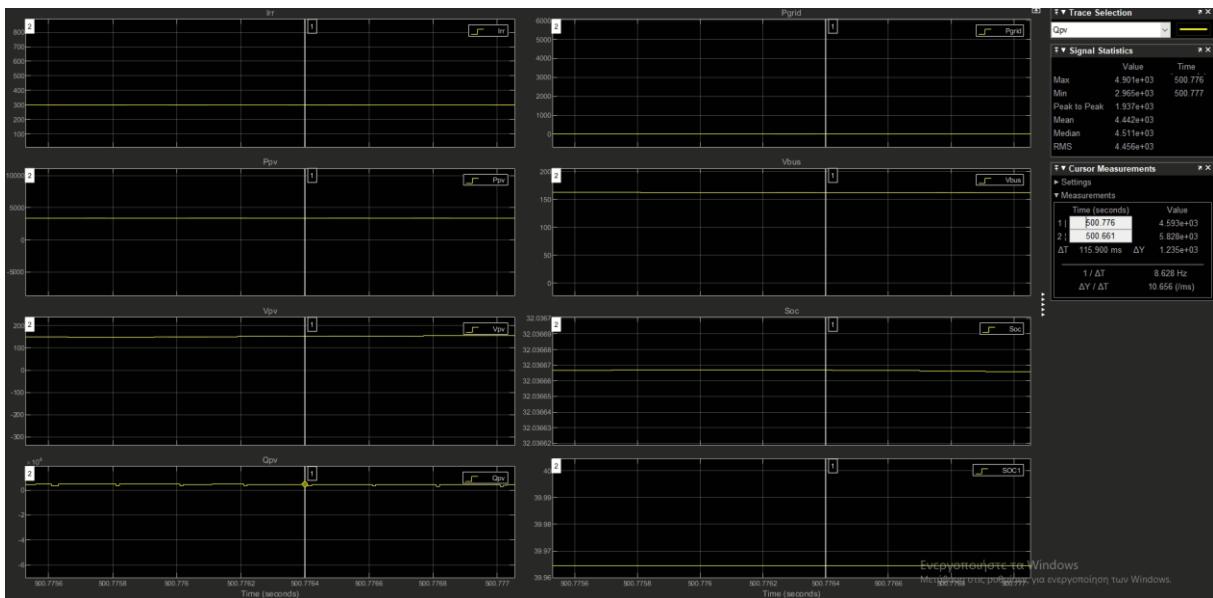
**Εικόνα 48: Απόκριση φόρτισης μπαταρίας απο τα Φ/Β**

Στην συνέχεια, δοκιμάστηκε η λειτουργία του συστήματος σε απότομη μείωση της ακτινοβολίας δηλαδή από τα 800W/m<sup>2</sup> στα 300W/m<sup>2</sup>, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα έλλειμμα στην παροχή ισχύος στο φορτίο κατά περίπου 1.3kW. Στην Εικόνα 49 φαίνεται ένα μικρό κομμάτι κατά την μετάβαση αυτή, όπως μπορούμε να διακρίνουμε λόγο της απότομης αλλαγής

φαίνεται η ισχύς να παίρνει αρνητικές τιμές για χρόνο περίπου ίσο με 900μSec. Έπειτα η τάση ξεκίνησε να μειώνεται, και σε χρόνο 116mSec η μπαταρία άρχισε να προσφέρει ξανά ενέργεια στο μικροδίκτυο Εικόνα 50 και επικράτησε ξανά ισορροπία.

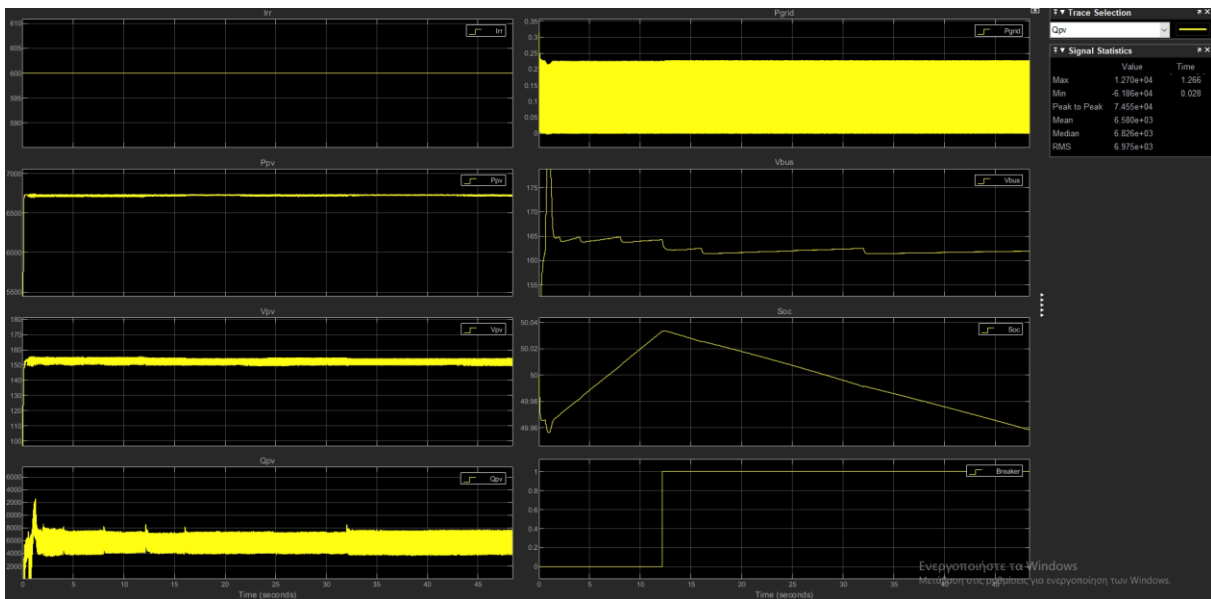


Εικόνα 49: Συμπεριφορά του συστήματος σε απότομη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας

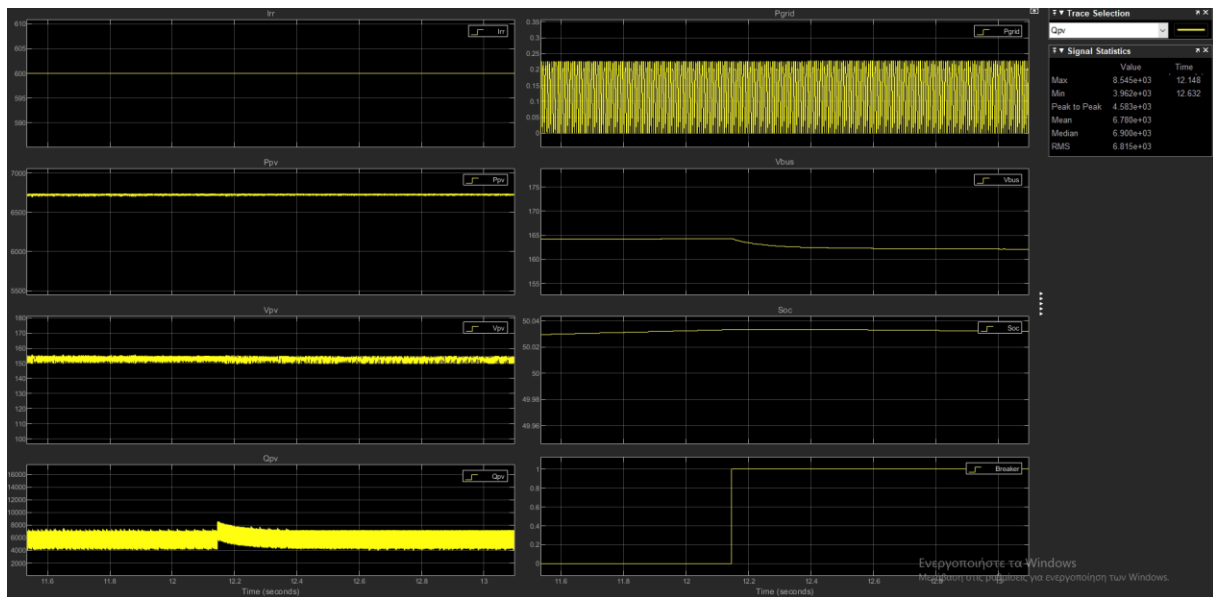


Εικόνα 50: Απόκριση μπαταρίας, σε απότομη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας

Στην τελευταία περίπτωση, το Φ/Β είχε σταθερή ακτινοβολία στα 600W/m<sup>2</sup> και παραγωγή ισχύος περίπου 6.7kW καθώς και η μπαταρία ήταν 50% φορτισμένη, μόλις το σύστημα βρήκε για λίγο ισορροπία Εικόνα 51, έκλεισε ένας διακόπτης και έδωσε παράλληλα τροφοδοσία σε ένα φορτίο 2kW. Σαν επακόλουθο ακαριαία είδαμε μια πτώση τάσης της τάξης 2 Volt και ο χρόνος απόκρισης της μπαταρίας ήταν της τάξης των 400mSec Εικόνα 52. Γενικά μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι πάλι το όλο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας μετά από μία αρκετά μεγάλη αλλαγή που προέκυψε καθώς και ο χρόνος απόκρισης του δεν ήταν και αρκετά μεγάλος.



**Εικόνα 51: Περίπτωση εισαγωγής δεύτερου φορτίου 2kW γενική μορφή**



**Εικόνα 52:** Χρόνος απόκρισης μπαταρίας και συμπεριφορά συστήματος κατά την εισαγωγή επιπλέον 2kW φορτίου στην έξοδο

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση όλα τα θέματα που αναφέρθηκαν σε αυτή την πτυχιακή, συμπεραίνουμε ότι σε πολλές περιπτώσεις ένα υβριδικό δίκτυο AC-DC θα ήταν πιο αποδοτικό και αποτελεσματικό σε σχέση με το παρόν, λόγω των λιγότερων σταδίων μετατροπής καθώς και συσκευών οι οποίες είναι πιο αποδοτικές όταν λειτουργούν σε συνεχές ρεύμα (EE: Κοινός φορτιστής για τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές από το 2024)[88].(Στις 7 Οκτωβρίου η Ελλάδα για πρώτη φορά κάλυψε επί πέντε ώρες τις ανάγκες ηλεκτροπαραγωγής εξολοκλήρου μέσω Ανανεώσιμων Πηγών, σε επίπεδα από 98% έως 121%, υπερβαίνοντας το μέγεθος του καθαρού φορτίου στο Σύστημα Μεταφοράς.)[89]. Η χρήση των μπαταριών θα ήταν αρκετά ωφέλιμη για την εξισορρόπηση της ζήτησης ενέργειας, εφόσον υπάρχει σωστή διαχείριση και έλεγχος τους. Ένα ακόμη όφελος κατά την χρήση DC διαύλου, και σύνδεση μπαταριών σε αυτόν είναι η ταχεία ανταπόκριση των μπαταριών στην υποστήριξη της ζήτησης των φορτίων συνήθως <1mSec και η σχετικά μικρή διακύμανση της τάσης που προκύπτει κατά την επέμβαση αυτή, και έτσι επιτυγχάνεται σύνδεση ευαίσθητων-σημαντικών συσκευών σε αυτό. Επιπλέον μερικές από τις μεγαλύτερες ίσως προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν αυτή την στιγμή είναι, στο κομμάτι της προστασίας του συστήματος, καθώς όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, όταν δημιουργείται κάποιο σφάλμα στον DC ζυγό, λόγω των πυκνωτών, της μη μηδενικής διέλευσης ρεύματος κλπ είναι αρκετά δύσκολη η ταχεία ανίχνευση και εξάλειψη των σφαλμάτων DC ( Στο κομμάτι της προσομοίωσης δοκιμάστηκε η χρήση διακοπών ACCBs σε σφάλματα στον DC δίαυλο και το σύστημα δεν προλάβαινε να ανταποκριθεί) , καθώς και η δημιουργία προτύπων που θα καθορίζουν ένα ή δύο επίπεδα DC τάσης για συσκευές και μικροσυσκευές στα σπίτια καταναλωτών π.χ 160VDC ή 326 VDC [35] για μεγάλες συσκευές όπως πλυντήρια, ηλ. κουζίνες, κλιματιστικά και θερμοσίφωνες και 5 VDC για φορητές συσκευές. Τέλος με βασικό γνώμονα τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούμε να διακρίνουμε ότι το τελικό φορτίο, στις περισσότερες περιπτώσεις θα συνεχίσει να λαμβάνει ενέργεια καθώς, είναι τέσσερις οι βασικές πηγές του, το δίκτυο διανομής, τα Φ/Β, η μπαταρία καθώς και ο δίαυλος που δημιουργεί αυτό το μικροδίκτυο. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις που δοκιμάστηκαν η συμμετοχή όλων των μέσων για να επιτευχθεί αυτό είναι της τάξης κλασμάτων του δευτερολέπτου, αυτό είναι πολύ σημαντικό για την ασφάλεια των συνδεδεμένων φορτίων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Photovoltaic-cell-mathematical-modelling-IJERTV6IS060166(parameters).
- [2] Design Analysis of DC-DC Converters Connected to a Photovoltaic Generator and Controlled by MPPT for Optimal Energy Transfer throughout a Clear Day
- [3] ΕΝΑΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΜΠΙΤΖΙΩΝΗΣ
- [4] P. Fairley, DC versus AC: the second war of currents has already begun [in my view], IEEE Power Energy Mag. 10 (2012) 103–104.
- [5] Marcelo Gustavo Molina et al. Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines
- [6] Khadija Tazi. Modeling and simulation of a residential microgrid supplied with PV/batteries in connected/disconnected modes—Case of Morocco
- [7] Single-switch ZVZCS quasi-resonant CLL isolated DC-DC converter for low-power 32" LCD TV
- [8] C.-H. Tsai, Y.-W. Bai, M.-B. Lin, R.J.R. Jhang, C.-Y. Chung, Reduce the standby power consumption of a microwave oven, IEEE Trans. Consum. Electron. 59 (2013) 54–61.
- [9] D. Salomonsson, A. Sannino, Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage DC systems, IET Electr. Power Appl. 1 (2007) 690–696
- [10] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, S. Mangold, Low voltage DC distribution system compared with 230VAC, in:IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011, pp. 340–345.
- [11] K. Techakittiroj, V. Wongpaibool, Co-existence between AC-distribution and DC-distribution: in the view of appliances, in: International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE), 2009, pp. 421–425.
- [12] DC microgrids and distribution systems: An overview  
Ahmed T. Elsayeda, Ahmed A. Mohamedb, Osama A. Mohammed
- [13] D. Becker, B. Sonnenberg, DC microgrids in buildings and data centers, in:IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011, pp. 1–7.
- [14] P. Gross, K. Godrich, Total DC integrated data centers, in: IEEE 27th International Telecommunication Conference (INTELEC), 2005, pp. 125–130.
- [15] S. Rajagopalan, B. Fortenbery, D. Symanski, Power quality disturbances within



DC data centers, in: IEEE 32nd International Telecommunication Energy Conference (INTELEC), 2010, pp. 1–7.

[16] G. AILee, W. Tschudi, Edison redux: 380 V dc brings reliability and efficiency to sustainable data centers, *IEEE Power Energy Mag.* 10 (2012) 50–59.

[17] L. Zhang, F. Jabbari, T. Brown, S. Samuelson, Coordinating plug-in electric vehicle charging with electric grid: valley filling and targetload following, *J. Power Sources* 267 (2014) 584–597.

[18] G. Mills, I. MacGill, Potential power system and fuel consumption impacts of plug in hybrid vehicle charging using Australian National Electricity Market load profiles and transportation survey data, *Electr. Power Syst. Res.* 116 (2014) 1–11.

[19] C. Liu, K.T. Chau, D. Wu, S. Gao, Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies, *Proc. IEEE* 101 (2013) 2409–2427.

[20] Y. Ota, H. Taniguchi, J. Baba, A. Yokoyama, Implementation of autonomous distributed V2G to electric vehicle and DC charging system, *Electr. Power Syst. Res.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.05.016>.

[21] M.A. López, S. Martín, J.A. Aguado, S. de la Torre, V2G strategies for congestion management in microgrids with high penetration of electric vehicles, *Electr. Power Syst. Res.* 104 (2013) 28–34.

[22] L. Drude, L.C. Pereira Junior, R. Rütther, Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid (V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazil in a smart grid environment, *Renew. Energy* 68 (2014) 443–451.

[23] M. Tabari, A. Yazdani, A DC distribution system for power system integration of plug-in hybrid electric vehicles, in: IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013, pp. 1–5.

[24] A. Mohamed, V. Salehi, T. Ma, O. Mohammed, Real-time energy management algorithm for plug-in hybrid electric vehicle charging parks involving sustainable energy, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 5 (2014) 577–586.

[25] B.E. Noriega, R.T. Pinto, P. Bauer, Sustainable DC-microgrid control system for electric-vehicle charging stations, in: 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1–10.

[26] L. Roggia, C. Rech, L. Schuch, J.E. Baggio, H.L. Hey, J.R. Pinheiro, Design of a sustainable residential microgrid system including PHEV and energy storage

- device, in: 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2011, pp. 1–9.
- [27] D.J. Hammerstrom, AC versus DC distribution systems: did we get it right? in: IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2007, pp. 1–5.
- [28] G. Seo, J. Baek, K. Choi, H. Bae, B. Cho, Modeling and analysis of DC distribution systems, in: IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011, pp. 223–227.
- [29] M.R. Starke, L.M. Tolbert, B. Ozpineci, AC vs. DC distribution: a loss comparison, in: IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2008, pp. 1–7.
- [30] F. Wang, Y. Pei, D. Boroyevich, R. Burgos, K. Ngo, AC vs. DC distribution for off-shore power delivery, in: IEEE 34th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics (IECON), 2008, pp. 2113–2118.
- [31] D. Salomonsson, A. Sannino, Low voltage DC distribution systems for commercial power systems with sensitive electronic loads, *IEEE Trans. Power Deliv.* 22 (2007) 1620–1627.
- [32] A. Sannino, G. Postiglione, M.H.J. Bollen, Feasibility of a DC network for commercial facilities, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 39 (2003) 1499–1507.
- [33] M.E. Baran, N.R. Mahajan, DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 39 (2003) 1596–1601.
- [34] R. Majumder, Aggregation of microgrids with DC system, *Electr. Power Syst. Res.* 108 (2014) 134–143.
- [35] D. Salomonsson, L. Söder, A. Sannino, An adaptive control system for a DC microgrid for data centers, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 44 (2008) 1910–1917.
- [36] A. Sannino, G. Postiglione, M.H.J. Bollen, Feasibility of a DC network for commercial facilities, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 39 (2003) 1499–1507.
- [37] M. Amin, Y. Arafat, S. Lundberg, S. Mangold, Low voltage DC distribution system compared with 230VAC, in: IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011, pp. 340–345.
- [38] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution, *IEEE Trans. Power Electron.* 25 (2010) 3066–3075.
- [39] Chandra, A., Singh, G. K., & Pant, V. (2020). Protection techniques for DC microgrid-A review. *Electric Power Systems Research*, 187, 106439.

- [40] Protection techniques for DC microgrid- A Review Ankan Chandra\*, G K Singh, Vinay Pant Table 3
- [41] N.O. Sokal, System oscillations from negative input resistance at power input port of switching-mode regulator, amplifier, DC/DC converter, or DC/AC inverter, in: IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, 1973, pp. 138–140.
- [42] R.D. Middlebrook, Input filter considerations in design and application of switching regulators, in: IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, 1976.
- [43] R.D. Middlebrook, Design techniques for preventing input-filter oscillations in switched-mode regulators, in: Proceedings of the Fifth National Solid State Power Conversion Conference, 1978.
- [44] X. Feng, Z. Ye, K. Xing, F.C. Lee, D. Borojevic, Individual load impedance specification for a stable DC distributed power system, in: 14th Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 99, vol. 2, 1999, pp. 923–929.
- [45] J. Sun, Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters, IEEE Trans. Power Electron. 26 (2011) 3075–3078.
- [46] X. Yu, M. Salato, An optimal minimum-component DC–DC converter input filter design and its stability analysis, IEEE Trans. Power Electron. 29 (2014) 829–840.
- [47] A.A. Amr, Radwan, A.-R.I. Yasser, Mohamed, Stabilization of mediumfrequency modes in isolated microgrids supplying direct online induction motor loads, IEEE Trans. Smart Grid 5 (2014) 358–370.
- [48] J. Yang, J.E. Fletcher, J. O'Reilly, Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables, IEEE Trans. Ind. Electron 59 (2012) 3827–3837 <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2162712>.
- [49] J. Do Park, J. Candelaria, Fault detection and isolation in low-voltage dc-bus microgrid system, IEEE Trans. Power Deliv. 28 (2013) 779–787 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2243478>.
- [50] D. Salomonsson, L. Söder, A. Sannino, Protection of low-voltage DC microgrids, IEEE Trans. Power Deliv. 24 (2009) 1045–1053 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2016622>.
- [51] A. Berizzi, A. Silvestri, D. Zaninelli, S. Massucco, Short-circuit current calculations

for DC systems, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 32 (1996) 990–997.

[52] Z. Shuai, D. He, Z. Xiong, Z. Lei, Z. John Shen, Comparative study of short-circuit fault characteristics for VSC-based DC distribution networks with different distributed generators, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron* 7 (2019) 528–540

<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2834542>.

[53] A. Meghwani, S. Chakrabarti, S.C. Srivastava, S. Anand, Analysis of fault characteristics in DC microgrids for various converter topologies, 2017 *IEEE Innov.*

*Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, ISGT-Asia 2017*, 2018,

pp. 1–6 <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2017.8378426>.

[54] W. Javed, D. Chen, M.E. Farrag, Y. Xu, System configuration, fault detection, location, isolation and restoration: a review on LVDC microgrid protections,

*Energies* (2019) 12 <https://doi.org/10.3390/en12061001>.

[55] A. Makkieh, A. Emhemed, D. Wang, A. Junyent-Ferre, G. Burt, Investigation of different system earthing schemes for protection of low-voltage DC microgrids, *J.*

*Eng.* (2019) 5129–5133 2019 <https://doi.org/10.1049/joe.2018.9365>.

[56] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution, *IEEE Trans. Power Electron* 25 (2010) 3066–3075

<https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2077682>

[57] T.R. De Oliveira, A.S. Bolzon, P.F. Donoso-Garcia, Grounding and safety considerations for residential DC microgrids, *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*

2014, pp. 5526–5532 <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049345>.

[58] J. Mohammadi, F. Badrkhani Ajaei, G. Stevens, Grounding the AC microgrid, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 55 (2019) 98–105 <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2864106>.

[59] D.K.J.S. Jayamaha, N.W.A. Lidula, A.D. Rajapakse, Ground fault analysis and grounding design considerations in DC microgrids, 2018 *IEEE 4th South. Power*

*Electron. Conf. SPEC 2018*, 2019, pp. 1–8 [https://doi.org/10.1109/SPEC.2018.](https://doi.org/10.1109/SPEC.2018.8636090)

8636090.

[60] M. Mobarrez, D. Fregosi, S. Bhattacharya, M.A. Bahmani, Grounding architectures for enabling ground fault ride-through capability in DC microgrids, 2017 *IEEE 2nd*

*Int. Conf. Direct Curr. Microgrids, ICDCM 2017*, 2017, pp. 81–87 [https://doi.org/](https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001026)

[10.1109/ICDCM.2017.8001026](https://doi.org/10.1109/ICDCM.2017.8001026)

[61] Protection techniques for DC microgrid- A review

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620302443?via%3Dihub>

[62] ] P. Caioli, R. Rodrigues, H. Zheng, Fault current limiting power converters for

- protection of DC microgrids, Conf. Proc. - IEEE SOUTHEASTCON, 2017, pp. 1–7  
<https://doi.org/10.1109/SECON.2017.7925392>.
- [63] S. Augustine, S.M. Brahma, M.J. Reno, Fault current control for DC microgrid protection using an adaptive droop, 2019 IEEE 28th Int. Symp. Ind. Electron. 2019, pp. 2591–2596 <https://doi.org/10.1109/isie.2019.8781462>
- [64] S. Mirsaiedi, X. Dong, D.M. Said, Towards hybrid AC/DC microgrids: Critical analysis and classification of protection strategies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90 (2018) 97–103 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.046>.
- [65] H. Sun, M. Rong, Z. Chen, C. Hou, Y. Sun, Investigation on the arc phenomenon of air DC circuit breaker, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 42 (2014) 2706–2707 <https://doi.org/10.1109/TPS.2014.2343257>.
- [66] R.M. Cuzner, G. Venkataramanan, The status of DC micro-grid protection, Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc. 2008), pp. 1–8 <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.382>.
- [67] D. Keshavarzi, E. Farjah, T. Ghanbari, Hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability, *IEEE Trans. Power Electron* 33 (2018) 2330–2338 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2690960>.
- [68] W. Liu, F. Liu, X. Zha, M. Huang, C. Chen, Y. Zhuang, An improved SSCB combining fault interruption and fault location functions for DC line short-circuit fault protection, *IEEE Trans. Power Deliv.* 34 (2019) 858–868 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2882497>.
- [69] B. Li, J. He, Y. Li, R. Li, A novel solid-state circuit breaker with self-adapt fault current limiting capability for LVDC distribution network, *IEEE Trans. Power Electron* 34 (2019) 3516–3529 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2850441>.
- [70] A. Meghwani, S.C. Srivastava, S. Chakrabarti, A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements, *IEEE Trans. Power Deliv.* 32 (2017) 172–181 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2555844>.
- [71] S.D.A. Fletcher, P.J. Norman, S.J. Galloway, P. Crolla, G.M. Burt, Optimizing the roles of unit and non-unit protection methods within DC microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid* 3 (2012) 2079–2087 <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2198499>.
- [72] ] I. Jahn, N. Johannesson, S. Norrga, Survey of methods for selective DC fault detection in MTDC grids, *IET Conf. Publ.* 2017, 2017, pp. 1–7 <https://doi.org/10.1049/cp.2017.0041>
- [73] J.P. Brozek, DC overcurrent protection - where we stand, Conf. Rec. - IAS Annu.

- Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc. 1992-Janua, 1992, pp. 1306–1310 <https://doi.org/10.1109/IAS.1992.244268>.
- [74] M.E. Baran, N.R. Mahajan, Overcurrent protection on voltage-source-converterbased multiterminal DC distribution systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* 22 (2007) 406–412 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.877086>.
- [75] K.A. Saleh, A. Hooshyar, E.F. El-Saadany, Hybrid passive-overcurrent relay for detection of faults in low-voltage DC grids, *IEEE Trans. Smart Grid* 8 (2017) 1129–1138 <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477482>.
- [76] L. Tang, B.T. Ooi, Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems, *IEEE Trans. Power Deliv.* 22 (2007) 1877–1884 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899276>.
- [77] J.D. Paez, D. Frey, J. Maneiro, S. Bacha, P. Dworakowski, Overview of DC-DC converters dedicated to HVdc grids, *IEEE Trans. Power Deliv.* 34 (2019) 119–128 <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2846408>.
- [78] G. Yang, F. Xiao, X. Fan, R. Wang, J. Liu, Three-phase three-level phase-shifted PWM DC-DC converter for electric ship MVDC application, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron* 5 (2017) 162–170 <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2620282>.
- [79] G.P. Adam, I.A. Gowaid, S.J. Finney, D. Holliday, B.W. Williams, Review of dc-dc converters for multi-terminal HVDC transmission networks, *IET Power Electron* 9 (2016) 281–296 <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.0530>.
- [80] S. Cui, J. Hu, R. De Doncker, Fault-tolerant operation of a TLC-MMC Hybrid DCDC converter for interconnection of MVDC and HVdc Grids, *IEEE Trans. Power Electron* 35 (2020) 83–93 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2911853>.
- [81] L. Qi, A. Antoniazzi, L. Raciti, DC distribution fault analysis, protection solutions, and example implementations, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 54 (2018) 3179–3186 <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2825437>.
- [82] Y.A. Harrye, K.H. Ahmed, A.A. Aboushady, DC fault isolation study of bidirectional dual active bridge DC/DC converter for DC transmission grid application, *IECON 2015 - 41st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.* 2015, pp. 3193–3198 <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392592>.
- [83] M.I. Rahman, K.H. Ahmed, D. Jovcic, Analysis of DC fault for dual-active bridge DC/DC converter including prototype verification, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron* 7 (2019) 1107–1115 <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2856759>.

- [84] R. Xie, Y. Shi, H. Li, Modular multilevel DAB (M2DAB) converter for shipboard MVDC system with fault protection and ride-through capability, 2015 IEEE Electr. Sh. Technol. Symp. ESTS 2015, 2015, pp. 427–432 <https://doi.org/10.1109/ESTS.2015.7157930>.
- [85] Y. Shi, R. Li, H. Li, Modular multilevel dual active bridge DC-DC converter with ZVS and fast DC fault recovery for battery energy storage systems, Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC. 2016-May, 2016, pp. 1675–1681 <https://doi.org/10.1109/APEC.2016.7468092>.
- [86] V. Ferreira, G. Buticchi, B. Cardoso, M. Liserre, Fault tolerance in multiple-active bridge converters applied in smart transformers, 2019 21st Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2019 ECCE Eur. 2019, pp. P.1–P.10 <https://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915477>.
- [87] Πανεπιστήμιο Πατρών, Αντώνιος Αλεξανδρίδης . «Εφαρμοσμένη Βελτιστοποίηση. Ενότητα 4». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE889>.
- [88] <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220930IPR41928/long-awaited-common-charger-for-mobile-devices-will-be-a-reality-in-2024#:~:text=By%20the%20end%20of%202024%2C%20all%20mobile%20phones%2C%20tablets%20and,obligation%20will%20extend%20to%20laptops.>
- [89] Battery Technologies for Grid-Level Large-Scale Electrical Energy Storage. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12209-019-00231-w>
- [90] Zsiborács, H., Baranyai, N. H., Vincze, A., Zentkó, L., Birkner, Z., Máté, K., & Pintér, G. (2019). Intermittent renewable energy sources: The role of energy storage in the european power system of 2040. *Electronics*, 8(7), 729.
- [91] D. Becker, B. Sonnenberg, DC microgrids in buildings and data centers, in: IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), 2011, pp. 1–7
- [92] K. Techakittiroj, V. Wongpaibool, Co-existence between AC-distribution and DC-distribution: in the view of appliances, in: International Conference on Computer and Electrical Engineering (ICCEE), 2009, pp. 421–425.
- [93] D. Jovcic, B.T. Ooi, Theoretical aspects of fault isolation on high-power direct current lines using resonant direct current/direct current converters, *IET Gener. Transm. Distrib.* 5 (2011) 153–160
- [94] A. Schon, M.M. Bakran, A new HVDC-DC converter with inherent fault clearing

capability, 2013 15th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2013, 2013 <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631739>.