



ΑΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΤΕΦ

ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Πτυχιακή εργασία

Του σπουδαστή του τμήματος Αυτοματισμού

του ΑΤΕΙ Πειραιά

Καλλούση Μιλτιάδη

Αριθμός μητρώου : 24305

ΘΕΜΑ:

«Μελέτη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος»

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

Επιβλέποντες:

Αλαφοδήμος Κωνσταντίνος – Καθηγητής

Παπουτσιδάκης Μιχάλης – Επίκουρος Καθηγητής

Φετφατζής Πρόδρομος – Εργαστηριακός συνεργάτης

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο / Η κάτωθι υπογεγραμμένος Μιλτιάδης Καλλούσης,

του Φάνη, με αριθμό μητρώου 24305 φοιτητής του Τμήματος **Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε.** του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφασης της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού 6μήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Επίσης δηλώνω υπεύθυνα ότι έχω παρακολουθήσει το σεμινάριο συγγραφής και εκπόνησης πτυχιακής εργασίας που διοργανώνεται από το Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε. κατά το Εαρινό Εξάμηνο του Ακ. Έτους 2018.

Ο Δηλών

Μιλτιάδης Καλλούσης

Ημερομηνία

25-06-2018

Στην Αριάδνη.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές του τμήματος Αυτοματισμού για το έργο και την γνώση που προσέφεραν τόσα χρόνια σε εμένα και τους συμφοιτητές μου.

Μέσα από την παρούσα εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αλαφοδήμο Κωνσταντίνο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εργαστηριακό συνεργάτη και φίλο κ. Πρόδρομο Φετφατζή για την αμέριστη συμπαράσταση κατά την διάρκεια της συγγραφής της πτυχιακής καθώς και για την άψογη συνεργασία κατά την διάρκεια της συμμετοχής μου στην ερευνητική ομάδα. Η βοήθεια και ή καθοδήγηση του ήταν εξαιρετικά πολύτιμη. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εργαστηριακό συνεργάτη κ. Κοφινά Παναγιώτη για την συνεργασία.

Ευχαριστώ τους γονείς μου για την αμέριστη στήριξη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Μικρό βιογραφικό:

Γεννήθηκα στην Χιμάρα το 1979. Το 1991 μετανάστευσα μαζί με την οικογένειά μου στην Κόρινθο όπου και τελείωσα την δευτεροβάθμια εκπαίδευση. Πέρασα στο Τμήμα Αυτοματισμού το εαρινό εξάμηνο 1999 – 2000. Εκπρόνησα την πρακτική μου άσκηση το εαρινό εξάμηνο 2007 – 2008 στο εργαστήριο Τεχνολογίας Πολυμέσων του τμήματος. Συμμετείχα από τον Απρίλιο του 2008 στην ερευνητική ομάδα του ΤΕΙ μαζί με τον κ. Π. Φετφατζή και τον κ. Π. Κοφινά υπό τον κ. Κ. Αλαφοδήμο συμβάλλοντας σε 5 δημοσιεύσεις και κάνοντας ο ίδιος δύο παρουσιάσεις στο διεθνές επιστημονικό συνέδριο eRA το 2008 και το 2009 καθώς και στην πρόταση για το πρόγραμμα ενίσχυσης ερευνητικών ομάδων στα ΤΕΙ ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ. Από τον Οκτώβριο του 2009 έως τον Φεβρουάριο του 2010 παρακολούθησα ενεργά ως ακροατής τα μαθήματα του πρώτου εξαμήνου φοίτησης του μεταπτυχιακού προγράμματος Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις που διοργανώνει το ΕΜΠ σε συνεργασία με το ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου εργαζόμουν σε περιστασιακή ή μόνιμη βάση στην Teleperformance ως τεχνικός τηλεφωνικής υποστήριξης για διάφορες εταιρείες παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Τον Οκτώβριο του 2010 ξεκίνησα να εργάζομαι ως τεχνικός οργάνων μέτρησης και αναλυτών στην εταιρεία ΤΕΚΗΜ ΑΕ. Τον Νοέμβριο του 2010 εξειδικεύτηκα στους αναλυτές στην Augusta Ιταλίας από την Socrate SRL. Έως τον Ιανουάριο του 2015 εργάστηκα στα πλαίσια της εκκίνησης του έργου Elefsina Refinery Upgrade Project (ERUP) και κατόπιν στα πλαίσια του συμβολαίου συντήρησης αναλυτών του διυλιστηρίου Ελευσίνας του ομίλου των Ελληνικών Πετρελαίων που έλαβε η εταιρεία μου σε συνεργασία με την Ιταλική εταιρεία Socrate SRL. Από τον Φεβρουάριο του 2015 έως και σήμερα εργάζομαι ως International Service Engineer στο αντικείμενο των αναλυτών και οργάνων μέτρησης για την εταιρεία Hobre Instrumnets BV που εδρεύει στο Purmerend της Ολλανδίας. Στο διάστημα αυτό έχω συμμετάσχει μεταξύ άλλων σε projects για εταιρείες όπως η BP, Statoil, Shell, MHPS (Mitsubishi Hitachi Power Systems), SBM offshore, Exxonmobil, Lukoil, Repsol, Nestle κ.α. σε διεθνές εργασιακό περιβάλλον.

Περίληψη:

Η εργασία αυτή χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Στο πρώτο μέρος (κεφάλαια 1-2) γίνεται μια θεωρητική παρουσίαση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων ξεκινώντας από την φωτεινή ακτινοβολία στο διάστημα και καταλήγοντας στην λειτουργία του αντιστροφέα. Στο δεύτερο μέρος (Κεφάλαιο 3) παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός διασυνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού αντιστροφέα (PV Inverter) στο πρόγραμμα προσομοίωσης MATLAB Simulink. Στο τρίτο παρουσιάζεται μια εργασία σχετικά με δίκτυα υπολογιστών μέσω της οικιακής ηλεκτρικής καλωδίωσης. Τέλος στο τέταρτο μέρος (παράρτημα) παρατίθενται οι δημοσιεύσεις που παρήχθησαν κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου (Απρίλιος 2008 – Δεκέμβριος 2010).

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
1.1 Ο Ήλιος	14
1.2 Παραγωγή ενέργειας στον ήλιο.....	15
1.3 Η φύση του φωτός.....	17
1.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	20
1.5 Ακτινοβολία του μέλανος σώματος.....	21
1.6 Από το διάστημα στην γη	23
1.7 Ηλιακή γεωμετρία.....	25
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	31
2.1 Ιστορική αναδρομή.....	32
2.2 Η επαφή pn.....	33
2.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο	35
2.4 Ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιημένου Φ/Β στοιχείου.....	37
2.5 Το μοντέλο των δύο διόδων	39
2.6 Ο συντελεστής πληρώσεως (fill factor / FF)	41
2.7 Οι εσωτερική παράλληλη (R_{sh}) και εν σειρά αντίσταση (R_s)	42
2.8 Εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την διάρκεια της ηλιοφάνειας — μοντέλο JW	42
2.9 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	45
2.10 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών από Φωτοβολταϊκά.....	45
2.10.1 Απλοί ρυθμιστές φόρτισης από Φ/Β με άμεση σύνδεση	46
2.10.2 Ρυθμιστής φόρτισης εύρεσης (MPPT) για Φ/Β.....	47
2.11 Ο αντιστροφέας (inverter)	49
2.11.1 Είδη αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β	49
2.11.2 Αντιστροφέας πηγής τάσης (voltage source inverters).....	50
2.11.3 Λειτουργία αντιστροφέα εύρους παλμών	50
2.12 Παρασιτική χωρητικότητα και ρεύμα διαρροής στα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίς μετασχηματιστή.....	53

2.12.1 Ρεύμα διαρροής σε Φ/Β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή	54
2.12.2 Ελαχιστοποίηση του ρεύματος διαρροής.....	56
2.13 Παραλλαγές τοπολογιών σχετικά με το ρεύμα διαρροής.....	57
2.13.1 Τοπολογία Η5	58
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	63
3.1 Εισαγωγή	64
3.2 Τα προγράμματα προσομοίωσης	64
3.3 Η φωτοβολταϊκή συστοιχία	64
3.4 Προσομοίωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας	67
3.5 Γενική περιγραφή του συστήματος	68
3.5.1 Ο σταθεροποιητής συνεχούς τάσης (DC stabilizer)	69
3.5.2 Ο αντιστροφέας (inverter)	70
3.6 Κύκλωμα ελέγχου, φορτίο, φίλτρο	71
3.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης	72
3.8 Συμπεράσματα – Προοπτικές	74
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	77
4.1 Εισαγωγή	78
4.2 Ιστορική αναδρομή.....	78
4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικής καλωδίωσης	79
4.4 Είδη θορύβου στην ηλεκτρική εγκατάσταση.....	80
4.5 Η τεχνολογία.....	82
4.6 Μετάδοση δεδομένων από φάση σε φάση.....	83
4.7 Η έννοια του υβριδικού δικτύου	84
4.8 Μετρήσεις.....	86
4.8.1 Μετρήσεις δικτύου μέσω ηλεκτρικής καλωδίωσης.....	86
4.8.2 Ανάλυση μετρήσεων δικτύου μέσω ηλεκτρικής καλωδίωσης.....	91
4.8.3 Μετρήσεις υβριδικού δικτύου.....	91

4.8.4 Ανάλυση μετρήσεων υβριδικού δικτύου.....	95
4.9 Σύγκριση με τα δεδομένα του 2018 – Προοπτικές.....	95
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4 ^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....	97
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ).....	99
Design Simulation for a 3-Phase grid connected PV Inverter in Simulink	101
Analysis and Simulation of a 3-phase Transformerless PV Inverter	113
Transformerless 3-phase PV Inverter simulation for efficient building installations	119
Local network data transmission via the power line grid.....	127
Hybrid local area network evaluation	137

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1. Ο Ήλιος και το άρμα του σε κρατήρα του 435 π.Χ. Από το Βρετανικό μουσείο, Λονδίνο.....	14
Σχήμα 1.2. Η διάμετρος του ήλιου σε σχέση με την γη και το πλανητικό σύστημα.....	15
Σχήμα 1.3. Σύντηξη 2 πρωτονίων.....	16
Σχήμα 1.4. Παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο: 2 πυρήνες υδρογόνου συντήκονται για να σχηματίσουν ένα πυρήνα δευτερίου, ένα ποζιτρόνιο και ένα νεutrίνο. Ο πυρήνας του δευτερίου συντήκεται με ένα άλλο πυρήνα υδρογόνου για να σχηματίσει ήλιο-3. Στο τελικό βήμα, δύο πυρήνες ηλίου-3 συντήκονται για να σχηματίσουν ένα πυρήνα ηλίου-4 και δύο πυρήνες υδρογόνου.....	17
Σχήμα 1.5. Μήκος κύματος.....	19
Σχήμα 1.6. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	20
Σχήμα 1.7. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	23
Σχήμα 1.8. Σύγκριση φασματικών ακτινοβολιών μέλανος σώματος στους 5800 K AMO και AM1,5.....	24
Σχήμα 1.9. Μάζα αέρος 1 (AM1) και μάζα αέρος 1,5 (AM1,5).....	25
Σχήμα 1.10. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ζενίθ – ναδίρ και η ημερησία κίνηση του ήλιου.....	26
Σχήμα 1.11. Αζιμούθιο, ηλιακή ανύψωση και γωνία ζενίθ.....	27
Σχήμα 2.1. Η διατομή της ένωσης p-n του φωτοβολταϊκού κυττάρου και ενδεικτική αναπαράσταση δημιουργίας φωτορεύματος.....	36
Σχήμα 2.2. Ισοδύναμο κύκλωμα μίας διόδου με αντίσταση φωτοβολταϊκού κυττάρου.....	37
Σχήμα 2.3. α) Η χαρακτηριστική καμπύλη I – V. β) Η καμπύλη P – V.....	39
Σχήμα 2.4. Ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου των δύο διόδων.....	40
Σχήμα 2.5. Γραφική απεικόνιση καμπύλης I-V για υπολογισμό Fill Factor.....	41
Σχήμα 2.6. Γραφική αναπαράσταση επίδρασης R_s και R_{sh} στην καμπύλη I-V.....	42
Σχήμα 2.7. Διάγραμμα ροής για φορτιστές με MPPT με αλγόριθμο Perturb and Observe.....	47
Σχήμα 2.8. Διάγραμμα ροής για φορτιστές με MPPT με αλγόριθμο Incremental Conductance.....	48
Σχήμα 2.9. α) Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης. β) Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής ρεύματος.....	49
Σχήμα 2.10. Αντιστροφέας εύρους παλμών ενός σκέλους.....	50
Σχήμα 2.11. Διαμόρφωση εύρους παλμού.....	51
Σχήμα 2.12. Έλεγχος του αντιστροφέα μέσω $V_{control}$ και V_{tri}	52
Σχήμα 2.13. Ημιτονοειδής αντιστροφέας εύρους παλμών.....	53
Σχήμα 2.14. Κύκλωμα συντονισμού ρεύματος διαρροής σε Φ/Β πάνελ.....	54
Σχήμα 2.15. Φ/Β πάνελ συμπεριφέρεται ως πυκνωτής.....	55
Σχήμα 2.16. Η επιλογή υψηλής συχνότητας PWM έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες τάσεις και αποδεκτές στάθμης ρεύμα διαρροής.....	56
Σχήμα 2.17. Η τοπολογία H5 σε λειτουργία θετικής ημι-περιόδου, D5, D4 σε συχνότητα ανοιγο – κλεισίματος και η D1 ανοιχτή, από πατέντα [2.15].....	58
Σχήμα 2.18. Η τοπολογία H5 από πατέντα [2.15].....	59
Σχήμα 3.1. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου.....	65
Σχήμα 3.2. Απόδοση Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).	67
Σχήμα 3.3. Ισχύς Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).	67
Σχήμα 3.4. Θερμοκρασία Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).....	67
Σχήμα 3.5. Ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).	67
Σχήμα 3.6. Μπλοκ διάγραμμα διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.....	68
Σχήμα 3.7. Μπλοκ διάγραμμα σταθεροποιητή συνεχούς τάσης.....	69
Σχήμα 3.8. Τάση εξόδου σταθεροποιητή συνεχούς τάσης.....	69

Σχήμα 3.9. Κύκλωμα αντιστροφέα στο Simulink.	70
Σχήμα 3.10. Τάση εξόδου αντιστροφέα (φάση με φάση αριστερά, φάση με ουδέτερο δεξιά).	71
Σχήμα 3.11. Κύκλωμα προσομοίωσης στο Simulink.	72
Σχήμα 3.12. Η τάση εξόδου (φάση με ουδέτερο) μετά το φίλτρο LC (πάνω) και πριν το φίλτρο LC (κάτω).	73
Σχήμα 3.13. Η τάση εξόδου (φάση με φάση) μετά το φίλτρο LC (πάνω) και πριν το φίλτρο LC (κάτω).	73
Σχήμα 3.14. Η τάση εξόδου VRMS (κάτω) και η THD (πάνω).	74
Σχήμα 4.1. Το φάσμα συχνοτήτων της ηλεκτρικής παροχής, των σημάτων X10 και εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για τα δίκτυα μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης.	82
Σχήμα 4.2. Το φάσμα συχνοτήτων της ορθογώνιας διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών (OFDM).	83
Σχήμα 4.3. Δύο φάσεις δημιουργούν έναν πυκνωτή στον οικιακό πίνακα.	84
Σχήμα 4.4. Υβριδικό δίκτυο.	85
Σχήμα 4.5. Παροχέτευση TCP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίωσης ~ 9 m.	87
Σχήμα 4.6. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίωσης ~ 9 m.	88
Σχήμα 4.7. Παροχέτευση UDP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίωσης ~ 9 m.	88
Σχήμα 4.8. Παροχέτευση TCP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m.	88
Σχήμα 4.9. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m.	89
Σχήμα 4.10. Παροχέτευση UDP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m.	89
Σχήμα 4.11. Παροχέτευση TCP με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.	89
Σχήμα 4.12. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά σε στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.	90
Σχήμα 4.13. Παροχέτευση UDP με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.	90
Σχήμα 4.14. Πακέτα δεδομένων που δεν παραδόθηκαν με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.	90
Σχήμα 4.15. Κάτοψη κτιρίου και σημεία μετρήσεων υβριδικού δικτύου.	92
Σχήμα 4.16. Παροχέτευση δικτύου μέσω ηλεκτρικής εγκατάστασης με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση στα σημεία 1 – 2, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή 45 Mbps.	93
Σχήμα 4.17. Παροχέτευση υβριδικού δικτύου με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση στα σημεία 1 – 2, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 31 Mbps.	93
Σχήμα 4.18. Παροχέτευση ασυρμάτου δικτύου με τερματικά στα σημεία 1 – 2, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 29 Mbps.	93
Σχήμα 4.19. Παροχέτευση δικτύου μέσω ηλεκτρικής εγκατάστασης με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις στα σημεία 1 – 3, μήκος καλωδίωσης ~ 30 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή 43 Mbps.	94
Σχήμα 4.20. Παροχέτευση υβριδικού δικτύου με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις στα σημεία 1 – 3, μήκος καλωδίωσης ~ 30 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 36 Mbps.	94
Σχήμα 4.21. Παροχέτευση ασυρμάτου δικτύου με τερματικά που βρίσκονται στα σημεία 1 – 3, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 30 Mbps.	95
Σχήμα 4.22. Homeplug.org 23-06-2018.	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ο ήλιος και το φως

1.1 Ο Ήλιος

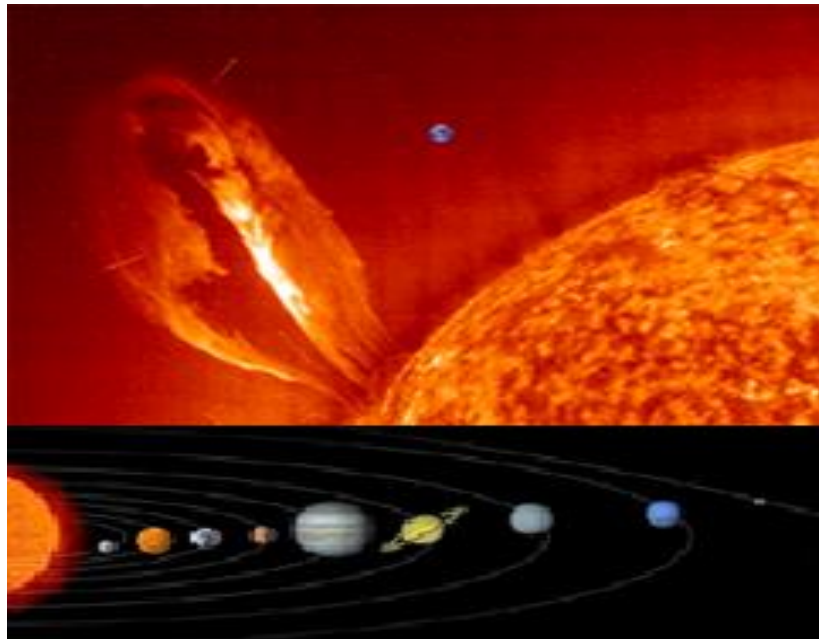
Σύμφωνα με την ελληνική μυθολογία, ο Ήλιος ήταν γιος του Τιτάνα Υπερίωνα και της Ευρυδίκης (ή Θείας). Αδελφές του ήταν η Σελήνη και η Ηώ (Αυγή). Από τον 5^ο π.Χ. αιώνα ο Ήλιος δεν εθεωρείτο αυτοτελής θεότητα και ταυτιζόταν με τον Φοίβο Απόλλωνα, δίδυμο αδελφό της Αρτέμιδος και γιο του Δία και της Λητούς. Γεννήθηκε στη Δήλο όπου δημιουργήθηκε ένας μεγάλος λατρευτικός χώρος. Σύμφωνα με ορισμένες μάλιστα εκδοχές ο δίσκος του Ήλιου παρομοιαζόταν με ένα χρυσό τέθριππο άρμα, το οποίο έσερναν τέσσερα ολόλευκα άλογα, ο Ηώς, ο Αιθίοψ, ο Βρόντης και ο Στερόπηξ που έβγαζαν από τα ρουθούνια τους φλόγες και φως (Σχήμα 1.1). Όρθιος πάνω στο άρμα του ο ακούραστος θεός εξακόντιζε γύρω του πίδακες φωτός. Οι Ρόδιοι ιδιαίτερα λάτρευαν τον Ήλιο ως το δημιουργό θεό της φυλής τους. Το κολοσσιαίο του άγαλμα από τον Λίνδιο Χάρη ήταν ένα από τα επτά θαύματα του κόσμου. Τον Ήλιο ως θεότητα τον συναντούμε και σε άλλους λαούς της αρχαιότητας με άλλη βέβαια ονομασία. Έτσι ήταν ο Σάμας των Βαβυλωνίων, ο Ελ των Φοινίκων και των Χαναναίων, ο Μολώχ των Αμμωνιτών, ο Χιμώχ των Μωαβιτών, ο Αμμων – Ρα των αρχαίων Αιγυπτίων, ο Σούρια των αρχαίων Ινδών και ο Μίθρα των αρχαίων Περσών [1.1] .



Σχήμα 1.1. Ο Ήλιος και το άρμα του σε κρατήρα του 435 π.Χ. Από το Βρετανικό μουσείο, Λονδίνο.

Το ηλιακό μας σύστημα αποτελείται από τον ήλιο και τους πλανήτες, αστεροειδείς και κομήτες, που περιστρέφονται γύρω του. Η απόσταση του ηλίου από την γη είναι 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα, με μικρές αποκλίσεις κατά την διάρκεια του έτους λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της γης. Ο ήλιος είναι ένας μεσαίου μεγέθους αστέρας, υπάρχουν στο

σύμπαν κατά πολύ μεγαλύτεροι, θερμότεροι και φωτεινότεροι αστέρες. Η απόσταση του όμως από την γη σχετικά με την απόσταση του κοντινότερου μετά από αυτόν αστέρα το κάνει να φαίνεται μεγαλύτερος και λαμπρότερος στον γήινο ουρανό από οποιονδήποτε άλλο αστέρα. Ο ήλιος έχει διάμετρο 1.4 εκατομμύρια χιλιόμετρα (Σχήμα 1.2) και όπως όλοι οι αστέρες, δεν βρίσκεται ούτε σε στερεά ούτε σε υγρή ή αέρια μορφή, βρίσκεται σε μορφή πλάσματος [1.3]. Το πλάσμα είναι η τέταρτη κατάσταση της ύλης και η συνηθέστερη μορφή της. Ο ήλιος είναι αραιός και σε αέρια μορφή στην επιφάνεια του και γίνεται πυκνότερος προς τον πυρήνα του λόγω βαρύτητας. Αποτελείται από υδρογόνο (75 % της μάζας ή 92.1% των ατόμων), ήλιο (helium 25% της μάζας και 7.8% των ατόμων), το 0.1% αποτελείται από άλλα βαρύτερα στοιχεία, κυρίως άνθρακα, άζωτο, οξυγόνο, νέον, μαγνήσιο, πυρίτιο και σίδηρο κ.α.

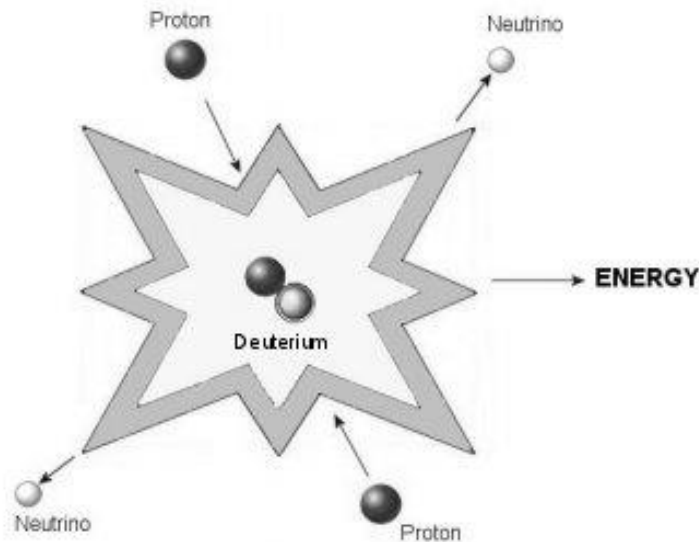


Σχήμα 1.2. Η διάμετρος του ήλιου σε σχέση με την γη και το πλανητικό σύστημα.

1.2 Παραγωγή ενέργειας στον ήλιο

Η διαδικασία σύμφωνα με την οποία η ενέργεια του ηλίου δημιουργείται είναι σχετικά απλή. Δύο πυρήνες υδρογόνου (H) συντήκονται για να σχηματιστεί ένας πυρήνας δευτερίου (D ή H₂), ένα ποζιτρόνιο και ένα νεutrίνο (Σχήμα 1.3). Ο πυρήνας του δευτερίου συντήκεται με ένα άλλο πυρήνα υδρογόνου και σχηματίζουν ήλιο – 3 (He). Μετά από αυτό δύο πυρήνες

ηλίου – 3 συντήκονται για να σχηματιστεί ένας πυρήνας ηλίου – 4 και δύο πυρήνες υδρογόνου, που ξεκινούν την διαδικασία από την αρχή [1.4]. Η θερμότητα και το φως του ηλίου προέρχονται από αυτή την αντίδραση σύντηξης.

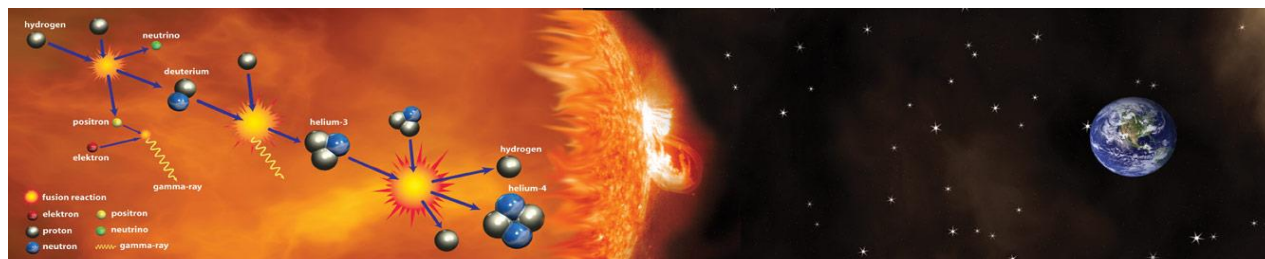


Σχήμα 1.3. Σύντηξη 2 πρωτονίων.

Ένας πυρήνας υδρογόνου (πρωτόνιο) στον Ήλιο πρέπει να περιμένει κατά μέσο όρο πέντε δισεκατομμύρια χρόνια για να συντηχθεί. Το δεύτερο βήμα, στο οποίο το ήλιο – 3 παράγεται από δευτέριο και υδρογόνο, συμβαίνει κατά μέσο όρο μετά από 1,4 δευτερόλεπτα, και το τελικό βήμα, η παραγωγή του ηλίου – 4 χρειάζεται 240000 χρόνια. Η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της σύντηξης μετατρέπεται σε φωτόνια: φως (Σχήμα 1.4).

Όταν η αντίδραση πραγματοποιηθεί, τα φωτόνια του φωτός που έχουν παραχθεί μπορούν κάποια μέρα να φτάσουν στη Γη, χρειάζονται ακόμη υπομονή. Ένα φωτόνιο ξεκινά το ταξίδι για τη Γη με την ταχύτητα του φωτός, αλλά σχεδόν αμέσως πέφτει πάνω σε ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο σκεδάζει το φωτόνιο σε τυχαία κατεύθυνση. Αυτό συμβαίνει ξανά και ξανά. Το μέσο φωτόνιο χρειάζεται περισσότερα από 20000 χρόνια για να κάνει το ταξίδι των 695000 χιλιομέτρων από το κέντρο του Ήλιου μέχρι την επιφάνειά του, το οποίο μεταφράζεται σε μια «παθητική» ταχύτητα 4 μέτρων την ώρα. Μετά από αυτό το μακρύ και ακανόνιστο ταξίδι, το φωτόνιο καλύπτει τα υπόλοιπα 149 εκατομμύρια χιλιόμετρα μέχρι τη Γη με τη

συνηθισμένη ταχύτητα του φωτός και 8 περίπου λεπτά αργότερα φτάνει τελικά στον προορισμό του.



Σχήμα 1.4. Παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο: 2 πυρήνες υδρογόνου συντήκονται για να σχηματίσουν ένα πυρήνα δευτερίου, ένα ποζιτρόνιο και ένα νεutrίνο. Ο πυρήνας του δευτερίου συντήκεται με ένα άλλο πυρήνα υδρογόνου για να σχηματίσει ήλιο-3. Στο τελικό βήμα, δύο πυρήνες ηλίου-3 συντήκονται για να σχηματίσουν ένα πυρήνα ηλίου-4 και δύο πυρήνες υδρογόνου.

1.3 Η φύση του φωτός

Το φως είναι ενέργεια. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό εάν αφήσουμε στον ήλιο ένα μαύρο αντικείμενο. Αναλυτικότερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι το φως κατά την διάδοση του περιγράφεται συνήθως ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ενώ κατά την παραγωγή ή την απορρόφηση του περιγράφεται συνήθως με διακριτές ποσότητες ενέργειας που ονομάζονται φωτόνια, το καθένα από τα οποία μπορεί να θεωρηθεί ως άυλο «σωματίδιο». Το φως του ηλίου γίνεται αντιληπτό από τα μάτια μας ως άσπρο επειδή είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών χρωμάτων που παράγουν το λευκό φως. Κάθε μια από τις ορατές και αόρατες περιοχές του φάσματος του ηλιακού φωτός έχει διαφορετική στάθμη ενέργειας. Στο ορατό μέρος του φάσματος (από το ερυθρό στο ιώδες) το ερυθρό είναι χαμηλής και το ιώδες υψηλής ενεργειακής στάθμης. Στο υπέρυθρο μέρος του φάσματος το φως δεν είναι ορατό αλλά μπορεί να γίνει αντιληπτό ως θερμότητα [1.5]. Η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει χαμηλότερης στάθμης ενέργεια από την ορατή. Η υπεριώδες ακτινοβολία που δεν είναι ορατή αλλά προκαλεί το μαύρισμα του δέρματος έχει περισσότερη ενέργεια από την ορατή ακτινοβολία.

Το ορατό φως είναι ένα πολύ μικρό κομμάτι του φάσματος. Μελέτες δείχνουν ότι ο τρόπος με τον οποίο μια ακτίνα φωτός με μία άλλη ή με υλικά αντικείμενα μπορεί να αναλυθεί εάν θεωρήσουμε ότι η φωτεινή ακτινοβολία διαδίδεται στον χώρο ως κύμα. Για αυτό τον λόγο

είναι χρήσιμο να χαρακτηρίσουμε την φωτεινή ακτινοβολία με παραμέτρους σχετιζόμενες με κύματα. Όλα τα κύματα έχουν μια χαρακτηριστική απόσταση που ονομάζεται μήκος κύματος. Το μήκος κύματος αντιστοιχίζεται σε συχνότητα. Η συχνότητα είναι ο αριθμός των επαναλήψεων κατά ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μετάδοσης. Συνεπώς ένα κύμα με μεγάλη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών έχει μεγάλο μήκος κύματος και μικρότερη συχνότητα από ένα κύμα με μικρότερες αποστάσεις (περισσότερες κορυφές στο ίδιο διάστημα). Το μήκος κύματος και η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογα. Η ερυθρή ακτινοβολία έχει μήκος κύματος περίπου 0,66 μm και συχνότητα περίπου 453 terrahertz, η ιώδης ακτινοβολία περίπου 0,44 μm και συχνότητα περίπου 682 terrahertz. Οι ακτίνες Χ έχουν ακόμα πιο μικρό μήκος κύματος και περισσότερη ενέργεια. Τα μικροκύματα (μήκος κύματος της τάξεως εκατοστών) μεταφέρουν πολύ μικρότερες ποσότητες ενέργειας. Η ταχύτητα του φωτός είναι σταθερή και ισούται με $c \sim 3 \cdot 10^8$ m/s [1.6].

Μαθηματικοί τύποι:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

- ν : η συχνότητα του φωτός
 λ : το μήκος κύματος του φωτός
 c : η ταχύτητα του φωτός

$$E = \nu * h \quad (1.2)$$

- E : ενέργεια κάθε φωτονίου
 ν : η συχνότητα του φωτός
 h : η σταθερά του Planck (6.626×10^{-34} J · s)

Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (1.1) και (1.2) έχουμε την εξίσωση (1.3).

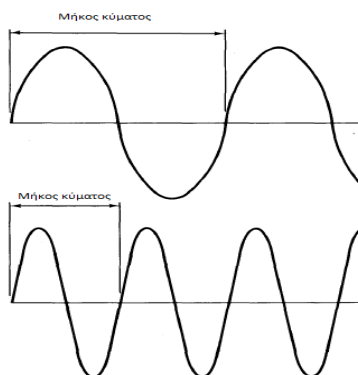
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

E : ενέργεια

λ : μήκος κύματος

c : η ταχύτητα του φωτός

Από την σχέση (1.3) μπορούμε να καταλάβουμε γιατί η ενέργεια που μεταφέρουν τα φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος είναι μικρότερη από αυτή που μεταφέρουν τα φωτόνια μικρού μήκους κύματος.



Σχήμα 1.5. Μήκος κύματος.

1.4 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Το άθροισμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αυτό διαχωρίζεται στις ακόλουθες επιμέρους περιοχές σύμφωνα με το μήκος κύματος:

Ακτίνες γ (10-12 m)

Ακτίνες X (10-10 m)

Υπεριώδης ακτινοβολία (10-7 m)

Ορατό μέρος (400 – 700 *10-9 m)

Ιώδες

Κυανό

Πράσινο

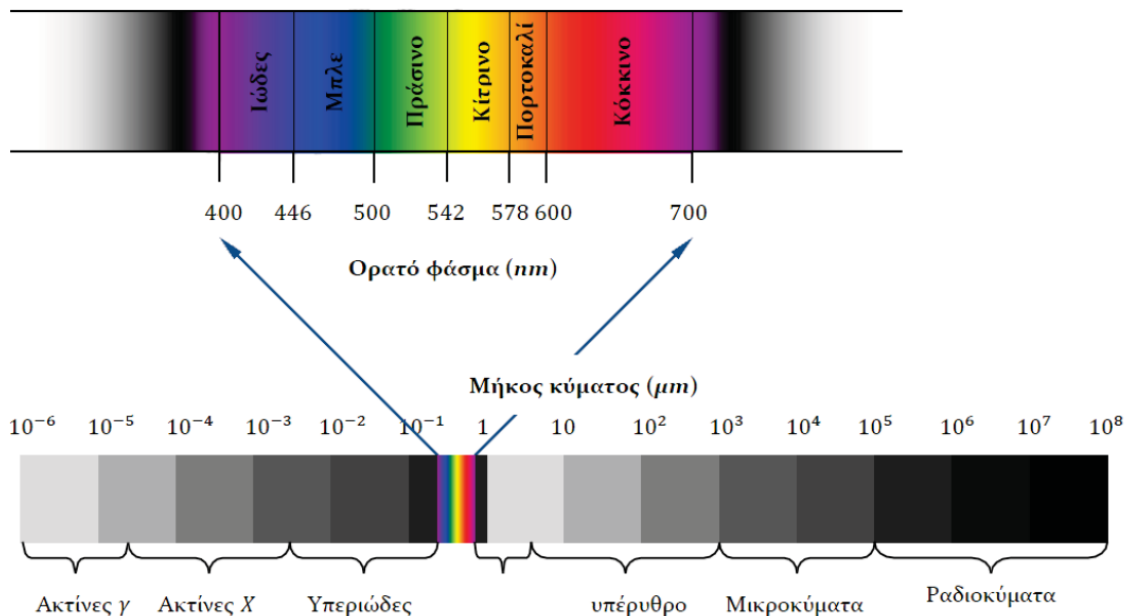
Κίτρινο

Ερυθρό

Υπέρυθρη ακτινοβολία (10-4 m)

Μικροκύματα (10-3 m)

Ραδιοκύματα (1 m)



Σχήμα 1.6. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

1.5 Ακτινοβολία του μέλανος σώματος

Με την ονομασία μέλαν σώμα χαρακτηρίζουμε κάθε υλικό που έχει την ιδιότητα να απορροφά τελείως την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας [1.7]. Επίσης απορροφά όλη την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης. Ένα τέτοιο υλικό θα πρέπει να έχει μαύρο χρώμα οπωσδήποτε. Αφού το μέλαν σώμα έχει την δυνατότητα να απορροφά όλες τις συχνότητες θα μπορεί και να τις εκπέμπει. Συνεπώς θα έχει συνεχές φάσμα εκπομπής. Η σύλληψη του μέλανος σώματος είναι ουσιώδης για την μελέτη της μετάδοσης ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Αφού απορροφά τελείως κάθε συχνότητας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης για όλα τα υλικά. Επίσης αποτελεί τέλεια πηγή ακτινοβολίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης για πραγματικές πηγές ακτινοβολίας [1.8]. Αυτό συμβαίνει διότι ένα μέλαν σώμα θα πρέπει να παραμένει σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του. Συνεπώς θα εκλύει ακριβώς όση ενέργεια απορροφά.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα μας ενδιαφέρει η λειτουργία του μέλανος σώματος ως πηγή στο ορατό μέρος του φάσματος που σε κάποια προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ως μοντέλο του ήλιου. Η φασματική ακτινοβολία που εκπέμπεται σε αυτή την περίπτωση δίδεται από τον νόμο του Planck (1.4). Η φασματική ακτινοβολία μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος.

$$F(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1 \right)} \quad (1.4)$$

λ	το μήκος κύματος του φωτός (m).
T	η θερμοκρασία του μέλανος σώματος (Kelvin).
F	η φασματική ακτινοβολία σε $Wm^2\mu m^{-1}$.
h	η σταθερά του Planck (Joule*s).

- c η ταχύτητα του φωτός (m/s).
 K η σταθερά του Boltzmann (joule/Kelvin).

Η συνολική πυκνότητα ισχύος προκύπτει από τον τύπο (1.5) [1.9]:

$$H = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

- σ η σταθερά Stefan – Boltzmann.
 T η θερμοκρασία του μέλανος σώματος σε βαθμούς Kelvin.

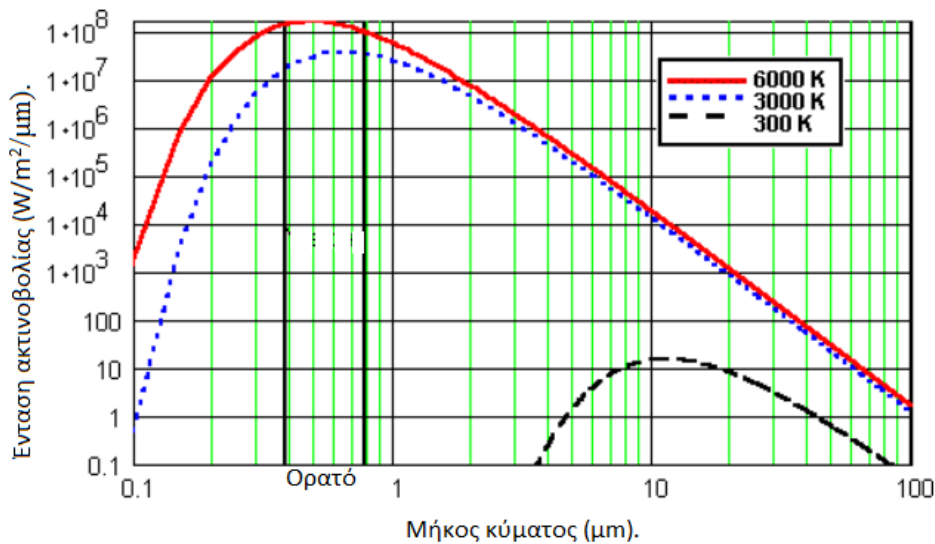
Μια επιπλέον σημαντική παράμετρος του μέλανος σώματος σαν πηγή ενέργειας, είναι το μήκος κύματος στο οποίο η τιμή της ενέργειας της εκπεμπόμενης φασματικής ακτινοβολίας είναι η μεγαλύτερη του φάσματος. Δηλαδή το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η μεγαλύτερη ισχύς. Αυτό υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Wien:

$$\lambda_p (\mu m) = \frac{2900}{T} \quad (1.6)$$

- λ_p το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπεται η υψηλότερη φασματική ακτινοβολία.
 T η θερμοκρασία του μέλανος σώματος σε Kelvin.

Όταν η θερμοκρασία του μέλανος σώματος αυξάνεται, η φασματική κατανομή και η ισχύς της ακτινοβολίας μεταβάλλεται. Σε θερμοκρασία δωματίου (300 K) ένας άνθρωπος ή μία λάμπα σβησμένη εκπέμπει ακτινοβολία σε μήκη κύματος αρκετά μεγαλύτερα από 1 μm . Αρκετά μακριά από το ορατό μέρος του φάσματος. Εάν το μέλαν σώμα θερμανθεί στους 3000 K, θα

εκπέμπει ακτινοβολία στο ερυθρό μέρος του φάσματος. Φαίνεται στο σχήμα 1.7 ότι το φάσμα μετατοπίζεται σε μήκη κύματος εντός του ορατού μέρους. Εάν η θερμοκρασία αυξηθεί στους 6000 K, η ακτινοβολία διαχέεται κατά μήκος του ορατού φάσματος. Τότε το φως που εκπέμπεται γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι ως λευκό. Το σχήμα 1.7 συγκρίνει τη ακτινοβολία στις 3 αυτές θερμοκρασίες (300, 3000, 6000 K). Είναι ξεκάθαρο ότι το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας [1.10].



Σχήμα 1.7. Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας.

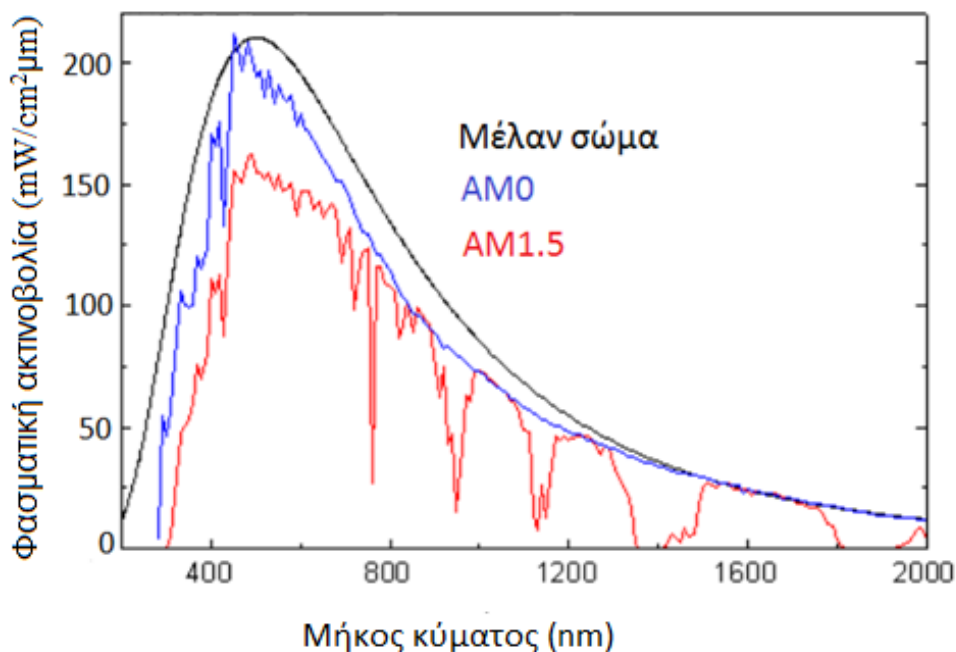
1.6 Από το διάστημα στην γη

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην γήινη ατμόσφαιρα ένα μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας αφαιρείται λόγω της σκέδασης ή της απορρόφησης από τα μόρια του αέρα και τα σύννεφα. Οι σκεδαστές αυτοί είναι είτε τα μόρια της ατμόσφαιρας είτε αερολύματα (aerosols). Η ακτινοβολία που δεν διασκορπίζεται και δεν ανακλάται, φτάνει στην επιφάνεια της γης σχεδόν σε ευθεία γραμμή από τον ήλιο ονομάζεται άμεση ή ακτινοβολία δέσμης. Η διασκορπισμένη ακτινοβολία που φτάνει στο έδαφος ονομάζεται διαχεόμενη ακτινοβολία. Ένα μέρος της ακτινοβολίας φτάνει στον ηλιακό συλλέκτη μετά από ανάκλαση από το έδαφος. Αυτή ονομάζεται ανακλώμενη ισχύς από το έδαφος (albedo). Το σύνολο της ακτινοβολίας αποτελείται από όλα τα προαναφερθέντα στοιχεία.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας που φτάνει στο έδαφος δεν είναι σταθερή. Εκτός από την ημερήσια και ετήσια μεταβολή λόγω της κίνησης του ήλιου υπάρχουν και αστάθμητοι παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι κλιματολογικές και καιρικές συνθήκες είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας. Εάν ο ουρανός είναι συννεφιασμένος τότε η ποσότητα της ακτινοβολίας στο έδαφος θα είναι πολύ πιο χαμηλή. Ένα μέγεθος που καθορίζει την επίδραση της ατμόσφαιρας στο ηλιακό φως είναι η μάζα αέρος (air mass, AM). Είναι κοινή πρακτική να χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές καμπύλες φασματικής κατανομής [1.11]. Στο σχήμα 1.8 τα βυθίσματα στο φάσμα AM1,5 προκαλούνται κυρίως από την απορρόφηση των μορίων της ατμόσφαιρας.

AM0 είναι η καμπύλη φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα. Σχεδόν ταυτίζεται με την καμπύλη φασματικής κατανομής της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος στους 5800 K.

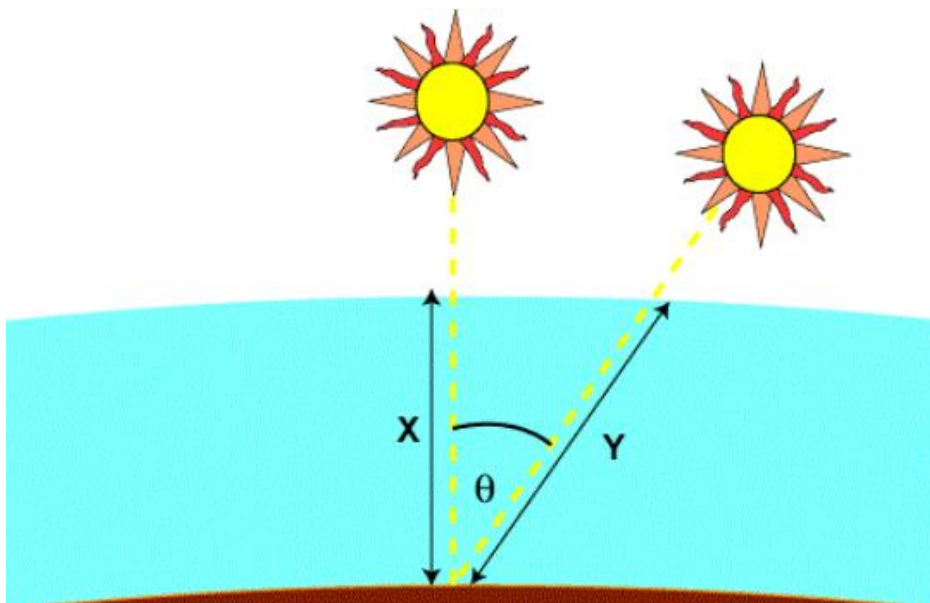
AM1,5G είναι η καμπύλη φασματικής κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 1.8. Σύγκριση φασματικών ακτινοβολιών μέλανος σώματος στους 5800 K AM0 και AM1,5.

Η μάζα αέρος αντιστοιχεί στην διαδρομή που διανύει το φως μέσα από την ατμόσφαιρα της γης, κανονικοποιημένη ως προς την μικρότερη δυνατή διαδρομή (όταν ο ήλιος βρίσκεται στον ζενίθ). Όταν ο ήλιος βρίσκεται κατακόρυφα πάνω από τον ηλιακό συλλέκτη η μάζα αέρος είναι ίση με 1 (AM1). Διαφορετικά υπολογίζεται από την σχέση (1.7).

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (1.7)$$

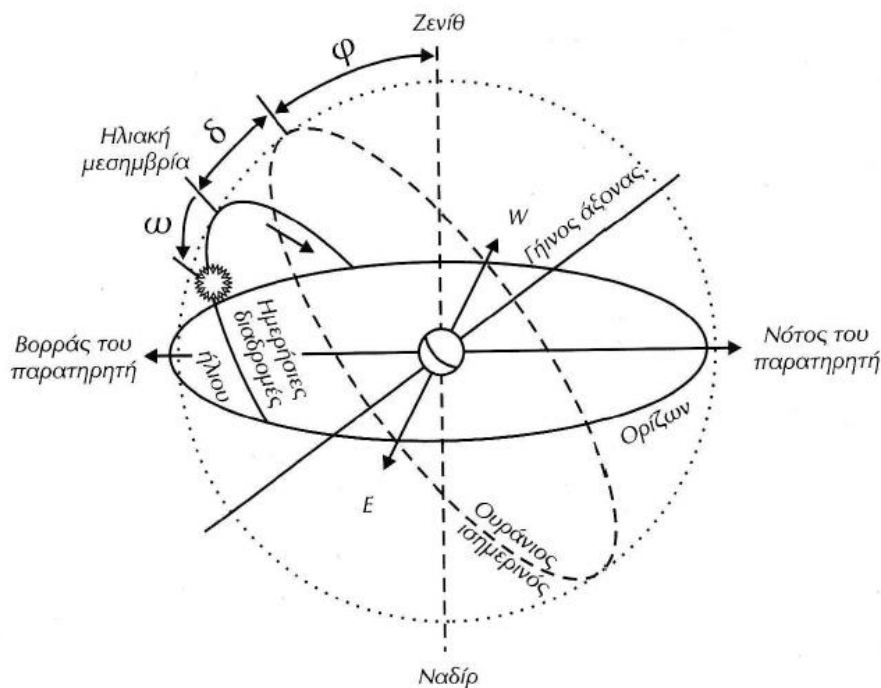


Σχήμα 1.9. Μάζα αέρος 1 (AM1) και μάζα αέρος 1,5 (AM1,5).

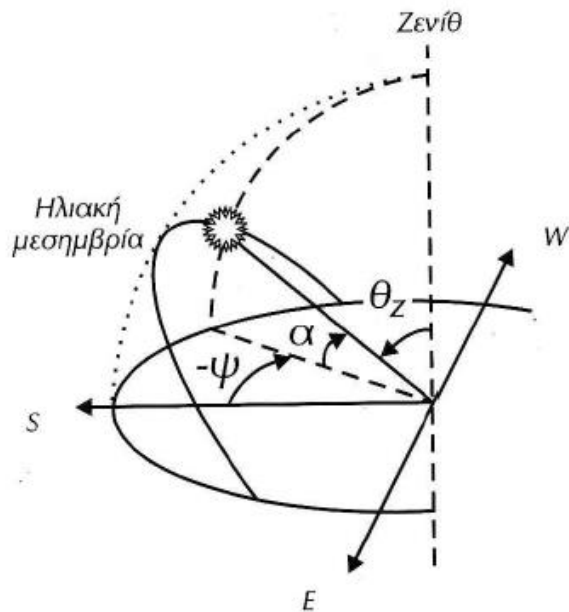
1.7 Ηλιακή γεωμετρία

Η γη περιστρέφεται γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά με τον ήλιο σε μία από τις εστίες της. Το επίπεδο της τροχιάς ονομάζεται εκλειπτική. Η σχετική θέση του ήλιου και της γης μπορούν να παρουσιαστούν ως ουράνια σφαίρα γύρω από την γη. Το επίπεδο του ισημερινού

τέμνει την ουράνια σφαίρα στον ουράνιο ισημερινό και ο πολικός άξονας στους ουράνιους πόλους. Η κίνηση της γης γύρω από τον ήλιο μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια φαινόμενη κίνηση του ήλιου γύρω από την ελλειπτική [1.12]. Αυτή είναι κεκλιμένη κατά 23,45 μοίρες ως προς τον ουράνιο ισημερινό. Η γωνία μεταξύ της γραμμής που συνδέει τα κέντρα της γης και του ήλιου και του επιπέδου του ισημερινού ονομάζεται ηλιακή απόκλιση δ . Η γωνία δ είναι μηδέν κατά την διάρκεια των ισημεριών. Θερινή ισημερία 20 – 21 Μαρτίου και χειμερινή ισημερία 22-23 Σεπτεμβρίου. Η γωνία δ μεγιστοποιείται κατά το θερινό ηλιοστάσιο (22 – 21 Ιουνίου) και ελαχιστοποιείται κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο (21 – 23 Δεκεμβρίου). Η γη περιστρέφεται με ρυθμό μιας περιστροφής την ημέρα γύρω από τον άξονά της [1.13]. Η ημερήσια περιστροφή της γης περιγράφεται από την κίνηση της ουράνιας σφαίρας γύρω από τον πολικό άξονα ενώ η στιγμιαία θέση του ήλιου περιγράφεται από την ωριαία γωνία ω . Η ωριαία γωνία ω είναι η γωνία μεταξύ είναι η γωνία του μεσημβρινού που διέρχεται από τον ήλιο και του μεσημβρινού της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Η ωριαία γωνία είναι μηδέν κατά την ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή (Σχήμα 1.10). Για κάθε θέση στην επιφάνεια της γης με γεωγραφικό πλάτος Φ , το σύστημα συντεταγμένων της ορίζεται από μια



Σχήμα 1.10. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων ζενίθ – ναδίρ και η ημερησία κίνηση του ήλιου.



Σχήμα 1.11. Αζιμούθιο, ηλιακή ανύψωση και γωνία ζενίθ.

κατακόρυφη προς την θέση γραμμή που τέμνει την ουράνια σφαίρα σε δύο σημεία, στο ζενίθ και στο ναδίρ [1.14]. Ο μέγιστος κύκλος που είναι κάθετος στον κατακόρυφο άξονα ονομάζεται ορίζοντας. Η γωνία ϕ δημιουργείται μεταξύ κατακόρυφου άξονα και του ορίζοντα του σημείου (Σχήμα 1.10). Η γωνία που σχηματίζουν η κατεύθυνση του ηλίου, από την ανατολή στην δύση, και του ορίζοντα είναι η ανύψωση α . Η γωνία θ_z είναι συμπληρωματική της γωνίας α . Το αζιμούθιο ψ είναι μηδέν στην ηλιακή μεσημβρία και αυξάνεται προς την ανατολή (Σχήμα 1.11).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 1^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1.1] <http://www.greekastronomy.gr>
- [1.2] <http://sohowww.nascom.nasa.gov>
- [1.3] <http://www.plasmas.org>
- [1.4] <http://www.scienceinschool.org>
- [1.5] *Basic Photovoltaic principles and methods. P Hersch February 1982. SERI/SP-290-1448*
- [1.6] http://www.physics.upatras.gr/UploadedFiles/course_225_3824.pdf
- [1.7] Κβαντομηχανική 1, Θεμελιώδεις αρχές, Απλά συστήματα, Δομή της ύλης. Τραχανάς Στέφανος, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 1996.
- [1.8] Thermal radiation heat transfer. Third edition. R. Siegel, J.R. Howell. Hemisphere publishing corporation, 1992.
- [1.9] Radiative processes in astrophysics. G.B. Rybicki, A.P. Lightman. New York: Wiley-Interscience, p. 25, 1979.
- [1.10] <https://www.pveducation.org>.
- [1.11] <http://www.superstrate.net/pv/index.html>
- [1.12] Ηλεκτρισμός από ηλιακή ενέργεια. Tomas Markvart. Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα 2003.
- [1.13] Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Σταμάτης Πέρδιος. Τεκδοτική, Αθήνα 2007.
- [1.14] ΘΑΝΟΣ Ν. ΣΤΑΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ Η Λ Ι Α Κ Η Γ Ε Ω Μ Ε Τ Ρ Ι Α ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΜΑΘΗΜΑ 'ΒΙΟΚΛΙΜΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ' ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΩΝ ΕΜΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Φωτοβολταικά συστήματα

2.1 Ιστορική αναδρομή

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον δεκαεννιάχρονο Edmund Becquerel το 1839. Εκτελώντας πειράματα με δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, το ένα από φύλλο πλατίνας και το άλλο από πλατίνα με επικάλυψη χλωριούχου αργύρου. Παρατήρησε την δημιουργία τάσης, όταν το φύλλο με την επικάλυψη χλωριούχου αργύρου φωτιζονταν από ηλιακό φως. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η δημιουργία διαφοράς δυναμικού σε ένα υλικό κατά την έκθεσή του στο φως. Στη συνέχεια το 1887 όταν ο Γερμανός φυσικός Χερτζ μελέτησε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο σε στερεά υλικά όπως το Σελήνιο και βρήκε αποδόσεις 1-2%. Το 1937 κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκό στοιχείο από θειούχο μόλυβδο (PbS) από τους Fischer & Godden και το 1939 κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκό στοιχείο από Σελήνιο (Se) με βαθμό απόδοσης 1 %. Το 1941 κατασκευάστηκε το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από πυρίτιο (Si).

Στην δεκαετία 1940 – 1950 ο Τσοχράλσκι ανέπτυξε τη διαδικασία παραγωγής μονοκρυστάλλων πυριτίου υψηλής καθαρότητας που έφτανε σε απόδοση κοντά στο 4 %. Τα επόμενα χρόνια οι εξελίξεις ήταν ραγδαίες και έφεραν την επιστήμη των φωτοβολταϊκών πολύ κοντά στην σημερινή της κατάσταση. Το 1954 οι Fuller, Pearson, Charin ανακοίνωσαν την πρώτη κατασκευή ΦΒ στοιχείου Si σχηματίζοντας επαφή p – n με διάχυση και απόδοση 6%. Εκείνη την περίοδο τα φωτοβολταϊκά “βγήκαν” ουσιαστικά από τα εργαστήρια και άρχισε σιγά σιγά να διευρύνεται η χρήση τους. Το 1956 έγιναν εμπορικές κατασκευές κυρίως από κρυσταλλικό πυρίτιο (c – Si), αυτές οι κατασκευές είχαν μικρή απόδοση της τάξης του 5 – 10 % και πολύ μεγάλο κόστος, περίπου 1000 \$/Wp.

Η πρώτη εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στοιχείων έγινε στην τέχνη της φωτογραφίας και συγκεκριμένα στην υλοποίηση του φωτόμετρου. Το 1958 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά φωτοβολταϊκά στοιχεία για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς στον αμερικάνικο διαστημικό δορυφόρο Vanguard. Την ίδια χρονιά εκτοξεύτηκε Ρώσικος δορυφόρος με μοναδική πηγή ενέργειας τα ηλιακά στοιχεία. Σήμερα αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται σε όλους τους δορυφόρους. Το 1959 κατασκευάστηκε φωτοβολταϊκό στοιχείο από CdS με απόδοση 5 %, το 1972 έχουμε την κατασκευή ιώδους ηλιακού στοιχείου Si με απόδοση 14% από τους Lindmayer

& Allison και το 1977 την κατασκευή ηλιακού στοιχείου από GaAs με απόδοση 16 % από τον Kameth.

Το 1981 γίνεται η πτήση πάνω από την Μάγχη του αεροπλάνου Solar Challenger εξοπλισμένου με 16.128 φωτοβολταϊκά στοιχεία Si συνολικής ισχύος 2,7 kW και το 1983 έχουμε την έναρξη λειτουργίας φωτοβολταϊκού σταθμού ισχύος 1 MW στην Βικτροβίλ της Καλιφόρνιας. Η χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών άνοιξε κατά τη διάρκεια της κρίσης πετρελαίου το 1973-74, και αυτό το γεγονός οδήγησε έκτοτε στην παρουσία πολυάριθμων ερευνητικών και αναπτυξιακών έργων.

2.2 Η επαφή pn

Φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραδική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Κάνοντας μια πιο αναλυτική προσέγγιση, στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δεν διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή. Η ενέργεια που παρέχεται, κατανέμεται στα άτομα του ημιαγωγού και προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια σθένους απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής. Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια $h\nu$ μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο ($E_g < h\nu$), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα

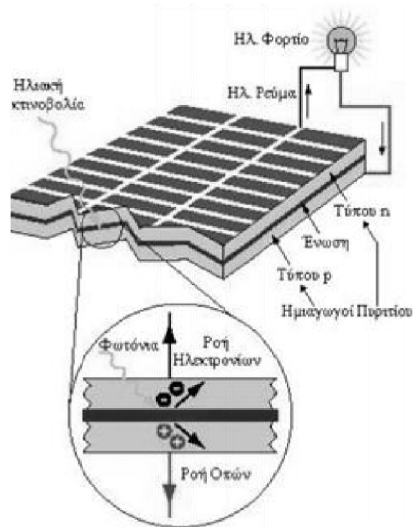
που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού ($E_g \geq h\nu$), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να το διεγείρει προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή. Αν τώρα ο τετρασθενής ημιαγωγός Si, νοθευτεί με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε έχουμε ημιαγωγό προσμίξεως τύπου-n και τύπου-p αντίστοιχα.

Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου P, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπαστεί και να κινείται σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P^+) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπου-n ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων B σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς. Με την απορρόφηση λίγης ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο B σε κατιόν (B^-). Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ή δότης οπών (τύπου-p ημιαγωγός). Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν έλθουν σε στενή επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών. Η συγκέντρωση των κατιόντων

στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του.

2.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το πεδίο που δημιουργείται σε μια επαφή p – n είναι σε θέση να κινήσει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς, τους οποίους διεγείρει το φως. Για να υφίσταται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, είναι απαραίτητη η δημιουργία επαφής δυο φωτοαγωγικών ημιαγωγών υλικών. Ηλεκτρόνια και οπές διεγείρονται λόγω της απορρόφησης φωτονίων, μέσα σε κάθε κύτταρο σαν φορείς πλειονότητας εκατέρωθεν της επαφής. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου της επαφής οι φορείς παραμένουν σε περιοχές που υπερτερούν όμοιοι με αυτούς φορείς (φορείς πλειονότητας) καθώς είναι πολύ μικρή η πιθανότητα να συναντήσουν φορέα μειονότητας και να επανασυνδεθούν. Από εκεί ρέουν προς το κύκλωμα. Οι υπόλοιποι θα συναντήσουν αντίθετο φορέα, με τον οποίο θα γίνει επανασύνδεση χωρίς να συμμετέχουν στην δημιουργία ρεύματος. Ατέλειες στην δομή του ημιαγωγού αυξάνουν την πιθανότητα επανασύνδεσης, αυτός είναι και ο λόγος υψηλού βαθμού καθαρότητας για το ημιαγωγό υλικό παρασκευής. Η περιοχή τύπου n έχει ως φορείς πλειονότητας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, και αντίστοιχα η περιοχή τύπου p έχει τις οπές όπου γίνεται θετικότερο.

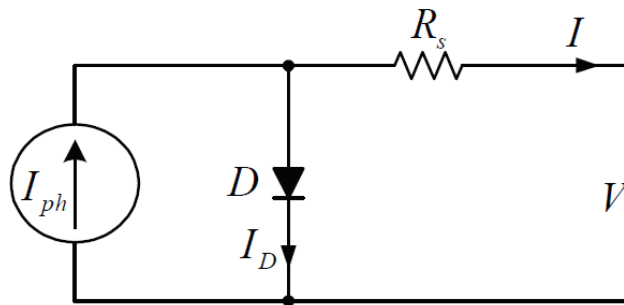


Σχήμα 2.1. Η διατομή της ένωσης p-n του φωτοβολταϊκού κυττάρου και ενδεικτική αναπαράσταση δημιουργίας φωτορεύματος.

Κίνηση των φωτοδημιουργούμενων φορέων υπό την επίδραση του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου, της επαφής, αποτελεί ρεύμα, με φορά αυτή του πεδίου Σχ. 6.1. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται φωτόρεύμα I_L . Η τιμή του δημιουργούμενου φωτορεύματος είναι ανάλογη του πλήθους των φωτονίων που απορροφώνται, και όπως επίσης ανάλογη με το πλήθος των φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια της διάταξης. Η συνολική ενέργεια των φωτονίων, ανά μονάδα χρόνου και επιφανείας, είναι η πυκνότητα ισχύος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Άρα η τιμή του φωτορεύματος I_L είναι ευθέως ανάλογη της πυκνότητας ισχύος $E(W/m^2)$, της ηλιακής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της διάταξης και του ενεργού εμβαδού της επαφής των δυο ημιαγωγών που εκτίθεται σε αυτή. Για την μοντελοποίηση ενός Φ/Β συστήματος με ηλεκτρονικά ισχύος [2.1] είναι απαραίτητη μια εξίσωση που περιγράφει την λειτουργία ενός Φ/Β κυττάρου ή Φ/Β πάνελ. Μία τέτοια εξίσωση έχει αναπτυχθεί σε διάφορες μορφές με την χρήση της εξίσωσης της διόδου του Shockley [2.2]. Οι δύο βασικότεροι τύποι της παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

2.4 Ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιημένου Φ/Β στοιχείου

Το βασικό συστατικό των φωτοβολταϊκών συστημάτων αποτελεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο (ονομάζεται και φωτοστοιχείο ή ηλιακό κύτταρο), το οποίο κατασκευάζεται ως ένωση τύπου p-n κατάλληλων ημιαγωγών (συντά πυριτίου). Όπως είναι γνωστό, εάν η πλευρά p μιας διόδου p-n συνδεθεί με τον θετικό πόλο (+) πηγής συνεχούς ρεύματος και η πλευρά n με τον αρνητικό (-), δηλαδή γίνει ορθή πόλωση της διόδου, διέρχεται ένα μεγάλο ρεύμα. Αντίθετα εάν γίνει ανάστροφη πόλωση, δηλαδή σύνδεση του πόλου (+) της πηγής με την πλευρά n και του p με τον πόλο (-), το διερχόμενο ρεύμα είναι πολύ μικρό και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου, I_0 [2.3]. Το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού κυττάρου ή κύκλωμα τεσσάρων παραμέτρων (σχήμα 2.2) αποτελείται από μια πηγή ρεύματος (I_{ph}) συνδεδεμένη παράλληλα με μια δίοδο. Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει υπόψη τις απώλειες λόγω της εσωτερικής αντίστασης του κυττάρου (R_s). Είναι μια καλή προσέγγιση της λειτουργίας του φωτοβολταϊκού κύτταρο χωρίς να εισέρχεται σε πολύπλοκους υπολογισμούς. Για αυτό και χρησιμοποιείται συχνά στην μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων για προσομοιώσεις κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και για αντιμετώπιση προβλημάτων σε πρακτικές εφαρμογές [2.4].



Σχήμα 2.2. Ισοδύναμο κύκλωμα μίας διόδου με αντίσταση φωτοβολταϊκού κυττάρου.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

$$V_t = \frac{n_s AkT}{q} \quad (2.2)$$

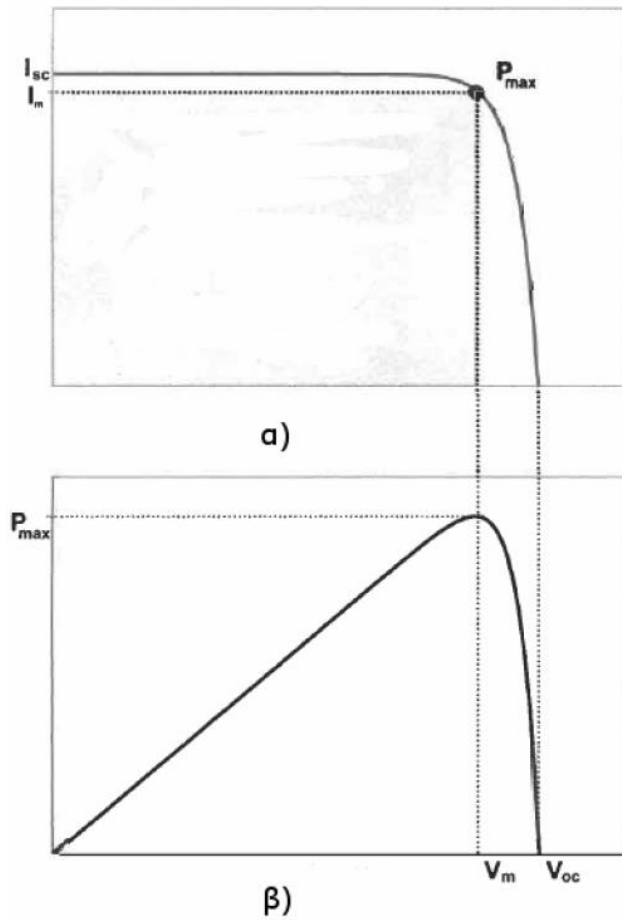
Όπου:

R_s	η εσωτερική αντίσταση του κυττάρου (Ω)
I_0	το ρεύμα κόρου (A)
n_s	ο αριθμός Φ/Β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά
q	το φορτίο του ηλεκτρονίου (C)
k	η σταθερά του Boltzman
A	ο συντελεστής της διόδου
T	η θερμοκρασία σε K
I_{ph}	το φωτορεύμα

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος – τάσης ($I - V$) παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3. Ιδανικά το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} είναι ίσο με το φωτορεύμα I_{ph} και η τάση ανοιχτού κυκλώματος δίνεται από την σχέση 2.3:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(I + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (2.3)$$

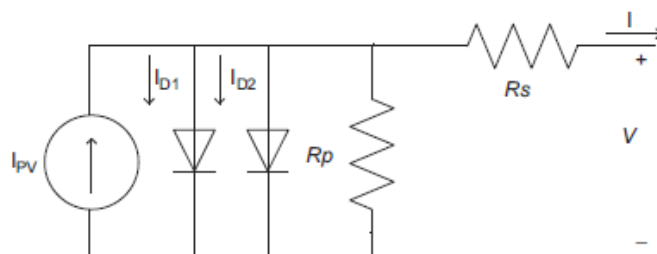
Η ισχύς $P=IV$ που παράγεται από το στοιχείο παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3β. Η μέγιστη ισχύς P_{max} υπολογίζεται για μέγιστο ρεύμα I_m και τάση V_m .



Σχήμα 2.3. α) Η χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$. β) Η καμπύλη $P - V$.

2.5 Το μοντέλο των δύο διόδων

Μια λίγο διαφορετική προσέγγισή δίνει το μοντέλο των δύο διόδων. Μας παρέχει μια πολύ καλή προσέγγιση του πραγματικού συστήματος ώστε να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε την μελέτη των Φ/Β κυψελών. Το ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 2.4. Ηλεκτρικό διάγραμμα του μοντέλου των δύο διόδων.

με μαθηματική εξίσωση την ακόλουθη:

$$I = I_{PV} - I_D \left(e^{\frac{V+IR_S}{a_1 V_{T1}}} - 1 \right) - I_{D2} * \left(e^{\frac{V+IR_S}{a_2 V_{T2}}} - 1 \right) - \left(\frac{V * I * R}{R_p} \right) \quad (2.4)$$

Όπου:

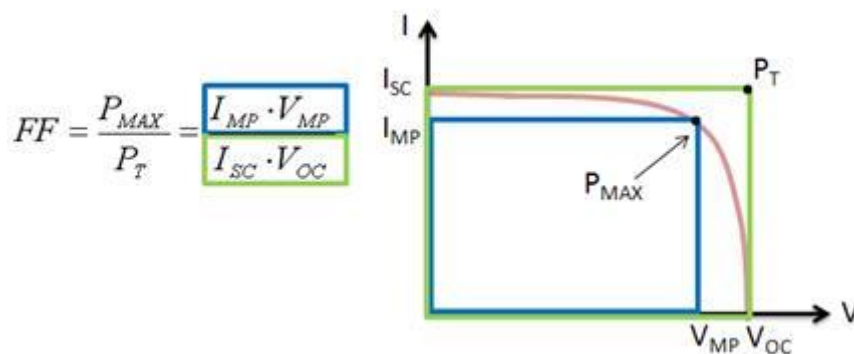
I_{PV}	το ισοδύναμο φωτορεύμα
I_{D1}	το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου D1
I_{D2}	το αντίστροφο ρεύμα κόρου της διόδου D2
i	το συνολικό ρεύμα στην έξοδο της κυψέλης
R_p	η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση της κυψέλης
R_s	η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση της κυψέλης
V	η τάση στην έξοδο του πλαισίου
α_1 και α_2	οι σταθερές τις ιδανικής διόδου
V_{T1} και V_{T2}	η θερμική τάση των διόδων D1 και D2 αντίστοιχα.

Η μορφή της καμπύλης τάσης-ρεύματος είναι ίδια με το μοντέλο της μιας διόδου. Στην πραγματικότητα όμως δίνει μια πολύ καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού συστήματος.

2.6 Ο συντελεστής πληρώσεως (fill factor / FF)

Ο συντελεστής πληρώσεως είναι ένας παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την μορφή της καμπύλης I-V του κυττάρου. Μας δείχνει πόσο «τετράγωνη» είναι η χαρακτηριστική I-V και συνήθως στην πράξη λαμβάνει τιμές από 0,7 – 0,85 . Είναι ο λόγος της μέγιστης ισχύος προς το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος επί το ρεύμα βραχυκυκλώσεως .

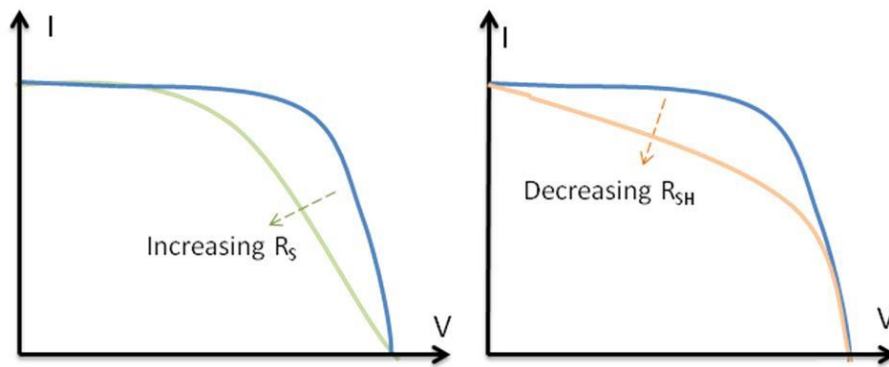
$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{oc}} \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.5. Γραφική απεικόνιση καμπύλης I-V για υπολογισμό Fill Factor.

2.7 Οι εσωτερική παράλληλη (R_{sh}) και εν σειρά αντίσταση (R_s)

Κατά την λειτουργία τους, η απόδοση των Φ/Β κυψελών μειώνεται λόγω της ύπαρξης των εσωτερικών αντιστάσεων, οι οποίες φαίνονται και στο μοντέλο της μίας και των δύο διόδων που αναφερθήκαμε προηγουμένως. Στο ιδανικό μοντέλο η παράλληλη αντίσταση θα λάμβανε τιμή που τείνει στο άπειρο ενώ η εν σειρά αντίστασης θα λάμβανε τιμή ίση με το μηδέν με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επιπλέον πτώση τάση και κατ' επέκταση απώλεια ισχύος στο φορτίο. Η μεταβολή των δύο αντιστάσεων έχουν επιπτώσεις στον συντελεστή Fill Factor και φυσικά στην μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ. Η επιπτώσεις φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Σχήμα 2.6. Γραφική αναπαράσταση επίδρασης R_s και R_{sh} στην καμπύλη I-V.

2.8 Εκτίμηση της ηλιακής ακτινοβολίας από την διάρκεια της ηλιοφάνειας — μοντέλο JW

Ένα μοντέλο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας είναι απαραίτητο για την κατανόηση των δυνατοτήτων που παρέχει σε κάθε τοποθεσία η χρήση ΦΒ. Ο Johnson et al. (1995) και ο Woodward et al. (2001) χρησιμοποίησαν την διάρκεια της ηλιοφάνειας για να εκτιμήσουν την ηλιακή ακτινοβολία. Το μοντέλο έχει παραμέτρους το γεωγραφικό πλάτος (latitude), την ηλιακή κλίση (solar declination), το μέγεθος της ημέρας (day length) και την ατμοσφαιρική διαπερατότητα σε ημερήσια βάση και έχει μόνο την ημερήσια διάρκεια ηλιοφάνειας (σε ώρες) σαν δεδομένο προς εισαγωγή. Η ολική ημερήσια ακτινοβολία (J_0) δίνεται από την σχέση 2.6:

$$hJ_0 = SJ_{0,s} + hJ_{0,s} \quad (2.6)$$

όπου h η διάρκεια της ημέρας S διάρκεια της ηλιοφάνειας $J_{0,s}$ είναι η ακτινοβολία της απευθείας δέσμης και $J_{0,d}$ οι συνιστώσες της διαχεόμενης ακτινοβολίας. Η διάρκεια της ημέρας σε ώρες υπολογίζεται από την σχέση 2.7:

$$h = \frac{24}{\pi} \cos^{-1}(-\tan\lambda \tan\delta) \quad (2.7)$$

όπου λ είναι το γεωγραφικό πλάτος και δ είναι η ηλιακή απόκλιση σε ακτίνια. Η ηλιακή απόκλιση για κάθε ημέρα του χρόνου δίνεται από την σχέση 2.8:

$$\delta = -0,4084 \cos\left(2\pi \frac{\delta+10}{365}\right) \quad (2.8)$$

όπου d είναι η ημέρα του χρόνου στο Ιουλιανό ημερολόγιο. Από τον Campbell (1977), η απ' ευθείας συνιστώσα της δέσμης $J_{0,s}$ δίνεται από την σχέση 2.9:

$$J_{0,s} = 1367 \frac{2\rho}{\pi} \sin\varphi \left(\tau \frac{1}{\sin\varphi} \right) \quad (2.9)$$

όπου ρ είναι το κλάσμα της ακτινοβολίας πλήρους ηλιακού φάσματος (εδώ χρησιμοποιούμε το 1) και 1367 είναι η μέση τιμή της ηλιακής σταθεράς [$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], τ είναι η ατμοσφαιρική διάδοση, φ είναι η ηλιακή γωνία ανύψωσης στο ζενίθ κατά το ηλιακό μεσημέρι, σε μοίρες από τον ορίζοντα (σχέση 2.10):

$$\sin\varphi = \sin\lambda \sin\delta + \cos\lambda \cos\delta \quad (2.10)$$

Η διάχυτη συνιστώσα της ολικής ακτινοβολίας συμβολίζεται με $J_{0,d}$ (από την σκέδαση των νεφών και από τον γαλάζιο ουρανό ταυτόχρονα), σύμφωνα με τον List (1971), μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση 2.11:

$$J_{0,d}A = J_{0,p}[f_{blue}(1 - c) + f_{cloud}c] \quad (2.11)$$

όπου c είναι το κλάσμα της μέσης ημερήσιας νεφοκάλυψης, όπου χρησιμοποιώντας την Taylor Hypothesis (Stull, 1988) παίρνουμε: $c = 1 - (S/h)$, μια αδιάστατη τιμή μεταξύ 0 (πλήρης νεφοκάλυψη) και 1 (καθόλου νεφοκάλυψη). $J_{0,p}$ είναι το μέσο ημερήσιο ολικό δυναμικό ακτινοβολίας του καθαρού ουρανού (σχέση 2.12):

$$J_{0,p} = 1347 \frac{p}{\pi} \sin\varphi \left(1 + \tau^{\frac{1}{\sin\varphi}}\right) \quad (2.12)$$

Οι τιμές των f_{blue} και f_{cloud} αναπαριστούν την σχετική διαφορετική ένταση ακτινοβολίας σε συνθήκες καθαρού ουρανού και νεφοκάλυψης, αντίστοιχα (σχέση 2.13):

$$f_{blue} = \frac{1 - \tau^{1/\sin\varphi}}{1 + \tau^{1/\sin\varphi}} \quad (2.13)$$

Για να περιγραφεί η παράμετρος F (εξίσ. 2.11) για κάθε περιοχή, οι τιμές θα πρέπει να έχουν προσαρμοστεί (fitted) για κάθε μέρα του χρόνου ώστε να δώσουν την βέλτιστη ημερήσια τιμή F (LADSS, 2005). Ο Woodward et al. (2001) καθόρισε μια τιμή F της τάξης του 1,11 για την Νέα Ζηλανδία. Για το Ηνωμένο Βασίλειο υπάρχει ένα εύρος στην μέση τιμή του F ανάμεσα στο 0.69 και το 0.87 (για ένα έτος και περιοχή εύρος της τάξης 0.391–1.047, και μέση τιμή όλων 0.688). Στο μοντέλο JW [2.6] επιβάλλεται μια κατώτερη ποσότητα από διάχυτη ακτινοβολία, μεταβλητή

με το h , έτσι ώστε ακόμη και ένα μηδενικό δεδομένο εισαγωγής για την διάρκεια ηλιοφάνειας, θα παράγει μια ποσότητα ακτινοβολίας για δεδομένη ημέρα του έτους.

2.9 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ανάλογα με την διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας τα Φ/Β συστήματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: διασυνδεδεμένα Φ/Β και αυτόνομα Φ/Β συστήματα.

Στα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα με το δίκτυο, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο συνήθως με επιδοτούμενη τιμή αυτή την περίοδο. Οι ανάγκες για κατανάλωση καλύπτονται από το δίκτυο όπως και χωρίς τα Φ/Β. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας για να μετρά την ενέργεια που παράγεται και διαχέεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο στις εκάστοτε καταναλώσεις. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης.

Σήμερα υπάρχει πληθώρα μικρών Φ/Β συστημάτων σε κεραιές τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, συστήματα άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα. Σε αυτά τα συστήματα υπάρχουν οι συστοιχίες συσσωρευτών, οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος υπάρχουν αντιστροφείς στο σύστημα οι οποίοι μετατρέπουν την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Όταν τα αυτόνομα Φ/Β συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.) τότε χαρακτηρίζονται σαν υβριδικά.

2.10 Ρυθμιστές φόρτισης μπαταριών από Φωτοβολταϊκά

Το κάθε σύστημα έχει συγκεκριμένες ανάγκες για την ομαλή λειτουργία του και η επιλογή των τεχνολογιών του φορτιστή αναλύεται σύντομα παρακάτω. Οι φορτιστές μπαταριών από φωτοβολταϊκά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Στο σημείο αυτό δίνεται

μια κάπως γενική κατηγοριοποίηση ανεξάρτητη από τα διατιθέμενα συστήματα στην αγορά, από το είδος των μπαταριών, τον τύπο της εφαρμογής, της ποσότητας του φορτίου και αναλύονται σύντομα τα βασικά είδη.

2.10.1 Απλοί ρυθμιστές φόρτισης από Φ/Β με άμεση σύνδεση

Το πιο απλό σύστημα ρυθμιστή φόρτισης είναι εκείνο στο οποίο συνδέεται τη μπαταρία άμεσα με το Φ/Β πάνελ. Ένας τέτοιος φορτιστής μπορεί να φορτίσει ικανοποιητικά μπαταρίες κάτω από τις προϋποθέσεις:

α) Η τάση που παράγει το Φ/Β πάνελ να μην υπερβαίνει την τάση φόρτισης της μπαταρίας αλλά και να μην είναι μικρότερη από αυτήν.

β) το ρεύμα που διαρρέει την μπαταρία κατά την φόρτισή της να είναι μέσα τα όρια του κατασκευαστή για την συγκεκριμένη μπαταρία σε κάθε περίπτωση ηλιακής ακτινοβολίας – θερμοκρασίας αλλά και φόρτου της μπαταρίας.

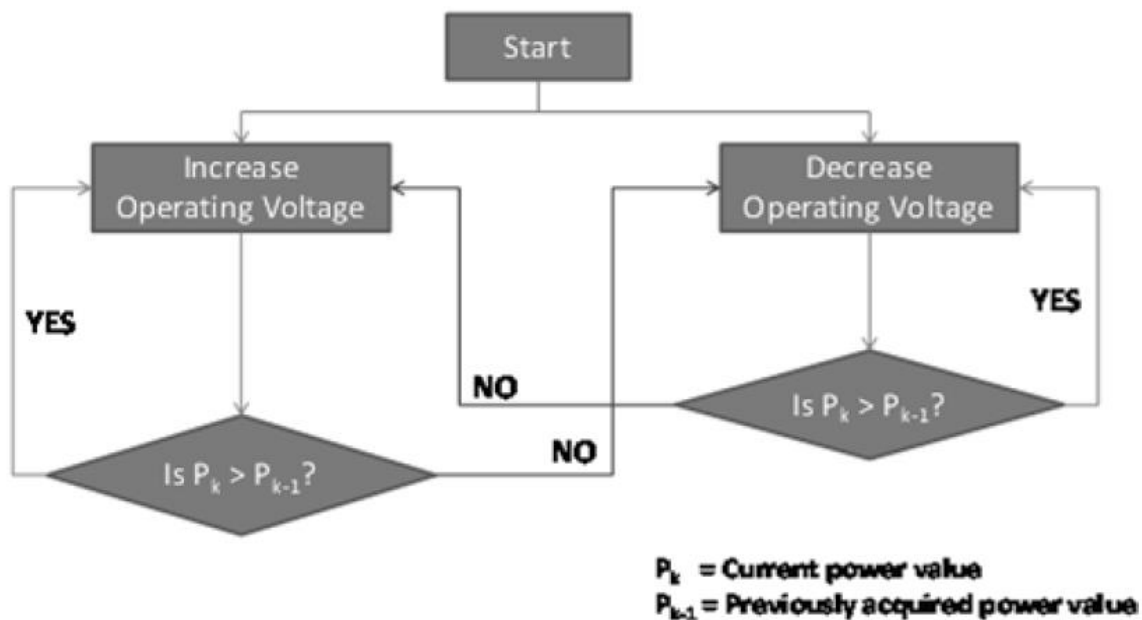
Υπάρχει ένας γενικός κανόνας του C/10 δηλαδή 10 φορές μικρότερο ρεύμα(A) από αυτό που προκύπτει από την χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah). Θα πρέπει να επισημανθεί η μεγάλη αξία που έχει η διαστασιολόγηση στην συνδεσμολογία της άμεσης σύνδεσης. Η καμπύλη I-V του πάνελ θα πρέπει να ταιριάζει πρακτικά με την καμπύλη φόρτισης της μπαταρίας. Το πάνελ που συνδέεται στην μπαταρία θα πρέπει να είναι το κατάλληλο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι το ελάχιστο κόστος και οι μηδαμινές απώλειες. Λόγω του ότι δεν υπάρχουν στοιχεία ελέγχου που να καταναλώνουν ενέργεια, οι απώλειες περιορίζονται μόνο στο κατά πόσο το σύστημα λειτουργεί κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP).

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι έχουν εφαρμογή σε συστήματα όπου το χαμηλό κόστος είναι σημαντικός παράγοντας και τα συστήματα φόρτισης δεν προσφέρουν κάτι περισσότερο, και κυρίως εκεί όπου οι καταναλώσεις είναι προκαθορισμένες και νυκτερινές. Ακόμη είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι η λογική της άμεσης συνδεσμολογίας μπορεί να εφαρμόζεται και σε συνδυασμό με αυτόματους φορτιστές. Κάποια από τα είδη ρυθμιστών φόρτισης που υπάρχουν είναι :

- Ρυθμιστές φόρτισης με έλεγχο ρεύματος.
- Ρυθμιστές φόρτισης με έλεγχο ποσοστού φόρτισης.
- Ρυθμιστές φόρτισης τύπου PWM.
- Ρυθμιστές φόρτισης σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).

2.10.2 Ρυθμιστής φόρτισης εύρεσης (MPPT) για Φ/Β

Οι ρυθμιστές φόρτισης εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος είναι PWM (Pulse Width Modulation) φορτιστές οι οποίοι συνήθως περιλαμβάνουν τον απαιτούμενο έλεγχο ώστε οι μπαταρίες να μην υπερφορτίζονται και αποτελούνται από DC-DC converters οι οποίοι ελέγχονται μέσω αλγορίθμου για την εύρεση του MPP.



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα ροής για φορτιστές με MPPT με αλγόριθμο Perturb and Observe.

Αλγόριθμος με ποσοστό

Αν κάποιος γνωρίζει την καμπύλη I-V του Φ/Β πάνελ μπορεί να κάνει την εκτίμηση ότι το MPP βρίσκεται περίπου σε ένα ποσοστό (συνήθως γύρω στο 75%) της τάσης ανοικτού κυκλώματος. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι άριστη αλλά δίνει ένα αποτέλεσμα αποδεκτό όταν το πάνελ λειτουργεί με αρκετή ηλιοφάνεια. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου βρίσκεται στο ότι το πάνελ

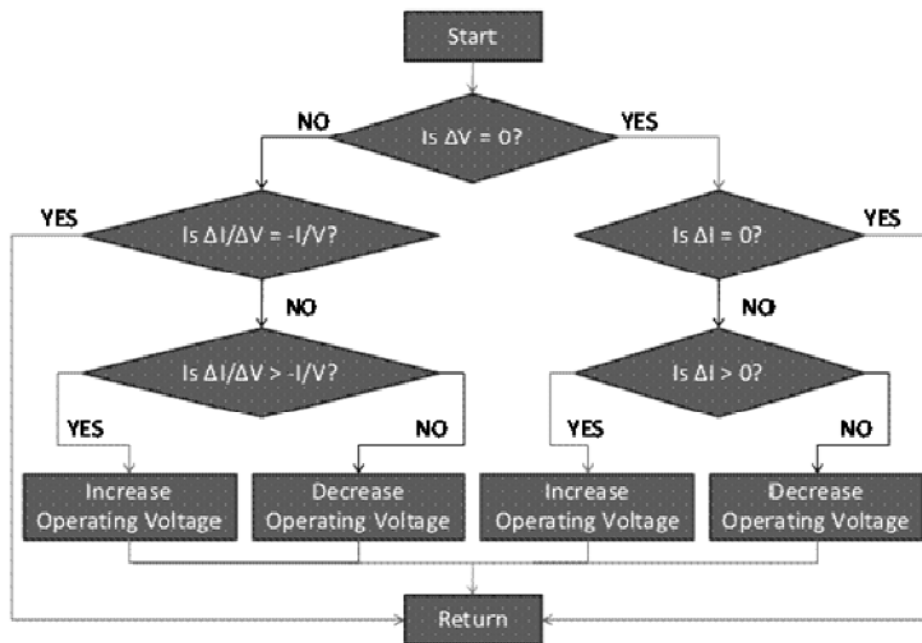
θα πρέπει να βρίσκεται για μια σημαντική χρονική διάρκεια εκτός αποσυνδεδεμένο από την τροφοδοσία του συστήματος ώστε να γίνεται η μέτρηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος.

Αλγόριθμος Pertube & Observe

Ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται στην μέτρηση της τάσης και του ρεύματος. Σε αυτή την αναρριχητική μέθοδο ο ελεγκτής αλλάζει τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) δηλαδή αλλάζει τη μέση τάση κατά ένα μικρό ποσοστό από τη συστοιχία. Ακολούθως μέτρα ισχύ, αν η ισχύς αυξάνεται προς αυτή την κατεύθυνση συνεχίζει να αυξάνει κύκλο λειτουργίας στην ίδια κατεύθυνση μέχρι που η ισχύς δεν αυξάνει άλλο. Αυτή είναι η πιο συχνή μέθοδος και ο αλγόριθμος φαίνεται στο σχήμα 6.2 παραστατικά.

Αλγόριθμος Incremental Conductance

Η μέθοδος της στοιχειώδους αγωγιμότητας (Incremental Conductance) υπολογίζει το σημείο μέγιστης ισχύος συγκρίνοντας την στοιχειώδη αγωγιμότητα ($\Delta I/\Delta V$) με την αγωγιμότητα (I/V), σχήμα 6.3. Όταν αυτά τα δύο είναι ίσα ($I/V = \Delta I/\Delta V$), η τάση εξόδου είναι η τάση MPP. Ο ελεγκτής διατηρεί αυτή την τάση μέχρι να αλλάξει η ακτινοβολία και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



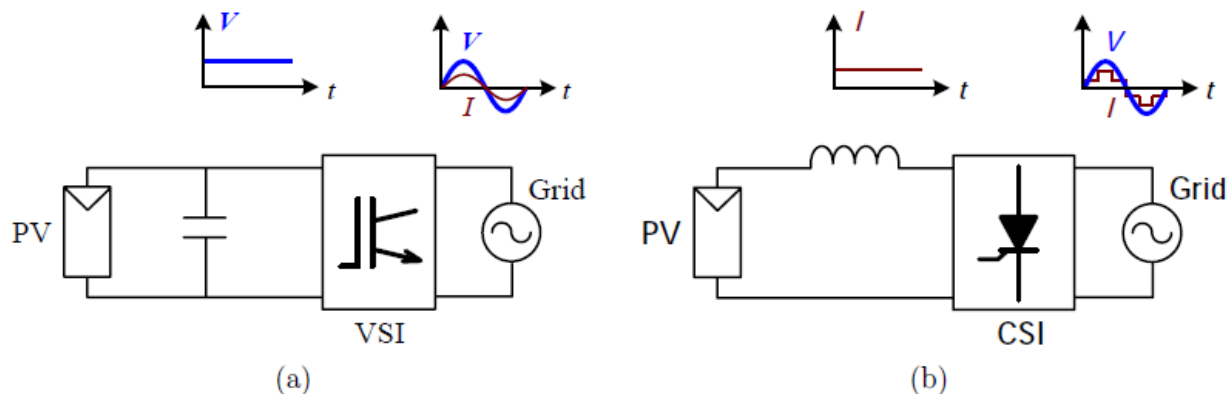
Σχήμα 2.8. Διάγραμμα ροής για φορτιστές με MPPT με αλγόριθμο Incremental Conductance.

2.11 Ο αντιστροφέας (inverter)

Όπως έχει σίγουρα γίνει αντιληπτό το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και κατά συνέπεια τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παράγουν συνεχή τάση και συνεχές ρεύμα. Η συντριπτική πλειονότητα των ηλεκτρικών συσκευών λειτουργεί έχοντας ως τροφοδοσία εναλλασσόμενη τάση. Γεννάται λοιπόν η ανάγκη για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τα φωτοβολταϊκά να βρεθεί ένας τρόπος να μετατραπεί η συνεχής τάση σε εναλλασσόμενη. Αυτή την λειτουργία επιτελεί ο αντιστροφέας (dc to ac inverter.)

2.11.1 Είδη αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται στα Φ/Β

Οι αντιστροφείς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Τους αντιστροφείς τάσης (voltage source inverters, VSI) και τους αντιστροφείς ρεύματος (current source inverters, CSI). Και οι δύο τύποι αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την τροφοδοσία ηλεκτροκινητήρων. Οι VSI έχουν ως σήμα εισόδου μια σταθερή τάση DC και οι CSI ένα σταθερό ρεύμα DC. Στην έξοδο οι VSI χρησιμοποιούν έναν μεγάλης χωρητικότητας πυκνωτή για να σταθεροποιήσει την τάση (DC link capacitor) ενώ οι CSI χρησιμοποιούν έναν πυκνωτή για σταθεροποίηση του ρεύματος (σχήμα 2.9) [2.7]. Οι αντιστροφείς τάσης είναι σχετικά πιο οικονομικοί και χρησιμοποιούνται ευρέως στα φωτοβολταϊκά.

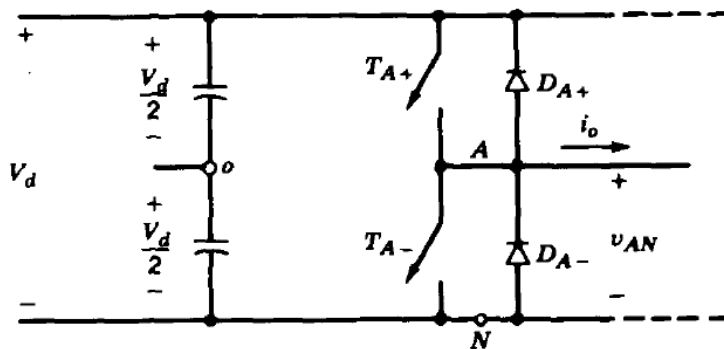


Σχήμα 2.9. α) Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης. β) Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής ρεύματος.

2.11.2 Αντιστροφείς πηγής τάσης (voltage source inverters)

Οι αντιστροφείς τάσης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες. Τους αντιστροφείς τετραγωνικής κυματομορφής και τους αντιστροφείς καθαρού ημιτόνου (sinusoidal ή pulse width modulation inverters, PWM). Στους αντιστροφείς τετραγωνικής κυματομορφής η τάση τροφοδοσίας είναι ίση με την τάση εξόδου και ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο την συχνότητα του τάσης εξόδου. Η τάση εξόδου είναι παρόμοια με τετραγωνική κυματομορφή, εξ ου και η ονομασία της.

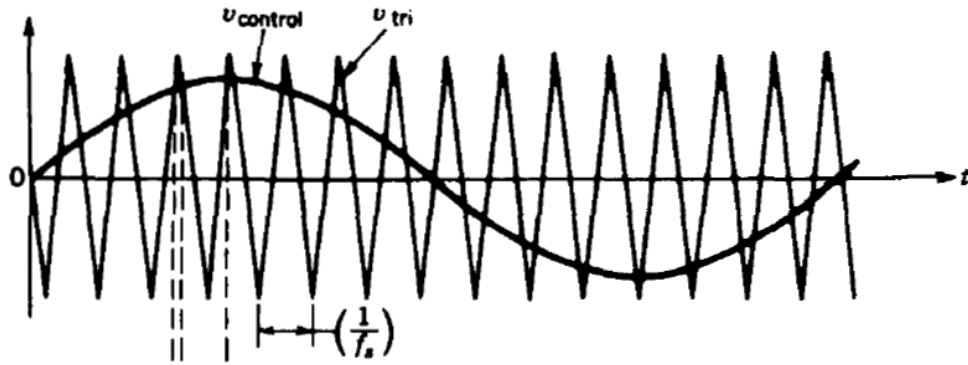
Οι αντιστροφείς καθαρού ημιτόνου έχουν μια σταθερή τάση εισόδου. Οπότε ο αντιστροφέας ελέγχει το μέγεθος και την συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου (σχήμα 2.10). Αυτό επιτυγχάνεται με μία τεχνική που ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμών (pulse width modulation, PWM).



Σχήμα 2.10. Αντιστροφέας εύρους παλμών ενός σκέλους.

2.11.3 Λειτουργία αντιστροφέα εύρους παλμών

Για να δημιουργηθεί μια τάση εξόδου κατάλληλου εύρους (230 V AC) και κατάλληλης συχνότητας (50 Hz), ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου το $V_{control}$, στην επιθυμητή συχνότητα (50 Hz) συγκρίνεται με μια τριγωνική κυματομορφή, την V_{tri} (σχήμα 2.8). Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής (f_s) είναι και η συχνότητα εναλλαγής κατάστασης των διακοπών



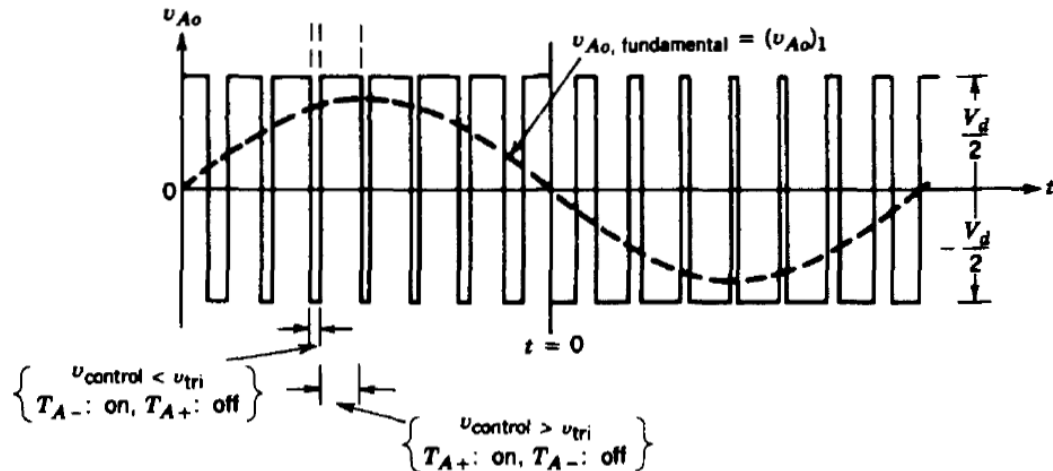
Σχήμα 2.11. Διαμόρφωση εύρους παλμού.

του αντιστροφέα (insulated gate bipolar tranzistors, IGBTs) και είναι σταθερή. Σταθερό παραμένει και το εύρος της V_{tri} [2.8]. Το σήμα ελέγχου $V_{control}$ έχει συχνότητα f_1 η οποία είναι η συχνότητα που θέλουμε για την τάση εξόδου. Είναι σημαντικό να πούμε ότι η τάση εξόδου δεν θα είναι τέλει ημιτονικό σήμα αλλά θα έχει και θόρυβο στις αρμονικές συχνότητες της f_1 . Ο συντελεστής διαμόρφωσης εύρους δίνεται από την σχέση 2.14:

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (2.14)$$

Ο συντελεστής διαμόρφωσης δίνεται από την σχέση 2.15

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.15)$$



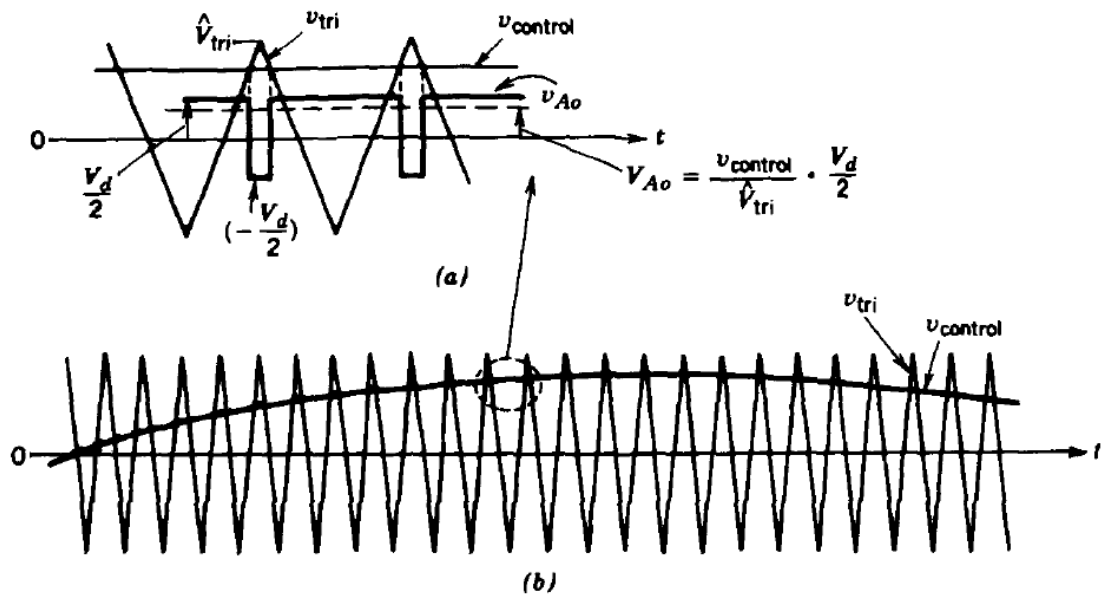
Σχήμα 2.12. Έλεγχος του αντιστροφέα μέσω $V_{control}$ και V_{tri} .

Στο σχήμα 2.12 οι διακόπτες T_{A+} και T_{A-} (σχήμα 2.7) ελέγχονται βάσει της σύγκρισης $V_{control}$ και V_{tri} . Η τάση εξόδου V_{A0} :

- Όταν $V_{control} > V_{tri}$, ο διακόπτης T_{A+} ενεργοποιείται και έχουμε $V_{A0} = (1/2) V_d$ με φορά ρεύματος θετική.
- Όταν $V_{control} < V_{tri}$, ο διακόπτης T_{A-} ενεργοποιείται και έχουμε $V_{A0} = -(1/2) V_d$ με φορά ρεύματος αρνητική.

Αφού οι δύο διακόπτες δεν είναι ποτέ ταυτόχρονα στην ίδια κατάσταση η τάση εξόδου V_{A0} κυμαίνεται μεταξύ $(1/2) V_d$ και $-(1/2) V_d$ όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.12. Το μέγιστο εύρος της τάσης εξόδου V_{A0} είναι $(1/2) V_d$. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό εάν θεωρήσουμε ένα σήμα ελέγχου $V_{control}$ σταθερό (σχήμα 2.13). Τότε η V_{A0} παίρνει μόνο δύο τιμές $(1/2) V_d$ και $-(1/2) V_d$. Για μια χρονική περίοδο $T_s = 1/f_s$ (σχήμα 2.13) και δεδομένη τάση εισόδου V_d η εναλλασσόμενη τάση εξόδου V_{A0} δίνεται από την σχέση 2.16.

$$V_{A0} = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \frac{V_d}{2} \quad (2.16)$$



Σχήμα 2.13. Ημιτονοειδής αντιστροφείας εύρους παλμών.

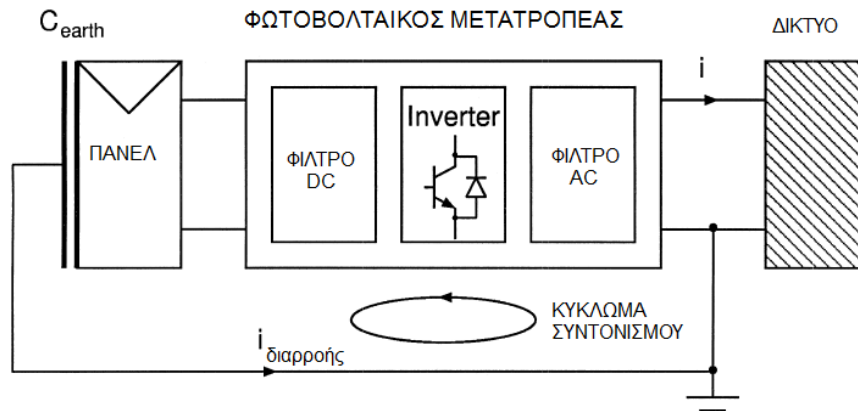
2.12 Παρασιτική χωρητικότητα και ρεύμα διαρροής στα φωτοβολταικά συστήματα χωρίς μετασχηματιστή.

Τα φωτοβολταικά πάνελ περικλείονται σε ένα μεταλλικό πλαίσιο, το οποίο στις περισσότερες χώρες η νομοθεσία επιβάλλει να είναι γειωμένο για λόγους ασφαλείας. Το γειωμένο πλαίσιο γίνεται μέρος ενός πυκνωτή το άλλο ηλεκτρόδιο του οποίου αποτελείται από τα φωτοβολταικά κύτταρα. Η χωρητικότητα του πυκνωτή εξαρτάται από :

- Τη επιφάνεια του φωτοβολταικού πάνελ και του γειωμένου πλαισίου.
- Τις ατμοσφαιρικές – περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Την σκόνη και την υγρασία που μπορούν να αυξήσουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα της επιφάνειας του πάνελ.

Από μετρήσεις που έχουν γίνει σε διάφορους τύπους πάνελ έχει διαπιστωθεί πως η χωρητικότητα είναι της τάξης των 150 pF [2.9]. Ανάλογα με τις συνθήκες η τιμή αυτή μπορεί να αυξηθεί δραματικά. Σε πάνελ καλυμμένο με στάσιμο νερό έχουν παρατηρηθεί χωρητικότητες έως και 9 nF [2.10]. Η παρασιτική χωρητικότητα είναι παρούσα σε κάθε φωτοβολταική

εγκατάσταση. Το εάν θα οδηγήσει η όχι σε ρεύμα διαρροής προς την γη εξαρτάται από το εάν υφίσταται κλειστό κύκλωμα (Σχήμα 2.14).



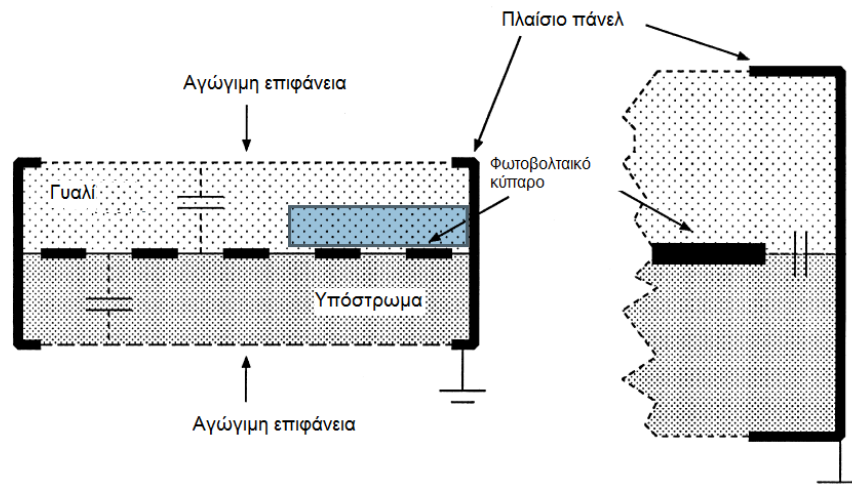
Σχήμα 2.14. Κύκλωμα συντονισμού ρεύματος διαρροής σε Φ/Β πάνελ.

2.12.1 Ρεύμα διαρροής σε Φ/Β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή

Μια τοπολογία που δεν περιλαμβάνει μετασχηματιστή συνδέει γαλβανικά το δίκτυο με το φωτοβολταϊκό πάνελ (Σχήμα 2.14). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ένα κλειστό κύκλωμα για να κυκλοφορήσει το ρεύμα διαρροής. Διαφορές δυναμικού που είναι δυνατό να δημιουργηθούν στα άκρα του «πυκνωτή» αυτού από την μεταγωγική δράση του inverter, φορτίζουν και εκφορτίζουν τον πυκνωτή. Τότε, η χωρητικότητα μεταξύ του πάνελ και της γείωσης, C_{earth} γίνεται μέρος ενός κυκλώματος συντονισμού που περιλαμβάνει το πάνελ, τα φίλτρα DC και AC, και την ηλεκτρική εμπέδηση του δικτύου. Λόγω των παρεμβάσεων για την βελτίωση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος ο συντελεστής απόσβεσης του κυκλώματος μπορεί να είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε ρεύματα διαρροής σε επίπεδα πολύ πάνω από τα ανώτερα επιτρεπτά. Περεταίρω η συχνότητα συντονισμού δεν είναι σταθερή λόγω της διαφοροποιούμενης χωρητικότητας μεταξύ της γης και του φωτοβολταϊκού πάνελ. Η τελευταία εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, από την το μέγεθος του πάνελ και το μήκος της καλωδίωσης στην DC πλευρά του κυκλώματος [2.11]. Αναλόγως της τοπολογίας, την κατάσταση

των μεταγωγικών διακοπών και τις περιβαλλοντικές συνθήκες το χωρητικό ρεύμα γείωσης είναι δυνατό να προκαλέσει ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, διαταραχή του ρεύματος που παρέχεται στο δίκτυο και επιπρόσθετες απώλειες στο σύστημα. Το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί με την υλοποίηση ειδικών τεχνικών ελέγχου. Η προσθήκη παθητικών στοιχείων στο κύκλωμα μεγαλώνει την σταθερά απόσβεσης και συνεπώς βελτιώνει την συμπεριφορά του [2.14].

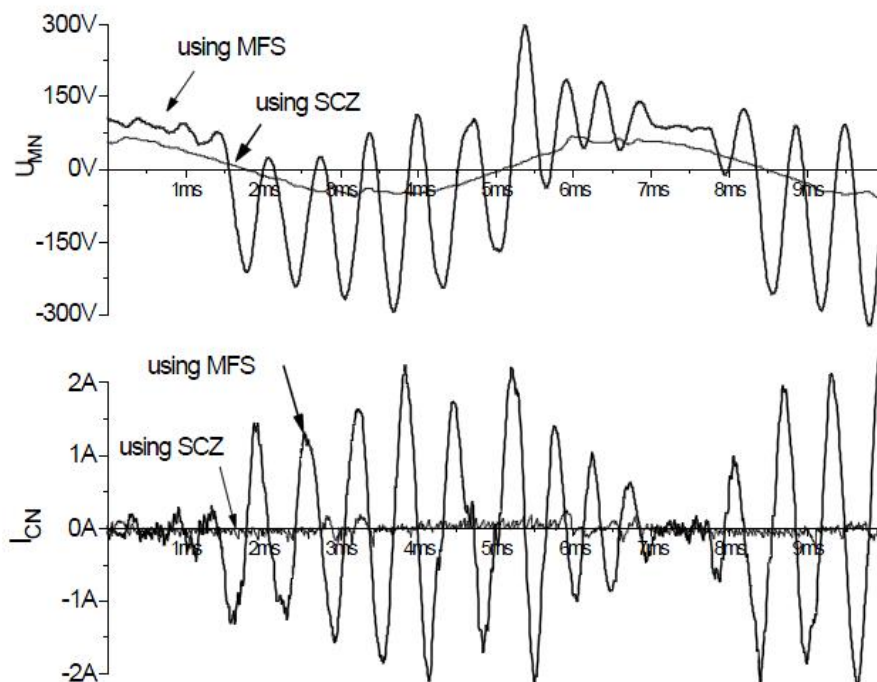
Όπως προαναφέρθηκε το εύρος της χωρητικότητας εξαρτάται από το περιβάλλον και από την δομή του φωτοβολταϊκού πάνελ και μπορεί να εκτιμηθεί σύμφωνα με τις φυσικές διαστάσεις του πάνελ και το γειωμένο πλαίσιο του. Το ένα ηλεκτρόδιο του πυκνωτή αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα ενώ το άλλο από το γειωμένο πλαίσιο. Στην χειρότερη περίπτωση ολόκληρο το πάνελ καλύπτεται από μια αγώγιμη επίστρωση, πχ σχηματισμένη από υγρασία ή σκόνη, αυξάνοντας την επιφάνεια του γειωμένου ηλεκτροδίου (Σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15. Φ/Β πάνελ συμπεριφέρεται ως πυκνωτής.

2.12.2 Ελαχιστοποίηση του ρεύματος διαρροής

Η συχνότητας χρονισμού των IGBTs για την διαμόρφωσης εύρους παλμού (pulse width modulation, PWM) επηρεάζει και το ρεύμα διαρροής. Είναι γνωστό ότι κατά την λειτουργία του αντιστροφέα ένας από τους τρεις κλάδους διαρρέεται από ρεύμα ανά χρονικό κύκλο. Αν θεωρήσουμε ότι η χωρητικότητα μεταξύ του πάνελ και της γης είναι ίση με μηδέν, εάν επιλέξουμε μια χαμηλή συχνότητα ανοιγο – κλεισίματος των IGBTs και συνεπώς αργή εναλλαγή των κλάδων οδηγεί στην δημιουργία μεγάλης διαφοράς δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή. Αντιθέτως η επιλογή υψηλής συχνότητας PWM έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες τάσεις και αποδεκτής στάθμης ρεύμα διαρροής όπως απεικονίζεται παρακάτω (Σχήμα 2.16) [2.13] .



Σχήμα 2.16. Η επιλογή υψηλής συχνότητας PWM έχει ως αποτέλεσμα μικρότερες τάσεις και αποδεκτής στάθμης ρεύμα διαρροής.

Ορισμος

Ρεύμα διαρροής ονομάζεται το ρεύμα που θα περάσει μέσα από το σώμα ενός ανθρώπου προς την γη ή κάποιο άλλο σημείο εάν αυτός έλθει σε επαφή με μια ηλεκτρική συσκευή [2.14].

2.13 Παραλλαγές τοπολογιών σχετικά με το ρεύμα διαρροής

Οι διάφορες παραλλαγές τοπολογιών Φ/Β αντιστροφών χωρίς μετασχηματιστή, μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής [2.15]. Οι ομαδοποίηση των αντιστροφών βασίζεται στα χαρακτηριστικά γνωρίσματα τους σχετικά με την διαχείριση του ρεύματος διαρροής.

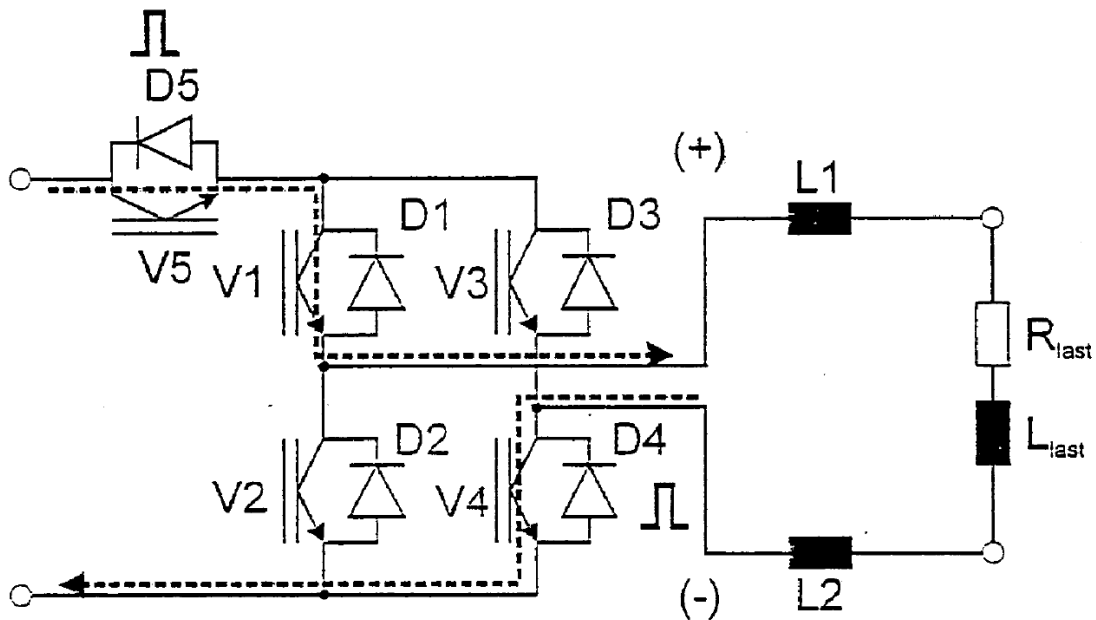
- **Τοπολογίες zero state de-coupled**
 - Τοπολογία H5
 - Τοπολογία HERIC
 - Τοπολογία H6-type MOSFET
 - Βελτιωμένη τοπολογία H6
 - Τοπολογία HRE

- **Τοπολογίες zero state mid-point clamped**
 - Τοπολογία H6
 - Τοπολογία HB-ZVR
 - Τοπολογία oH5
 - Τοπολογία PN-NPC

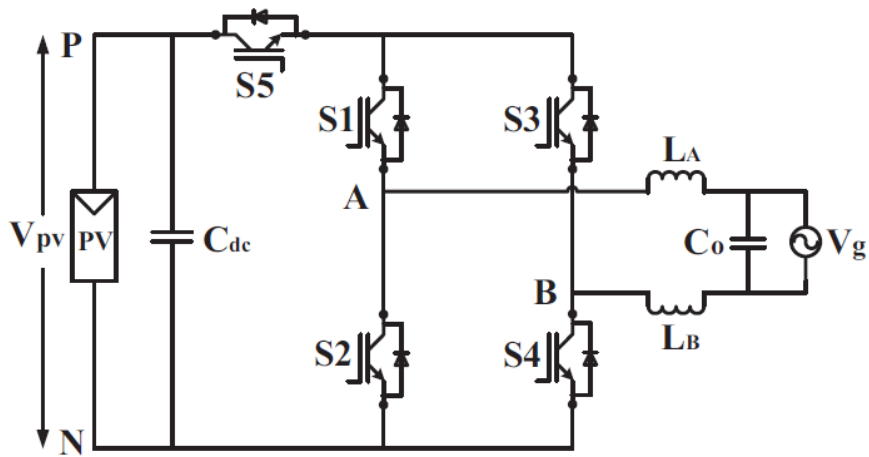
- **Τοπολογίες solidity clamped**
 - Τοπολογία NPC three level VSI
 - Τοπολογία ANPC
 - Τοπολογία dual parallel buck
 - Τοπολογία Virtual bus
 - Τοπολογία flying capacitor

2.13.1 Τοπολογία Η5

Μια τοπολογία που προτείνεται στο [2.16] ονομάζεται τοπολογία Η5 και φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Η τοπολογία αποτελεί πατέντα που κατέχει η SMA solar technology. Στην τοπολογία πλήρους γέφυρας (Η4) προστίθεται ένα επιπλέον IGBT. Η μέθοδος SPWM έχει εφαρμοστεί για να λειτουργεί ο αντιστροφέας σε 3 επίπεδα τάσης εξόδου. Στην θετική ημι-περίοδο οι διακόπτες D4, D5 (σχήματα 2.17, 2.18) είναι σε συχνότητα ανοιγο-κλεισίματος, ο διακόπτης D1 άγει μόνιμα. Η κατάσταση μηδενικής τάσης εξόδου επιτυγχάνεται όταν οι D4, D5 δεν άγουν και το παραμένον ρεύμα (freewheeling current) ρέει μέσω του D1, που άγει μόνιμα, και την παράλληλη δίοδο του D3 (σχήμα 2.17). Αυτό δημιουργεί έναν βρόχο "απόσβεσης" για το παραμένον ρεύμα το χρονικό διάστημα που οι διακόπτες D4 και D5 δεν άγουν. Τα αντίστοιχα συμβαίνουν στην αρνητική ημι-περίοδο με τους διακόπτες D2, D5 που είναι σε συχνότητα ανοιγο-κλεισίματος ενώ ο διακόπτης D3 άγει μόνιμα και το παραμένον ρεύμα (freewheeling current) ρέει μέσω του D3, και την παράλληλη δίοδο του D1.



Σχήμα 2.17. Η τοπολογία Η5 σε λειτουργία θετικής ημι-περιόδου, D5, D4 σε συχνότητα ανοιγο – κλεισίματος και η D1 ανοιχτή, από πατέντα [2.15]



Σχήμα 2.18. Η τοπολογία H5 από πατέντα [2.15].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 2^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[2.1] P. Fetfatzis, C. Alafodimos, M. Kallousis, P. Kofinas, C. Stergiou, Transformerless 3-phase PV Inverter simulation for efficient building installations, SEB11 conference Marseille, France, 1-3 June 2011, 'Smart Innovation, Systems and Technologies' and indexed in ISI conference publications.

[2.2] W. Shockley, "The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors," Bell System Technical Journal, vol. 28, pp. 435–89, 1949.

[2.3] Διπλωματική εργασία: Ανάπτυξη αλγορίθμου εύρεσης σημείου μέγιστης ισχύος για φωτοβολταϊκά συστήματα – σύγκριση αντίστοιχων μεθόδων. Δημητρόπουλος Α. Ραιμόντο Μ.Ο. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2009.

[2.4] Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems. Dezso Sera. Aalborg University Institute of Energy Technology Denmark, January 2009.

[2.5] Διπλωματική εργασία, Ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων σε κτίριο γραφείων. Σαμολαδάς Χρήστος. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης 2008.

[2.6] M. Rivington et al., Agricultural and Forest Meteorology 132 (2005) 228–243.

[2.7] Low cost current source 1-phase photovoltaic grid connected inverter. Gurhan Ertasgin. Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences. School of Electrical and Electronic Engineering. The University of Adelaide.

[2.8] Power electronics, converters applications and design, 2nd edition. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robin. Wiley 1995.

[2.9] A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules. Soeren Baekhoej Kjaer, Member, IEEE, John K. Pedersen, Senior Member, IEEE, and Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2005.

[2.10] H. Schmidt, B. Burger, and Chr. Siedle; "Gefährdungspotenzial transformatorloser Wechselrichter – Fakten und Gerüchte"; in 18. Symposium Photovoltaische Sonnenenergie, 2003, pp. 89-98.

[2.11] N. Henze and T. Degner; "Radio Interference of Photovoltaic Power Systems"; in 16th International Wroclaw Symposium and Exhibition on EMC, 25-28 Jun. 2002, pp. 1-6

[2.12] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V. G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—An overview," in Proc. IEEE PESC'02, vol. 2, 2002, pp. 1995–2000.

[2.13] Inverters without transformer in grid connected photovoltaic applications. Meinhardt M. and Mutschler P. In Proceedings of the 1995 EPE, pp. 3.086 3.091, Sevilla, Spain.

[2.14] Eisner Safety Consultants; "Leakage Current (Part 1)"; May 2002.

[2.15] Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review. Monirul Islam, Saad Mekhilef, Mahamudul Hasan. Renewable and Sustainable Energy Reviews 45 (2015)69–86.

[2.16] Victor M, Greizer F, Bremicker S, Hübler U. Method of converting a direct current voltage from a source of direct current voltage, more specifically from a photovoltaic source of direct current voltage, into an alternating current voltage, ed: United States Patents 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προσομοίωση διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού αντιστροφέα (PV Inverter) τριών φάσεων στο MATLAB Simulink

3.1 Εισαγωγή

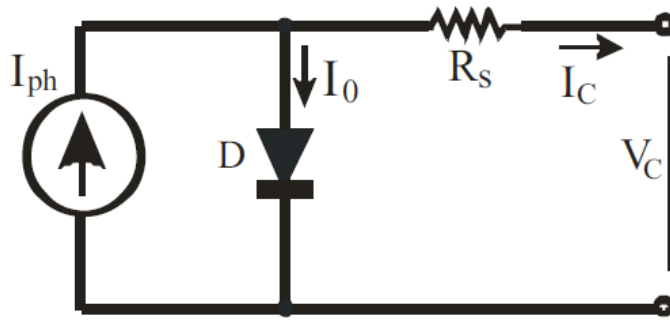
Σε αυτό το κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά ενός τριφασικού διασυνδεδεμένου στο δίκτυο αντιστροφέα με ικανότητα να τροφοδοτεί φορτία της τάξεως των 10 KW. Αυτή η τιμή του φορτίου επιλέχθηκε διότι ταιριάζει στο μέσο όρο της ενεργειακής τιμής που χρησιμοποιείται από ένα νοικοκυριό. Η τροφοδοσία του αντιστροφέα υλοποιείται από μια εξίσωση που προσομοιώνει την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Το σύστημα υλοποιείται στο πρόγραμμα προσομοίωσης Simulink του MATLAB.

3.2 Τα προγράμματα προσομοίωσης

Τα προγράμματα προσομοίωσης είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό εφαρμογών ηλεκτρονικών ισχύος, όπως οι φωτοβολταϊκού αντιστροφείς. Παρέχουν την δυνατότητα να ελεγχθεί η δυναμική συμπεριφοράς ενός συστήματος πριν αυτό υλοποιηθεί έτσι ώστε όταν τελικά υλοποιηθούν να βρίσκονται ήδη σε μια κατάσταση καλής λειτουργίας. Τέτοια προγράμματα είναι το MATLAB / Simulink, Orcad Pspice κ.λπ.. Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών έχει την ανάγκη βελτίωσης των υπαρχόντων υποσυστημάτων συμπεριλαμβανομένου του για την βελτίωση της λειτουργικότητάς τους, την μείωση του κόστους και την υλοποίηση νέων τεχνολογιών.

3.3 Η φωτοβολταϊκή συστοιχία

Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία συνίσταται από έναν αριθμό Φ/Β κυττάρων συνδεδεμένων σε σειρά και παράλληλα. Ένα Φ/Β κύτταρο αναπαρίσταται συνήθως από το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 3.1). Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου και κατά συνέπεια της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία. Η τάση εξόδου είναι μια συνάρτηση του φωτορεύματος που εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία (σχέση 3.1) [3.1][3.2].



Σχήμα 3.1. Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β κυττάρου.

$$V_c = \frac{AkT_c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph} + I_0 - I_c}{I_0} \right) - R_s I_c \quad (3.1)$$

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία ή και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεταβάλλονται, τότε και η τάση και το ρεύμα εξόδου του κυττάρου επηρεάζονται. Επίσης η θερμοκρασία του κυττάρου επηρεάζεται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ηλιακή ακτινοβολία. Συνεπώς σε ένα ολιστικό μοντέλο προσομοίωσης του Φ/Β κυττάρου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι σχέσεις. Μία τέτοια μέθοδος έχει υλοποιηθεί από τον Buresch [3.3]. Οι συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις 3.2, 3.3.

$$C_{TV} = 1 + \beta_T (T_c - T_x) \quad (3.2)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_c} \beta_T (T_c - T_x) \quad (3.3)$$

Οι συντελεστές διόρθωσης για την ηλιακή ακτινοβολία από τις σχέσεις 3.4, 3.5.

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \alpha_T (S_x - S_c) \quad (3.4)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_c} (S_x - S_c) \quad (3.5)$$

Όπου:

e:	φορτίο ηλεκτρονίου $1,602 \cdot 10^{-19}$ C	A:	ο συντελεστής προσαρμογής θεωρητικής καμπύλης I=V στην πειραματική
k:	σταθερά του Boltzman	β_T :	συντελεστής διόρθωσης
I_c :	ρεύμα εξόδου Φ/B κυττάρου, A	γ_T :	συντελεστής διόρθωσης
I_{ph} :	φωτορεύμα, A	α_s :	Κλίση μεταβολής θερμοκρασίας λόγω μεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας, Km^2/W
I_0 :	ρεύμα κόρου	T_x :	θερμοκρασία περιβάλλοντος, K
R_s :	αντίσταση σειράς Φ/B κυττάρου	S_c :	STC ακτινοβολία, W/m^2
T_c :	STC θερμοκρασία Φ/B κυττάρου, K	S_x :	Μεταβλητή ακτινοβολία W/m^2
V_c :	τάση εξόδου Φ/B κυττάρου, V		

Εάν υπολογίσουμε το εκ νέου το φωτορεύμα I_{ph} και την τάση εξόδου V_c σύμφωνα με τους συντελεστές διόρθωσης τότε έχουμε τις σχέσεις 3.6, 3.7. Αυτές δίνουν την μεταβολή τους σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία.

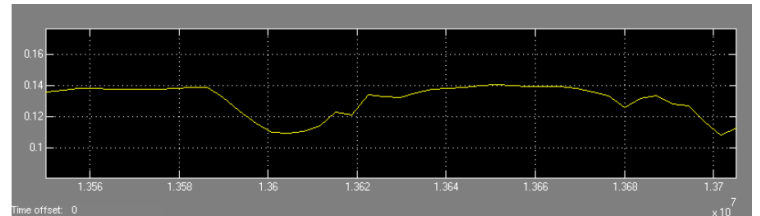
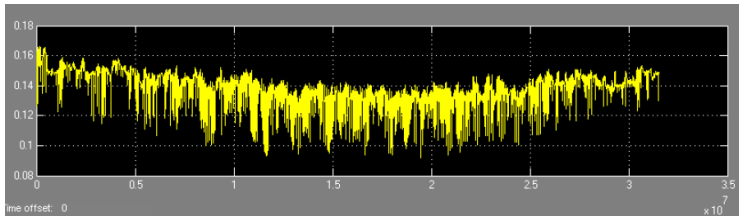
$$V_{CX} = V_C C_{TV} C_{SV} \quad (3.6)$$

$$I_{phx} = I_{ph} C_{TI} C_{SI} \quad (3.7)$$

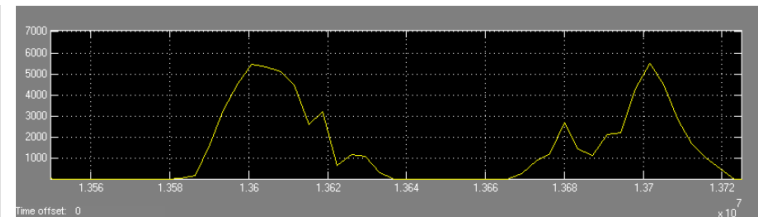
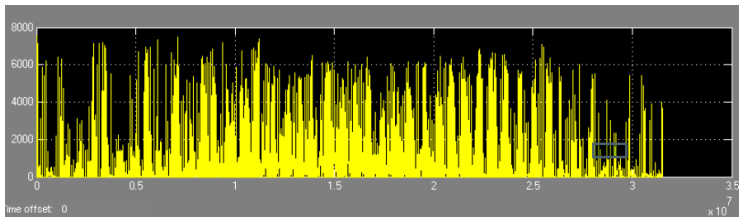
Αν συνδυάσουμε τις σχέσεις 3.6 και 3.7 με την σχέση 2.1 μπορούμε να υπολογίσου το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP).

3.4 Προσομοίωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας

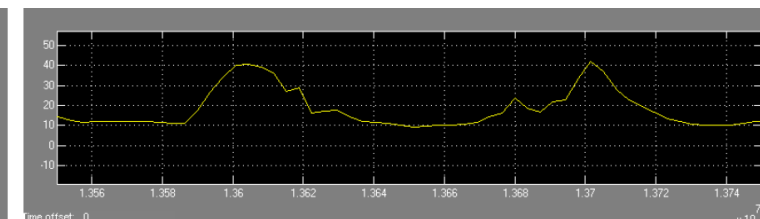
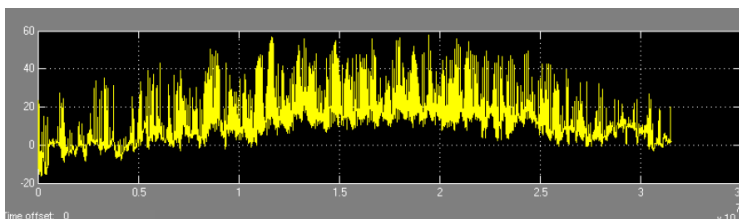
Η φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει προσομοιωθεί στο Simulink με δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για χρονικό διάστημα ενός έτους. Έχουν χρησιμοποιηθεί μετρήσεις από μετεωρολογικά δεδομένα από ένα πρόγραμμα που έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο του Αϊντχόφεν [3.4]. Οι παράμετροι του προγράμματος είναι ο προσανατολισμός της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (νότιος) και η κλίση της συστοιχίας (36° νότια) και η επιφάνεια της (72 m^2). Η συνολική ενέργεια που υπολογίστηκε από την προσομοίωση για ένα έτος συνεχούς λειτουργίας είναι 8501 kW . Οι προσομοιωμένες διακυμάνσεις με την θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και την ώρα της ημέρας απεικονίζονται στα σχήματα 3.2 – 3.5.



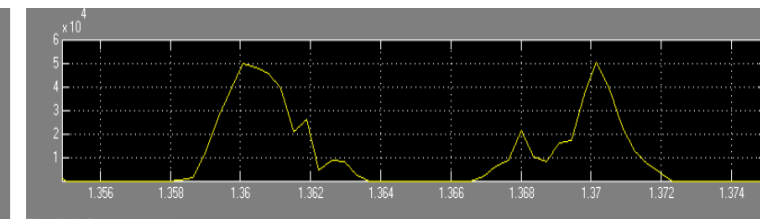
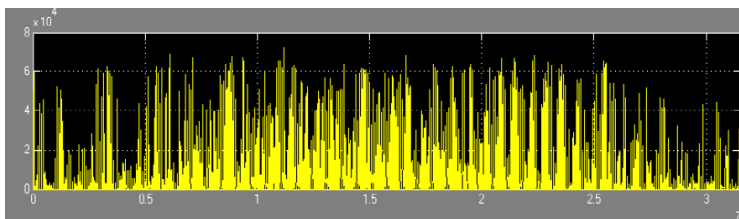
Σχήμα 3.2. Απόδοση Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).



Σχήμα 3.3. Ισχύς Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).



Σχήμα 3.4. Θερμοκρασία Φ/Β συστοιχίας κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).



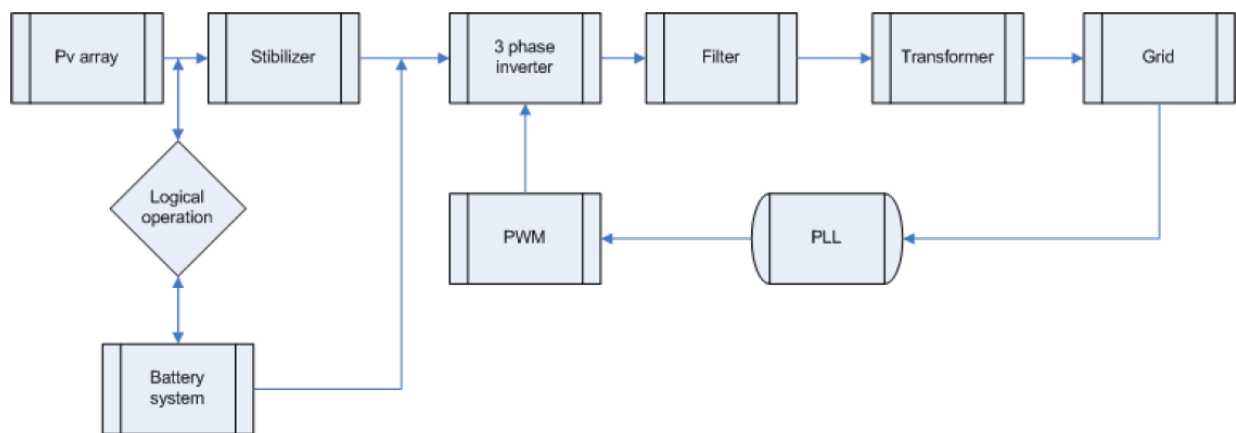
Σχήμα 3.5. Ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια ενός έτους (αριστερά) και δύο ημερών (δεξιά).

Ο άξονας Χ στα σχήματα 3.2 – 3.5 είναι σε δευτερόλεπτα. Οι μονάδα του άξονα Υ αναφέρεται σε κάθε εικόνα ξεχωριστά. Εάν τα παρατηρήσει κάνεις προσεκτικά θα δει πως η απόδοσή μειώνεται σε σχέση με την θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα είναι να μειώνεται η αποδιδόμενη ενέργεια.

3.5 Γενική περιγραφή του συστήματος

Το σχήμα 3.6 απεικονίζει το μπλοκ διάγραμμα συνδεδεμένου στο δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος αντιστροφέα. Αποτελείται από:

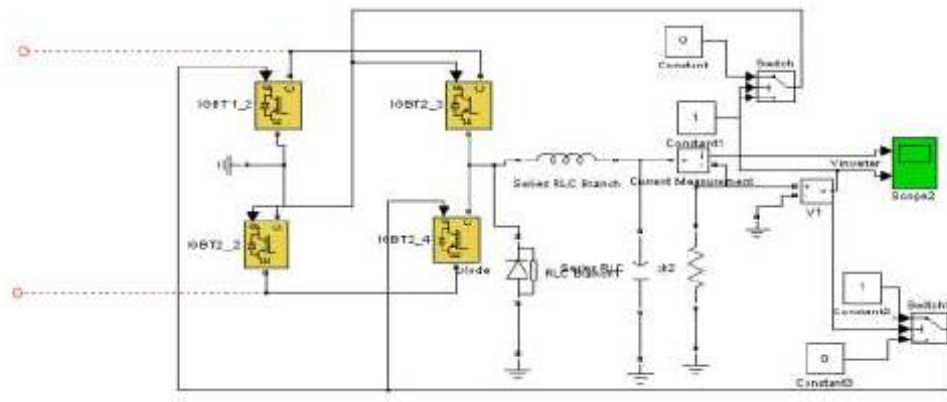
- Την φωτοβολταική συστοιχία (PV array).
- Τον σταθεροποιητή τάσης (Stabilizer) που ρυθμίζει την τάση εισόδου του αντιστροφέα και υλοποιεί την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT).
- Των αντιστροφέα τριών φάσεων που μετατρέπει την συνεχή τάση (DC) σε εναλλασσόμενη (AC).
- Το φίλτρο χαμηλών συχνοτήτων LC που μειώνει τις αρμονικές διαταραχές.
- Τον βρόχο κλειδώματος φάσης που συγχρονίζει την φάση της τάσης εξόδου του αντιστροφέα με αυτή του δικτύου.
- Τον ελεγκτή διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) που χειρίζεται τα IGBTs.



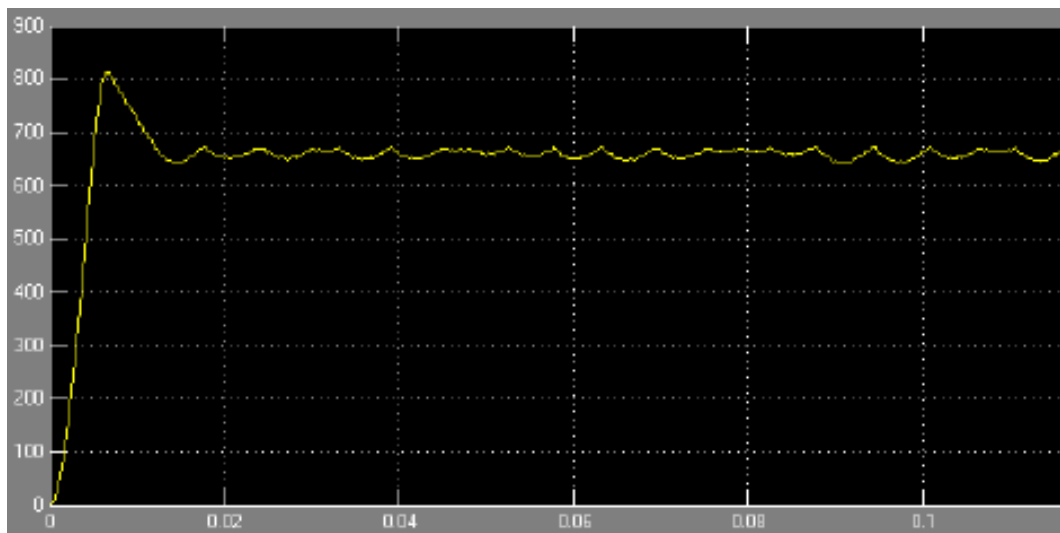
Σχήμα 3.6. Μπλοκ διάγραμμα διασυνδεδεμένου φωτοβολταικού συστήματος.

3.5.1 Ο σταθεροποιητής συνεχούς τάσης (DC stabilizer)

Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα του σταθεροποιητή στο Simulink. Η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι στα 700 V και σταθεροποιείται στα 650 V (σχήμα 3.8). Ο σταθεροποιητής αποτελείται από 4 IGBTs και δύο διακόπτες σύγκρισης. Οι διακόπτες σύγκρισης συγκρίνουν την τάση εξόδου με το επιθυμητό set point των 650 V και χειρίζονται τα IGBTs μέσω του σήματος συγχρονισμού. Η έξοδος του σταθεροποιητή είναι συνδεδεμένη στην είσοδο του αντιστροφέα μέσω ενός φίλτρου LC χαμηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 3.7. Μπλοκ διάγραμμα σταθεροποιητή συνεχούς τάσης.

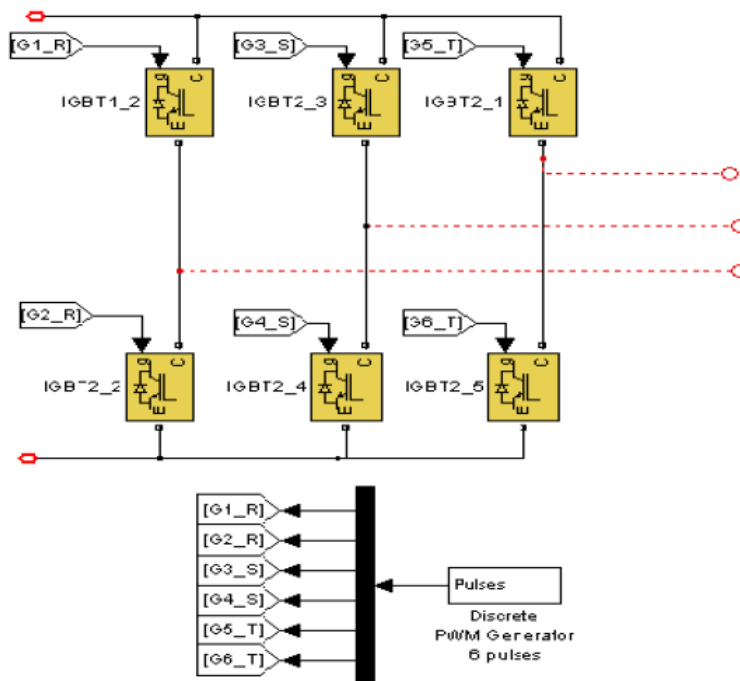


Σχήμα 3.8. Τάση εξόδου σταθεροποιητή συνεχούς τάσης.

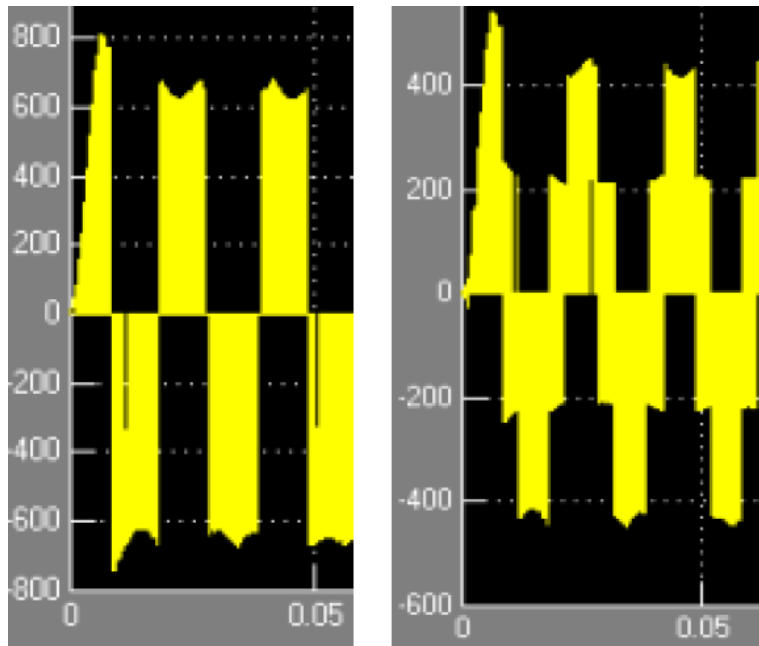
Μια διαφορετική συνδεσμολογία είναι αυτή του σταθεροποιητή υποβιβασμού τάσης (buck converter) [3.5]. Η απόδοση του σταθεροποιητή τάσης είναι σημαντική για την λειτουργία του αντιστροφέα. Αυτό ισχύει ειδικά σε περίπτωση που η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή αλλά έχει διακυμάνσεις ή η απόδοση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι χαμηλή.

3.5.2 Ο αντιστροφέας (inverter)

Ο αντιστροφέας μετατρέπει της συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Αυτό επιτυγχάνεται στο Simulink με το κύκλωμα του σχήματος 3.9. Σε αυτό απεικονίζεται ένας αντιστροφέας με τρία σκέλη κάθε ένα εκ των οποίων κάθε ένα περιλαμβάνει 2 IGBTs. Στο ίδιο σχήμα υπάρχει και η μονάδα ελέγχου του αντιστροφέα. Η μονάδα αυτή ελέγχει την λειτουργία της διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) και μέσω αυτής την συχνότητα ανοιγο – κλεισίματος των IGBTs όπως αυτή εξηγήθηκε στο κεφάλαιο 2.11.3. Η συχνότητα αυτή της στην συγκεκριμένη προσομοίωση είναι 1 KHz. Η λειτουργία του αντιστροφέα μας δίνει τις εξόδους που απεικονίζονται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.9. Κύκλωμα αντιστροφέα στο Simulink.



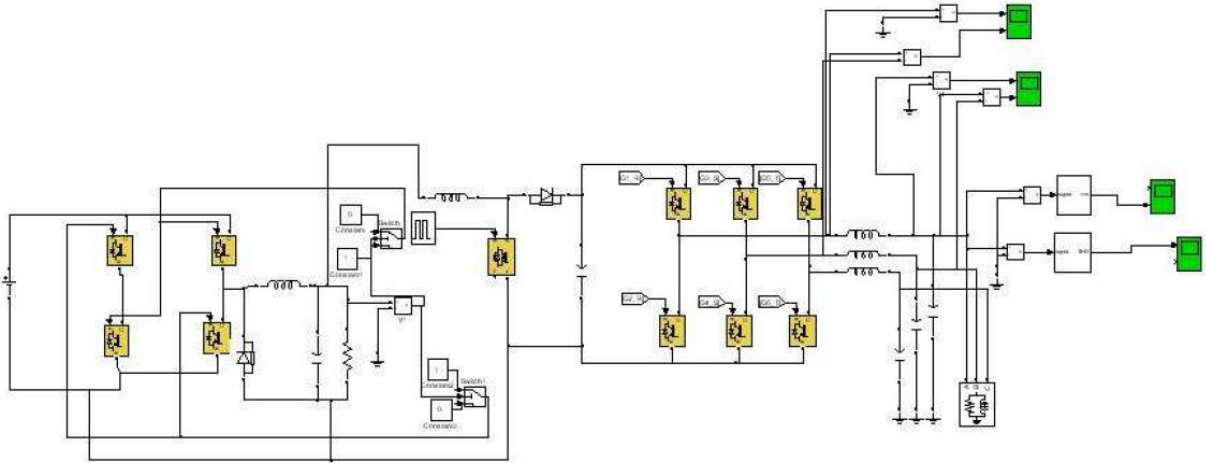
Σχήμα 3.10. Τάση εξόδου αντιστροφέα (φάση με φάση αριστερά, φάση με ουδέτερο δεξιά).

3.6 Κύκλωμα ελέγχου, φορτίο, φίλτρο

Το κύκλωμα ελέγχου επιτελεί ένα πλήθος λειτουργιών:

- Ελέγχει τα IGBTs για την λειτουργία της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM).
- Συγχρονίζει τον αντιστροφέα με το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος.
- Λειτουργεί το σύστημα στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT).

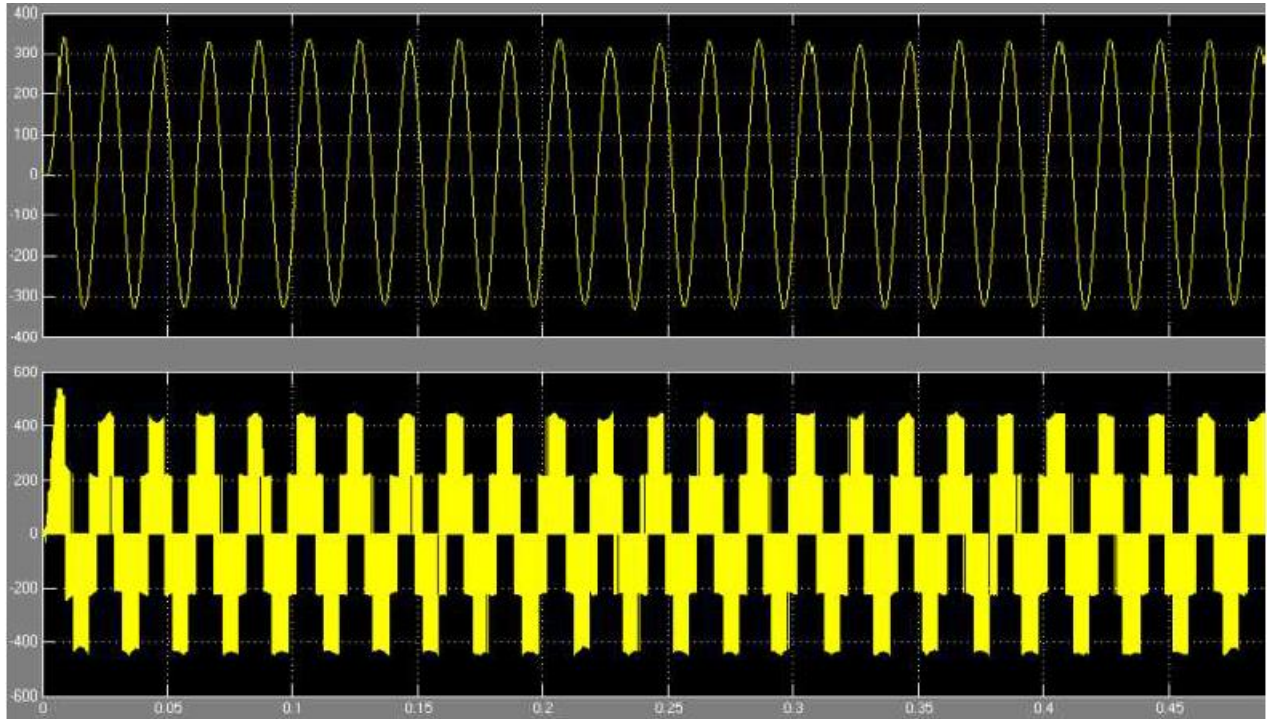
Το σημείο μέγιστης ισχύος (MPPT) υπολογίζεται μέσω της σχέσης 3.1. Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα που μπορεί να πραγματοποιήσει αυτές τις λειτουργίες είναι το TMS320F2812 της Texas Instruments [3.6]. Το Simulink έχει ένα δικό του σύστημα ελέγχου το οποίο λειτουργεί τον αντιστροφέα. Το φορτίο είναι απαραίτητο για να λάβουμε ρεαλιστικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιείται εδώ μια μικρή επαγωγή και μια μεγάλη αντίσταση για να γίνει η προσομοίωση ενός φορτίου 10 KW. Το φίλτρο LC που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση είναι της τάξης $L = 20 \text{ mH}$, $C = 35 \text{ }\mu\text{F}$. Το φορτίο, το φίλτρο καθώς και όλο το κύκλωμα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο σχήμα 3.11.



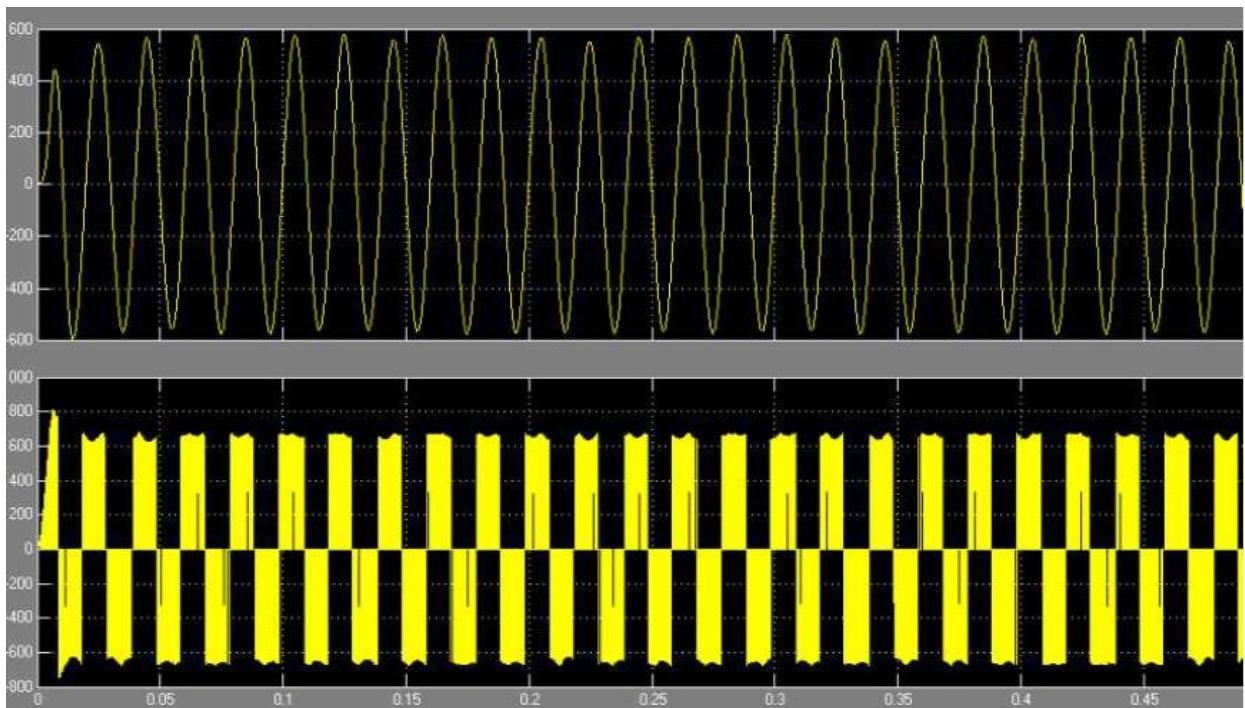
Σχήμα 3.11. Κύκλωμα προσομοίωσης στο Simulink.

3.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο σχήμα 3.12 πάνω απεικονίζεται η τάση εξόδου (φάση με ουδέτερο) μετά το φίλτρο LC και κάτω πριν το φίλτρο LC. Πριν το φίλτρο μπορούμε να διακρίνουμε στο διάγραμμα της τάσης την επιρροή της λειτουργίας των IGBTs. Αντίστοιχα η τάση εξόδου φάση με φάση πριν και μετά το φίλτρο LC απεικονίζονται στο σχήμα 3.13. Και εδώ πριν το φίλτρο LC βλέπουμε την επιρροή των IGBTs. Η συμπεριφορά του συστήματος σε ιδανικές συνθήκες και χωρίς φορτίο είναι εξαιρετική. Όταν προστίθενται όμως φορτία βλέπουμε τα ημιτονοειδή χαρακτηριστικά να γίνονται χειρότερα. Επίσης εάν προσομοιώσουμε κάθε κομμάτι τους συστήματος ξεχωριστά, η συμπεριφορά του είναι ιδανική. Δεν συμβαίνει το ίδιο όταν το σύστημα προσομοιώνεται όλο μαζί.

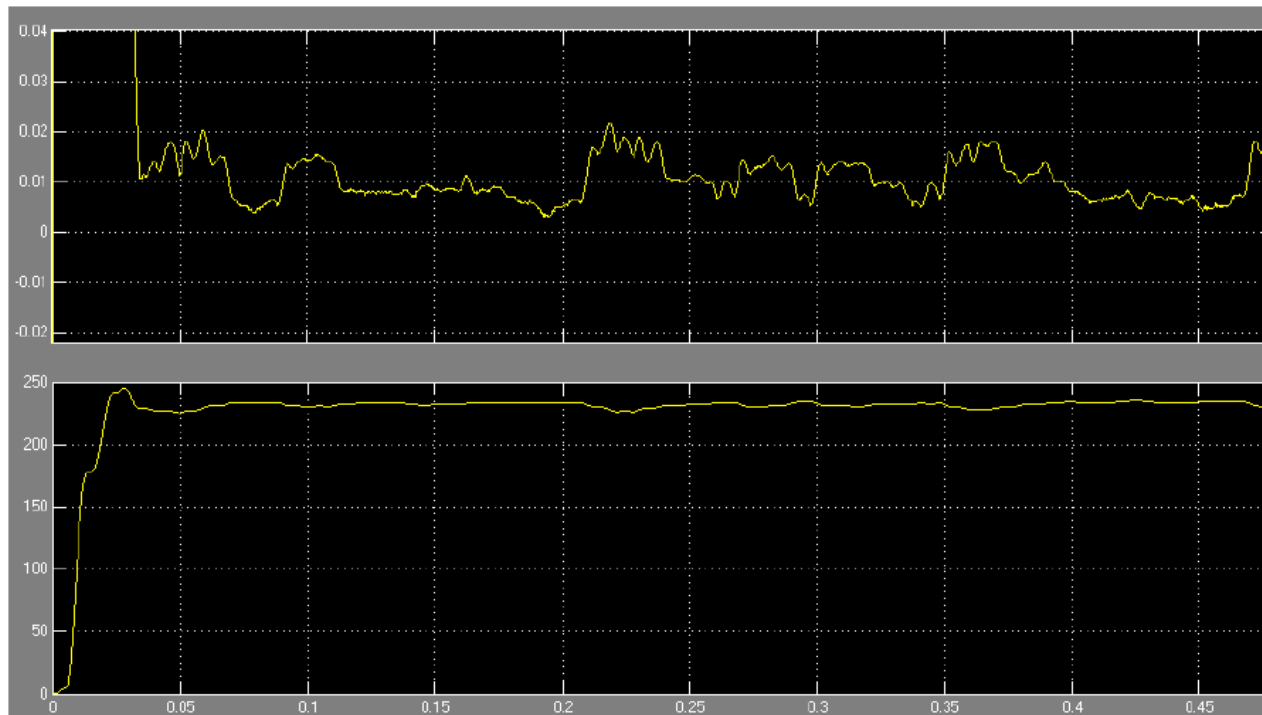


Σχήμα 3.12. Η τάση εξόδου (φάση με ουδέτερο) μετά το φίλτρο LC (πάνω) και πριν το φίλτρο LC (κάτω).



Σχήμα 3.13. Η τάση εξόδου (φάση με φάση) μετά το φίλτρο LC (πάνω) και πριν το φίλτρο LC (κάτω).

Έχει προσομοιωθεί επίσης και η V_{RMS} . Το αποτέλεσμα είναι 230 Volt (+- 5 Volt), (σχήμα 3.14 κάτω γράφημα). Η συνολικές αρμονικές διαταραχές (Total Harmonic Distortion, THD). Είναι της τάξης του 2,2 %, (σχήμα 3.14 πάνω γράφημα). Το αποτέλεσμα της THD μπορεί να είναι καλύτερο εάν εφαρμοστούν τεχνικές βελτίωσής της [3.7].



Σχήμα 3.14. Η τάση εξόδου V_{RMS} (κάτω) και η THD (πάνω).

3.8 Συμπεράσματα – Προοπτικές

Η προσομοίωση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για το διάστημα ενός έτους έχει πραγματοποιηθεί σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης οι εξισώσεις για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος έχουν γραφτεί. Η διασύνδεση στο δίκτυο και το κύκλωμα ελέγχου χρειάζονται περαιτέρω βελτίωση. Στο μέλλον θα μπορούσε ένα παρόμοιο σύστημα να υλοποιηθεί. Ενδεχομένως να χρειάζονται περαιτέρω προσομοιώσεις και σε άλλα προγράμματα όπως το Pspice με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 3^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [3.1] L. Castaner, S. Silvestere, Modeling Photovoltaic systems using PSpice, John Wiley & Sons, Inc, West Sussex, England, 2002.
- [3.2] Altas, I.H., Sharaf, A.M. Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment.
- [3.3] M. Buresch: Photovoltaic Energy Systems Design and Installation, McGraw-Hill, New York, 1983.
- [3.4] <http://sts.bwk.tue.nl/7y700/software/Default.asp> Technical University Eindhoven.
- [3.5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins. Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1995.
- [3.6] T. Kerekes, D. Séra, R. Teodorescu, PV inverter control using a TMS320F2812 DSP, European DSP Education and Research Symposium, EDERS 2006, Munich, Germany.
- [3.7] S. Manias, Power Electronics, Greek Edition, Athens, Greece, 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Αξιολόγηση δικτύου υπολογιστών μέσω της οικιακής ηλεκτρικής
εγκατάστασης

4.1 Εισαγωγή

Κατά τα προηγούμενα χρόνια επιτεύχθηκε αξιοσημείωτη πρόοδος στον τομέα των δικτύων μέσω της ηλεκτρικής οικιακής εγκατάστασης. Πολλές εταιρείες προσφέρουν συσκευές δικτύωσης, ενώ οι πάροχοι υπηρεσιών τηλεπικοινωνιών εξετάζουν την προοπτική χρησιμοποίησης αυτής της τεχνολογίας. Μια μεγάλη ελληνική εταιρεία τηλεπικοινωνιών χρησιμοποιούσε ήδη την τεχνολογία αυτή για την παροχή υπηρεσιών IPTV σε ένα υβριδικό δίκτυο Ethernet – ηλεκτρικής εγκατάστασης. Επομένως, υπάρχει ένα ορισμένο ενδιαφέρον για τον τρόπο λειτουργίας των δικτύων που χρησιμοποιούν περισσότερες από μία μεθόδους πρόσβασης. Ο κύριος σκοπός αυτής της εργασίας είναι η εγκατάσταση και η εξέταση ενός τέτοιου δικτύου.

4.2 Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα συστήματα επικοινωνίας μέσω του δικτύου της ηλεκτρικής εγκατάστασης (Power line communications, PLC) εισήχθησαν στη δεκαετία του 1950. Η χρήση τους ήταν για τον έλεγχο του εξοπλισμού των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν συστήματα τηλεφωνίας PLC για τους μηχανικούς που εργάζονταν στην τοποθέτηση των ηλεκτρικών καλωδίων. Στη δεκαετία του 1970 ένα σύστημα PLC που περιείχε μια συσκευή με μικρόφωνο και ένα βύσμα τροφοδοσίας και μια συσκευή με ένα ηχείο συνδεδεμένο μέσω του ηλεκτρικού ρεύματος βγήκε στο εμπόριο. Η βασική ιδέα ήταν να ακούτε τι συνέβαινε σε ένα άλλο δωμάτιο του σπιτιού. Όμως, όλες αυτές οι εφαρμογές απαιτούσαν μόνο μια ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων ανά 1 kbps. Αργότερα το 1999 στη Γερμανία κατά τη διάρκεια της έκθεσης CeBit παρουσιάστηκε ένα δίκτυο PLC. Περιλάμβανε ένα backbone ταχύτητας δεδομένων 2Mbps συνδεδεμένο με ένα μόντεμ με πέντε μονάδες σε ένα κτίριο διαμερισμάτων σε απόσταση 380 μέτρων.

Αξιοσημείωτη πρόοδος έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια στον τομέα των επικοινωνιών χαμηλής τάσης (LV, κάτω από 1kV) με σημαντικό αριθμό εταιρειών που αναπτύσσουν σχετικές τεχνολογίες. Το γεγονός ότι τα τελευταία τηλεπικοινωνιακά μονοπώλια στην Ευρώπη έληξαν το 1998 ευνόησε μια τέτοια εξέλιξη. Η σημαντικότερη από αυτές ήταν η ίδρυση της συμμαχίας homeplug powerline τον Μάρτιο του 2000 [4.1].

4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικής καλωδίωσης

Η οικιακή ηλεκτρική καλωδίωση έχει ένα τεράστιο πλεονέκτημα όταν εξετάζεται ως κανάλι επικοινωνίας. Κάθε σπίτι έχει πρίζες διαθέσιμες σε κάθε δωμάτιο, επομένως η συνδεσιμότητα είναι εξαιρετική. Από την άλλη πλευρά, τα ηλεκτρικά καλώδια δεν σχεδιάστηκαν ούτε δημιουργήθηκαν τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς. Λόγω αυτού του γεγονότος και της θορυβώδους φύσης της ίδιας της ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν ένα σκληρό περιβάλλον. Μια γραμμή που συνδέει δύο πρίζες, μπορεί να έχει μια πολύ περίπλοκη συνάρτηση μεταφοράς που θα μπορούσε να επηρεαστεί από τον θόρυβο που παράγεται από συσκευές που συνδέονται ή στο οικιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [4.2]. Ένα τυπικό οικιακό δίκτυο γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας έχει τα χαρακτηριστικά ενός δικτύου τοπολογίας αστέρα (star network topology). Οι πομποδέκτες μπορούν να βρίσκονται σε οποιοδήποτε από τα δωμάτια και λόγω αυτής της δομής σήματα υψηλής συχνότητας υποφέρουν από διάφορες αντανakλάσεις [4.3]. Ένα κατάλληλο μοντέλο που επιτρέπει μια ρεαλιστική περιγραφή του μέσου έχει προταθεί από τον Phillips [4.4]. Περιγράφει την απόκριση του καναλιού επικοινωνίας ως υπέρθεση N παλμών Dirac. Κάθε παλμός αντιπροσωπεύει την υπέρθεση των σημάτων από κάθε κατεύθυνση. Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζει τις αποκρίσεις με έναν πολύπλοκο συντελεστή στάθμισης ρ_i και εισάγει μια χρονική καθυστέρηση τ_i . Τότε το κανάλι επικοινωνίας περιγράφεται από την σχέση (4.1).

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i * e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (4.1)$$

Όπου:

ρ_i συντελεστή στάθμισης

τ_i χρονική καθυστέρηση

Μια διαφορετική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά του δικτύου στις χαμηλές συχνότητες έχει προταθεί από τον Zimmerman [4.5]. Περιλαμβάνει έναν επιπλέον συντελεστή εξασθένησης και την υπέρθεση των σημάτων από N διαφορετικές διαδρομές. Το μήκος της διαδρομής επικοινωνίας d_i και ένας συντελεστής στάθμισης g_i λαμβάνονται υπόψη για κάθε σήμα μαζί με την ταχύτητα διάδοσης v_p . Οι παράμετροι a_0 , a_1 και k χρησιμοποιούνται για να διαμορφωθεί η εξασθένιση που εξαρτάται από τη συχνότητα (σχέση 4.2).

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i * e^{-(a_0+a_1f^k)*d_i} * e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (4.2)$$

Όπου:

a_0, a_1	συντελεστές εξασθένησης
i	αύξων αριθμός διαδρομής
k	εκθετικός δείκτης διαδρομής (τυπικές τιμές 0,5 και 1)
g_i	συντελεστής στάθμισης (μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός των συντελεστών μετάδοσης και ανάκλασης του σήματος)
d_i	μήκος διαδρομής
τ_i	χρονική καθυστέρηση διαδρομής

4.4 Είδη θορύβου στην ηλεκτρική εγκατάσταση

Σε αντίθεση με άλλα μέσα τηλεπικοινωνιών, στην ηλεκτρική καλωδίωση τα είδη θορύβου είναι μάλλον περίπλοκο με διάφορους τύπους τυχαίων διαταραχών που συμβαίνουν. Οι τύποι θορύβου που συναντώνται στα δίκτυα μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης μπορούν να ταξινομηθούν σε πέντε κατηγορίες [4.6], [4.7]:

Έγχρωμος θόρυβος (coloured noise):

Αυτός ο θόρυβος έχει φασματική πυκνότητα σχετικά χαμηλής ισχύος, και μεταβάλλεται σε σχέση με την συχνότητα. Ο θόρυβος προκαλείται από πολλές πηγές θορύβου χαμηλής ισχύος.

Θόρυβος περιορισμένης ζώνης συχνότητας (narrow band noise):

Αυτός ο θόρυβος αποτελείται από ημιτονοειδή σήματα με διαμορφωμένα πλάτη. Οι πηγές θορύβου είναι σταθμοί εκπομπής και το επίπεδο θορύβου ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Περιοδικός παλμικός θόρυβος που είναι ασύγχρονος στη συχνότητα δικτύου:

Οι παλμοί έχουν ρυθμό επανάληψης γενικά από 50 kHz έως 200 kHz. Ο θόρυβος προκαλείται κυρίως από την λειτουργία των τροφοδοτικών.

Περιοδικός παλμικός θόρυβος που είναι συγχρονισμένος με τη συχνότητα δικτύου:

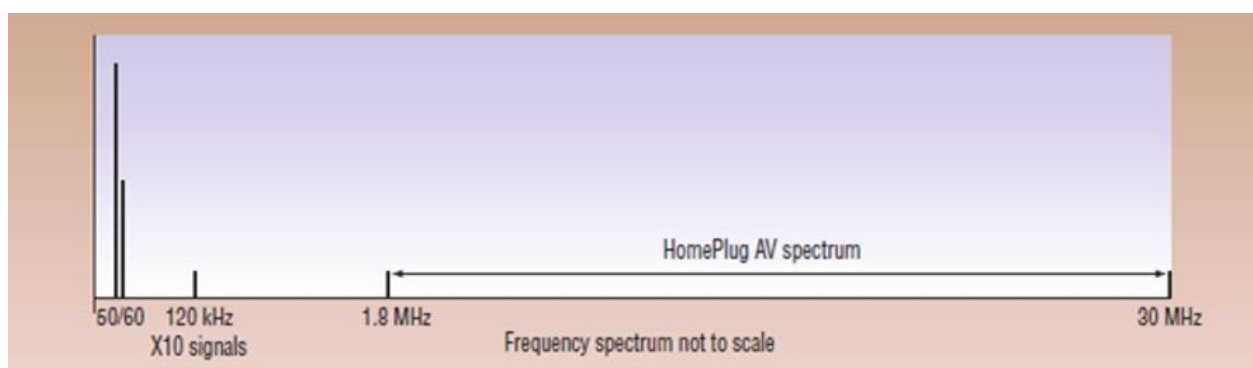
Οι παλμοί έχουν ρυθμό επανάληψης 50 Hz ή 100 Hz και είναι συγχρονισμένοι με την συχνότητα του δικτύου. Η διάρκεια των παλμών είναι μικρή, γενικά της τάξης των μsecond . Αυτός ο θόρυβος προκαλείται από τροφοδοτικά που λειτουργούν σε συγχρονισμό με την συχνότητα του δικτύου.

Ασύγχρονος παλμικός θόρυβος:

Ο θόρυβος προκαλείται από την αλλαγή των φορτίων στο δίκτυο διανομής. Οι παρορμήσεις έχουν διάρκεια από μερικά msec έως λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η φασματική πυκνότητα ισχύος αυτού του τύπου θορύβου μπορεί να έχει επίπεδα άνω των 50 dB πάνω από το θόρυβο του περιβάλλοντος.

4.5 Η τεχνολογία

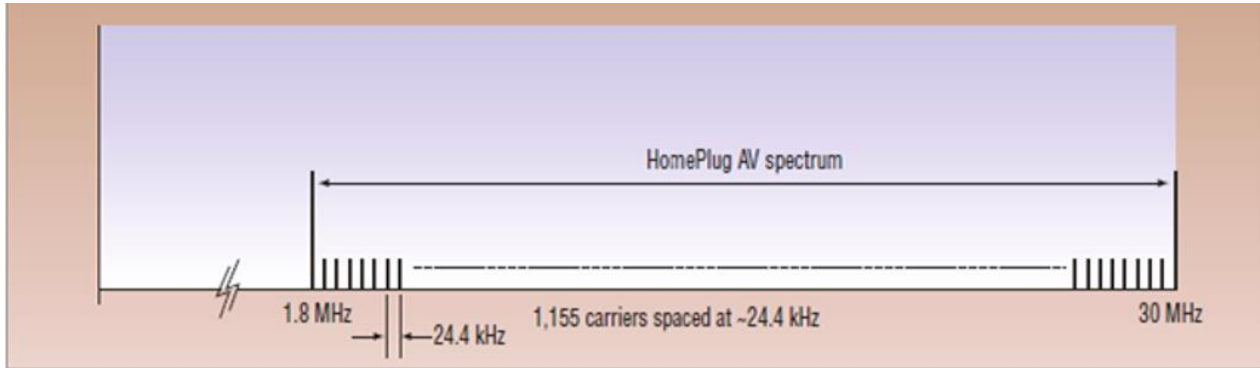
Ένας αριθμός τεχνικών χρησιμοποιούνται για αντιμετώπιση των προκλήσεων του περιβάλλοντος του οικιακού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Το σχήμα 4.1 απεικονίζει το εύρος ζώνης του καναλιού μετάδοσης της οικιακής ηλεκτρικής εγκατάστασης μέχρι τα 30 MHz. Τα σήματα χαμηλής συχνότητας όπως το X10 στα 120 KHz και η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος στα 50 ή 60 Hz αποκόπτονται μέσω ενός παθητικού φίλτρου.



Σχήμα 4.1. Το φάσμα συχνοτήτων της ηλεκτρικής παροχής, των σημάτων X10 και εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για τα δίκτυα μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης .

Η ζώνη συχνοτήτων από 1,8 MHz έως 30 MHz διαχωρίζεται σε 1.155 φορείς (Σχήμα 4.2) σε απόσταση 24,4 KHz. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται η ορθογώνια διαμόρφωση πολλαπλών φερουσών (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM). Η OFDM είναι μια ισχυρή τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως σε μόντεμ DSL και ασύρματες εφαρμογές. Πρακτικά χρησιμοποιούνται 917 φορείς για να μεταδοθούν σήματα (σχήμα 4.2). Κάθε φορέας διαμορφώνεται είτε με χρήση διαφόρων τεχνικών διαμόρφωσης όπως BPSK, QPSK, QAM), 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM ή 1024-QAM ανάλογα με την ποιότητα του καναλιού μετάδοσης. Η διαμόρφωση 1024-QAM χρησιμοποιεί τον υψηλότερο αριθμό bits ανά φορέα 1024 μοναδικά αναλογικά φάσματα / εύρη σχηματίζει σύμβολα που αντιπροσωπεύουν 10 ψηφία. Σε περίπτωση που και οι 917 φορείς διαμορφωθούν με διαμόρφωση 1024-QAM, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων του καναλιού θα προσεγγίσει το όριο του Shannon, φτάνοντας τα 197Mbps [4.8]. Στην πράξη μετά από μια εκτίμηση της ποιότητας του καναλιού μετάδοσης κάθε φέρουσα

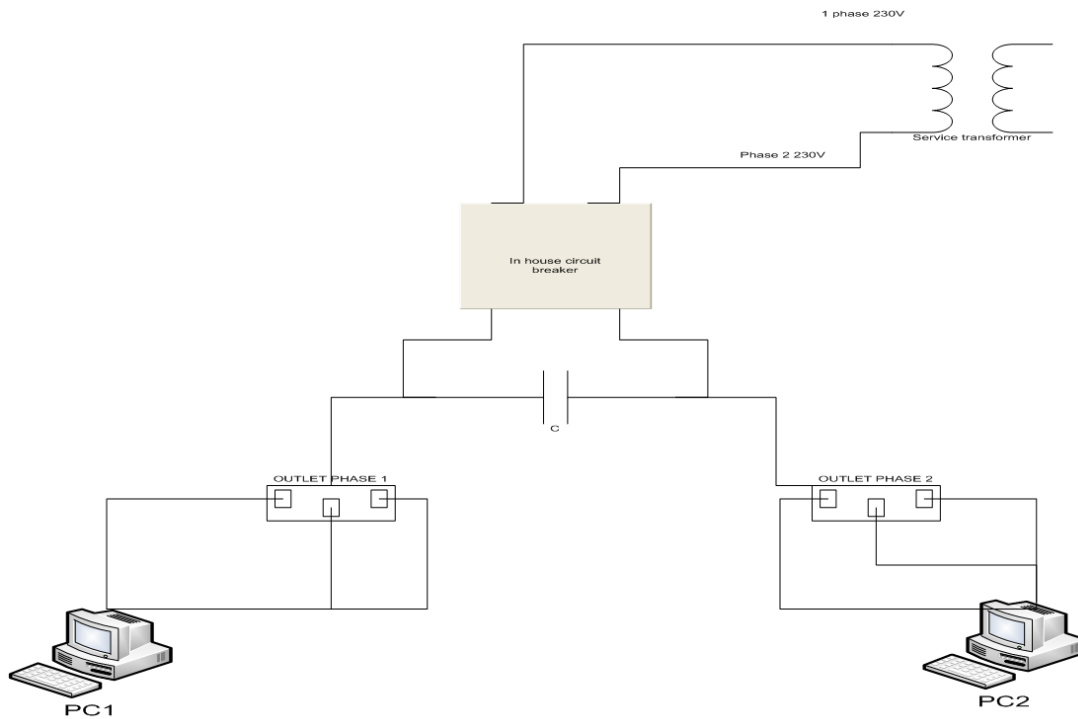
διαμορφώνεται με τη μέγιστη ποσότητα δεδομένων που επιτρέπει η ποιότητα του μέσου μετάδοσης [4.9].



Σχήμα 4.2. Το φάσμα συχνοτήτων της ορθογώνιας διαμόρφωσης πολλαπλών φερουσών (OFDM).

4.6 Μετάδοση δεδομένων από φάση σε φάση

Ο κεντρικός οικιακός πίνακας της ηλεκτρικής εγκατάστασης αποτελεί ένα σημείο ζεύξης για την μετάδοση δεδομένων από φάση σε φάση. Λόγω της παράλληλης διαδρομής που ακολουθούν τα καλώδια κάθε φάσης μέχρι να συνδεθούν στον πίνακα σχηματίζεται ένας πυκνωτής (σχήμα 4.3). Σε αυτό το σημείο κάθε αγωγός χρησιμεύει ως πλάκα από πυκνωτή. Όταν οι αγωγοί διαφορετικών φάσεων βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, εμφανίζεται μια χωρητικότητα μεταξύ τους, συνδέοντας τις δύο φάσεις. Αυτό μπορεί να γενικευτεί σε όλες τις φάσεις του δικτύου ηλεκτρικής εγκατάστασης. Στις υψηλές συχνότητες η αντίσταση μεταξύ των αγωγών (Z), με τη μορφή ηλεκτρικής εμπέδησης, είναι χαμηλή. Αυτή δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των ηλεκτρικών συσκευών που πιθανόν να λειτουργούν. Όταν μια ηλεκτρική συσκευή συνδεδεμένη σε περισσότερες από μία φάσεις τίθεται σε λειτουργία, η αντίσταση του καναλιού μετάδοσης μπορεί να μειωθεί ακόμα περισσότερο. Σε κάθε περίπτωση, η σύνθετη αντίσταση του καναλιού μετάδοσης Z_{BUS} είναι πάντα αρκετά χαμηλή ώστε να μην παρεμποδίσει γεφυρώσει την μετάδοση δεδομένων από φάση σε φάση. Στις μετρήσεις αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχει διαφορά ταχύτητας μεταξύ δικτύων που χρησιμοποιούν μία φάση και δικτύων κάνουν σύζευξη φάσεων.

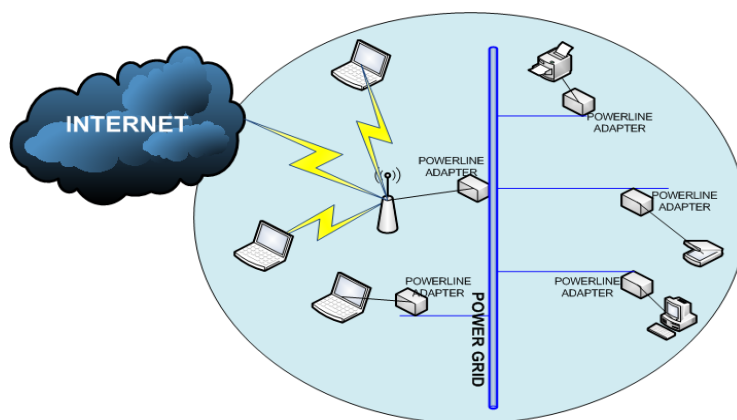


Σχήμα 4.3. Δύο φάσεις δημιουργούν έναν πυκνωτή στον οικιακό πίνακα.

4.7 Η έννοια του υβριδικού δικτύου

Ο όρος υβριδικό περιγράφει ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί περισσότερες από μία τεχνολογίες δικτύωσης [4.10]. Όπως προαναφέρθηκε η δομή του ευρωπαϊκού δικτύου χαμηλής τάσης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα δίκτυο τοπολογίας αστέρος. Ως επέκταση σε αυτήν την ιδέα, μπορούμε να υποθέσουμε ότι το οικιακό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας από τον κεντρικού πίνακα μέχρι τις διάφορες πρίζες παροχής ακολουθούν την ίδια αρχιτεκτονική [4.3]. Από την άλλη πλευρά, ένα ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιεί μια σειρά από τοπολογίες ανάλογα με τον αριθμό των σημείων πρόσβασης και τους δέκτες που είναι συνδεδεμένοι εκείνη τη στιγμή. Τα ασύρματα δίκτυα είναι εξαιρετικά ευρέως διαδεδομένα. Γενικά, μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στη συχνότητα μικροκυμάτων 2,4 GHz. Τα δίκτυα μέσω της οικιακής ηλεκτρικής καλωδίωσης εκμεταλλεύονται την υπάρχουσα καλωδίωση

που χρησιμοποιείται για τη διανομή ενέργειας σε ένα σπίτι για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων [4.9]. Μια σύνδεση μεταξύ δύο ή περισσότερων πομποδεκτών, υπολογιστών σε αυτή την περίπτωση, επιτυγχάνεται μέσω προσαρμογέων που είναι συνδεδεμένοι στις πρίζες. Κάθε προσαρμογέα συνδέεται με έναν υπολογιστή μέσω καλωδίου Ethernet. Συνεπώς, σχηματίζεται δίκτυο τύπου Ethernet μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιεί τη ζώνη συχνοτήτων 1 - 30 MHz για τη μετάδοση σήματος. Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός τέτοιου δικτύου είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη για πρόσθετη καλωδίωση και η τεχνολογία είναι plug and play, πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτείται ειδικό λογισμικό ή προγράμματα οδήγησης για σωστή λειτουργία. Η δικτύωση της γραμμής ρεύματος προσφέρει μια εναλλακτική τεχνολογία δικτύωσης που μπορεί να λειτουργεί συμπληρωματικά με ασύρματα, Ethernet ή και τα δύο. Ειδικά τα ασύρματα σημεία πρόσβασης έχουν περιορισμένη εμβέλεια και αντιμετωπίζουν προβλήματα με τους τοίχους και τη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών ορόφων. Ένα υβριδικό δίκτυο όπως αυτό που απεικονίζεται παρακάτω (σχήμα 4.4) θα μπορούσε να λύσει αυτό το πρόβλημα. Συμπεριλαμβάνει ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης με δύο φορητούς υπολογιστές συνδεδεμένους,



Σχήμα 4.4. Υβριδικό δίκτυο.

4.8 Μετρήσεις

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαφορετικές ομάδες μετρήσεων. Η πρώτη ομάδα έγινε με την χρήση δύο υπολογιστών συνδεδεμένων μέσω ενός δικτύου μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης ενώ η δεύτερη έγινε με την χρήση ενός υβριδικού δικτύου που περιλάμβανε ένα δίκτυο μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης και ένα ασύρματο δίκτυο. Για την διενέργεια των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε τα πρόγραμμα αξιολόγησης δικτύων IxChariot 6.50 and Performance Endpoints 6.60 [4.11].

4.8.1 Μετρήσεις δικτύου μέσω ηλεκτρικής καλωδίωσης

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων του τμήματος Αυτοματισμού του ΤΕΙ Πειραιά. Για την διενέργεια τους χρησιμοποιήθηκαν:

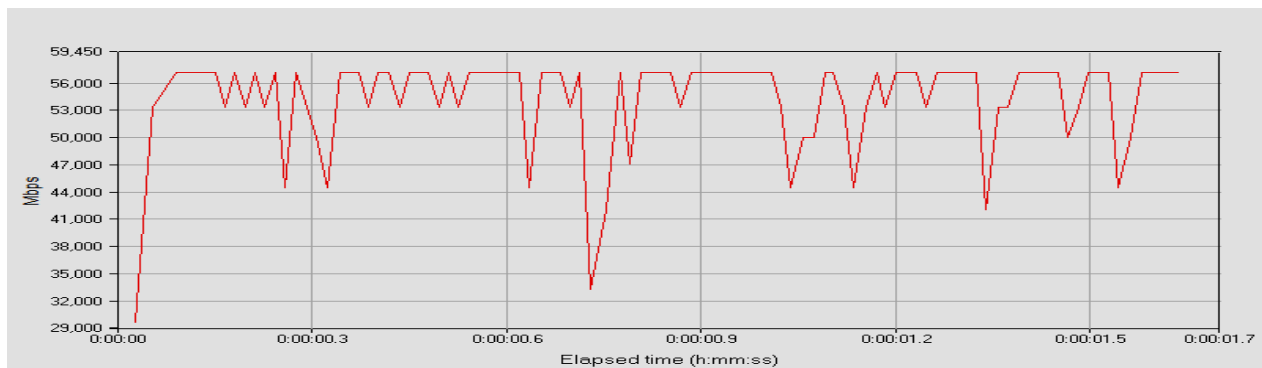
- Ένας φορητός υπολογιστής HP Compaq nx9010 με επεξεργαστή Intel Pentium 4 CPU 2.8 GHz, 448 MB μνήμης RAM, με κάρτα δικτύου National Semiconductor's 10/100 και λειτουργικό σύστημα Microsoft Windows XP Professional.
- Ένας σταθερός υπολογιστής με επεξεργαστή Intel Core2 Duo CPU 2.2 GHz, 1GB RAM, Atheros L1 Gigabit Ethernet 10/100/1000Base-T Network adapter.
- Two Netgear HDX101 AV Powerline adapters.
- Τα πρόγραμμα αξιολόγησης δικτύων IxChariot 6.50 and Performance Endpoints 6.60.
-

Για να γίνουν οι μετρήσεις ο φορητός υπολογιστής μετακινούταν σε διάφορα σημεία του κτιρίου. Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια σύνοψη των μετρήσεων και τον τοπολογιών.

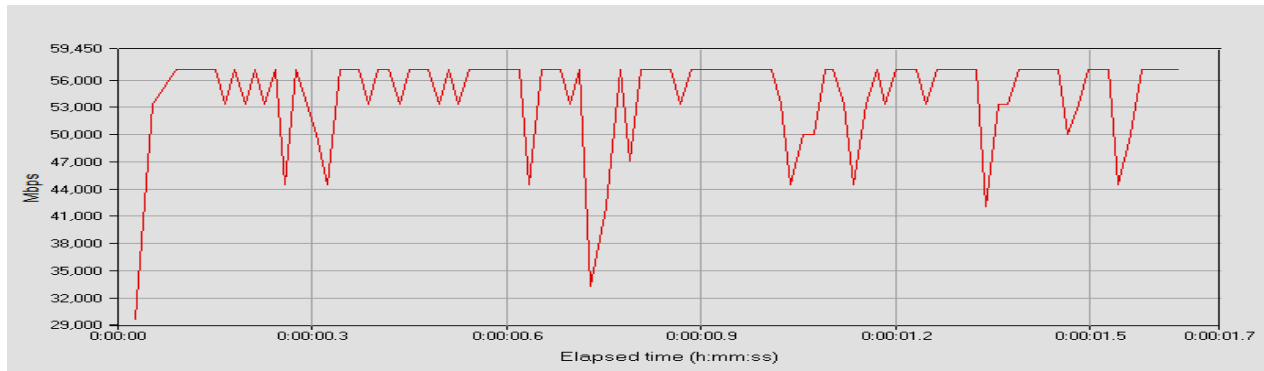
Πίνακας 4.1. Σύνοψη μετρήσεων					
	TCP		UDP	Κάθετη απόσταση. (m)	Μήκος καλωδίωσης (εκτίμηση) (m)
	Παροχέτευση (Mbps)	Χρόνος απόκρισης (msec)	IPTV Παροχέτευση (Mbps)		
Ίδια φάση στο ίδιο δωμάτιο	50 Mbps	1.8	3.747	5	8
Διαφορετικές φάσει	45 Mbps	1.9	3.747	9	15
Ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια	21 Mbps	5	3.747	17	29

Ακολουθούν τα διαγράμματα για κάθε μέτρηση του άνω πίνακα.

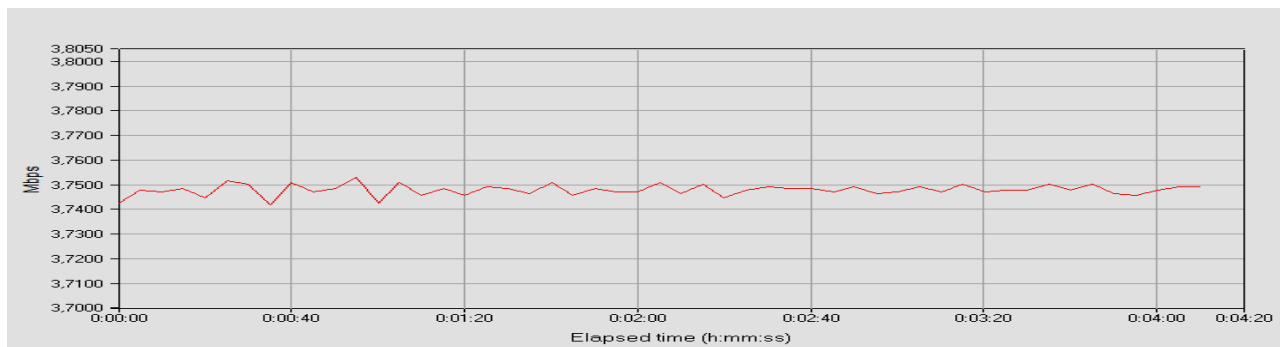
Τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση μήκος καλωδίωσης ~ 9 m:



Σχήμα 4.5. Παροχέτευση TCP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίωσης ~ 9 m.

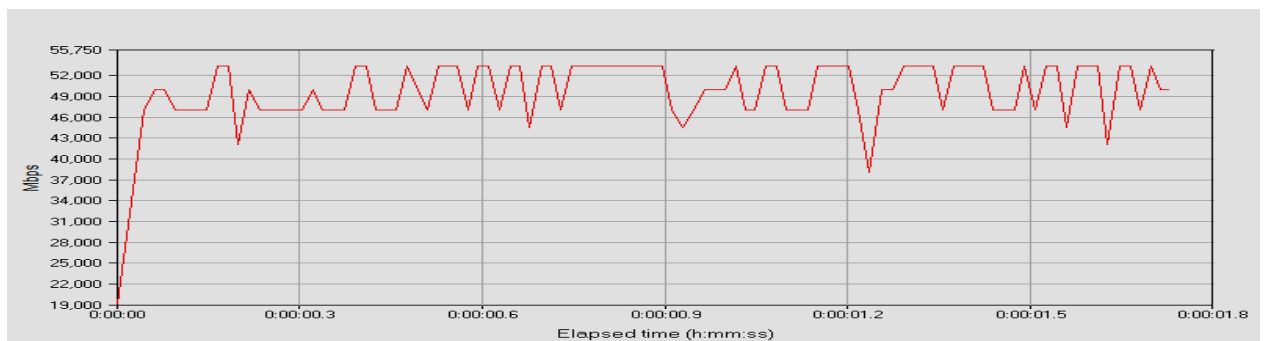


Σχήμα 4.6. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίου ~ 9 m.

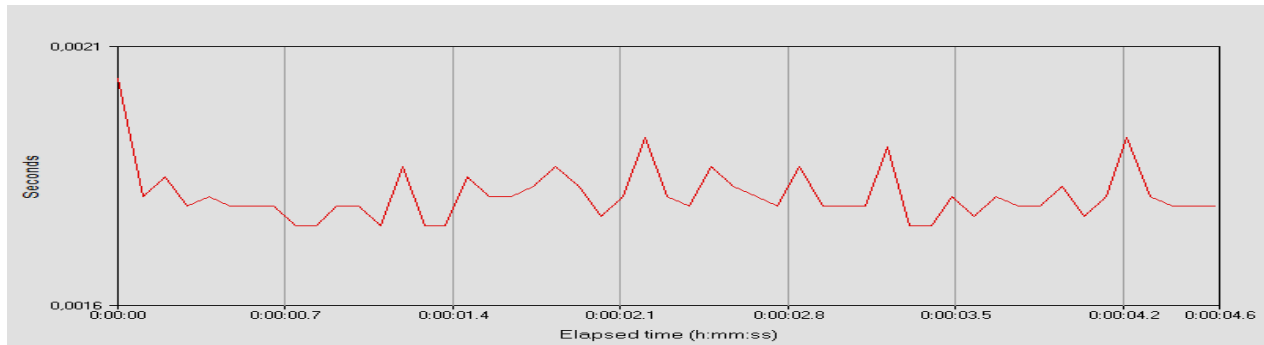


Σχήμα 4.7. Παροχέτευση UDP με τερματικά στην ίδια φάση, μήκος καλωδίου ~ 9 m.

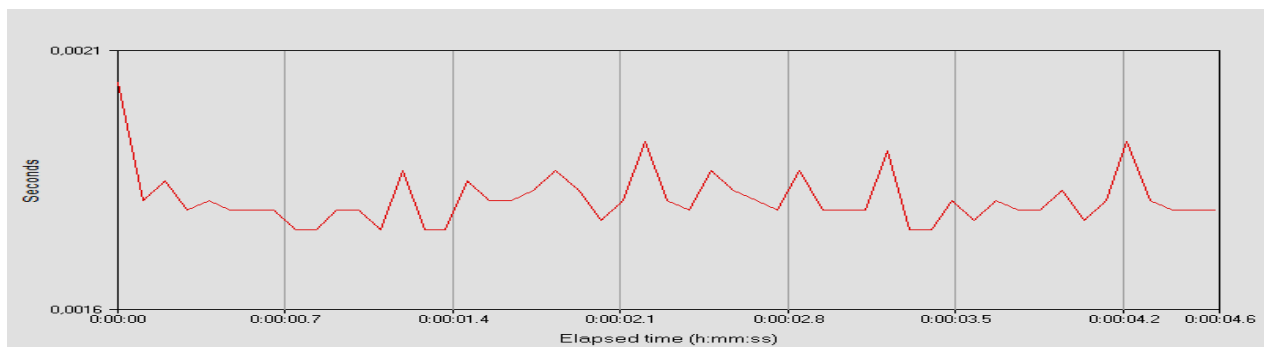
Τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετική φάση, μήκος καλωδίου ~ 15 m:



Σχήμα 4.8. Παροχέτευση TCP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίου ~ 15 m.

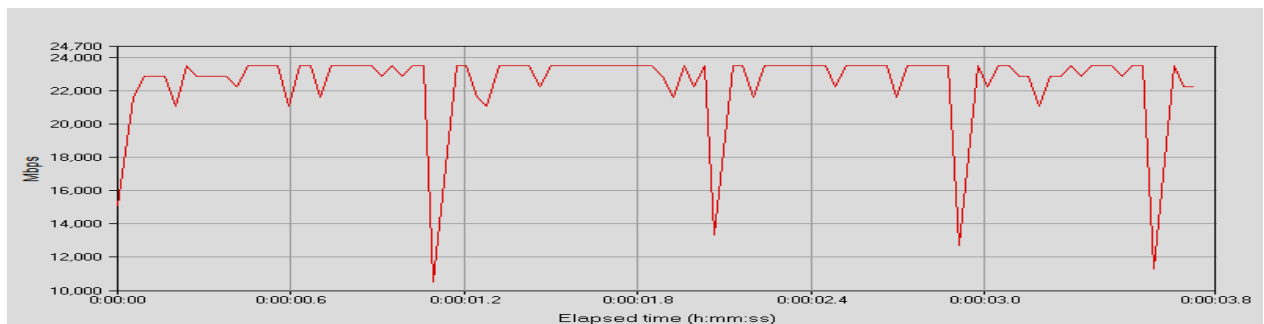


Σχήμα 4.9. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίου ~ 15 m.

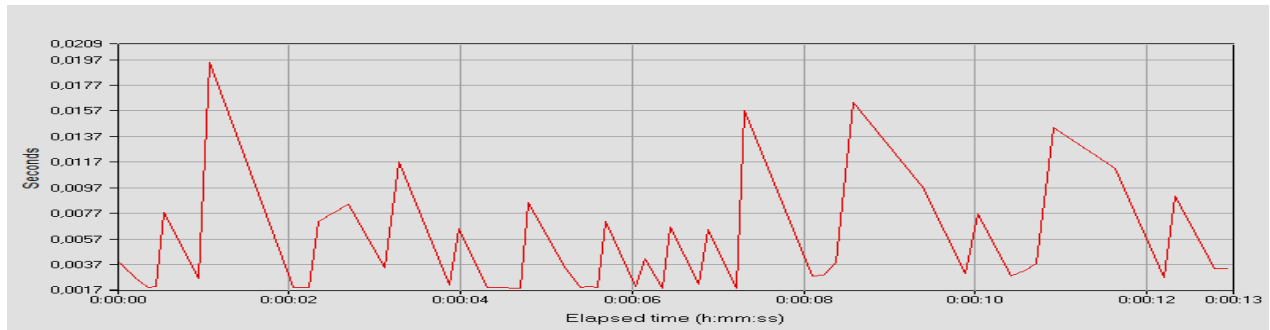


Σχήμα 4.10. Παροχέτευση UDP με τερματικά σε διαφορετικές φάσεις, μήκος καλωδίου ~ 15 m.

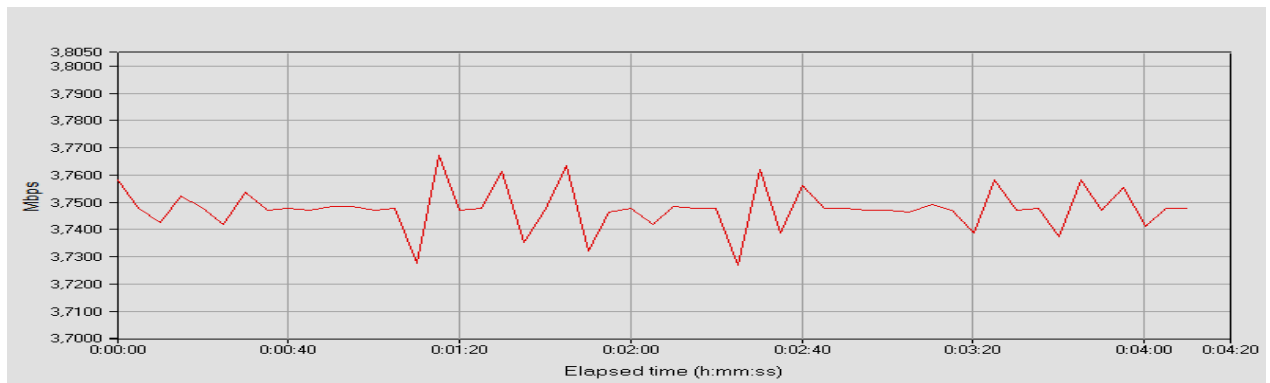
**Τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια,
μήκος καλωδίου ~ 29 m :**



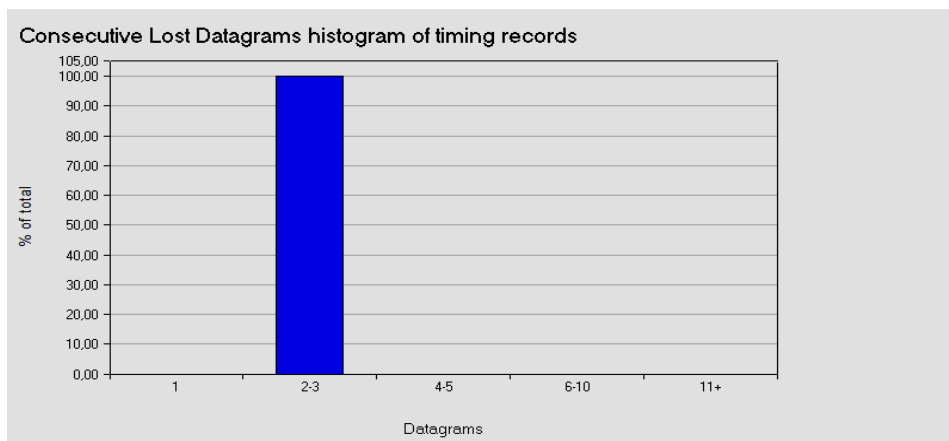
Σχήμα 4.11. Παροχέτευση TCP με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίου ~ 29 m.



Σχήμα 4.12. Χρόνος απόκρισης TCP με τερματικά σε στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.



Σχήμα 4.13. Παροχέτευση UDP με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m.



Σχήμα 4.14. Πακέτα δεδομένων που δεν παραδόθηκαν με τερματικά στην ίδια φάση σε διαφορετικά δωμάτια, μήκος καλωδίωσης ~ 29 m .

4.8.2 Ανάλυση μετρήσεων δικτύου μέσω ηλεκτρικής καλωδίωσης

Με τους υπολογιστές συνδεδεμένους στην ίδια φάση και μια απόσταση καναλιού περίπου 9 μέτρων, η σύνδεση παρέχει μια ταχύτητα TCP 50 Mbps. Παρά τις τα σκαμπανεβάματα που δεν μπορούν να αποφευχθούν λόγω της φύσης του καναλιού, το δίκτυο φαίνεται να λειτουργεί με ικανοποιητικά. Η απόδοση της παροχέτευσης UDP, για μεταφορά αρχείων IPTV, είναι επίσης καλή και σταθερή στα 3.747 Mbps.

Με τους υπολογιστές συνδεδεμένους σε διαφορετικές φάσεις και με την απόσταση του καναλιού να ανέρχεται σε περίπου 15 μέτρα, η απόδοση του δικτύου TCP πέφτει λίγο και σταθεροποιείται με στα 45 Mbps. Η παροχέτευση UDP παραμένει στα 3.747 Mbps και δεν παρατηρούνται απώλειες δεδομένων, ωστόσο σε ορισμένα σημεία υπάρχουν αυξομειώσεις στην ταχύτητα του δικτύου.

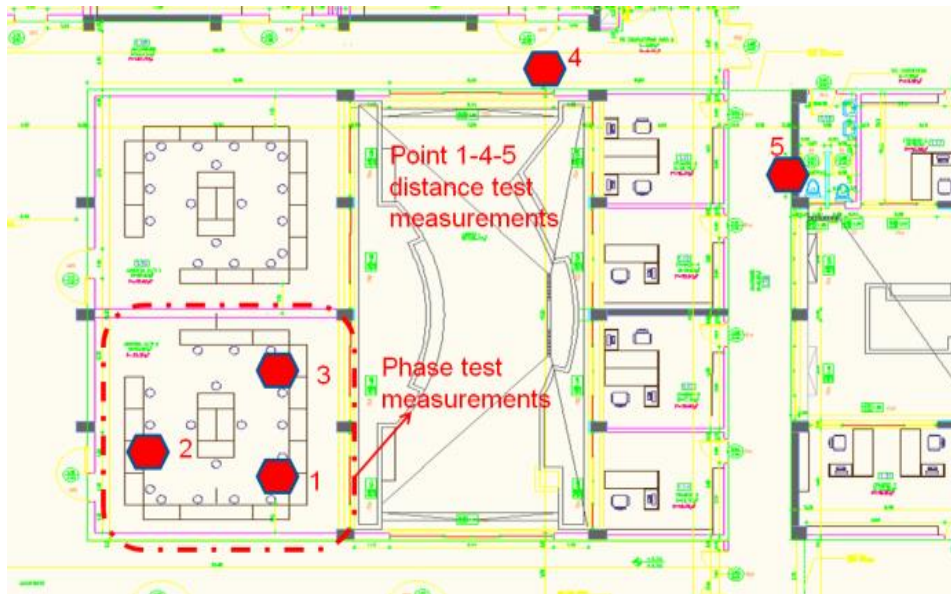
Όταν οι υπολογιστές είναι συνδεδεμένοι σε διαφορετικούς χώρους και η απόσταση του καναλιού ανέρχεται σε περίπου 29 μέτρα, η απόδοση του TCP πέφτει σημαντικά στα 21 Mbps. Η παροχέτευση UDP παραμένει στα 3.747 Mbps, ωστόσο στην περίπτωση αυτή υπάρχει ένας αριθμός διαδοχικών χαμένων πακέτων δεδομένων (σχήμα 4.11).

Καθώς η απόσταση αυξάνεται, η απόδοση μειώνεται και φυσικά ο χρόνος απόκρισης αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο αυξανόμενο μήκος του καναλιού και στον αριθμό των κόμβων μεταξύ των δύο τερματικών. Ωστόσο, ακόμη και η χαμηλότερη τιμή παροχέτευσης που μετρήθηκε (21 Mbps) είναι περισσότερο από επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες ενός οικιακού δικτύου. Γενικά οι μετρήσεις καλύπτουν τις ανάγκες ενός οικιακού δικτύου.

4.8.3 Μετρήσεις υβριδικού δικτύου

Ένα υβριδικό δίκτυο στήθηκε στον πρώτο όροφο του κτιρίου του τμήματος αυτοματισμού του ΤΕΙ Πειραιά. Οι κόκκινες κουκίδες (σχήμα 4.15) είναι τα σημεία στα οποία τοποθετήθηκαν οι υπολογιστές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το σημείο ασύρματης πρόσβασης (wireless access point), βρίσκεται στο σημείο 1. Αρχικά, στήθηκε ένα δίκτυο μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης μεταξύ 2 υπολογιστών, ένας από τους οποίους βρισκόταν στο σημείο 1 και ο δεύτερος στο σημείο 2. Στη συνέχεια δεύτερος υπολογιστής μετακινήθηκε στο σημείο 3. Μετά από αυτό, δημιουργήθηκε ένα υβριδικό δίκτυο ασύρματης γραμμής – δικτύου ηλεκτρικού

ρεύματος που συνδέει ασύρματα έναν υπολογιστή με το σημείο πρόσβασης και το σημείο πρόσβασης μέσω ενός προσαρμογέα στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο δεύτερος υπολογιστής ακολούθησε την ίδια διαδρομή όπως προηγουμένως. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα ασύρματο δίκτυο για τα ίδια σημεία. Για κάθε τοπολογία και μέθοδο σύνδεσης μετριέται η απόδοση. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ήταν IxChariot 6.60 και Performance Endpoints.

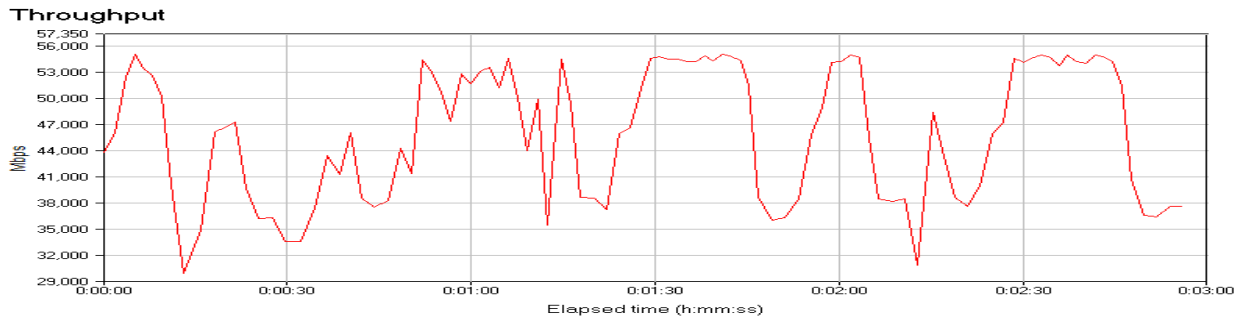


Σχήμα 4.15. Κάτοψη κτιρίου και σημεία μετρήσεων υβριδικού δίκτυο.

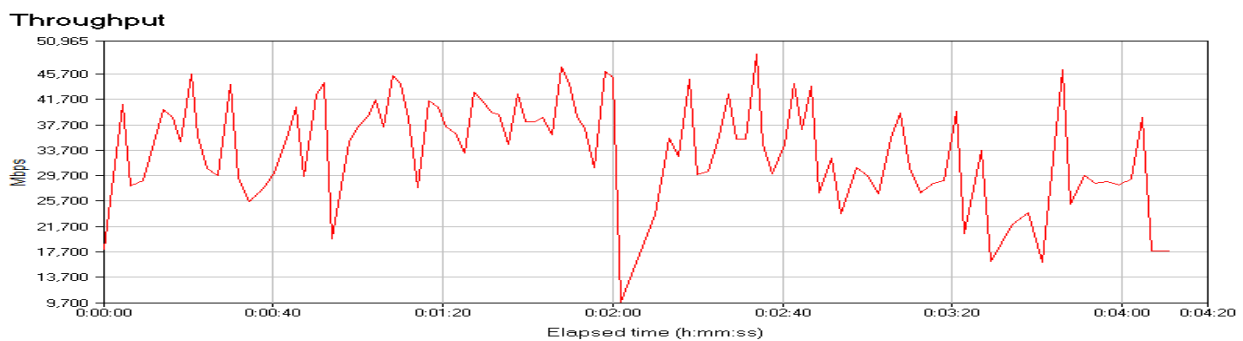
Τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση στα σημεία 1 – 2, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m, κάθετη απόσταση 8 m:

Αρχικά παρουσιάζονται οι μετρήσεις μεταξύ των σημείων 1 και 2 (σχήμα 4.15). το μήκος του καλωδίου ηλεκτρικής εγκατάστασης είναι περίπου 15 m ενώ η κάθετη απόσταση είναι περίπου 8 m. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4,16 η παροχέτευση είναι περίπου 45Mbps. Αντίστοιχα για το υβριδικό εμφανίζεται πέφτει στα 31Mbps (σχήμα 4.17). Εδώ ο υπολογιστής και το ασύρματο σημείο πρόσβασης συνδέονται στην ίδια φάση. Το τρίτο γράφημα δείχνει την

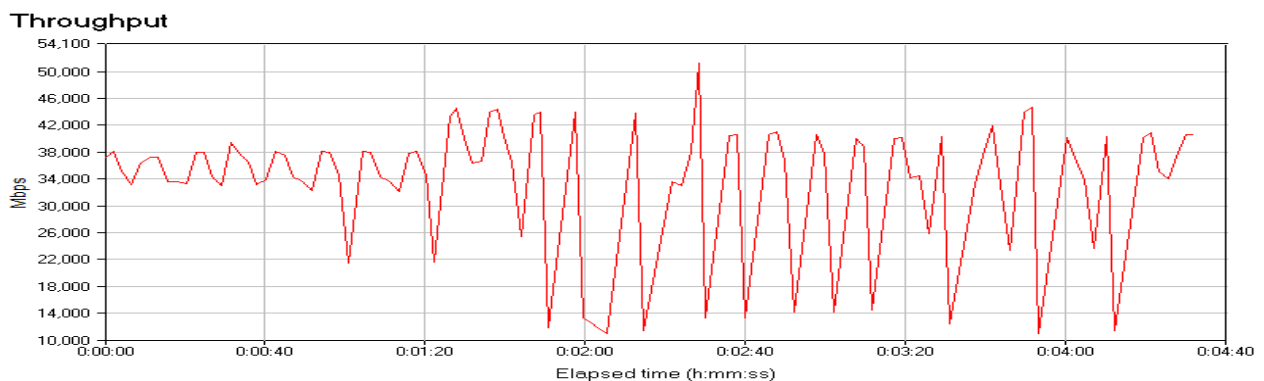
παροχέτευση που μετράται με τους δύο υπολογιστές συνδεδεμένους ασύρματα και τοποθετημένους στα ίδια σημεία. Η παροχέτευση είναι περίπου 29Mbps (σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.16. Παροχέτευση δικτύου μέσω ηλεκτρικής εγκατάστασης με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση στα σημεία 1 – 2, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή 45 Mbps.



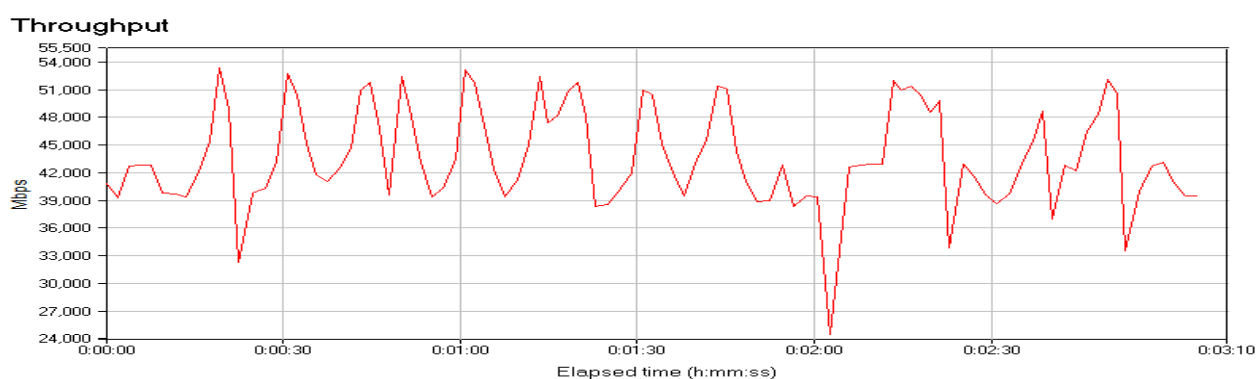
Σχήμα 4.17. Παροχέτευση υβριδικού δικτύου με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται στην ίδια φάση στα σημεία 1 – 2, μήκος καλωδίωσης ~ 15 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 31 Mbps.



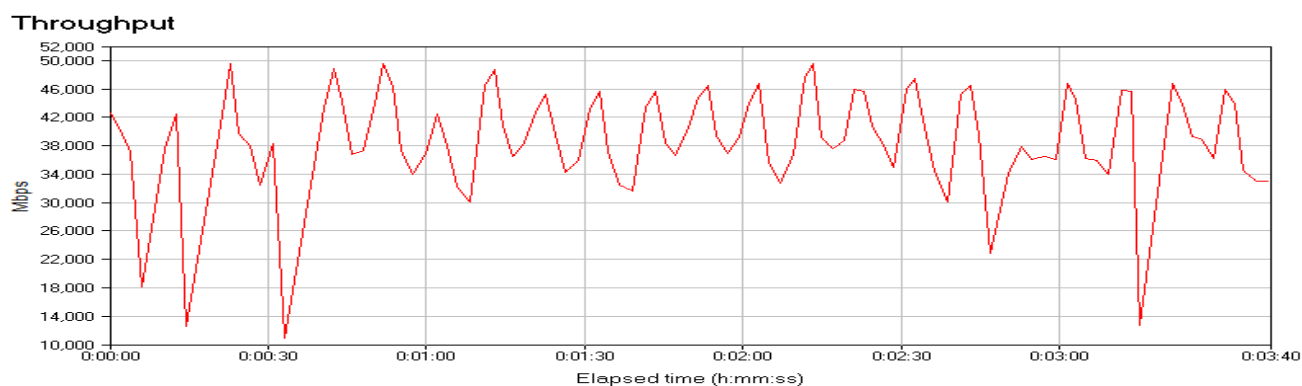
Σχήμα 4.18. Παροχέτευση ασυρμάτου δικτύου με τερματικά στα σημεία 1 – 2, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 29 Mbps.

**Τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις στα σημεία 1 – 3,
μήκος καλωδίωσης ~ 30 m, κάθετη απόσταση 8 m:**

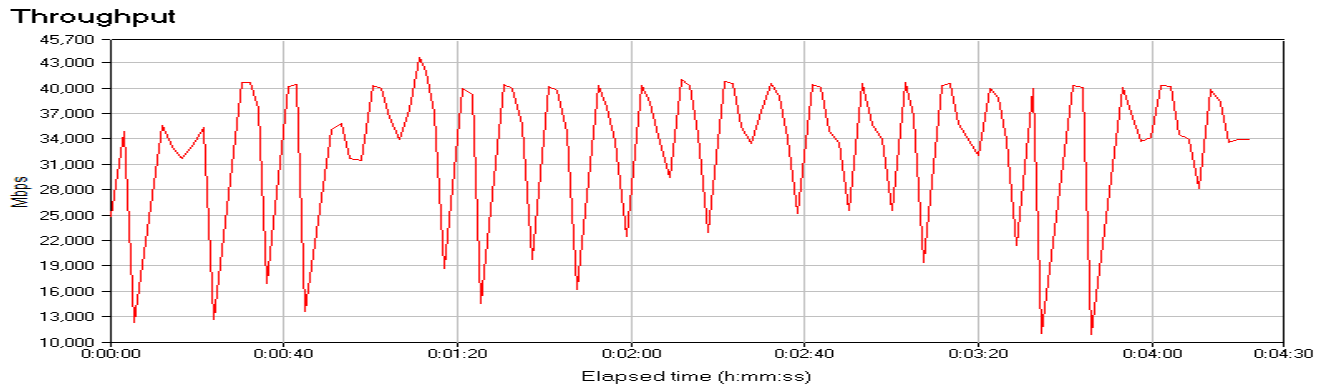
Στη συνέχεια, ο ένας υπολογιστής μεταφέρθηκε από το σημείο 2 στο σημείο 3. Η ηλεκτρική καλωδίωση έχει στην περίπτωση αυτή μήκος περίπου 30 m ενώ οι δύο πρίζες βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις. Είναι προφανές από τα αποτελέσματα ότι η σύνδεση σε διαφορετική φάση της ηλεκτρικής παροχής δεν επηρεάζει τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων.



Σχήμα 4.19. Παροχέτευση δικτύου μέσω ηλεκτρικής εγκατάστασης με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις στα σημεία 1 – 3, μήκος καλωδίωσης ~ 30 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή 43 Mbps.



Σχήμα 4.20. Παροχέτευση υβριδικού δικτύου με τερματικά συνδεδεμένα σε πρίζες που βρίσκονται σε διαφορετικές φάσεις στα σημεία 1 – 3, μήκος καλωδίωσης ~ 30 m, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 36 Mbps.



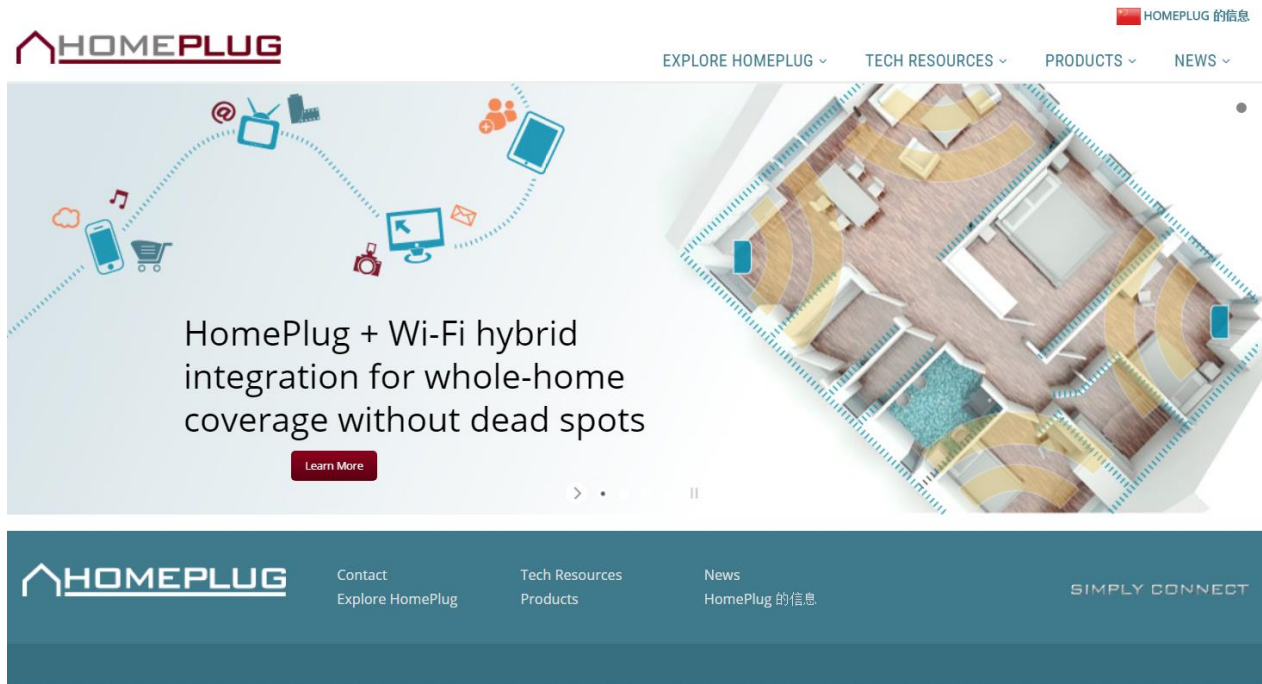
Σχήμα 4.21. Παροχέτευση ασυρμάτου δικτύου με τερματικά που βρίσκονται στα σημεία 1 – 3, κάθετη απόσταση 8 m. Μέση τιμή ~ 30 Mbps.

4.8.4 Ανάλυση μετρήσεων υβριδικού δικτύου

Ένα πρώτο συμπέρασμα είναι ότι για τέτοιες αποστάσεις το δίκτυο μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης έχει απόδοση ίση ή και καλύτερη από το ασύρματο δίκτυο. Συνεπώς είναι μια αξιόπιστη εναλλακτική για οικιακά δίκτυα. Το μέγιστο μήκος της καλωδίωσης μεταξύ δύο πριζών σε ένα σπίτι δεν ξεπερνά τα 30 έως 40 μέτρα. Τα πρόσφατα κατασκευασμένα σπίτια που έχουν καλή καλωδίωση είναι κατάλληλα για τη δημιουργία ενός τέτοιου δικτύου που λειτουργεί με εξαιρετικά ικανοποιητικούς ρυθμούς ανταλλαγής δεδομένων. Η μέγιστη ταχύτητα Internet στην Ελλάδα είναι 24Mbps και τα αποτελέσματα υπερβαίνουν κατά πολύ αυτές τις τιμές. Επιπλέον, το υβριδικό δίκτυο συνεργάζεται καλά με το ασύρματο δίκτυο και δεν υπάρχουν προβλήματα συνδεσιμότητας. Η ρύθμιση είναι εξαιρετικά εύκολη.

4.9 Σύγκριση με τα δεδομένα του 2018 – Προοπτικές

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία πραγματοποιήθηκαν τις χρονιές 2008 -2009. Σήμερα ισότοπο της Homerplug.org μια από τις βασικές διαφημίσεις που τρέχουν έχουν να κάνουν με ένα υβριδικό δίκτυο ακριβώς όπως αυτό που παρουσιάζεται εδώ. Αυτό σε ένα βαθμό αποδεικνύει ότι η εργασία έγινε σε έναν τομέα με εξαιρετικές προοπτικές.



Σχήμα 4.22. Homeplug.org 23-06-2018.

Ένα ακόμα πεδίο που τα δίκτυα μέσω της ηλεκτρικής εγκατάστασης θα μπορούσαν να επεκταθούν στο μέλλον είναι το ίντερνετ των συσκευών (the internet of things).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ 4^{ΟΥ} ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[4.1] <http://www.homeplug.org>

[4.2] X. Jiang, J. Nguimbis, S. Cheng, H. He, X. Wu. A novel scheme for low voltage powerline communication signal processing. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 25, Issue 4, May 2003, Pages 269-274.

[4.3] Matthias Götz, Manuel Rapp, Klaus Dostert. Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design. IEEE Communications Magazine April 2004. pp 78 – 86.

[4.4] H. Philipps, “Modelling of Powerline Communication Channels,” Proc. 3rd Int’l. Symp. Power-Line Communications and its Applications, Lancaster, UK, 1999, pp. 14–21.

[4.5] M. Zimmermann and K. Dostert, “A Multipath Model for the Power line Channel,” IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 4, Apr. 2002, pp. 553–59.

[4.6] M. Zimmermann and K. Dostert, “An analysis of broadband noise scenario in powerline networks,” in Proc. ISPLC 2000, Limerick, Ireland, Apr. 2000, pp. 131–138.

[4.7] Hooijen Han Vinck, On the Channel Capacity of a European-style Residential Power Circuit”. ISPLC 1998, Soka University, Tokyo, Japan, pp. 31-44, 1998.

[4.8] A Mathematical Theory of Communication. C. E. Shannon. The Bell System Technical Journal, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

[4.9] Mark E. Hazen, The technology behind HomePlug AV powerline communications. Computer magazine, IEEE computer society, volume 41 June 2008, pp 90 – 92.

[4.10] Matthew J. Miller William D. List Nitin H. Vaidya A Hybrid Network Implementation to Extend Infrastructure Reach.

[4.11] www.ixiacom.com

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ)

Design Simulation for a 3-Phase grid connected PV Inverter in Simulink

K. Alafodimos¹, P. Fetfatzis^{1*}, P. Kofinas¹, M Kallousis¹, X. Kikidakis²

¹ TEI of Piraeus, Department of Automatic Controls, P. Ralli and Thivon, Aigaleo.

² TEI of Piraeus, Department of Electrical Engineer, P. Ralli and Thivon, Aigaleo.

* e-mail address: p_fetfatzis@yahoo.gr

Abstract

In this work we address the Design Simulation in Simulink, for a 3-Phase grid connected system of a Photovoltaic Inverter, in order to analyze the system's behavior and lead the design process. Initially we use a formula that emulates the output of the PV Array. This simulation defines the output from the hypothetical solar array in order to constitute the input for the simulated Inverter. The basic parameters of this are the Date, hour during the day, temperature, solar potential, etc. Secondly, the main system has been virtually created in order to actualize the conversion from DC to AC. The basic components of this are a stabilizer a 6 IGBTs 3 arm bridge, and a Filter LC and a 10KW load. At third, the control circuit, is discussed and has been designed in Simulink, results to sinusoidal characteristics which are a priori defined. The main theme of this contribution is the architecture of the virtual circuit and the components that are being used in a holistic approach. At last combining the above parts, we take the voltage, the current of the inverter via the time and the THD. The final results are extracted after optimization of the system. New control methods are discussed in combination with the simulation conclusions.

Keywords: Simulation, PV Inverter, Simulink, 3-Phase, THD.

1. INTRODUCTION

A huge problem in many countries is the pollution and the energy generation, has a very large influence in that. The air quality can be very low in some areas. The more carbon dioxide we pump into the atmosphere, the greater the effect of air pollution and global warming becomes. By making the renewable energy easy to use and economically profitable, we can reduce the use of the fossil fuels. The PV arrays can give us cost effective solution for industrial and domestic applications. The topical air pollution and the global warming are of crucial importance and the way for the resolution goes through spatial efforts from scientists, engineers in accordance with social acceptance and institutional funding.

In the design procedure of the inverters for PV/grid systems convert, the DC voltage generated at the PV array, to a suitable AC voltage. Also tracking the Maximum Power Point enables the maximization of the exploited energy. The current that injects to the grid should obey the regulations, such as the EN61000-3-2 and the IEEE1547, which state the amount of injected harmonics and other parameters ref.[4][18].

Since the task is the design of power electronics applications, such as PV inverters, simulation programs are a useful asset. They provide the option to control and visualize the system's dynamic behavior. Such programs are Matlab/Simulink, Orcad PSpice etc.. Simulink has the basic advantage of

being especially built to develop and control continuous - discrete time systems and use transfer functions ref.[2][3].

The PV industry has the need of more sophisticated inverter design to enhance their functionality, reduce cost and suit to new proposed topologies ref.[5][12]. In this paper we will study the simulation behavior of a 3-phase grid connected P-V inverter which has the ability to feed a load of 10KW ref.[17]. This value of load has been chosen because it fits to the average energy value used from an ordinary household and in other professional buildings. We assume that the surface that the P-V array will virtually cover about 72m². Such a size can be accommodated and installed on a roof, as well as provide to the load the appropriate amount of energy.

2. PV ARRAY

2.1 PV Array Parameters

The major factors that affect the efficiency of a PV module are the temperature and the solar radiation. The PV cell output voltage V_c is a function of the photocurrent that is determined by a load current depending on the solar irradiation level during the operation. However an exact description of a PV cell has been done at the University of South Wales and lead at a software, PC1D, which is commonly used and is can be obtained through the web ref.[16]. The solution that is given at this program is numerical and provides lots of parameters. An analytical approximation, that can give us an overview of major importance parameters is mentioned in Ref.[6][13] and is as follows:

$$V_c = \frac{AkT_c}{e} \ln\left(\frac{I_{ph} + I_0 - I_c}{I_0}\right) - R_s I_c \quad (2.1)$$

Temperature correction factors for voltage and current respectively:

$$C_{TV} = 1 + \beta_T(T_c - T_x) \quad 2.2$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_c} \beta_T(T_c - T_x) \quad 2.3$$

- e: Electron charge
- k: Boltzmann constant,
- I_c : Cell output current, A
- I_{ph} : Photocurrent, A
- I_0 : Reverse saturation current of the diode, A
- R_s : Series resistance of one cell, Ω
- T_c : STC temperature, K
- V_c : Cell output voltage, V
- A: Curve fitting factor
- β_T : Correction coefficient, 1/K
- γ_T : Correction coefficient, W/Km²
- α_s : Slope of change in the cell operating temperature due to a change in the solar irradiation level, Km²/W
- T_c : STC temperature, K
- T_x : Ambiance temperature (variable), K
- S_c : STC irradiance, W/m²
- S_x : Variable irradiance, W/m²

Irradiance correction factors for voltage and current respectively:

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \alpha_T (S_x - S_C) \quad (2.4)$$

$$C_{SI} = 1 + \frac{1}{S_C} (S_x - S_C) \quad (2.5)$$

Applying the correction factors to I_{ph} and V_c the temperature-irradiance relationship was obtained.

$$V_{cx} = V_c C_{TV} C_{SV} \quad (2.6)$$

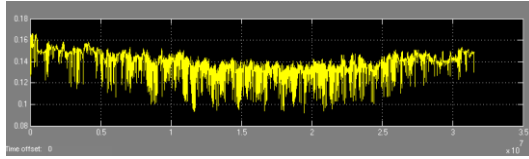
$$I_{phx} = I_{ph} C_{TI} C_{SI} \quad (2.7)$$

By combining the equations 2.6, 2.7 with the 2.1 we can extract the MPP. The tracking of the MPP can be done, if the microcontroller at the control unit has a feedback procedure for the tracking that has the appropriate frequency.

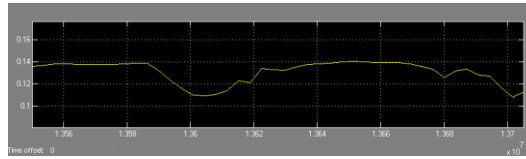
2.3 Simulation of the PV array

According to the market of the PV panels, in order to succeed an output voltage of 700V and an output current of 15A, we have to connect 60 modules of monocrystalline silicon in three rows of 20 panels series connected in each row. The PV module that we have in mind is FVG 72-125, model FVG 185M-MC, of the FVG ENERGY company from Italy, with power peak 185W, cell efficiency 17,5% and module efficiency 14,6%.

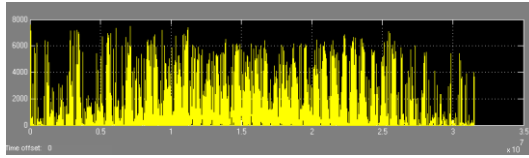
The P-V array according to measurements, with a time interval of one hour, of temperature, and solar irradiance for a one year period has been simulated in Simulink environment. The measurements we use are meteorological data and have been used from the simulation program. This program has been developed by the Technical University of Eindhoven ref.[7]. We have use it as it can be obtained from the web and the parameters that we set are the direction of the PV Array which is South, the angle to the South 36° , and the array surface at 72 m^2 . The total energy in one simulated year was 8502 kWh. The P-V array's output characteristics fluctuate depending on the temperature, solar irradiance levels, time and are illustrated below in fig.[1].



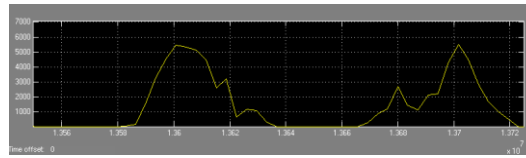
P-V array efficiency in 1 year



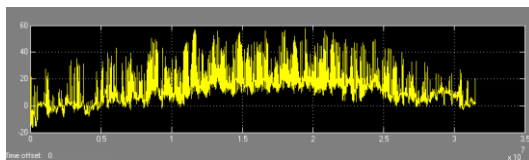
P-V array efficiency in 1 day



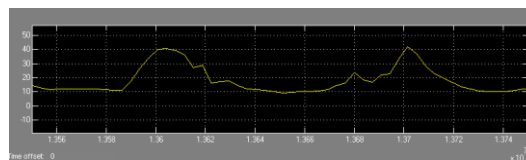
P-V array power(W) in 1 year



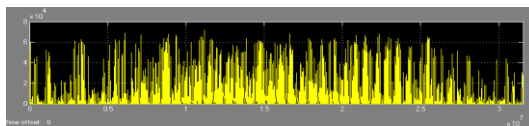
P-V array power(W) in 1 day



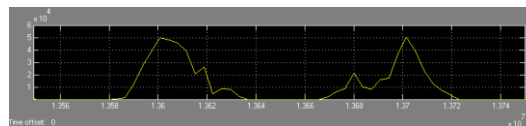
P-V array temperature (°C) in 1 year



P-V array temperature (°C) in 1 day



Solar irradiance (W) in 1 year



Solar irradiance (W) in 1 day

Figure [1] PV Array simulation results.

The above graphs at the x axis have the value of time in seconds. The y axes values are mentioned at each graph. The left graphs correspond to one year period and the right ones the period of two days. It is very clear from the graphs that the temperature of the cells is a parameter which reduces the efficiency and as a result the total energy captured. A useful approach in the prediction of the expected values from a PV array is discussed in the ref.[8] which can be combined with morning measurements. The estimation of the total energy that generates a system is based on such simulations. Very important role in the utilization of the solar radiation has the Maximum Power Point Tracing from the control circuit. This is based, on keeping the DC current, flowing from PV array, to the point that maximizes the power and is calculated by the microprocessor, at the control circuit, from a Function like eq. 2.1 ref.[20].

3. Simulation of the inverter

3.1 General

The block diagram below in fig.[2] presents the proposed design for the grid connected P-V inverter system. It is consisted of: 1. P-V array that simulates the P-V module voltage and current output, depending on the temperature and solar irradiance, 2. the stabilizer which regulates the P-V array voltage at an acceptable rate in order the inverter to be fed and actualize the MPPT, 3. a 3-phase inverter which converts the generated DC power into a 3-phase AC, 4. the Filter which is an LC low pass filter reducing the harmonic distortion by cutting off the high frequency harmonics, 5. the control unit in which a PLL synchronizes the output phase of the inverter with the phase of the grid and the PWM synchronizes the IGBTs.

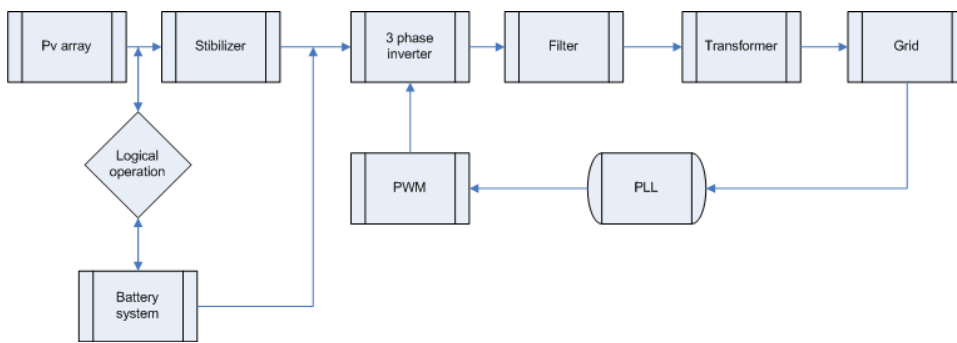


Figure [2] Block diagram of the topology we use.

3.2 Stabilizer

The block diagram of the stabilizer we use, in simulink environment can be seen in fig[3]. The output of the P-V module about 700V is being stabilized at about 650V. The stabilizer is consisted of four IGBTs bridge and 2 switches. The switches compare the output voltage to the desirable value of 650V and consequently turn on or off the IGBTs through the synchronization signal.

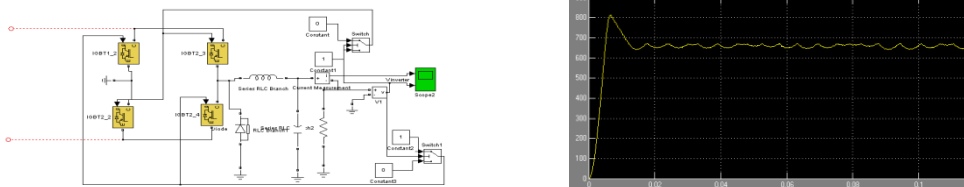


Figure [3] Block diagram of stabilizer and the stabilizer output voltage(V).

The output of the stabilizer is connected to a low pass filter (LC) and is the input for inverter. This is a preliminary MatLab Simulation that is based on the regulator (stabilazer) which can be seen in fig[3]. Another test have been used which is a step down (buck) convert ref.[1]. We have to enhance the stabilizers functionality in order to be able to regulate the voltage regardless of the solar irradiance, the efficiency of the cell and the voltage that is extracted from the MPPT equation. All these parameters affect the generated power from the panels and at last give us some variations to the voltage that the array generates. This affects the AC power that is generated and results to variations of the amplitude of the voltage. Such regulator can be combined to the control at the PWM and maximize the total efficiency.

3.3 The inverter

The main circuit is the part where the DC electric power is converted to AC. This is virtually implemented with the one that is shown at the Fig.[4]. In this circuit we use a 3 leg inverter for 3-phase conversion which is composed of 6 IGBTs and the control unit. The last generates control pulses to drive the IGBTs. The pulse generator gives a digital signal to the IGBTs. When the signal from the pulse generator is not zero then it reacts as a switch and opens. This consists the basic operation in order to convert the DC to AC, with the technique of the Pulse Width Modulation (PWM). The frequency of the IGBTs we use is 1 KHz. For the time interval the IGBTs are open, we get a pulse at power circuit, which has the same amplitude of source, as it can be seen at the fig.[4]. The RMS time integral give us the output values. The on-off is determined by a control unit which is analysed below. The modulation factor m_a can be used as a parameter for the dynamic control of the system. When m_a is changing we can control the voltage output and correct the voltage fluctuations due to the pv array and MPPT. The losses will be analoge to the change over the m_a . A useful reference for cascated multilevel converters which discusses the control circuit of new topology Ref.[9]. A three phase inverter has the basic advantage that generates power in 3-phase and is working without a hitch.

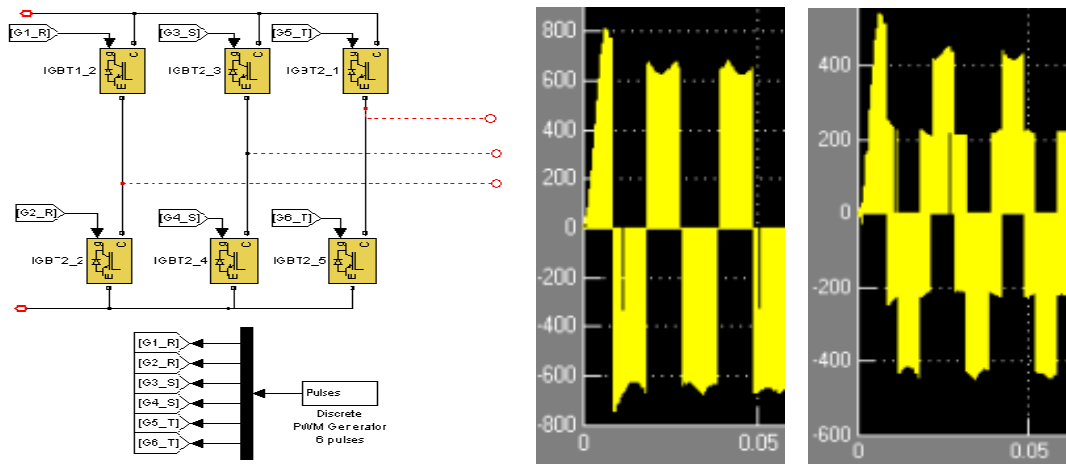


Figure [4] Simulation of the inverter and the pulse generator and the output Voltage(V) Phase to Phase and Phase to Neutral respectively in Simulink GUI .

At one node of the circuit, supposing we have an input voltage $v_{oi}(t)$ an LC filter , L inductance and C capacitance and the r_L resistant Load as it can be seen at Fig.[4] and at fig.[8], if we apply the Kirchoff's laws and if we consider that the IGBTs at an open state, we get:

$$r_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + v_c = v_{oi}(t) \quad (3.1)$$

$$i_L - C \frac{dv_c}{dt} - \frac{v_c}{R} = 0 \quad (3.2)$$

And if using the matrix formulation:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_{oi}(t) \quad (3.3)$$

Which can be simplified to the:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{b}g(t) \quad (3.4)$$

$$\text{With: } \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix}, g(t) = v_{oi}(t), \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}, \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

The above problem is depending on the output of the PV array and in order to have a simple solution we consider only the switching part of the circuit that is in fig.[4] one obtain the solution ref.[19] which is:

$$V_{RN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(\cos \frac{n\pi}{3} + 1 \right) \sin n(\omega t) \quad (3.5)$$

$$V_{SN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(\cos \frac{n\pi}{3} + 1 \right) \sin n(\omega t - 120^\circ) \quad (3.6)$$

$$V_{TN} = \sum_{n=1,5,7,11}^{\infty} \frac{4V}{3n\pi} \left(\cos \frac{n\pi}{3} + 1 \right) \sin n(\omega t - 240^\circ) \quad (3.7)$$

The equations (3.5-7) above correspond, each one of the 3-phases to neutral voltage, the 1, 5, 7, 11 are the harmonics appearing and $\omega=2\pi f$ the basic frequency at 50Hz. The MathLab/Simulink using the numerical methods is solving the problem, taking into account not only this part of the system, which is describing by the eq.(3.5-7), but the total circuit as it can be seen at fig.[8].

4. Control Circuit, Grid utility, Load, Filter

The control circuit combines a number of functions. At first, it provides the appropriate pulses to the IGBTs for the PWM technique. Secondly, it synchronizes the inverter generated phases to the grid and finally tracks the Maximum Power Point (MPPT) of the PV array. The MPPT is calculated by the equations which mathematically describe the PV array behavior equation 2.1. For the implementation of the control unit an IC that can perform the above described functions is the TMS320F2812 of Texas Instruments as it is presented to the Ref[14]. A low cost method is proposed in ref[10], where a common circuit, the D class amplifier, can be control used for the control unit. Matlab/Simulink has a default control system that enables the inverter to extract sinusoidal waveforms. The clocking is the result of the comparison between a sinusoidal reference waveform and a sawtooth, which is the basic idea of the PWM ref.[1] The m_a is the driving voltages amplitudes ratio and give us the ability for dynamic control ref[15]. The control circuit has been developed in Simulink. We have to enhance the functionality of the control circuit with the use of dynamic control.

In order this simulation to give us realistic and accurate output data for each day, of the simulated days from the PV array, we have to simulate the grid utility and the load. We use a small inductance and high resistance for a preliminary house load estimation of about 10KW. The load we use at the simulation can be seen at fig.[8]. Grid utility can be simulated using impedance estimation. Such values have been experimentally measured in ref.[11]. The Grid utility is not presented in this contribution. The idea to have a simulation that will work for each day and give us data for such a system has been studied and will be fulfilled at the future. The LC filter we use can be seen at fig.[8], with $L=20\text{mH}$ and $C=35\mu\text{F}$.

5. Results and discussion

In the graphs that we take from the output scopes, it can be initially seen at the waveforms of the voltage from phase to neutral fig.[5], upper diagram and this value before the LC filter which corresponds to the pulses from the IGBT's fig.[5], down diagram. From the Last diagram, it is obvious that the system has some variations. We try to understand the behavior of the system under various Loads, varying from 1kW to 10kW. When the Load is getting bigger the variation follows up and the sinusoidal characteristics are becoming worse off. The holistic consideration of the grid tied inverter system results in the mentioned variations, whereas if each part of the system was considered separately the behavior would seem to be ideal.

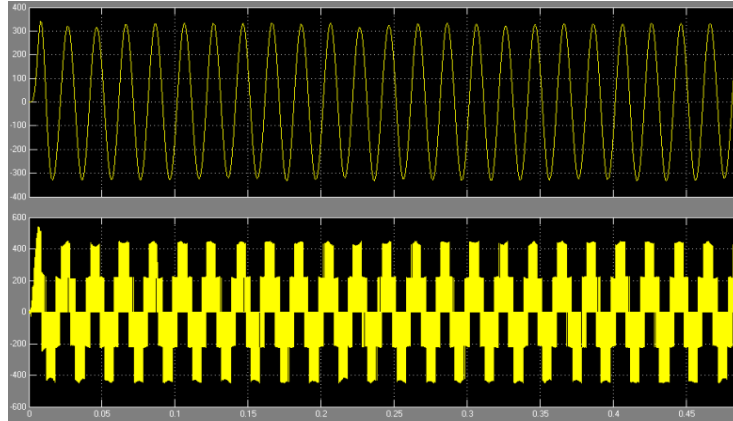


Figure [5] Inverter output voltage (Phase-Neutral) after (up) and before (down) filtering.

Secondly the phase to phase output voltage which illustrates these waveforms, fig.[6] corresponds to the sinusoidal profile. The same behavior as mentioned above, considering the variations, appears to the pulses too.

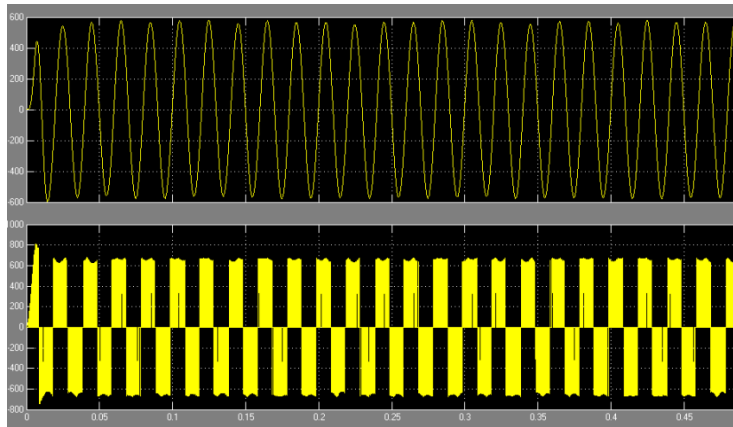


Figure [6] Inverter output voltage (Phase-Phase) after and before filtering.

We have also measured the V_{RMS} which can be seen at the fig.[7] down diagram and by the results we observe that we have a value of $230V \pm 5V$. This result complies with regulations mentioned above. The Total Harmonic Distortion (THD) measurement was at low values such as 2.2% fig.[7], upper diagram as a result of the systems optimization, which is coherent to the IEC standards.

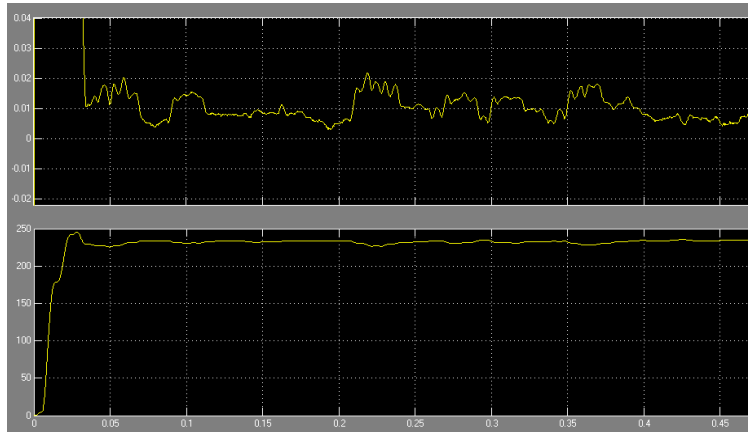


Figure [7] Inverter output voltage THD and V_{RMS} phase to neutral respectively.

The results we get are in accordance with the regulations, but they appear to have a strong influence from the load we use. The THD factor can be better if use harmonic reduction techniques ref.[19]. The transformers can be used for in order to achieve in accordance with other topologies ref.[1] better results in THD but they case problems from the losses, from the cost and the total volume and weight growth ref.[18].

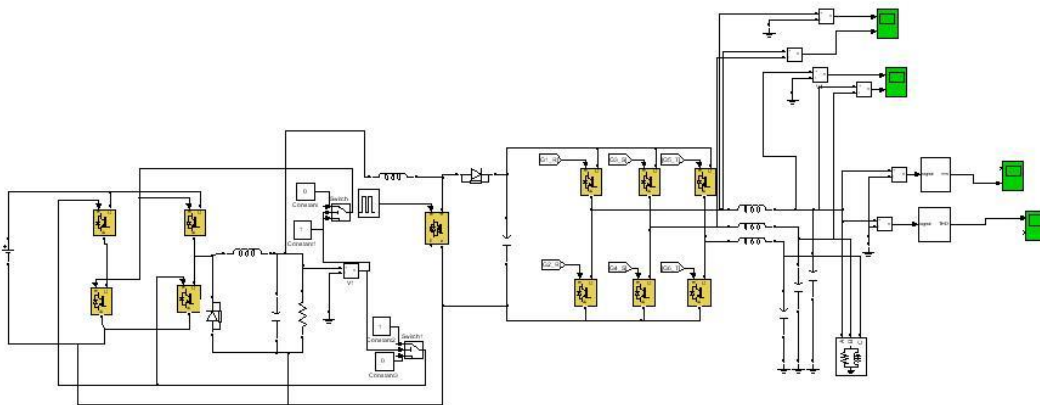


Figure [8] Total circuit in Simulink.

6. Conclusions & Prospects

The PV array has been simulated at one year period and other code sources are been discussed. In order to extract the voltage deviation from the array, we intent to apply the formula of the MPP to these codes. Our approach, considering the hole system, has not been totally implemented in Simulink. The grid utility and the control unit should be promoted in future work. The real implementation of the system is an issue that has been mentioned and should be analyzed while the simulation procedure exalts. Other simulation programs such as PSpice should be used to compare their results. The inverters need to develop

in order to be more efficient and up to date, to new topologies that are proposed, for the PV plant arrangements, and to alternative applications such as fuel cells, while single phase PV inverters have very good perspectives.

References

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1995.
- [2] M. Ciobotaru, T. Kerekes, R. Teodorescu, A. Bouscayrol, *PV inverter simulation using MATLAB/Simulink graphical environment and PLECS blockset*, IEEE 1-4244-0136-4/06/ 2006, p.5313-5318.
- [3] S. Orts, S. Segui, F.J. Gimeno, M. Alcaiiiz, R. Masot, *Modelling and simulation of three phase power active compensator with Matlab/Simulink*, 2004 351h Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [4] S. B. Kjær, Intro, Aalborg, Nov. 2004.
- [5] T. Ahfock, L. Bowtell, *DC Offset Elimination in a Single Phase Grid-Connected Photovoltaic System*, AUPEC'06, Melbourne, Australia, Dec. 2006.
- [6] L. Castaner, S. Silvestere, *Modeling Photovoltaic systems using PSpice*, John Wiley & Sons, Inc, West Sussex, England, 2002.
- [7] <http://sts.bwk.tue.nl/7y700/software/Default.asp> Technical University Eindhoven.
- [8] S. Kaplanis, E. Kaplani, *A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation $I(h;n_j)$ values*, Renewable Energy, 32, 2007, p.1414-1425.
- [9] S. A. Khajehoddin, P. Jain, A. Bakhshai, *Cascaded Multilevel Converters and Their Applications in Photovoltaic Systems*, 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June, 2007.
- [10] K. Hayashi, T. Shimada, H. Koizumi 1, Y. Ohashi, K. Kurokawa, *A New Grid-Connected Inverter by Utilizing Ready-Made PWM ICs for Audio Power Amplifier*, 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference, China, 2005.
- [11] L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, U. Borup, *A digital controled pv inverter with grid impedance estimation for ens detection*, IEEE Transactions on power electronics, VOL 20, NOV 2005.
- [12] R. H. Bonn, *Developing a "Next Generation" PV Inverter*, IEEE, 0-7803-747 1 - 1/02/2002.
- [13] Altas, I. H.; Sha Araf, *A.M Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment*,
- [14] T. Kerekes, D. Séra, R. Teodorescu, *PV inverter control using a TMS320F2812 DSP*, European DSP Education and Research Symposium, EDERS 2006, Munich, Germany.

[15] C. Eduardo, C. A. Petry, S. A. Mussa, H. B. Mohr, *Ac Indirect Line Conditioner Digital Control Using PLL Based on the Three-Phase Instantaneous Power Theory*, 1-4244-0136-4/06/ 2006 IEEE, p.2535-2540.

[16] <http://www.pv.unsw.edu.au/links/products/pc1d.asp>

[17] I. Tsagas, *Laboratory evaluation of DC/AC inverters for stand-alone & grid-connected photovoltaic systems, PHD thesis, Greece, 2002.*

[18] S. B. Kjær, *Testing the inverter*, Aalborg, Dec. 2004.

[19] S. Manias, *Power Electronics*, Greek Edition, Athens, Greece, 2007.

[20] M.A.S. Masoum, H. Dehbonei, *Design, Construction and Testing of a Voltage-based Maximum Power Point Tracker (VMPPT) for Small Satellite Power Supply*, 13th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan Utah, USA, 1999.

Analysis and Simulation of a 3-phase Transformerless PV Inverter

P. Fetfatzis*^α, P. Kofinasa, M. Kallousis, K. Alafodimos

Abstract

A transformerless 3-phase grid connected photovoltaic(PV) inverter's simulation is being presented in this paper. The simulation model of the inverter has been developed in Matlab/Simulink. Transformerless topologies can improve the efficiency of the system. There are however issues such as the leakage current phenomenon that have to be dealt with. We analyze the parts of the model that are: the PV model we use, the MPPT algorithm by the means of a DC/DC converter, the inverter's control circuit, the LC filter, and the connection to the AC electrical grid. We analyze the passive filter's performance that is used in the model. We also discuss the use of a Kalman filter in order to reduce the total harmonic distortion. The connection to the grid is performed and the discussion is focused on the leakage current, the earth's parasitic capacitance and the total harmonic distortion. The analysis and the results we extract, arise from a whole system simulation, taking into account all the parameters.

1. Introduction

In a world that energy demand is growing and the risks of climate change have to be encountered, we should consider using ways of environmentally friendly energy production. Energy generated from replenished natural resources can be used and in combination with state of the art technology in order to cover the energy demands of domestic consumers. During the last years photovoltaic cogeneration and microcogeneration systems have been developed. Grid connected PV systems can be hosted at nearly every building covering to minimum their power consumption. Therefore, we are capable to the built efficient building, which not only save energy, but also produce, reducing the emissions of greenhouse gases as much as possible, contributing greatly to the environmental protection.

1.1. PV system simulation overview

The system that we describe, consists of five basic parts as shown in fig. 1, the PV array is in parallel connection with a Dc/Dc converter,

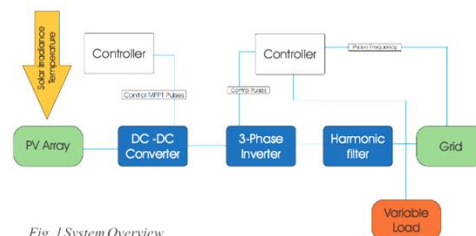


Fig.1 System Overview

Fig .1 System overview Block diagram

the inverter that converts the dc power to ac. The LC low-pass filter for cutting off the high frequencies that the inverter produces and lastly the electrical grid. The 3-phase load is variable. Two controllers are used, one to control the current and the voltage of the PV array to maximize the power produced. The second is responsible for the phase, frequency and amplitude of the ac power which is produced from the inverter in order to achieve the synchronization and power management between the electrical grid and the inverter.

2. PV Array

By implementing the PV Array's mathematical model in Matlab for constant solar irradiance, we take the characteristics V-I and P-V, PV curve of the cell fig.2 ref[1].

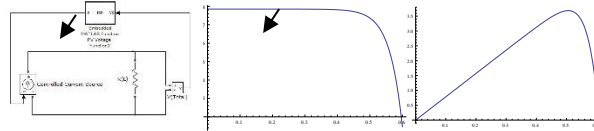


Fig.2 Left: Simulink Model for the PV Cell, I-V PV Cell Characteristic, Right: P-V PV Cell Characteristic, the arrow indicates the MMP.

We use the eq.(1), ref.[1] in order to simulate the PV array current. The equation corresponds to SolarCellHellas cells and their characteristics can be seen in table(1) and the simulation graph is in fig.2.

$$i_{pv} = n_p I_{sc} - n_p I_{sat} \left[e^{\frac{q \cdot v_{pv}}{k \cdot T \cdot A \cdot n_s}} - 1 \right] \quad (1)$$

Where the i_{pv} , i_{sc} , i_{sat} are the PV array, short circuit, saturation currents respectively, the n_p, n_s are the number of parallel and series connected cells, q the elementary electric charge, k the Boltzmann constant, T the cell temperature, A experimental constant, v_{pv} the PV array voltage. The i_{sc} has strong dependence from the temperature ref[1]. In order to realize the array, we can choose the appropriate number of solar cells in parallel and in series connection.

Table 1, PV cell data.

Electrical Characteristics		Mechanical Characteristics	
Average	SCH6P-50	Dimensions: 156mm x 156mm \pm 0.5mm	
η [%]	14.4	Thickness: 180 μ m \pm 40 μ m	
Pmax [Wp]	3.50	Front (-): 2 busbars, 2mm wide each, silver,	
Isc [A]	7.85	Silicon Nitride (SiNx) antireflection coating	
Voc [V]	0.594	Rear (+): 2 busbars, 5mm wide each,	
Current @ 0.5V [A]	\geq 6.80	silver/aluminium, continuous	

3. DC/DC for MPPT

The DC/DC boost converter used firstly steps up the voltage and secondly maximizes the power that is injected from the PV array, using a Maximum Power Point Tracking(MPPT) algorithm.

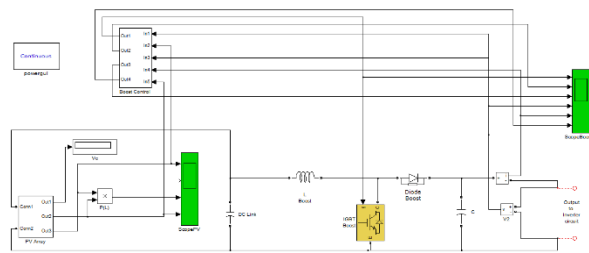


Fig 3 Boost Converter, Simulink Model

The usage of the boost converter in fig.3 is to rise the voltage from the PV array to a higher level, appropriate for the grid connection. This topology allows the PV voltage to be in a lower level (about the half of the inverter's output peak voltage). The Maximum Power Point(MPP) can change due to temperature variations at the PV panels and also the variable solar irradiance during the day. The MPPT algorithm that is used at the control of the DC/DC is the Modified Perturb and Observe (MPO) ref[2]. The control of the boost converter calculates the duration eq.(2) of the pulses according to the MPO algorithm using the Pulse Width Modulation(PWM) technique. The algorithm has been implemented in Matlab/Simulink environment via an embedded Matlab function as fig.3 illustrates and generates the reference voltage V_{ref} for the PWM.

Table 2, MOSFETs, IGBTs, Microprocessor data

Power Transistors		Microprocessor
MOSFET 771- PSMN035-150P127	IGBT 512- FGH40N60SFDTU	LM3S8962
Transistor Polarity: N channel	Continuous Collector Current I _c Max: 80A	Data Bus Width: 32bit
Continuous Drain Current: 50A	Collector- Emitter Voltage V _{CEO} Max: 600V	Program Memory Size: 256KB
Drain-Source Breakdown Voltage: 150V	Maximum Gate Emitter Voltage: +/- 20V	Data RAM Size: 64KB
Resistance Drain-Source RDS (on): 30mOhms	Maximum Operating Temperature: + 150°C	Maximum Clock Frequency: 50MHz
		Number of Programmable I/Os: 42

To avoid the use of a DC/DC converter we can use higher voltage from the PV array or a CSI (Current Source Inverter) topology ref[3][4].

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (2)$$

V_i : input Voltage of the DC/DC
V_o is the output Voltage of the DC/DC

Such topologies may have an even better efficiency at an order of magnitude 2-3%, which corresponds to the converter internal losses[5][6]. The output of the converter fig.3 (red legs) is connected to an LC filter before the connection to the inverter. The technical characteristics of the IGBTs, MOSFETs and microprocessors that are illustrated in table 2 will be used for an experimental prototype DC/DC converter that will be developed.

4. Inverter

4.1. Basic circuit

The model for the inverter is a 3-phase Voltage Source Inverter(VSI) fig.4. This simulink model converts the DC voltage to the appropriate AC voltage fig.5.

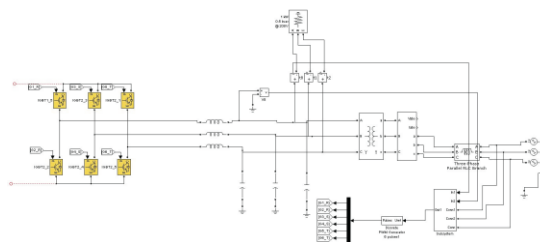


Fig .4 Inverter basic circuit, Simulink Model

The control circuit consists of a PWM generator from the SimPowerSystems pallet in Simulink, controlling the voltage at the value of 230Vrms@50Hz and performing the synchronization to the 3-phase grid. The grid is simulated by three ideal voltage sources of 230V, 50Hz and phase difference 120°, an impedance of 1mH-10mH ref[7], an one to one three phase transformer and an internal resistance.

The system is grid connected and it is functional only when the grid is active. The sinusoidal waveforms are injected to the PWM control circuit, to the second controller, in order to drive the IGBTs. (In a real implementation of the inverter the grid waveforms should be filtered properly in a way that the grid's noise is rejected. Although in this simulation grid noise

characteristics are not performed so there is no need for such subsystem). In this way the sinusoidal voltage that is produced from the inverter has the same frequency as the grid and the correct phase difference. In the control process and filter the circuit induces a time delay corresponding to approximately 18° relative to the grid's reference. This difference can be found by comparing the reference and the produced waveforms or can be estimated. In this model we feed the PWM with a complementary phase difference to overcome this. In the inverter an algorithm can control the amplitude of the modulation V_{ref} , in order the output voltage variation to comply with the regulation limits while the input can change due to MPP changes. However this algorithm has not been implemented in this simulation.

The total output performance of the system ref [8] can be seen in fig5. In the two upper graphs is the phase-phase voltage $V_{pp}(t)$ waveform and the rms value $V_1(t)$ of the voltage to neutral. The voltage has the expected amplitude and the waveform is very close to a clear sinus. The two curves below them indicate the current phase to phase $I_{pp}(t)$ waveform and the current phase to neutral rms $I_1(t)$, indicating very low phase difference between the voltage and current and also stable characteristics. The most important parameter is the Total Harmonic Distortion(THD) which is at the lower graph in fig.5 which shows a THD value of 1.8% which complies to every standar regulation.

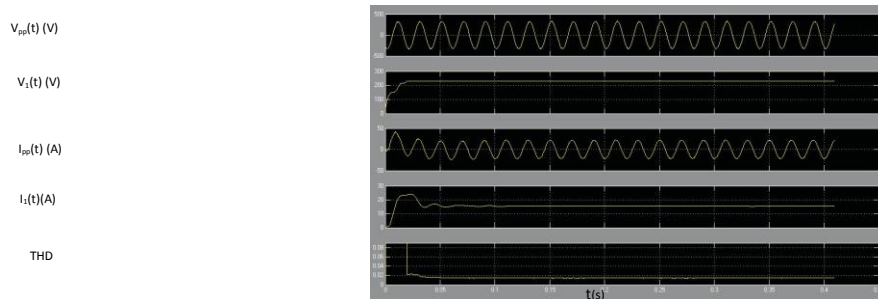


Fig. 5 Simulation result graphs from top to bottom: (A) phase-phase voltage $V_{pp}(t)$, (B) $V_1(t)$ rms phase to neutral voltage, (C) phase-phase current $I_{pp}(t)$, (D) $V_1(t)$ rms phase to neutral current, (E) THD.

Our team is at the point of experimental development of this model using IGBTs or MOSFETs table2. The harmonic distortion of such systems can be eliminated using the appropriate low pass filter. Supposing that the IGBTs are functioning as ideal switches, the circuit can be simplified to the filter. An analytical solution for the Kirchhoff's equations in the time domain ref[9] for the filter gives the graph illustrated in fig.6.

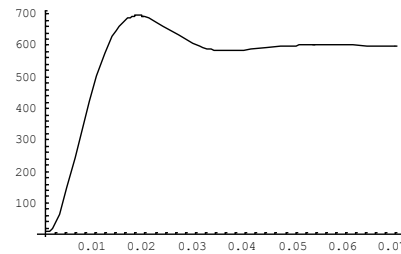


Fig.6 The graph that corresponds to the relative amplitude (V)(vertical axes) for the filter's performance towards the time (s).

This graph can guide us to the choice and physical understanding of the value of the inductance at the LC filter that is used at both at the boost as a DC Link and at the inverter as a low pass filter of the inverter. The response of such a filter can be seen in fig.6 for an example of: $R = 10\Omega$, $V_o = 600V$, $r = 0.02\Omega$, $L = 0.05H$, $C = 0.0005F$ and can have different form for other L,C values. Active filtering techniques can be used in order to improve the filter performance and to reduce the high values of the inductance, capacitance that are usually nesecary.

4.2. Discussion - Leakage Current

An element that reduces the efficiency of a PV system is the transformer. As new topologies are tested in order to achieve higher efficiency, transformerless systems have prevailed. In such systems galvanic coupling is induced ref.[1]. The transformer of a grid connected PV inverter delivers galvanic isolation. In the transformerless systems the earth's parasitic capacitance phenomenon appears between the earth and the PV panel(inverter). A resonance circuit, is formed due to the high frequency of the IGBT's switching mode, with low dumping coefficient leading to high leakage currents. The parasitic capacitance is formed among the PV cells, the metallic frame, and glass or other non conductive materials of the panel (due to dust and humidity eth.) and earth. The resonance frequency and the parasitic capacitance of this resonance circuit is not stable but varies due to the environmental conditions ref[10].

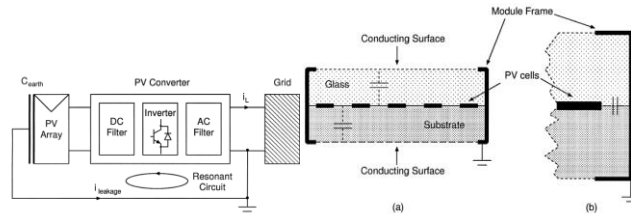


Fig. 7 At the left fig there is a transformerless grid tied PV system showing the earth's parasitic capacitance, at the right fig we can see in detail the points that the module forms this capacitance, both figures from ref[10].

The transformerless topology results to relatively high leakage current due to the capacitance that is formed between the ground, the PV panels and the inverter's components. A value for a PV array is $C_{G-PV}=100nF$, parasitic capacitance. This is obviously a disadvantage of the topology that adds losses to the system. In addition to that there are also safety issues. Several techniques[11], different topologies[4] and a variety of modulation strategies[3] have been used to minimize the ground leakage current through the parasitic capacitance of the PV array[12][13].

4.3. Harmonic Distortion - Kalman Filters

The total harmonic distortion (THD) that we obtain from our Inverter model in Simulink is 1.8% fig.5. Although, active filtering techniques can improve the output performance of the inverter, reducing the needs for high values at the capacitance and inductance of the LC output filter, also reducing the cost and increasing the stability. A Kalman filter is an optimal recursive data processing algorithm. It processes all available measurement and also takes into account the knowledge of the system and measurement dynamics along with the statistical description of the system noises and uncertainty in dynamic models in order to estimate the current value of the variables of interest ref.[14]. This data is processed in the form of state equations eq.(3) of the system.

$$\begin{aligned} x'(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + w(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Where $x(t)$ are the states, $u(t)$ the inputs, in these equations, $y(t)$ the outputs and $w(t)$, $v(t)$ the noises of the system and that related to the measurement [15].

5. Conclusion-Prospects

In this paper we analyse and implement the simulation of a PV array, a boost converter in combination with a VSI and the grid utility. The control of the boost and VSI has been proceeded now and in previous works. We also analyse the passive filter performance. In such systems the key role of the system is the passive filter characteristics that performs the power quality. When the system is moving from a point of power production to another the filters may inject distortion. For these reason we propose active filtering such Kalman filter which can perform high power quality even when the system is moving rapidly.

The CSI topology can be very effective and we plan to proceed in a simulation to compare the VSI and CSI topology.

The VSI with a boost converter, for realizing the MPP, has been implemented adequately and the use MPPT algorithm has to be tested for different solar irradiance scenarios. The leakage current has been discussed and is going to be part of the future simulations.

ACKNOWLEDGMENTS

This work has been funded by the "Special Account of Research" of Technical Educational Institute (TEI) of Piraeus.

Notes and references

^a Automation Department, Technological Educational Institute (TEI) of Piraeus, Thivon & Petrou Ralli 250, Aigaleo Athens, Greece. Fax: +30210541128; Tel: +302105381533; E-mail: p.fefatzis@yahoo.gr

† Electronic Supplementary Information (ESI) available: See DOI: 10.1039/b000000x/

1. T.-F. Wu, C.-H. Chang, Y.-D. Chang, and K.-Y. Lee, "Power Loss Analysis of Grid Connection Photovoltaic Systems", PEDS2009, p.326-331.
2. A. Yafaoui, B. Wu and R. Cheung, "Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithm for residential Photovoltaic systems", 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, Toronto, Ontario, Canada, June 10 – 14, 2007.
3. Lopez O, Teodorescu R, Freijedo F, Doval-Gandoy J. "Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application", Power engineering society general meeting; 2007, p.1–5.
4. M. Meinhardt and P. Mutschler, "Inverters without transformer in grid connected photovoltaic applications," in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE, Sevilla, Spain, Sep.1995, vol. 3, p. 3086–3091.
5. T. Kerekes, R. Teodorescu and U. Borup, Transformerless Photovoltaic Inverters Connected to the Grid, Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE, Feb. 25 2007-March 1 2007, p.1733 - 1737.
6. B. Sahan, A. Notholt-Vergara, A. Engler, P. Zacharias, "Development of a single-stage three-phase PV module integrated converter", 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Aalborg, Denmark, September 2007, p.1-11.
7. St. Kourtesi, L. Ekonomou, A. Nakulas, G.P. Fotis, E. Zoulias, "Modelling and simulation of a single phase photovoltaic inverter and investigation of switching strategies for harmonic minimization", 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 10 – 14, 2007, p.155-159.
8. P. Fetfatzis, P. Kofinas, M Kallousis, K. Alafodimos, "*Parameter Analysis of a Grid tied PV inverter's dynamic behaviour*", eRA-4 proceedings 2009.
9. K. Alafodimos, P. Fetfatzis, P. Kofinas, M Kallousis, X. Kikidakis, "Design Simulation for a 3-Phase grid connected PV Inverter in Simulink", eRA-3 proceedings 2008, p.76-87.
10. M. Calais, V. G. Agelidis and Mike Meinhardt, "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: An overview," Solar Energy Vol. 66, No. 5, p. 325–335, 1999.
11. T. Kerekes , R. Teodorescu, P. Rodriguez, Gerardo Vázquez, Emiliano Aldabas, "A new high-efficiency single-phase transformerless PV inverter topology" 2009 IEEE.
12. E. Gubia, P. Sanchis, A. Ursúa, et al, "*Ground currents in Single-phase Transformerless Photovoltaic Systems*", Progress in Photovoltaics: Research and Applications; 2007, p.629-650.
13. T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, "Common-mode voltage in case of transformerless PV inverters connected to the grid", ISIE 2008,p.2390-2395.
14. Maybeck, Peter S, "*Stochastic Models, Estimation and Control*", 1979, Vol. 1, Academic Press, Inc.
15. H. Beltran, J. Zabalza, C. Ariño, E. Belenguer, E. Perez1 and N. Aparicio "Improved Kalman Filter Based Inverter Control for Reduction of Low Order Current Harmonics due to Isolation Transformers in Renewable Energy Sources", ICREPQ'09.

Transformerless 3-phase PV Inverter simulation for efficient building installations

P. Fetfatzis^{1*}, P. Kofinas¹, M. Kallousis¹, C. Alafodimos¹, C. Stergiou²

¹ Automation Department, Technological Educational Institute (TEI) of Piraeus,

² Mechanical Engineering Department, Technological Educational Institute (TEI) of Piraeus

*p_fetfatzis@yahoo.gr

Abstract

A transformerless 3-phase grid tied solar inverter's simulation is being presented in this paper. Transformerless topologies improve the efficiency of the system. The inverter's simulation model has been developed in Matlab/Simulink. There are however issues such as the leakage current phenomenon that need further discussion. We analyze the parts of the model that are: the PV model we use, the MPPT algorithm through a DC/DC converter, the inverter's control circuit, the LC filter, the connection to the grid and the passive filter. We also discuss the use of a Kalman filter in order to reduce the total harmonic distortion. The analysis and the results we extract, arise from a whole system simulation.

1. Introduction

In a world that energy demand is growing and the risks of climate change are raising, we should consider using ways of environmentally friendly energy production. Energy generated from replenished natural resources can be used in combination with state of the art technology, in order to cover the energy demands of domestic consumers. During the last year's photovoltaic cogeneration and micro-cogeneration systems have been developed. Grid connected photovoltaic (PV) systems can be hosted at nearly every building covering to minimum their power consumption. Therefore, we are capable of constructing efficient buildings, which aren't only save energy, but also produce, reducing the emissions of the green-house gases as much as possible, contributing greatly to the environmental protection.

1.1 PV SYSTEM SIMULATION OVERVIEW

The system that we describe, consists of five basic parts as shown in fig. 1, the PV array is in parallel connection with a DC/DC converter, the inverter that converts the dc power to ac, the LC low-pass filter for cutting off the high frequencies that the inverter produces and lastly the electrical grid. The 3-phase load is variable. Two controllers are used, one to control the current and the voltage of the PV array in order to maximize the produced power.

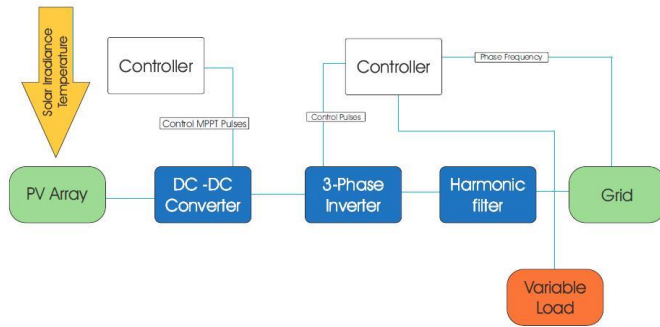


Fig.1. System overview Block diagram.

The second is responsible for the phase, frequency and amplitude of the ac power, produced by the inverter in order to achieve the synchronization and power management between the electrical grid and the inverter.

2. PV Array

By implementing the PV Array's mathematical model in Matlab for constant solar irradiance, we take the characteristics I-V and P-V, PV curve of the cell fig. 2 [1]. We use the eq. (1) [1], in order to simulate the PV array current. The equation corresponds to SolarCellHellas cells and their characteristics can be seen in (Table I) and the simulation graph is in fig. 2. Where the i_{pv} , i_{sc} , i_{sat} are the PV array, short circuit, saturation currents respectively, the n_p , n_s are the number of parallel and series connected cells, q the elementary electric charge, k the Boltzmann constant, T the cell temperature, A experimental constant, V_{pv} the PV array voltage.

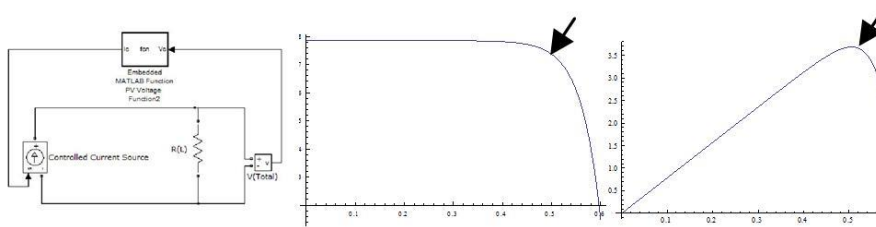


Fig. 2. Left: Simulink Model for the PV Cell, I-V PV Cell Characteristic, Right: P-V PV Cell Characteristic, the arrow indicates the MMP.

The i_{sc} has strong dependence from the temperature [1]. In order to realize the array, we can choose the appropriate number of solar cells in parallel and in series connection.

$$i_{pv} = n_p I_{sc} - n_p I_{sat} \left[e^{\frac{q \cdot V_{pv}}{k \cdot T \cdot A \cdot n_s}} - 1 \right] \quad (1)$$

Table .1 PV cell data

Electrical Characteristics		Mechanical
SCH6P-50 (STC)		Characteristics
Average n [%]	14.4	Dimensions: 156mm x 156mm x 0.5mm
P _{max} [Wp]	3.50	Thickness: 180 μ m 40 μ m
I _{sc} [A]	7.85	Front (-): 2 bus bars, 2mm wide each, silver, Silicon Nitride (SiNx) antireflection coating
V _{oc} [V]	0.594	Rear (+): 2 bus bars, 5mm wide each, silver/aluminum, continuous

3. DC/DC for MPPT

The DC/DC boost converter firstly steps up the voltage and secondly maximizes the power that is injected from the PV array by using a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm. The usage of the boost converter in fig. 3 is to raise the voltage from the PV array to a higher level, appropriate for the grid connection. This topology allows the PV voltage to be in a lower level (about the half of the inverter's output peak voltage). The Maximum Power Point (MPP) can change due to temperature variations at the PV panels and also the variable solar irradiance during the day. The MPPT algorithm that is used at the control of the DC/DC is the Modified Perturb and Observe (MPO) [2].

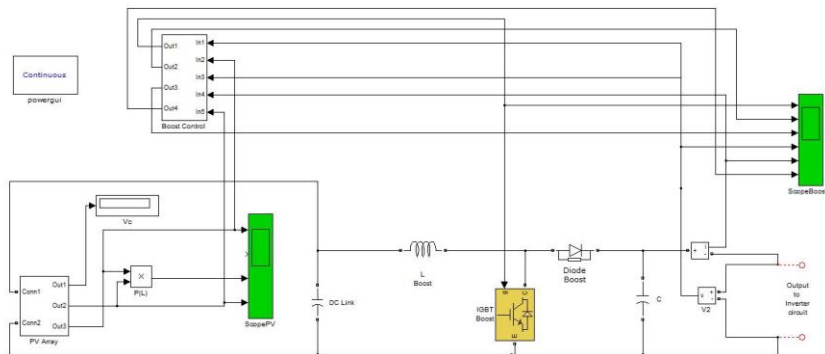


Fig.3. Boost Converter, Simulink Model.

The control of the boost converter calculates the duration (2) of the pulses according to the MPO algorithm using the Pulse Width Modulation (PWM) technique where V_i and V_o is the input and output Voltage of the DC/DC.

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (2)$$

The algorithm has been implemented in Matlab/Simulink environment via an embedded Matlab function as fig. 3 illustrates and generates the reference voltage V_{ref} for the PWM. Single stage topologies may have an even better efficiency at an order of magnitude 2-3%, which corresponds to the converter internal losses [5][6]. The output of the converter fig. 3 (red legs) is connected to an LC filter.

4. Inverter

4.1 Basic circuit

The model for the inverter is a 3-phase Voltage Source Inverter (VSI) fig.4.

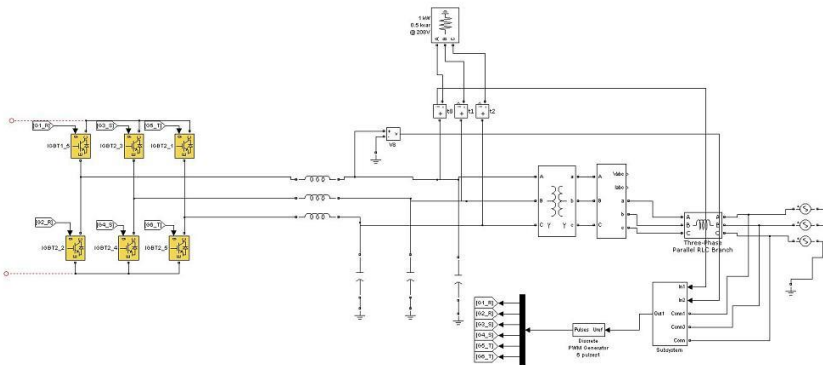


Fig .4. Inverter basic circuit, Simulink Model.

This Simulink model converts the DC voltage to the appropriate AC voltage fig. 5. The system is grid connected and it's functional only when the grid is active. The sinusoidal waveforms are injected to the PWM control circuit, to the second controller, in order to drive the IGBTs. (In a real implementation of the inverter the grid waveforms should be filtered properly in a way that the grid's noise is rejected. Although in this simulation grid noise characteristics are not performed, so there is no need for such subsystem). In this way the sinusoidal voltage that is produced from the inverter has the same frequency as the grid and the appropriate phase difference. In the control process and at the filter, the circuit induces a time delay corresponding to approximately 18° , relative to the grid's reference. This difference can be found by comparing the reference and the produced waveforms or can be estimated. To overcome this, in this model, we feed the control of the PWM with a complementary phase difference. In the inverter, an algorithm can control the amplitude of the modulation V_{ref} , in order the output's voltage variation to comply with the regulation limits while the input can change due to MPP changes. However this algorithm has not been implemented in this simulation. The total output performance of the system [8] can be seen in fig. 5. In the two upper graphs is the phase-phase voltage $V_{pp}(t)$ waveform and the rms value $V1(t)$ of the voltage to neutral. The voltage has the expected amplitude and the waveform is very close to a pure sine. The two curves below them indicate the current phase to phase

$I_{pp}(t)$ waveform and the current phase to neutral rms $I_1(t)$, indicating very low phase difference between the voltage and current and also stable characteristics. The most important parameter is the Total Harmonic Distortion (THD) which is at the lower graph in fig. 5 which shows a THD value of 1.8% complying in every standard regulation.

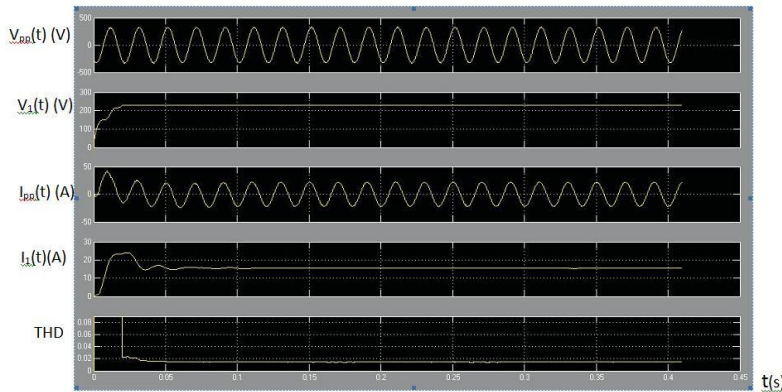


Fig. 5. Simulation result graphs from top to bottom: (A) phase-phase voltage $V_{pp}(t)$, (B) $V_1(t)$ rms phase to neutral voltage, (C) phase-phase current $I_{pp}(t)$, (D) $V_1(t)$ rms phase to neutral current, (E) THD.

The harmonic distortion of such systems can be eliminated using the appropriate low pass filter. Supposing that the IGBTs are functioning as ideal switches, the circuit can be simplified to the filter. An analytical solution of the Kirchhoff's equations in the time domain ref[9] for the filter gives the graph illustrated in fig.6.

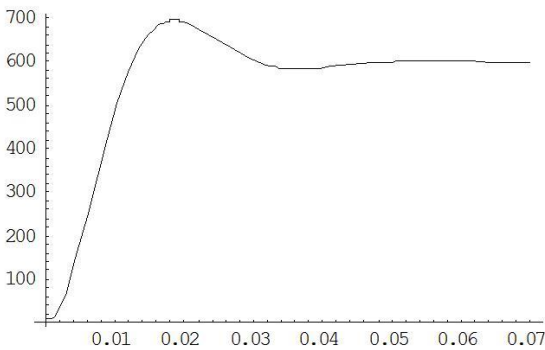


Fig. 6. The graph that corresponds to the relative amplitude (V)(vertical axes) for the filter's performance towards the time (s).

This graph can guide us to the choice and physical understanding of the value of the inductance at the LC filter that is used both at the boost as a DC Link and at the inverter as a low pass filter. The response of such a filter can be seen in fig.6 for an example of: $R = 10\Omega$, $V_o = 600V$, $r = 0.02\Omega$, $L = 0.05H$, $C = 0.0005F$ and can have different form for other L , C values. Active filtering techniques can be used in order to improve the filter performance and to reduce the usually necessary high values of the inductance and capacitance.

4.2 Discussion - Leakage Current

An element that reduces the efficiency of a PV system is the transformer. As new topologies are tested in order to achieve higher efficiency, transformerless systems have prevailed. In such systems galvanic coupling is induced [1]. The transformer of a grid connected PV inverter delivers galvanic isolation. In the transformerless systems the earth's parasitic capacitance phenomenon appears between the earth and the PV panel (inverter) fig. 7.

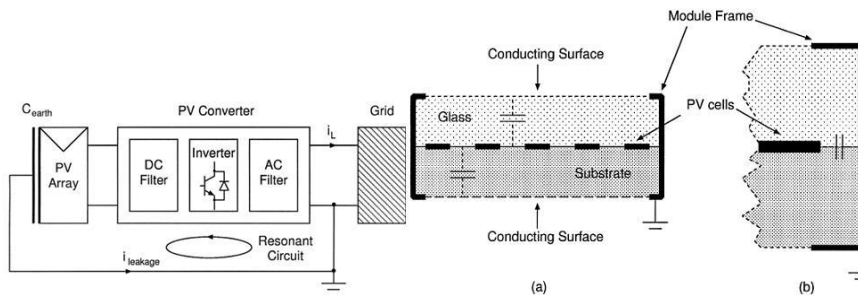


Fig. 7. At the left fig. there is a transformerless grid tied PV system showing the earth's parasitic capacitance, at the right fig. we can see in detail the points that the module forms this capacitance, both figures from ref[10].

A resonance circuit is formed due to the high frequency of the IGBT's switching mode, with low dumping coefficient leading to high leakage currents. The parasitic capacitance is formed among the PV cells, the metallic frame, and glass or other non conductive materials of the panel (due to dust and humidity etc.) and earth. The resonance frequency and the parasitic capacitance of this resonance circuit are not stable but vary due to the environmental conditions [10]. The transformless topology results to relatively high leakage current due to the capacitance that is formed between the ground, the PV panels and the inverter's components. A value for a PV array is $C_{GPV}=100\text{nF}$ parasitic capacitance. This is obviously a disadvantage of the topology that adds losses to the system. In addition to that there are also safety issues. The topology that is used seems to inject larger leakage current as the switching frequency is going higher from experimental results [5]. The solution to this is to use a combination of 3 NPC legs [5]. Several techniques [11], different topologies [4] and a variety of modulation strategies [3] have been used to minimize the ground leakage current through the parasitic capacitance of the PV array [12], [13].

4.3 Harmonic Distortion - Kalman Filters

The Total Harmonic Distortion (THD) that we obtain from our Inverter model in Simulink is 1.8% fig. 5. Although, active filtering techniques can improve the output performance of the inverter, reducing the needs for high values at the capacitance and inductance of the LC output filter, also reducing the cost and increasing the stability. A Kalman filter is an optimal recursive data processing algorithm. It processes all available measurement and also takes into account the knowledge of the system and measurement dynamics along with the statistical description of the system noises and uncertainty in

dynamic models in order to estimate the current value of the variables of interest [14]. This data is processed in the form of state equations eq. (3) of the system.

$$\begin{aligned}x'(t) &= A \bullet x(t) + B \bullet u(t) + w(t) \\y(t) &= C \bullet x(t) + v(t)\end{aligned}\tag{3}$$

Where $x(t)$ are the states, $u(t)$ the inputs, in these equations, $y(t)$ the outputs and $w(t)$, $v(t)$ the noises of the system that related to the measurements [15].

5. Conclusions and Prospects

In this paper we analyze and implement the simulation of a PV array, a boost converter in combination with a VSI and the grid utility. The control of the boost and VSI has been processed now and in previous works. We also analyze the passive filter performance. In such systems the key role of the system is the passive filter characteristics that perform the power quality. When the system is moving from a point of power production to another the filters may inject distortion. For these reason we propose active filtering such Kalman filter which can perform high power quality even when the system is moving rapidly. The CSI topology can be very effective and we plan to proceed in a simulation to compare the VSI and CSI topology. The VSI with a boost converter, for realizing the MPP, has been implemented adequately and the use of MPPT algorithm has to be tested for different solar irradiance scenarios. The leakage current has been discussed and it is going to be part of the future simulations.

6. References

1. T.-F. Wu, C.-H. Chang, Y.-D. Chang, and K.-Y. Lee, "Power Loss Analysis of Grid Connection Photovoltaic Systems", PEDS2009, p.326-331.
2. A. Yafaoui, B. Wu and R. Cheung, "Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithm for residential Photovoltaic systems", 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, Toronto, Ontario, Canada, June 10 – 14, 2007.
3. Lopez O, Teodorescu R, Freijedo F, Doval- Gandoy J. "Eliminating ground current in a transformerless photovoltaic application", Power engineering society general meeting; 2007. p.1–5.
4. M. Meinhardt and P. Mutschler, "Inverters without transformer in grid connected photovoltaic applications," in Proc. Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE, Sevilla, Spain, Sep.1995, vol. 3, p. 3086–3091.
5. T. Kerekes, R. Teodorescu and U. Borup, Transformerless Photovoltaic Inverters Connected to the Grid, Applied Power Electronics Conference, APEC 2007 - Twenty Second Annual IEEE, Feb. 25 2007-March 1 2007, p.1733 - 1737.
6. B. Sahan, A. Notholt-Vergara, A. Engler, P. Zacharias, "Development of a single-stage threephase PV module integrated converter", 12th European Conference on Power Electronics and Applications EPE, Aalborg, Denmark, September 2007, p.1-11.
7. St. Kourtesi, L. Ekonomou, A. Nakulas, G.P. Fotis, E. Zoulias, "Modeling and simulation of a single phase photovoltaic inverter and investigation of switching strategies for harmonic minimization", 2nd Canadian Solar Buildings Conference Calgary, June 2007, p.155-159.

8. P. Fetfatzis, P. Kofinas, M Kallousis, K. Alafodimos, "Parameter Analysis of a Grid tied PV inverter's dynamic behaviour", eRA-4 proceedings 2009.
9. K. Alafodimos, P. Fetfatzis, P. Kofinas, M Kallousis, X. Kikidakis, "Design Simulation for a 3-Phase grid connected PV Inverter in Simulink", eRA-3 proceedings 2008, p.76-87.
10. M. Calais, V. G. Agelidis and Mike Meinhardt, "Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: An overview," Solar Energy Vol. 66, No. 5, p. 325-335, 1999.
11. T. Kerekes , R. Teodorescu, P. Rodríguez, Gerardo Vázquez, Emiliano Aldabas, "A new highefficiency single-phase transformerless PV inverter topology" 2009 IEEE.
12. E. Gubía, P. Sanchis, A. Ursúa, et al, "Ground currents in Single-phase Transformerless Photovoltaic Systems", Progress in Photovoltaics: Research and Applications; 2007, p.629-650.
13. T. Kerekes, R. Teodorescu, M. Liserre, "Common-mode voltage in case of transformerless PV inverters connected to the grid", ISIE 2008, p.2390-2395.
14. Maybeck, Peter S, "Stochastic Models, Estimation and Control", 1979, Vol. 1, Academic Press, Inc.
15. H. Beltran, J. Zabalza, C. Ariño, E. Belenguer, E. Perezl and N. Aparicio "Improved Kalman Filter Based Inverter Control for Reduction of Low Order Current Harmonics due to Isolation Transformers in Renewable Energy Sources", ICREPQ'09.

Local network data transmission via the power line grid.

K. Alafodimos^{1*}, M. Kallousis¹

¹TEI of Piraeus, Department of Automatic Controls, P. Ralli and Thivon Aigaleo.

*email address: calafod@teipir.gr

Abstract

In this paper we intend to evaluate a data transfer system through the 3 phase low voltage power grid. Measurements will be conducted with PCs located in the same room, after that, one PC will be connected to a different phase of the power grid and finally one PC will be moved on a different floor of the building, remaining at the same phase of the power grid. Ixia's [1] network performance benchmarks IxChariot 6.40 and Endpoint 6.60 will be used to incarnate the software part of the measurements. Three scripts of the benchmark (Throughput, Response Time and IPTV) will be run. The results will be presented in order to evaluate the technology and its usability.

Keywords : Homeplug Alliance, Power Line Communications (PLC), dLAN.

1. INTRODUCTION

Power line communications have always been behind the mainstream of the public attention. Despite the fact that the idea of using the power lines as a telecommunication medium has been around for a long time, the vast progress of Ethernet and wireless technologies have somehow impeded it from being widely used. As a result, quite a few publications on the subject exist [2].

The first PLC¹ systems were introduced in the 1950's. Their use was to control the power line companies own equipment. At the same time PLC telephony systems were developed for engineers laying the electricity cables. In the 1970's a PLC system that contained a device with a microphone and a power plug and a device with a speaker connected through the power mains. The basic idea was listening to what was happening in another room of the house. However all these application only demanded a kilobit per second rate of data transfer. Later in the 1999 in Germany during CeBit exhibition the PLC demonstrator was presented. It implemented a 2Mbps backbone connecting a master modem to five units in an apartment building 380 meters away.

A remarkable progress has been noted the latest years on the domain of the low voltage (LV, below 1kV) power line communications with a significant number of companies developing technologies on hardware and software, especially devoted on home power line telecommunications. The fact that the last telecommunication monopolies in Europe were ended in 1998 has favored such a development. The most significant of them was the foundation of homeplug powerline alliance on March 2000 [3]. The main task of this paper is to evaluate a power

line network between two computers and examine if this technology can offer an alternative to Ethernet or wireless.

2. CHANNEL CHARACTERISTICS

Home electricity cables have a huge advantage when examined as a communication channel. Every house has a number of plugs available in each room, therefore no connectivity matters can arise. On the other hand, electricity cables were neither designed nor set up to support telecommunications. Due to this fact and the noisy nature of electricity itself, this is a harsh environment. A line connecting two outlets, might have a really complicated transfer function that would be effected by noise generated from devices being plugged in or out from the home power network [4]. A typical home power line network has the characteristics of a star shaped network. Transceivers may be located in any of the rooms, and due to this structure high frequency signals suffer from various reflections [5]. An appropriate model that allows realistic description of the channel has been proposed by Phillips [6]. It actually describes the channel impulse response as a superposition of N Dirac pulses. Each pulse represents the superposition of signals from each path. Then it multiplies the impulses by a complex weighting factor ρ_i and poses a time delay τ_i . Therefore the following transfer function (1) describes the channel.

$$H(f) = \sum_{i=1}^N \rho_i * e^{-j2\pi f \tau_i} \quad (1)$$

ρ_i : Weighting factor

τ_i : Time delay

Another approach that takes into account the low pass behavior of the network has been proposed by Zimmerman [7]. It includes an additional attenuation factor and the superposition of signals from N different paths. The signal length d_i and a weighting factor g_i are taken into account for each signal along with the propagation speed V_p . Parameters a_0 , a_1 , and k are used in order frequency – dependent attenuation to be modeled. This results to the following equation (2).

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i * e^{-(a_0+a_1 f^k)*d_i} * e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v_p}} \quad (2)$$

a_0 : Offset of attenuation

- a_1 : Increase of attenuation
- k : Exponent of attenuation
- v_p : Propagation speed
- d_i : Signal length
- g_i : Weighting factor

In contradiction with other telecommunication channels, the power lines do not represent an additive white Gaussian noise environment (AWGN) [8], [5]. The noise scenario is rather complicated with various types of impulsive disturbances occurring. According to [9], [8] the noise types encountered on power line networks can be classified in five categories :

- Colored background noise:

This noise has a relatively low power spectral density, which is frequency variant. The noise is caused by numerous weak noise sources. The power spectral density of this type of noise varies in terms of minutes or hours.

- Narrow band noise:

This noise consists of sinusoidal signals with modulated amplitudes. The sources of the noise are broadcast stations and the noise level varies within the daytime.

- Periodic impulsive noise that is asynchronous to the mains frequency:

The impulses have a repetition rate generally from 50 kHz to 200 kHz. The noise is mostly caused by switching power supplies.

- Periodic noise that is synchronous to the mains frequency:

The impulses have a repetition rate of 50 Hz or 100 Hz and are synchronous to the mains cycle. The duration of impulses is short, generally in the order of microseconds. This noise is caused by power supplies that operate synchronously with the mains cycle.

- Asynchronous impulsive noise:

The noise is caused by switching transients in the distribution network. The impulses have a duration from some microseconds up to a few Milliseconds. The power spectral density of this type of noise can have levels of more than 50 dB above the background noise.

3. TECHNOLOGY

A number of techniques are engaged to overcome the power line environment challenges. Figure 1 illustrates the power line channel bandwidth up to 30 MHz. The low band signals such as X10 at 120 KHz and AC Voltage at 50 or 60 Hz are being cut off through passive filtering.

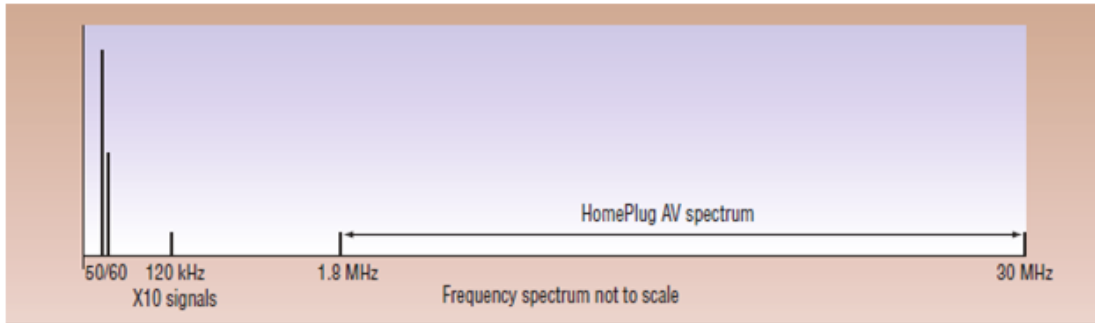


Figure 1. VAC, control signals and HomePlug AV spectrum.

Consequently the bandwidth from 1.8 MHz to 30 MHz is separated in 1,155 carriers (Figure 2) spaced at 24.4 KHz using. In order this to be achieved orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) is employed. OFDM is a robust technique widely used in DSL modems and wireless applications. Then, carriers that interfere with legacy services are being turned off through a tone mask. Practically, 917 carriers are used in order signals to be transmitted. Each carrier is modulated using either binary phase shift keying (BPSK), quadrature phase shift keying (QPSK), 8-quadrature amplitude modulation (QAM), 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM or 1024-QAM, depending on channel condition. 1024-QAM provides the highest bit rate per carrier because each of the 1024 unique analog phase/amplitude forms symbols that represent 10 digits. In case all 917 carriers are modulated with 1024-QAM, the channel bit rate would approach Shannon's limit achieving a channel rate of 197Mbps.

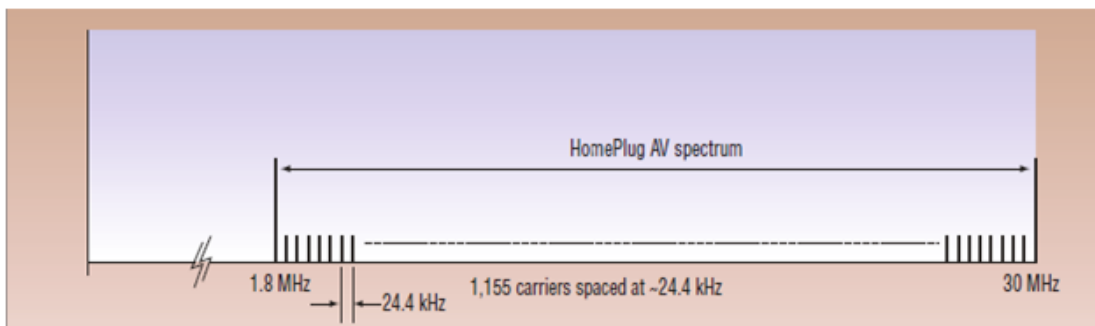


Figure 2. OFDM frequency spectrum spreading.

Practically after a process called channel estimation each carrier is loaded with the maximum number of bits that prevailing line conditions allow [10].

4. EVALUATION PRESENTATION

As it was referred above the main task of this paper was to evaluate a simple network consisted of two computers connected through the power lines and decide whether such a network offers a third solution to the already wide spread Ethernet and Wi – Fi. Therefore the following parts were used :

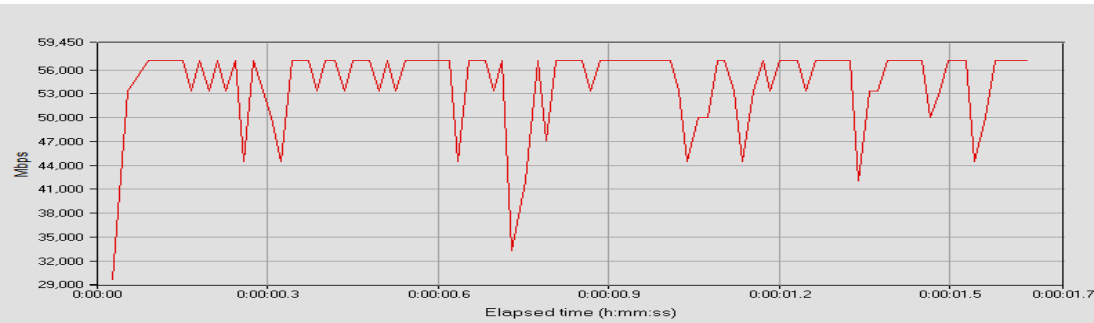
- One laptop HP Compaq nx9010 with Intel Pentium 4 CPU at 2.8 GHz, 448 MB of ram, National Semiconductor’s 10/100 Network adapter and Microsoft Windows XP Professional.
- One desktop pc with Intel Core2 Duo CPU at 2.2 GHz, 1GB of RAM, Atheros L1 Gigabit Ethernet 10/100/1000Base-T Network adapter.
- Two Netgear HDX101 AV Powerline adapters.
- Ixia’s (www.ixiacom.com) network performance benchmarks IxChariot 6.50 and Performance Endpoints 6.60.

Throughout the evaluation the laptop was being moved from plug to plug in order the appropriate measurements to be taken. The following array presents an overview of the protocols used, the topologies and the measurements. Also the graphs taken from IxChariot 6.50 are being presented.

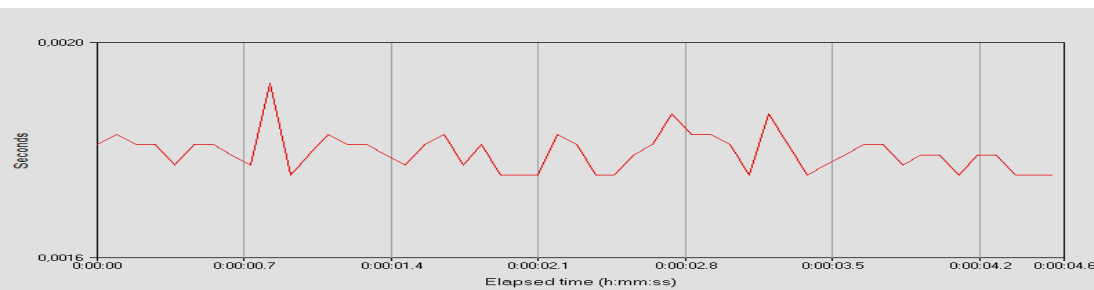
Evaluation overview

	TCP		UDP	Vertical distance. (meters)	Wire length (approximately) (meters)
	Throughput (Mbps)	Response Time (msec)	IPTV Throughput (Mbps)		
Same phase.	50 Mbps	1.8	3.747	5	8
Phase to phase.	45 Mbps	1.9	3.747	9	15
Same phase, different rooms.	21 Mbps	5	3.747	17	29

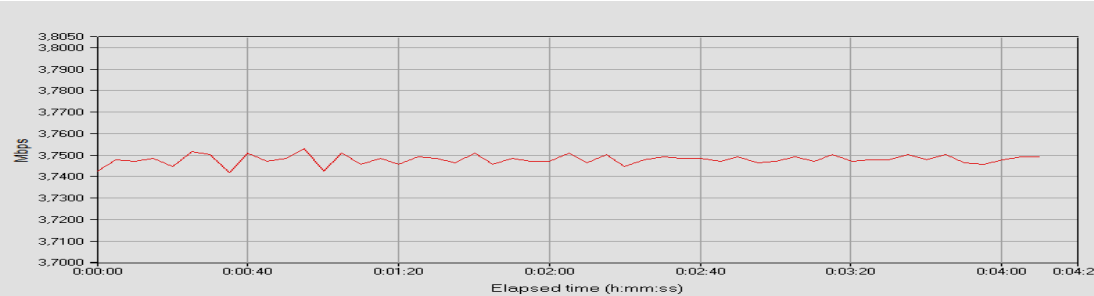
4.1 Same phase



a) TCP throughput.



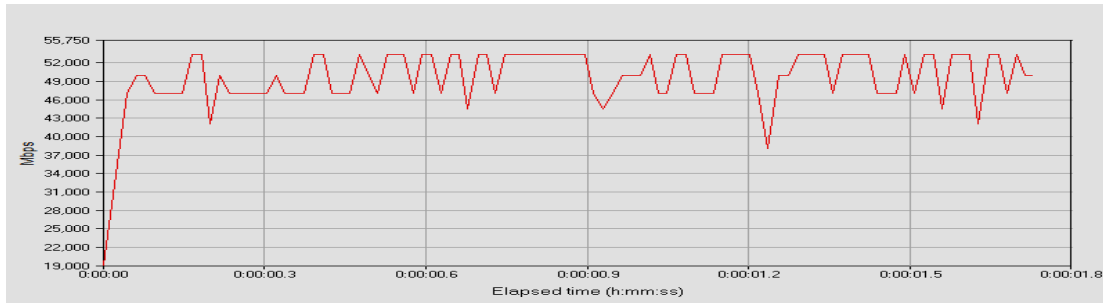
b) TCP response time.



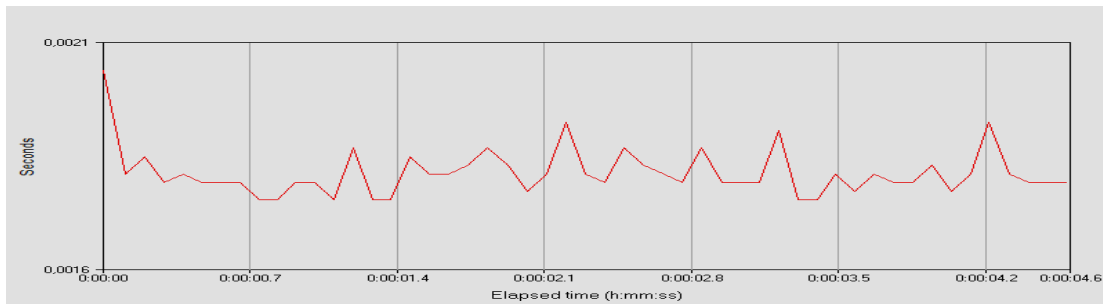
c) UDP throughput.

With the computers connected on the same phase and a channel distance of approximately 9 meters the connection gives a TCP throughput of 50 Mbps. Despite the variations that cannot be avoided due to the nature of the channel, the network seems to function at a good rate. The UDP throughput that the system chose to perform an IPTV file transfer is pretty stable at 3.747 Mbps.

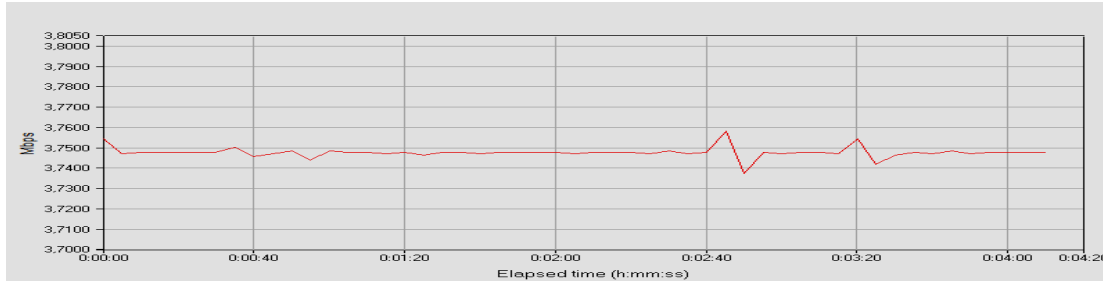
4.2 Phase to phase



a) TCP throughput



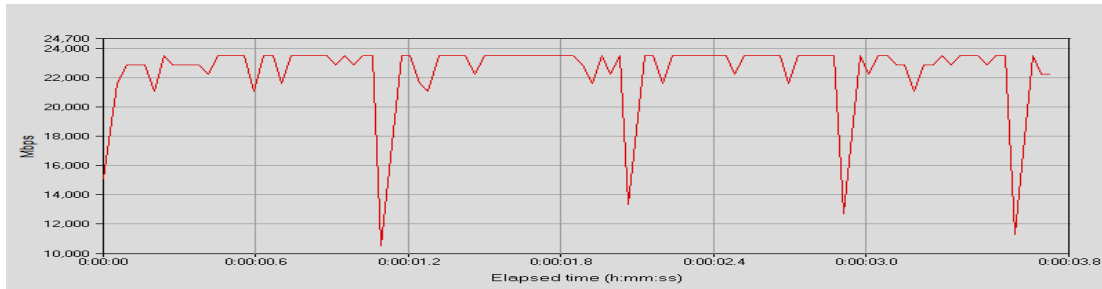
b) TCP response time.



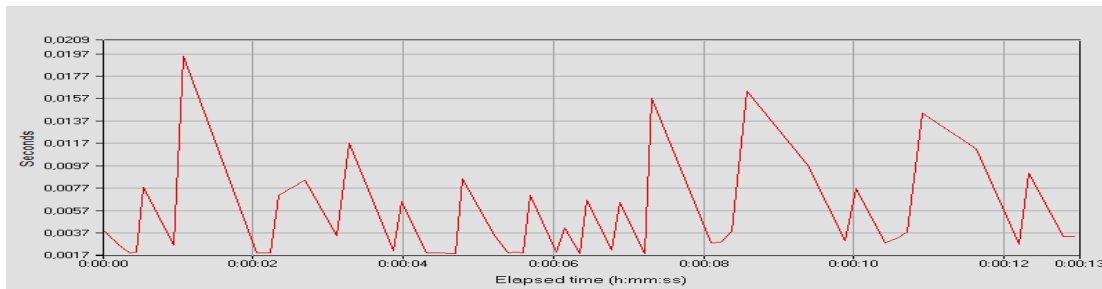
c) UDP throughput.

With the computers connected in different phases and the channel distance rising at approximately 15 meters the TCP throughput drops a little and is being stabilized at a middle value of 45 Mbps. The UDP throughput remains at 3.747 Mbps and no package losses are observed, however at certain points variations are noted.

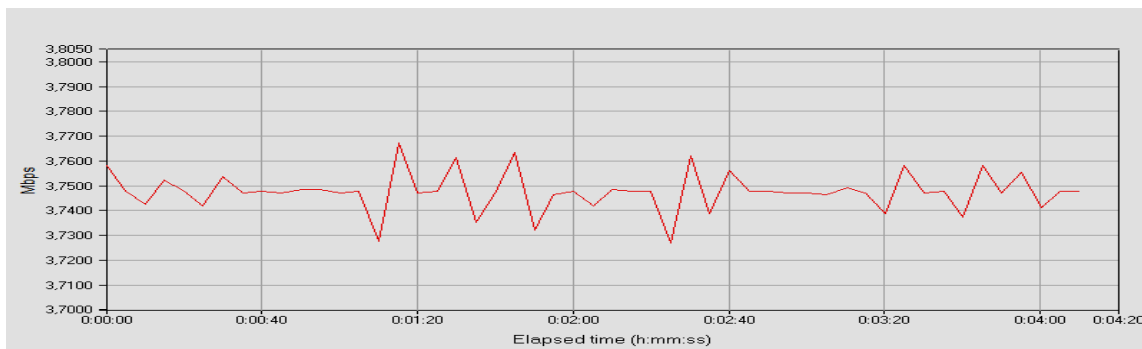
4.3 Same phase, different rooms



a) *TCP throughput.*

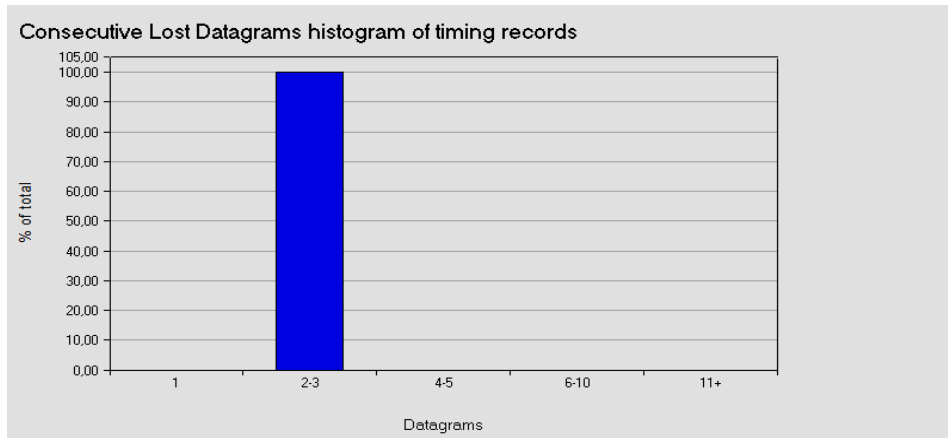


b) *TCP response time.*



c) *UDP throughput.*

When the computers are connected in different rooms and the channel distance rises at approximately 29 meters, TCP throughput drops significantly at a middle value of 21 Mbps. UDP throughput remains at 3.747 Mbps, however in this case there is a number of consecutive lost datagrams (d). This would simply mean that the user of the receiver would miss a couple of frames from the video he would be watching.



d) Lost datagrams histogram.

5 CONCLUSIONS AND FURTHER WORK

As the distance is growing, the throughput drops and of course the response time is rising. This is due to the growing length of channel and the number of nodes between the transmitter and the receiver. However even the lower measured value of throughput at 21 Mbps is more than adequate to cover the needs of a home network. When the task is file or internet connection sharing, the values measured cover the needs of a home network. Certain security issues can be raised as the power line network extends in a wide area that surpasses the limits of a house. However there are cryptography options [11] that can restrict access to the network. The idea of setting up and evaluating a PLC local area network that will be extended in a wider area has been studied and will be promoted to further work along with the simultaneous measuring of the channel attenuation levels and the calculation of the signal to noise ratio.

References

[1] www.ixiacom.com

[2] O. G. Hooijen, *Aspects of Residential Power Line Communications*. Aachen, Germany: Shaker-Verlag, 1998.

[3] <http://www.homeplug.org>

[4] X. Jiang, J. Nguimbis, S. Cheng, H. He, X. Wu. *A novel scheme for low voltage powerline communication signal processing*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 25, Issue 4, May 2003, Pages 269-274.

[5] Matthias Götz, Manuel Rapp, Klaus Dostert. *Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design*. IEEE Communications Magazine April 2004. pp 78 – 86.

[6] H. Philipps, “Modelling of Powerline Communication Channels,” *Proc. 3rd Int’l. Symp. Power-Line Commun. and its Applications*, Lancaster, UK, 1999, pp. 14–21.

[7] M. Zimmermann and K. Dostert, “A Multipath Model for the Power line Channel,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 4, Apr. 2002, pp. 553–59.

[8] M. Zimmermann and K. Dostert, “An analysis of broadband noise scenario in powerline networks,” in *Proc. ISPLC 2000*, Limerick, Ireland, Apr. 2000, pp. 131–138.

[9] Hooijen Han Vinck, *On the Channel Capacity of a European-style Residential Power Circuit*. ISPLC 1998, Soka University, Tokyo, Japan, pp. 31-44, 1998.

[10] Mark E. Hazen, *The technology behind HomePlug AV powerline communications*. Computer magazine, IEEE computer society, volume 41 June 2008, pp 90 – 92.

[11] Richard Newman, Sherman Gavette, Larry Yonge, and Ross Anderson. *Protecting domestic power-line communications*. In *SOUPS '06: Proceedings of the second symposium on Usable privacy and security*, pages 122–132, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.

Hybrid local area network evaluation

M. Kallousis^{1*}, P. Kofinas¹, N. Alafodimos¹, P. Fetfatzis¹, K. Alafodimos¹

¹TEI of Piraeus, Department of Automatic Controls, P. Ralli and Thivon Aigaleo.

*email address: mkallousis@yahoo.gr

Abstract

The low voltage power grid is an environment that can be utilized in order to provide an alternative medium of networking. In this paper we present the setup of a small local area network through the 3 phase low voltage power lines and measure throughput for various topologies. Furthermore a hybrid local area network consisted of a power line and a wireless network will be examined. We intend to compare the characteristics of each part of the hybrid network and investigate whether such a topology has the ability to function as a unit. The software that we use is Ixia's network performance benchmarks IxChariot 6.40 and Endpoint 6.60. The main purpose is to examine the functionality, while this net is in full operation combining both types of networking. We also study, the power line networking as a complementary solution for wireless small range networks and Ethernet that due to installation difficulties, fail to cover certain areas.

Keywords: Power Line Communications (PLC), hybrid network, Wi-Fi.

1. Introduction

During the previous years a remarkable progress has been achieved in the domain of home power line communications. A number of companies offer power line networking devices, whereas telecommunication vendors are examining the prospect of utilizing this technology. In fact a major Greek telecommunications vendor already uses power line communications technology to provide IPTV service [1] in a hybrid Ethernet – power line network formation. Therefore there is a certain amount of interest in the way that networks using more than one access method function. The main purpose of this paper is the setup and examination of such a network.

The term hybrid, as referred above, describes a network that uses more than one topology or access method [2]. The network presented here is consisted of a power line and a wireless network. According to [3] the structure of the European low voltage access network can be characterized as a star shaped network. As an expansion to that idea, we can assume that the home power line network, meaning everything that is located at the inner side of the main circuit breaker panel follows the same architecture. On the other hand a wireless network employs a number of topologies depending on the number of access points and the receivers that are connected at the time.

Wireless networks are extremely wide spread and the way they function is behind the scope of this paper. In general they transmit and receive data in the form of electromagnetic waves, in the microwave frequency of 2.4 GHz. Power line networks exploit the already existing wiring used for power distribution in a house in order to transmit and receive data [4]. A connection between two or more transceivers, computers in this case, is achieved via adapters that are plugged into the power sockets. Each adapter is connected to an adapter through an Ethernet cable. Therefore an Ethernet type network is formed via the power lines. It uses the frequency band 1 – 30 MHz for signal transmission. The main advantages of such a network are that there is no need for extra cabling and the technology is plug and play, which means that no special software or drivers are required for proper function.

Power line networking offers an alternative networking technology that can function complementary to wireless, Ethernet or both of them. Especially wireless access points have a limited range and encounter problems with walls and floor to floor connectivity. A hybrid network like the one that is illustrated in the picture below (fig. 1) could solve that problem. There is a wireless access point and a couple of laptops connected wirelessly to it. On the right

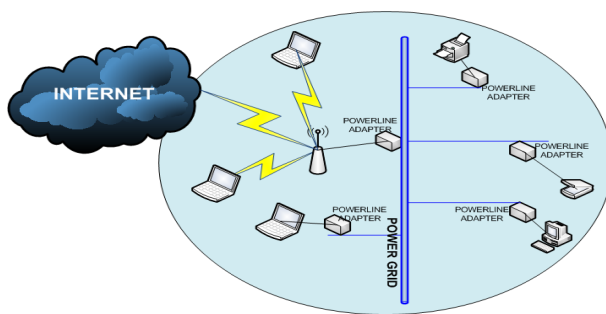


Figure 1. Hybrid network.

side of the picture there is a network via the power lines. The two of them are interconnected as the access point is also connected to the power lines through an adapter and enables file and internet connection sharing for both sub networks.

2. Measurements

In this paper we intend to investigate whether such a hybrid network is feasible and evaluate its functionality. In order to do that a hybrid network (fig. 2) was set up on the first floor of the automation department building at the TEI of Piraeus.

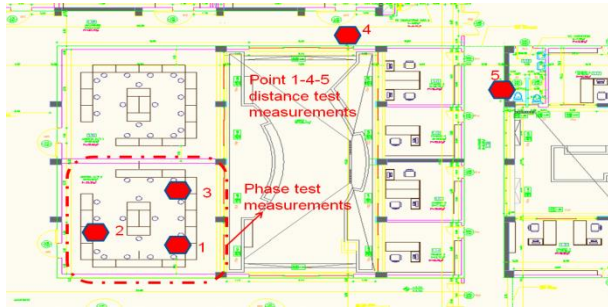


Figure 2. Evaluated network.

The red dots are the points where the computers were located during the measurements. The wireless access point, which is also used for the Automation department wireless network, was located on point 1. First of all a power line network was formed between 2 computers one of them was located on point 1 and the second on point 2. Then it was moved to the points 3, 4, 5. After that a hybrid wireless – power line network was setup connecting a computer wirelessly to the access point and the access point via an adapter to the power lines. The second computer followed the same route as before. Lastly a wireless network for the same points was setup. For each topology and connection method throughput is measured. The software used to conduct the measurements was IxChariot 6.60 and Performance Endpoints [5] .

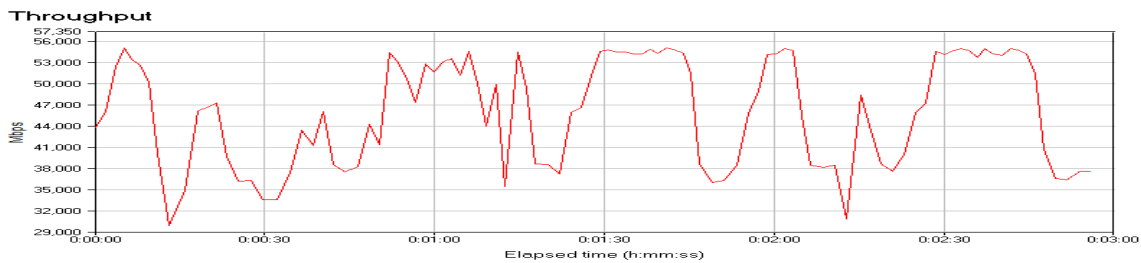


Figure 3. PLC Same phase Throughput 45Mbps.

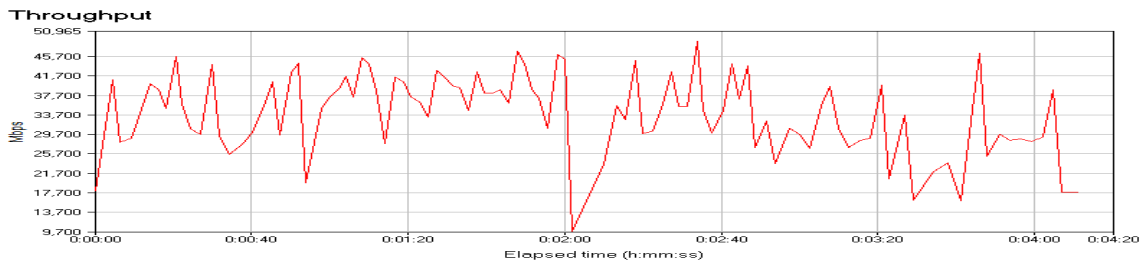


Figure 4. Hybrid PLC and Wi – fi same phase Throughput 31 Mbps.

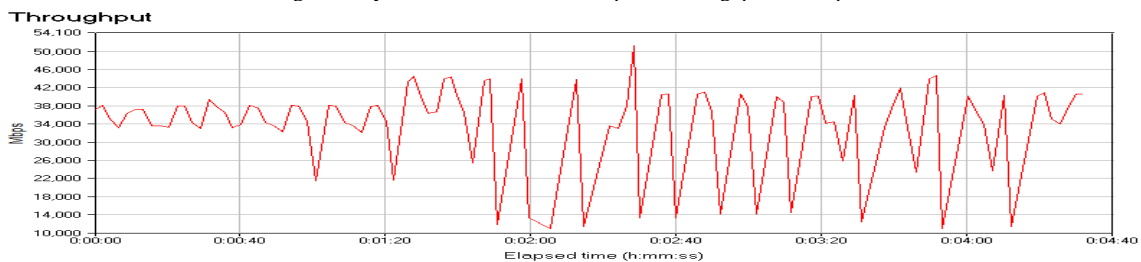


Figure 5. Wi – fi only Throughput 29 Mbps.

First the measurements between these two points are presented. The power line channel distance is approximately 15m whereas the physical distance is about 8m. As it is illustrated above (fig. 3), the throughput between the computers connected at the same phase of the power lines network is about 45Mb/s. At this point it would be useful to specify that throughput is quantity that specifies the amount of data that are being transmitted through a channel during a second. Respectively a throughput of 31Mb/s is shown (fig. 4). Here the computer and the access point are connected to the same phase too. The third graph shows the throughput measured with two computers connected wirelessly and located at the same points. The throughput here is about 29Mbps (fig 5). Then the computer was moved to point 3. The power line channel in this case has a length of approximately 30m. These two power outlets are connected to different phases. It is obvious from the results that different phase connection does not affect the data transfer rates.

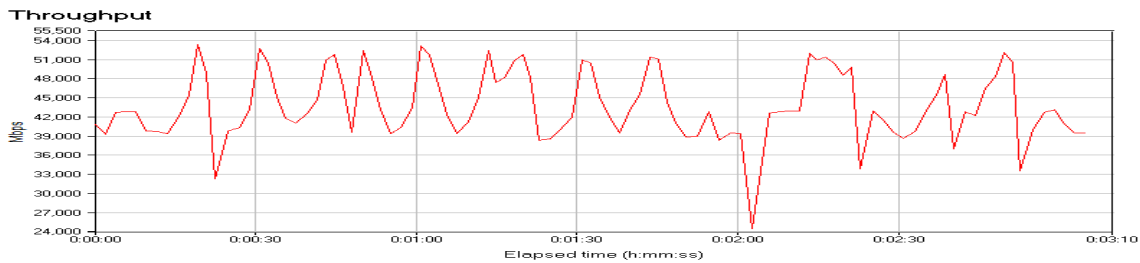


Figure 6. PLC phase to phase Throughput 43Mbps.

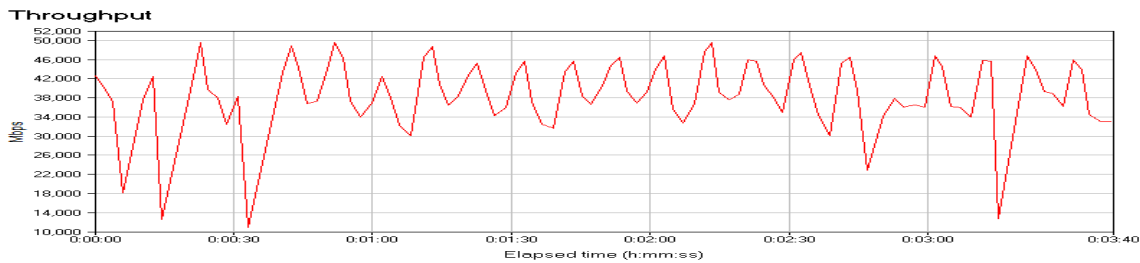


Figure 7. Hybrid PLC and Wi – fi phase to phase Throughput 36 Mbps.

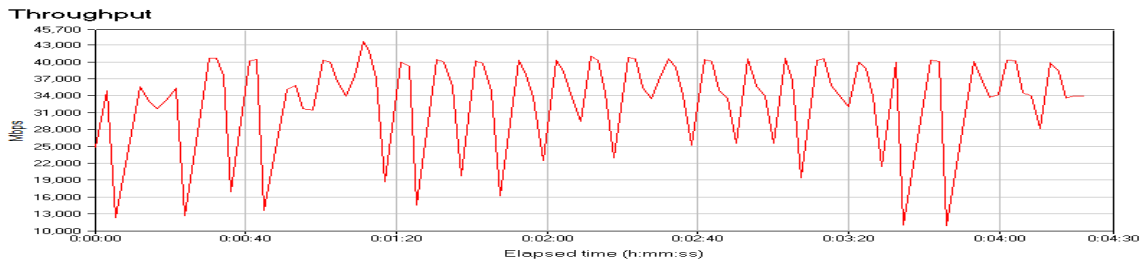


Figure 8. Wi – fi only Throughput 30 Mbps.

3

A first conclusion is that for such distances the power line network corresponds equally to the wireless. Consequently power line networking is reliable for home networking. The maximum distance between two sockets in a middle house is about 30 to 40m. This means that recently built houses that have a good quality of wiring are suitable for setting up such a network that functions at extremely satisfactory data exchange rates. The maximum internet speed in Greece is 24Mbps and the results exceed by far such values. Furthermore power line cooperates

well with wireless network and there are no issues of connectivity. The setup is extremely easy. It is important here to underline that phase to phase data exchange rates as mentioned above appears to be the same as the same phase results.

3. Phase to Phase connection

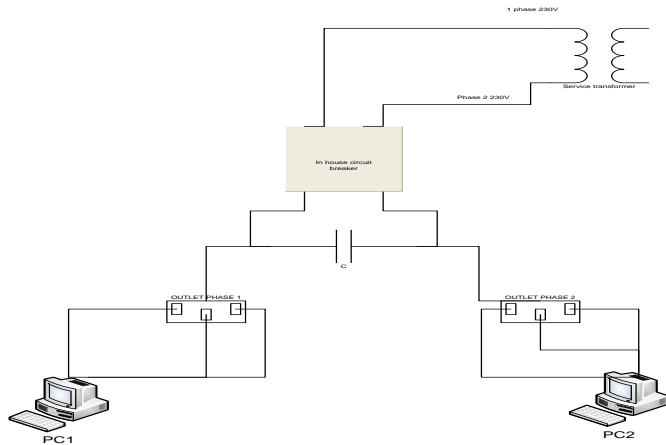


Figure 9. Phase to Phase connection without physical coupling.

The circuit breaker panel is the point of convergence for the cross-phase coupling. Most of the coupling is provided by the paralleled connection of poly-phase cables that lead to major household appliances, and of course the incoming mains. At this point each conductor serves as a capacitive plate. When conductors of different phases, are in a close distance, a capacitance between them appears, coupling the two phases. This can be generalized in all phases at the mains of the electrical installation. At frequencies in the HF spectrum, the resulting inter-wire impedance (Z), in the form of capacitive reactance, is low. The low bus impedance exists regardless whether a major appliance is actually turned on. With a polyphase appliance turned on, the bus impedance may drop even lower in the form of a complex impedance. In any case, the bus impedance, Z_{BUS} , is always sufficiently low to bridge PLC signals across phases without significant attenuation. There is no difference between same phase and phase to phase. This means that phase difference does not affect the PLC system. This scheme explains (fig. 9) why this is so. The phases are not physically coupled however they are brought in parallel in the house circuit breaker panel.

4. Long distance measurements

Then the computer was moved to point 4. The power line channel distance is approximately 60 m. The physical distance is about 20m. The first two graphs show respectively only power line and a hybrid power line wifi network throughput whereas the third shows the wireless network throughput for the same distance. It is obvious that the results are significantly lower, at the rate of 1 Mbps where the power line participates. On the other hand the wireless network seems to preserve its rates.

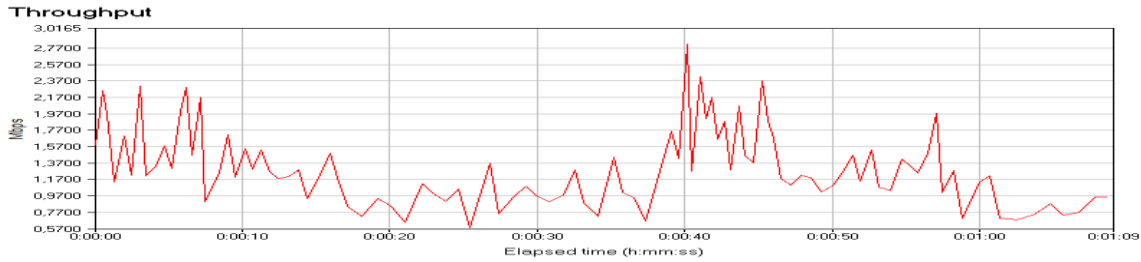


Figure 10. Ping Latency 10 ms Throughput 1.1 Mbps.

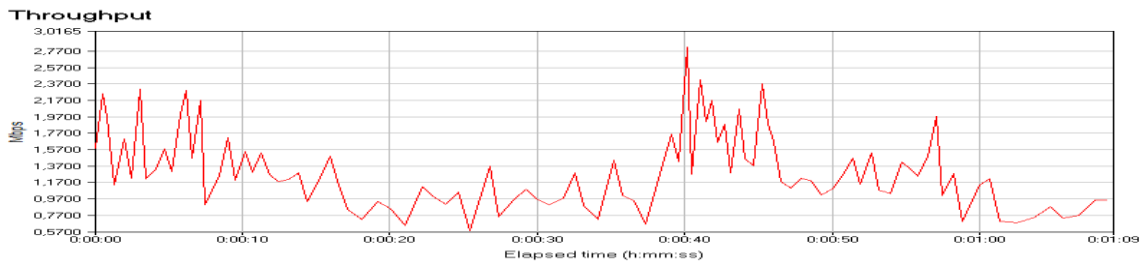


Figure 11. Hybrid PLC Wi – Fi long distance Throughput 1.1 Mbps.

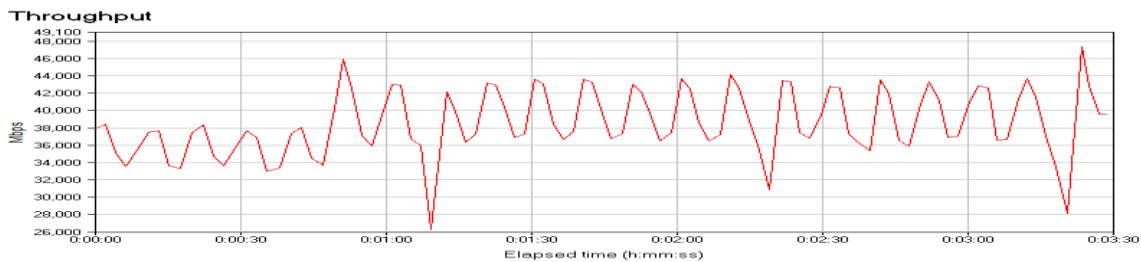


Figure 12. Wi – Fi only Throughput 38Mbps.

Now the computer was moved to point 5. The first attempt for data transfer failed as there was no connectivity between the two terminals. The power line channel distance is about 75m whereas the physical distance is only 25m. After that a third power line adapter was connected at the point 4. The third adapter acted as a repeater. The connection between the point 1 and 4 was achieved and so did the connection between point 4 and 5. An indirect connection between points 1 and 5 had been established.

In the first and the second case (fig 13,14) the throughput is very low, at the rates of 0.5Mbps. However the prospect of connecting interval power line adapters to extend the network is a great advantage. By connecting consequently adapters the network can cover great distances, with lower data transfer rates. In the third case (fig 15), the wireless connection functions satisfactory as the speed remaining in high levels.



Figure 13. PLC long distance Throughput 0.54 Mbps.

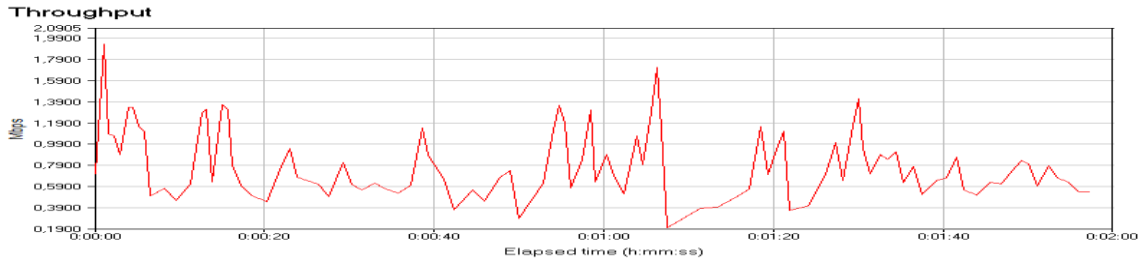


Figure 14. Hybrid PLC Wi – Fi long distance Throughput 0.68 Mbps.

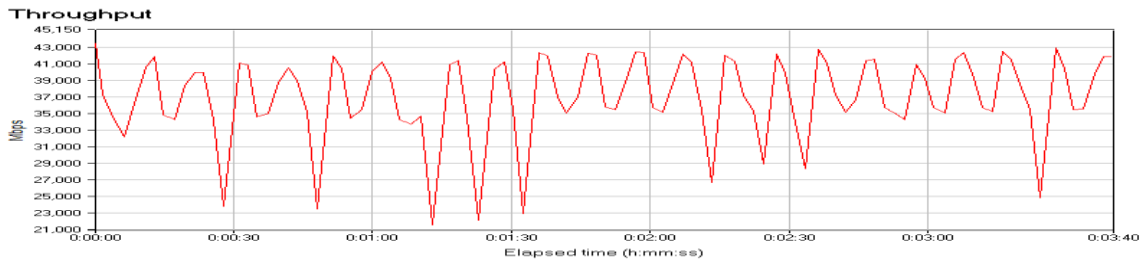


Figure 15. Wi – Fi only Throughput 36 Mbps.

Due to the structure of power distribution lines signal propagation is mainly influenced by 3 factors. Attenuation caused by cable losses and length, this means as the cable length is growing, the signal is weakening more and more which makes data exchange rates drop. Multipath propagation caused by branching. What happens is that as the signal is passing from a number of central panel breakers, it is divided in many branches, which also increases signal attenuation. Specifically in our case of measurements the signal passes from 6 central panels which means a great number of branching. Furthermore due to transmission and reflections a part of the signal interferes with the original signal. This phenomenon also causes losses. So it understandable why such results appear at the distances of 60 meters with multiple branching.

5. Conclusions and further work

This scheme (fig.16) is a possible scenario based on power line adapters. An effort was made to connect power lines adapters floor to floor. In other words three adapters, each one in different floor. This effort was made in order to connect the floors via power line communication technique and then with one wireless access point in every floor to distribute wireless internet all over the building. This method is tested because the attempt of connecting the wireless access points directly failed. But this scenario also failed because of the complex structure of the wiring of the building. However such a connection was successful when attempted in a house. For small companies that are placed in two or more floors and a wireless connection cannot be carried out, the use of power line communication could be a solution.

To sum up, the PLC achieved high data transfer rates in small distances however in long distances the data transfer rates are decreased. A network based on PLC has the ability to increase its range by using interval adapters in a function of repeater. It is a reliable solution in small complexity wiring buildings however in buildings with high wiring complexity and long distances the connection between two networks is problematic. Also it functions very well in a

corporation with wireless networks without any compatibility matters. A really interesting application of PLC is the industrial equipment monitoring and control via Ethernet type power line networks [6]. A work towards that direction is underway, as that is a field our team would like to be involved with.

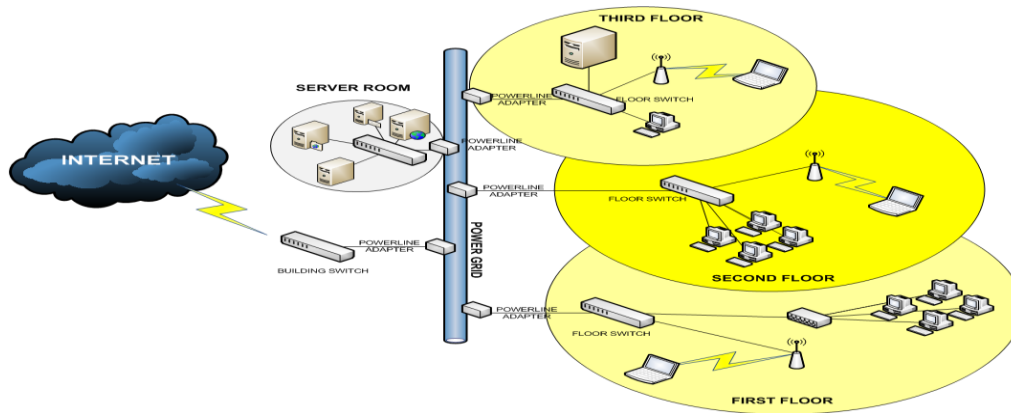


Figure 16. Floor to floor hybrid network.

Acknowledgments

We would like to thank Ixia (www.ixiacom.com) as well as Acta (www.acta.com.gr/) for offering their software in order the measurements to be carried out.

References

- [1] <http://www.on.gr>
- [2] Matthew J. Miller William D. List Nitin H. Vaidya *A Hybrid Network Implementation to Extend Infrastructure Reach*
- [3] Matthias Götz, Manuel Rapp, Klaus Dostert. *Power Line Channel Characteristics and Their Effect on Communication System Design*. IEEE Communications Magazine April 2004. pp 78 – 86.
- [4] Mark E. Hazen, *The technology behind HomePlug AV powerline communications*. Computer magazine, IEEE computer society, volume 41 June 2008, pp 90 – 92.
- [5] www.ixiacom.com
- [6] J. Ahola, J. Toukonen, A. Kosonen, T. Lindh1 and V. Sarkimaki, *Electric Motor Cable Communication Overcomes the Biggest Obstacle in On-line Condition Monitoring*.