

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών μεγάλης ισχύος σε σύνδεση με το δίκτυο

Δαλαΐνας Δημήτρης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΛΕΞΑΝΔΡΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 16/2/09

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η διπλωματική εργασία με θέμα
Μελέτη εγκατάστασης φωτοβολταϊκών μεγάλης ισχύος σε σύνδεση με το δίκτυο

Του φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών

Δαλαΐνα Δημήτρη του Θεοδώρου (Α.Μ. 5196)

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών στις 16/2/09.

Ο επιβλέπων/εξεταστής Α.Αλεξανδρίδης	Ο διευθυντής του τομέα Α.Αλεξανδρίδης

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Απευθύνω θερμές ευχαριστίες στους κυρίους Α.Αλεξανδρίδη, Θ.Ζαχαρία, Μ.Νέρη, Σ.Λαζάρου, Ι.Ναξακη, Α.Τζινευράκη, Ε.Μίμο, Α. Χαρίτο, Ι. Παπαϊωάννου, Σ. Κοντό για την πολύτιμη βοήθεια τους και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
Περιεχόμενα	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	10
Περίληψη.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	13
Μοντέλο της μιας διόδου του πλαισίου και καθορισμός των παραμέτρων του.	13
1.1 Μοντέλο της μιας διόδου ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου.....	13
1.2 Μοντέλο της μιας διόδου για ένα ολόκληρο το πλαίσιο.	14
1.2.1 Συνήθεις προσεγγίσεις	16
1.2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων του κυκλώματος της μιας διόδου με χρήση πειραματικών μετρήσεων.	18
1.2.3 Εξισώσεις που δίνουν τις παραμέτρους του μοντέλου.....	20
1.3 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου της μιας διόδου από τα στοιχεία που παραθέτουν οι κατασκευαστές (2).....	21
1.4 Μοντέλο μιας διόδου και καθορισμός παραμέτρων στο PVSYST (3).....	24

1.4.1 Χαρακτηριστικά φβ πλαισίου – περιγραφή μοντέλου	24
1.4.2 Φωτόρρευμα στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.	26
1.4.3 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.	27
1.4.4 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου.	27
1.5 Γραφικές παραστάσεις	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	39
Απώλειες	39
2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη	39
2.1.1 Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (STC-Standard Test Conditions):.....	39
2.1.2 Ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.	39
2.1.3 Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας ΦΒ κυψελίδας (Nominal Operating Cell Temperature-NOCT).	40
2.1.4 Συνθήκες λειτουργίας της φβ κυψελίδας κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία της ισούται με την ονομαστική τιμή της (NOCT):	40
2.2 Απώλειες και συντελεστές απόδοσης.	41
2.2.1 Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου.	41
2.2.2 Συντελεστής απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array).	42
2.2.3 Δίοδοι αντεπιστροφής.	43
2.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ και PVSYSYST	45
2.3.1 Απώλειες IAM [Incidence angle modifier-IAM)].	45
2.3.2 Θερμικές απώλειες λόγω της θερμοκρασίας των κυψελίδων.	47
2.3.3 Απώλειες λόγω ανακρίβειας ποιοτικών χαρακτηριστικών πλαισίου (Module Quality Loss).	54
2.3.4 Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων (Mismatch Loss). (3)	54
2.3.5 Ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων. (3)	55
2.4 ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	60
Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπέα	60
3.1 Εισαγωγή.....	60

3.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπέα.....	61
3.3 Πλευρά εισόδου του μετατροπέα. (Input side)	61
3.3.1 Κατάσταση λειτουργίας.....	61
3.3.2 Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση.....	62
3.3.3 Μέγιστη τάση.....	62
3.3.4 Κατώφλι ισχύος (Power threshold)	62
3.3.5 Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα (I_{pvmax})	62
3.3.6 Λοιπά στοιχεία.....	63
3.4 Πλευρά εξόδου του μετατροπέα.	63
3.4.1 Ονομαστική ισχύς	63
3.4.2 Μέγιστη AC ισχύς.....	64
3.4.3 Ονομαστική AC τάση	64
3.4.4 Ονομαστικό AC ρεύμα	64
3.4.5 Μονοφασική ή τριφασική σύνδεση	64
3.4.6 Συχνότητα δικτύου.....	64
3.5 Απόδοση	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	66
Διαστασιολόγηση	66
4.1 Μετατροπείς.....	66
4.1.1 Υπολογισμός της συνολικής ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων	66
4.1.2 Αριθμός και «τοποθέτηση μετατροπέων»	67
4.2 ΦΒ συστοιχίες.....	69
4.2.1 Εκτίμηση του συνολικού αριθμού πλαισίων.....	69
4.2.2 Συμβατότητα συστοιχίας-μετατροπέα	70
4.2.3 Η τάση της συστοιχίας.....	70
4.2.4 Συμβατότητα τάσης συστοιχίας και τάσης εισόδου μετατροπέα	71
4.2.5 Υπολογισμός του μέγιστου αριθμού πλαισίων εν σειρά	72
4.2.6 Έλεγχος τάσης στο MPP	72
4.2.7 Αριθμός παράλληλων αλυσίδων	73
4.2.8 Συμβατότητα ρεύματος συστοιχίας και μετατροπέα	74
4.3 Μονογραμμικό σχέδιο.....	75
4.4 Τελικά αποτελέσματα για το σύστημα.....	76
4.4.1 Αποδοτικότητες, λόγος επίδοσης, αποδόσεις.....	76
4.4.2 Ακτινοβολία, αποδιδόμενη ενέργεια και αποδόσεις.....	79

4.4.3 Διαγράμματα απωλειών	81
4.4.4 Συγκεντρωτική αναφορά του συστήματος.....	81
4.5 Τοποθέτηση πλαισίων	85
4.5.1 Τοποθέτηση για αποφυγή σκίασης	85
4.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέα και πλαισίου	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	89
Νησιδοποίηση	89
5.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	89
5.1.1 Διανεμημένη παραγωγή.....	89
5.1.2 Τι είναι το φαινόμενο της νησιδοποίησης	90
5.1.2 Λόγοι για τους οποίους η νησιδοποίηση είναι ανεπιθύμητη.	91
5.2 Τεχνικές ανίχνευσης και διακοπής της νησιδοποίησης.....	92
5.2.1 «Τοπικές» τεχνικές ανίχνευσης	92
5.2.2 Οι παθητικές τεχνικές	92
5.2.3 Οι ενεργητικές τεχνικές.	93
5.3 Περιγραφή παθητικών τεχνικών.....	93
5.3.1 Παραδοσιακές τεχνικές με ρελέ υπέρτασης/υπότασης και υπερσυχνότητας/υποσυχνότητας	94
5.3.2 .Ανίχνευση Αρμονικών Τάσης.....	97
5.3.3. Ανίχνευση μεταβολών φάσης (phase jump).....	99
5.4 Περιγραφή ενεργητικών τεχνικών	102
5.4.1 Μέτρηση εμπέδησης του δικτύου (Impedance measurement)	102
5.4.2 Ανίχνευση της εμπέδησης για συγκεκριμένη συχνότητα.....	104
5.4.3 Τεχνικές μεταβολής της συχνότητας και της φάσης που χρησιμοποιούν θετική ανάδραση (Frequency and phase shift techniques-positive feedback).....	104
5.4.3.α Γενική αρχή λειτουργίας.....	105
5.4.3.β Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας (Active Frequency Drift - AFD).....	106
5.4.3.γ Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση [AFDPF(with positive feedback) or Sandia Frequency Drift]	108
5.4.3.δ Slip Mode Frequency Shift (SMS).....	109
5.4.4 Μεταβολή Τάσης με Θετική Ανάδραση - Sandia Voltage Shift (SVS)	112
5.5 Τυπική συσκευή αυτόματης αποσύνδεσης μεταξύ παραγωγού και δικτύου.....	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6115

Προστασίες.....115

6.1 Βασικές έννοιες.....	115
6.2 Διατάξεις προστασίας ΧΤ.....	116
6.2.1 Ασφάλειες.....	116
6.2.2 Αυτόματοι Διακόπτες Ισχύος.....	117
6.3 Διατάξεις προστασίας ΜΤ.....	119
6.3.1 Ασφάλειες ΥΤ.....	119
6.3.2 Διακόπτες ισχύος ΜΤ.....	119
6.3.3 Διακόπτες φορτίου.....	122
6.3.4 Αποζεύκτες.....	122
6.4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ.....	123
6.4.1 Πλευρά ΜΤ.....	123
6.4.2 Πλευρά ΧΤ.....	123
6.4.3 Ρεύματα ζεύξεως ΜΣ.....	124
6.4.4 Προστασία έναντι ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	125
6.5 Μελέτη προστασίας εγκατάστασης ΧΤ και ΜΣ ανύψωσης.....	126
6.5.1 Στοιχεία ΜΣ.....	126
6.5.2 Ασφάλειες ΧΤ.....	127
6.5.3 Αυτόματος Διακόπτης Ισχύος (ΔΙ) ΧΤ.....	127
6.5.4 Ασφάλειες ΥΤ.....	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7133

Θέματα σύνδεσης με το Δίκτυο133

7.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες.....	133
7.1.1 Σημείο σύνδεσης στο δίκτυο – ΣΣΔ.....	133
7.1.2 Σημείο κοινής σύνδεσης – ΣΚΣ.....	133
7.1.4 Εγκατάσταση παραγωγής.....	135
7.1.5 Μοναδιαία εγκατάσταση.....	135
7.1.6 Μονάδα γεννήτριας.....	136
7.2 Γενικές προϋποθέσεις για τη σύνδεση.....	137
7.2.1 Τρόπος σύνδεσης.....	137
7.2.2 Γενικά περί διατάξεων ζεύξης και προστασίας.....	138
7.3 Διατάξεις ζεύξης και προστασίας.....	138

7.3.1 Προϋποθέσεις για τις διατάξεις ζεύξης και προστασίας.....	138
7.3.2 Ρυθμίσεις προστασιών	140
7.3.3 Διαμόρφωση της σύνδεσης στη ΜΤ	144
7.3.4 Συνολική επισκόπηση των μέσων προστασίας και ζεύξης μέχρι το ΣΚΣ	146
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	148
Βραχυκυκλώματα	148
8.1 Εισαγωγή.....	148
8.2 Βασικοί ορισμοί	149
8.3 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης.....	153
8.3.1 Μέθοδος IEC 909	153
8.3.2 Σύνθετες αντιστάσεις.....	153
8.3.3 Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k''	156
8.3.4 Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_s	156
8.3.5 Υπολογισμός ρεύματος διακοπής I_a	157
8.3.6 Υπολογισμός μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης I_k	159
8.4 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε δίκτυα ΧΤ	160
Βιβλιογραφία	162
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	164

Περίληψη

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τη μελέτη ενός διασυνδεδεμένου με το Δίκτυο φωτοβολταϊκού σταθμού μεγάλης ισχύος. Η ονομαστική ισχύς του σταθμού ανέρχεται στα 500kW περίπου και η σύνδεση του γίνεται στο Δίκτυο ΜΤ της ΔΕΗ. Για την εξομοίωση της λειτουργίας του σταθμού χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα PVSYST. Με τη χρήση και κατανόηση του συγκεκριμένου προγράμματος προσπαθούμε ταυτόχρονα να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για την μοντελοποιημένη λειτουργία των φωτοβολταϊκών.

Στο πρώτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με το μοντέλο της μιας διόδου που περιγράφει τη λειτουργία των ΦΒ πλαισίων. Οι παράμετροι του μοντέλου και οι τιμές που αυτές λαμβάνουν για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ηλεκτρική συμπεριφορά των πλαισίων. Ωστόσο ο καθορισμός των παραμέτρων δεν είναι πάντα εύκολη υπόθεση. Στο κεφάλαιο αυτό θα ανιχνεύσουμε μια μεθοδολογία προσδιορισμού τους για να καταλήξουμε στον τρόπο που αντιμετωπίζονται από το πρόγραμμα.

Κατά την λειτουργία των ΦΒ πλαισίων σε συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες παρουσιάζονται απώλειες. Μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να αποτελείται από εκατοντάδες πλαίσια. Πρέπει συνεπώς να δούμε το σύνολο των

απωλειών που αφορούν το σύστημα φβ γεννήτρια. Στο κεφάλαιο 2 εξετάζουμε το ζήτημα των απωλειών και τον τρόπο αντιμετώπισης τους από το PVSYST. Σκοπός μας είναι η κατανόηση των παραγόντων που τις καθορίζουν και η κατά το δυνατόν ποσοτικοποίηση τους.

Ένα από τα σημαντικότερα τμήματα μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι ο μετατροπέας dc-ac. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα σημαντικότερα ηλεκτρικά μεγέθη που αφορούν τους μετατροπείς και είναι σημαντικά για την ορθή διαστασιολόγηση του συστήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο προχωράμε στη διαστασιολόγηση του συστήματος. Εξετάζουμε κυρίως τα ζητήματα συμβατότητας μεταξύ ΦΒ γεννητριών και μετατροπέων και καθορίζουμε τον αριθμό των εν σειρά και παράλληλων πλαισίων που απαιτούνται. Παράλληλα παρουσιάζονται οι αποδόσεις του συστήματος όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα για προσομοίωση λειτουργίας ενός έτους. Ο υπολογισμός τους βασίζεται στα 2 πρώτα κεφάλαια.

Στο πέμπτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Η αύξηση της παραγωγής ισχύος από Διανεμημένους Παραγωγούς καθιστά την εμφάνιση του φαινομένου όλο και συχνότερη. Η ανίχνευση και διακοπή του φαινομένου είναι καθοριστικής σημασίας για την ορθή λειτουργία του Δικτύου και την ασφάλεια του προσωπικού που εργάζεται σε αυτό. Εδώ περιγράφουμε μερικές από τις πιο βασικές εφαρμοζόμενες μεθόδους ανίχνευσης και διακοπής του.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα βασικά χαρακτηριστικά των μέσων προστασίας έναντι υπερεντάσεων. Προχωράμε σε μελέτη των διατάξεων προστασίας της εγκατάστασης με σκοπό τη διασφάλιση της σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο συνεχίζουμε με μια επισκόπηση των διατάξεων προστασίας και ζεύξης που χρειάζονται για τη σύνδεση Διανεμημένων Παραγωγών στο Δίκτυο Μέσης Τάσης της ΔΕΗ. Παραθέτουμε τις βασικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα μέσα όπως αυτές καθορίζονται από σχετικό κανονισμό.

Στο όγδοο κεφάλαιο τέλος παρουσιάζουμε μερικές βασικές αρχές και ορισμούς που χαρακτηρίζουν τα βραχυκυκλώματα στα Δίκτυα YT και MT. Ο υπολογισμός χαρακτηριστικών μεγεθών που αφορούν στα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι

καθοριστικής σημασίας για την προστασία του συστήματος παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ισχύος. Δε θα επεκταθούμε ωστόσο σε μια τέτοια μελέτη.

Κεφάλαιο 1

Μοντέλο της μιας διόδου του πλαισίου και καθορισμός των παραμέτρων του.

1.1 Μοντέλο της μιας διόδου ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Το παραμετρικό μοντέλο της μιας διόδου ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$I_{cell} = I_{L,cell} - I_{0,cell} \cdot \left(e^{\frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{s,cell}}{n_{cell} \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + I R_{s,cell}}{R_{sh,cell}} \quad (1.1)$$

Όπου :

- V_T : η θερμική τάση σε Volt που δίνεται από τη σχέση $V_T = \frac{KT_c}{q}$. Για θερμοκρασία δωματίου, $27^\circ\text{C} = 300^\circ\text{K}$, $V_T \approx 25,85\text{mV}$.
- K : η σταθερά Boltzmann. $K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$.
- T_c : απόλυτη θερμοκρασία του κυττάρου σε βαθμούς Kelvin. ($0^\circ\text{C} = 273^\circ\text{K}$).

- q : φορτίο ηλεκτρονίου.
- n_{cell} : συντελεστής διόρθωσης που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης και μη ιδανικής διάχυσης τα οποία συμβαίνουν στην περιοχή της p-n επαφής. Παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2.
- I_{cell} : το ρεύμα στην έξοδο του κυττάρου.
- V_{cell} : η τάση στην έξοδο του κυττάρου.
- $I_{L, \text{ cell}}$: το φωτόρευμα, δηλαδή το ρεύμα που παράγεται λόγω του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός επί του κυττάρου.
- $I_{0, \text{ cell}}$: ρεύμα κόρου της διόδου
- $R_{s, \text{ cell}}$: σε σειρά αντίσταση του κυττάρου. Παριστάνει σε συγκεντρωμένη μορφή όλα τα κατανεμημένα στοιχεία αντίστασης κατά τη ροή των φορέων στον κυρίως ημιαγωγό, την ενδοεπιφάνεια μεταξύ ημιαγωγού ωμικής επαφής και την ωμική επαφή. Είναι συνήθως μικρότερη του 1Ω .
- $R_{sh, \text{ cell}}$: παράλληλη αντίσταση του κυττάρου. Οφείλεται σε διαρροές φορέων που συμβαίνουν : στην επαφή pn (επανασύνδεση), στην εξωτερική παράπλευρη επιφάνεια του κυττάρου (επιφανειακή διαρροή), σε άλλες ανωμαλίες του κρυστάλλου. Είναι της τάξης των $k\Omega$, γενικά πολύ μεγαλύτερη από την R_s .

1.2 Μοντέλο της μιας διόδου για ένα ολόκληρο το πλαίσιο.

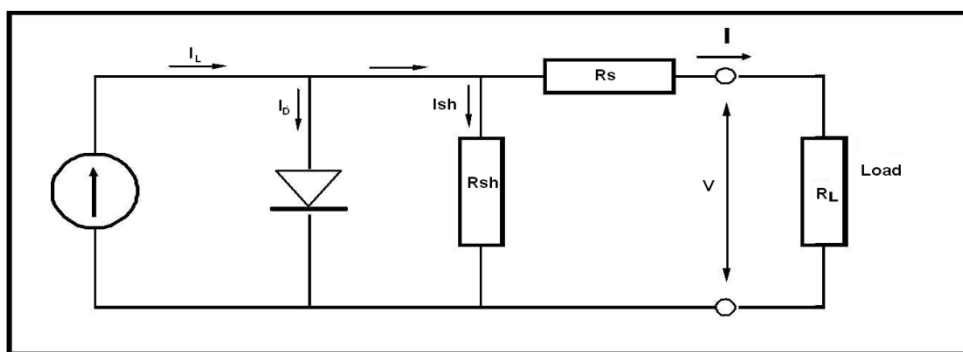
Με βάση το μοντέλο της μιας διόδου για ένα ηλιακό κύτταρο προκύπτει το μοντέλο της μιας διόδου για ένα ολόκληρο πλαίσιο. Αν θεωρήσουμε ότι το πλαίσιο αποτελείται από N_s ίδια ηλιακά κύτταρα σε σειρά και N_p παράλληλες αλυσίδες κυττάρων τότε η ηλεκτρική συμπεριφορά του δίνεται από την εξίσωση:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Όπου:

- N_s : αριθμός κυττάρων σε σειρά. Θεωρούμε ότι τα κύτταρα είναι πανομοιότυπα.
- N_p : αριθμός παράλληλων αλυσίδων.
- n : $N_s \times n_{cell}$.
- $I = I_{cell} \times N_p$, το ρεύμα στην έξοδο του πλαισίου.
- $V = V_{cell} \times N_s$, η τάση στη έξοδο του πλαισίου.
- $I_L = I_{L,cell} \times N_p$ το συνολικό ισοδύναμο φωτόρευμα του πλαισίου.
- $I_0 = I_{0,cell} \times N_p$ το συνολικό ρεύμα κόρου της διόδου του πλαισίου.
- $R_s = (N_s / N_p) \times R_{s, cell}$ η ισοδύναμη σε σειρά αντίσταση του πλαισίου
- $R_{sh} = (N_s / N_p) \times R_{sh, cell}$ η ισοδύναμη παράλληλη αντίσταση του πλαισίου

Η εξίσωση αυτή είναι μια μη γραμμική πεπλεγμένη εξίσωση, $I=f(I,V)$. Αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την ηλεκτρική συμπεριφορά ενός πλαισίου σε στατικές καταστάσεις. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα.



Σχέδιο 1. . Το μοντέλο της μιας διόδου για ένα πλαίσιο.

Αν επιλύσουμε την παραπάνω εξίσωση (1.2) ως προς την τάση τότε παίρνουμε πάλι μια πεπλεγμένη εξίσωση τα μορφής $V= f(I,V)$. Επομένως έχουμε :

$$\blacksquare \quad V = -I \cdot R_s + nV_T \cdot \ln \left(\frac{I_L - \beta_R \cdot I - \frac{V}{R_{SH}}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.3)$$

Όπου:

$$\circ \quad \beta_R = 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε το ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοιχτοκύκλωσης .

- Το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} υπολογίζεται αν θέσουμε στην εξίσωση 1.2 $V=0$ και $I = I_{sc}$ οπότε προκύπτει :

$$\blacksquare \quad I_{sc} = \frac{1}{\beta_R} \cdot \left\{ I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] \right\} \quad (1.5)$$

- Η τάση ανοιχτοκύκλωσης V_{oc} υπολογίζεται αν θέσουμε στην εξίσωση 1.3 όπου $I = 0$ και $V = V_{oc}$ οπότε προκύπτει:

$$V_{oc} = nV_T \cdot \ln \left(\frac{I_L - \frac{V_{oc}}{R_{SH}}}{I_0} + 1 \right) \quad (1.6)$$

1.2.1 Συνήθειες προσεγγίσεις

Επειδή όπως είδαμε η R_{sh} είναι πολύ μεγάλη (της τάξης των $k\Omega$) και πολύ μεγαλύτερη της R_s μπορούμε να κάνουμε τις παρακάτω προσεγγίσεις:

$$\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \approx 0 \quad \text{και} \quad \frac{V}{R_{SH}} \approx 0$$

$$\beta_R = 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \approx 1$$

Οι παραλειπόμενοι όροι είναι σχεδόν αμελητέοι και δεν έχουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της χαρακτηριστικής εξόδου V-I.

Έτσι οι σχέσεις 1.2 ,1.3,1.5,1.6 απλοποιούνται στις ακόλουθες:

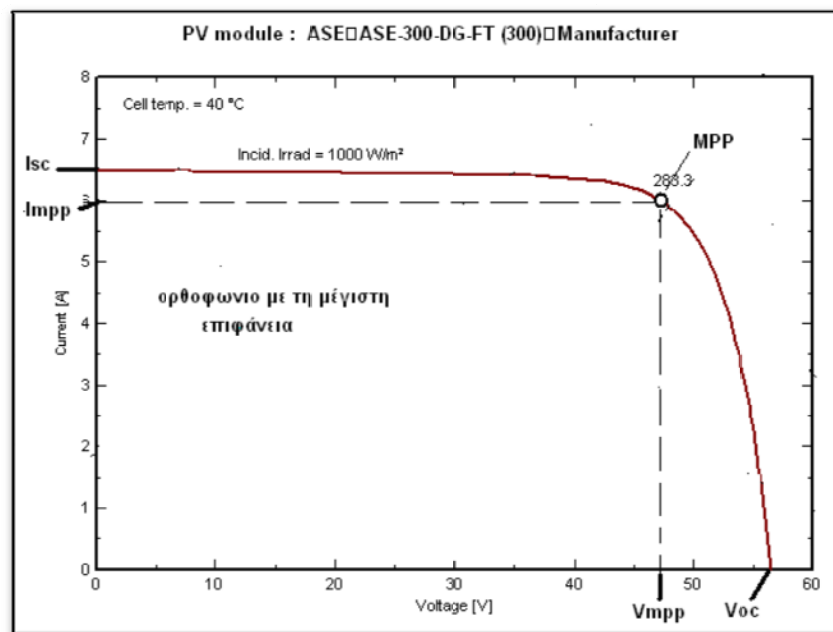
$$\blacksquare \quad I \approx I_L - I_0 \cdot \left[e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right] \quad (1.7)$$

$$\blacksquare \quad V \approx -I \cdot R_s + nV_T \cdot \ln \left(\frac{I_L - I}{I_0} + 1 \right) \quad (1.8)$$

$$\blacksquare \quad I_{sc} \approx I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] \quad (1.9)$$

$$\blacksquare \quad V_{oc} \approx nV_T \cdot \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.10)$$

Η γραφική παράσταση μεταξύ τάσης και ρεύματος στην έξοδο του πλαισίου καλείται χαρακτηριστική εξόδου I-V και έχει επικρατήσει να παριστάνεται στο πρώτο τεταρτημόριο. Μια τέτοια καμπύλη για δοσμένη ένταση ακτινοβολίας και δοσμένη θερμοκρασία λειτουργίας του πλαισίου φαίνεται στο σχήμα για το πλαίσιο ASE-300-DG-FT.



Σχέδιο 2. Χαρακτηριστική I-V για το πλαίσιο ASE-300-DG-FT.

Στην καμπύλη βλέπουμε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά μεγέθη για το πλαίσιο:

- I_{sc} : το ρεύμα βραχυκύκλωσης στην έξοδο του πλαισίου για τάση εξόδου $V=0$.
- V_{oc} : την τάση ανοιχτού κυκλώματος, που είναι η τάση για ρεύμα $I=0$.
- MPP: το σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου που είναι το σημείο της I-V καμπύλης από όπου μπορούμε να κατασκευάσουμε το ορθογώνιο με την μέγιστη επιφάνεια μέσα στην καμπύλη I-V. Η ισχύς στο σημείο, αυτό για δοσμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας, είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει το πλαίσιο, P_M .
- I_{MPP} : το ρεύμα εξόδου που αντιστοιχεί στο MPP.
- V_{MPP} : η τάση εξόδου που αντιστοιχεί στο MPP.

1.2.2 Προσδιορισμός παραμέτρων του κυκλώματος της μιας διόδου με χρήση πειραματικών μετρήσεων.

Οι παράμετροι που καθορίζουν το μοντέλο της μια διόδου για το φβ πλαίσιο δεν υπολογίζονται εύκολα. Παρουσιάζεται εδώ συνοπτικά ένας αλγεβρικός τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου με βάση συγκεκριμένες πειραματικές

μετρήσεις ή δεδομένα που παρέχονται για τα πλαίσια υπό γνωστές συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας (συνθήκες αναφοράς). Οι συνθήκες αναφοράς λαμβάνονται συνήθως για ακτινοβολία 1000 W/m^2 και για τη θερμοκρασία 25°C (STC συνθήκες).

Για δεδομένες λοιπόν τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας μπορούμε να καθορίσουμε την πλήρη I-V χαρακτηριστική ενός οποιουδήποτε πλαισίου αρκεί να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους των παραπάνω εξισώσεων, δηλ τα : n , I_0 , I_L , R_{sh} , R_s .

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κάποιες επιλεγμένες μετρήσεις και γίνονται κατάλληλες προσεγγίσεις στις παραπάνω εξισώσεις του μοντέλου για να καταλήξουμε σε σχέσεις που δίνουν τις αναλυτικές εκφράσεις για τις παραμέτρους του μοντέλου με ικανοποιητική ακρίβεια. Επομένως χρησιμοποιούμε κάποιες μετρήσεις και τις εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο και στη συνέχεια επιλύουμε το αλγεβρικό σύστημα που προκύπτει ως προς τις ζητούμενες παραμέτρους.

Για τον υπολογισμό λοιπόν των παραμέτρων με την συγκεκριμένη αλγεβρική μέθοδο χρησιμοποιούνται κατάλληλα πειραματικά σημεία που προκύπτουν από κάποια κατάλληλη πειραματική καμπύλη. Τα σημεία αυτά είναι:

- Τάση ανοιχτού κυκλώματος, V_{oc} .
- Ρεύμα ανοιχτοκύκλωσης, I_{sc} .
- Τάση V_{MP} και ρεύμα I_{MP} στο σημείο μέγιστης ισχύος εξόδου P_{MP} .
- Την κλίση, $\partial V/\partial I$, της καμπύλης V-I στο σημείο ($V=V_{oc}$, $I=0$), με βάση την οποία υπολογίζουμε την R_{s0} . Έχουμε δηλαδή: (1.11) $R_{s0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{oc}}$

Για το σκοπό αυτό απαιτείται η λήψη πειραματικών μετρήσεων πολύ κοντά στην τιμή V_{oc} . Συγκεκριμένα παίρνουμε το ζεύγος τιμών (V_{MAX} , I_{MIN}).

$$\text{ο } R_{s0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{oc}} = -\frac{V_{oc} - V_{MAX}}{0 - I_{MIN}} \rightarrow R_{s0} = \frac{V_{oc} - V_{MAX}}{I_{MIN}} \quad (1.12)$$

- Την κλίση της καμπύλης V-I στο σημείο ($V=0$, $I=I_{sc}$), με βάση την οποία υπολογίζουμε την R_{sh} . Έχουμε δηλαδή: $R_{sh} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{I=I_{sc}}$ (1.13)

Για το σκοπό αυτό απαιτείται η λήψη πειραματικών μετρήσεων πολύ κοντά στην τιμή ($V=0$, $I=I_{sc}$). Συγκεκριμένα παίρνουμε το ζεύγος τιμών (0 , I_{MAX}).

$$\text{ο } R_{sh0} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{I=I_{sc}} = -\frac{0 - V_{MIN}}{I_{SC} - I_{MAX}} \rightarrow R_{sh0} = \frac{V_{MIN}}{I_{SC} - I_{MAX}} \quad (1.14)$$

1.2.3 Εξισώσεις που δίνουν τις παραμέτρους του μοντέλου.

Με βάση τα παραπάνω μετρούμενα δεδομένα, με τη χρήση των εξισώσεων που έχουμε ήδη δει και κάνοντας κατάλληλες προσεγγίσεις καταλήγουμε σε 5 εξισώσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου του φβ πλαισίου. Οι εξισώσεις στις οποίες καταλήγουμε παρουσιάζονται πιο κάτω. Η διαδοχή των εξισώσεων συμπίπτει με τη διαδοχή που πρέπει να γίνουν οι υπολογισμοί για να λάβουμε τις τιμές των παραμέτρων. Συνεπώς έχουμε:

$$\blacksquare \quad R_{sh} \approx R_{sh0} = \frac{V_{MIN}}{I_{SC} - I_{MAX}} \quad (1.15)$$

$$\blacksquare \quad n \approx \frac{1}{V_T} \cdot \frac{V_{MP} + I_{MP}R_{s0} - V_{oc}}{\ln\left(\frac{(I_{sc} - I_{MP})R_{sh} - V_{MP}}{I_{sc} \cdot R_{sh} - V_{oc}}\right) + \frac{I_{MP}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}} \quad (1.16)$$

$$\blacksquare \quad I_0 \approx \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right)} \quad (1.17)$$

$$\blacksquare \quad R_s = R_{s0} - \frac{nV_T}{I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right)} \quad \text{όπου } R_{s0} = \frac{V_{oc} - V_{MAX}}{I_{MIN}} \quad (1.18)$$

$$\blacksquare \quad I_L = I_{SC} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{SC} R_s}{n V_T} \right) - 1 \right] \quad (1.19)$$

Μπορούμε συνεπώς να υπολογίσουμε τις παραμέτρους του μοντέλου ενός φβ πλαισίου (πάντα για συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) ως συνάρτηση μεγεθών άμεσα μετρήσιμων από την χαρακτηριστική V-I. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι :

V_{oc} : τάση ανοιχτού κυκλώματος.

I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης.

V_{MP} : τάση που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

I_{MP} : ρεύμα που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

V_{MIN} : η ελάχιστη μετρηθείσα τιμή τάσεως της καμπύλης.

I_{MAX} : η μέγιστη μετρηθείσα τιμή ρεύματος της καμπύλης.

V_{MAX} : η μέγιστη μετρηθείσα τιμή τάσεως της καμπύλης.

I_{MIN} : η ελάχιστη μετρηθείσα τιμή ρεύματος της καμπύλης (1)

1.3 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου της μιας διόδου από τα στοιχεία που παραθέτουν οι κατασκευαστές (2)

Οι Beckmann & Duffie, για τον υπολογισμό των παραμέτρων R_s , I_L , I_0 και a , με βάση τα στοιχεία που παραθέτουν οι κατασκευαστές για τα πλαίσια, προτείνουν την διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως.

Αρχικά να πούμε ότι η βασική σχέση που περιγράφει το μοντέλο της μιας διόδου είναι:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.20)$$

και συμπίπτει υπόλοιπες σχέσεις που περιγράφουν το μοντέλο της μιας διόδου και έχουμε δει ή πρόκειται να δούμε στην παρούσα εργασία.

Να επισημάνουμε ότι γενικά ισχύει R_{sh} πολύ μεγάλη, της τάξης των $k\Omega$, και επίσης ότι $R_{sh} \gg R_s$. Όπως είδαμε άλλωστε η R_s είναι μικρότερη από 1Ω . Με βάση αυτή τη θεώρηση γίνονται απλοποιήσεις που απλουστεύουν σημαντικά τους υπολογισμούς χωρίς ωστόσο να προκύπτουν σημαντικά σφάλματα στον υπολογισμό των παραπάνω παραμέτρων του μοντέλου της μιας διόδου.

Στις συνθήκες βραχυκυκλώματος το ρεύμα της διόδου θεωρείται αμελητέο. Το ίδιο θεωρείται και για το ρεύμα I_{sh} στην παράλληλη αντίσταση R_{sh} . Οπότε λαμβάνεται:

$$I_L = I_{sc} \quad (1.21)$$

Από την αρχική σχέση (1.20) για $V=V_{oc}$ και για ρεύμα $I=0$ λαμβάνοντας υπόψη ότι R_{sh} πολύ μεγάλη και αγνοώντας τη μονάδα σε σχέση με τον εκθετικό όρο έχουμε:

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V_{oc}}{a}} - 1 \right) \rightarrow I_0 = I_L \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{a}} \quad (1.22)$$

Αντικαθιστώντας στην βασική εξίσωση (1.20) το ζεύγος τιμών (I_{MPP} , V_{MPP}), την έκφραση για το I_0 από την (1.22) και λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (1.21) προκύπτει για την R_s ότι:

$$R_s = \frac{a \ln \left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_L} \right) - V_{MPP} + V_{oc}}{I_{MPP}} \quad (1.23)$$

Η παραπάνω σχέση συνδέει τις παραμέτρους a και R_s αλλά δίνει και όρια για τις τιμές που μπορούν να πάρουν. Έτσι η μέγιστη τιμή για την R_s προκύπτει όταν το a τείνει στο μηδέν, αφού ο όρος $\ln[1-(I_{MPP}/I_L)]$ είναι γενικά αρνητικός. Η μέγιστη τιμή για το a προκύπτει όταν η R_s τείνει στο μηδέν. Αυτά με την προϋπόθεση ότι για να υπάρχει φυσική σημασία οι παραπάνω παράμετροι πρέπει να έχουν θετικές τιμές.

Μια ικανοποιητική τιμή για το συντελεστή a_{ref} δίνεται από τη σχέση:

$$a_{ref} = \frac{\mu_{Voc} T_{cref} - V_{ocref} + E_{gap} N_s}{\frac{\mu_{Isc} T_{cref}}{I_{Lref}} - 3} \quad (1.24)$$

όπου μ_{Voc} είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής για την τάση ανοιχτού κυκλώματος, μ_{Isc} ο θερμοκρασιακός συντελεστής για το ρεύμα βραχυκύκλωσης, E_{gap} το ενεργειακό διάκενο του υλικού, N_s ο αριθμός των κυττάρων του πλαισίου επί τον αριθμό των εν σειρά πλαισίων, G_{ref} η ακτινοβολία αναφοράς και T_{cref} η θερμοκρασία αναφοράς του κυττάρου.

Από τη σχέση (1.24) υπολογίζουμε πρώτα τον a_{ref} και στη συνέχεια από τις προηγούμενες σχέσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους R_{sref} , I_{Lref} και I_{0ref} για το μοντέλο της μιας διόδου σε συνθήκες αναφοράς για την ακτινοβολία (G_{ref}) και τη θερμοκρασία (T_{cref}). Συνήθως οι συνθήκες αναφοράς είναι οι STC οπότε $G_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ και $T_{cref}=25^\circ\text{C}$. Επίσης για τις συνθήκες αναφοράς πρέπει να παρέχονται από τον κατασκευαστή τα εξής στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα πλαίσια: I_{MPP} , V_{MPP} , V_{oc} , I_{sc} , μ_{Voc} και μ_{Isc} .

Η τιμή για την R_{sh} μπορεί να υπολογιστεί με χρήση πειραματικών δεδομένων όπως είδαμε σε προηγούμενη παράγραφο ή να ληφθεί πολύ μεγάλη $R_{sh} \rightarrow \infty$ χωρίς να προκύψουν σημαντικές αλλαγές στην χαρακτηριστική καμπύλη.

Με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς για τις συνθήκες αναφοράς (a_{ref} , R_{sref} , I_{Lref} και I_{0ref}) είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων I_L , I_0 και a του μοντέλου της μιας διόδου και για οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες ακτινοβολίας (G) και θερμοκρασίας (T). Οι παρακάτω σχέσεις δίνουν μια ικανοποιητική προσέγγιση για αυτές τις παραμέτρους.

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{ref}} \quad (1.25)$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{Tref}} \left[I_{Lref} + \mu I_{sc} (T_c - T_{cref}) \right] \quad (1.26)$$

$$\frac{I_0}{I_{0ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \exp \left[\frac{E_{gap} N_s}{a_{ref}} \left(1 - \frac{T_c}{T_{cref}} \right) \right] \quad (1.27)$$

Σημείωση 1: στο μοντέλο αυτό η τιμή της R_s θεωρείται αμετάβλητη ως προς τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας επομένως μπορεί να λαμβάνεται $R_s=R_{sref}$.

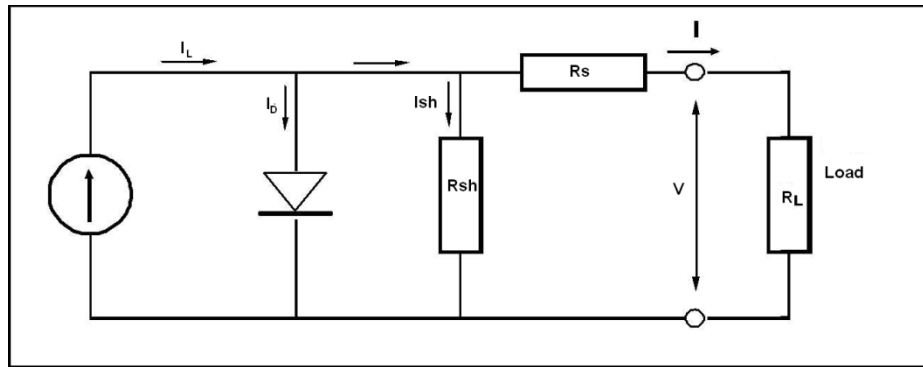
Σημείωση 2: αν η τιμή του a_{ref} που προκύπτει από την εξίσωση 1.24 είναι θετική αλλά μικρότερη από την μέγιστη τιμή του που προκύπτει από την εξίσωση 1.23 για $R_s=0$ τότε μοντέλο της μιας διόδου μας καλύπτει. Αν όμως η τιμή του a_{ref} από την εξίσωση 1.24 είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το a με βάση την 1.23 ή προκύψει να έχει αρνητική τιμή τότε το μοντέλο δεν μας καλύπτει.

1.4 Μοντέλο μιας διόδου και καθορισμός παραμέτρων στο PVSYST (3).

1.4.1 Χαρακτηριστικά φβ πλαισίου – περιγραφή μοντέλου.

Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε κινείται στο παραπάνω μοτίβο αναφορικά με το μοντέλο και τον αλγεβρικό τρόπο προσδιορισμού των παραμέτρων που χρειάζονται για να τον πλήρη προσδιορισμό του.

Για να περιγραφτεί λοιπόν η λειτουργία των φωτοβολταϊκών πλαισίων χρησιμοποιείται το μοντέλο της μιας διόδου. Παρατίθεται και το γνωστό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.



Σχέδιο 3. Μοντέλο μιας διόδου του πλαισίου

Το μοντέλο είχε αρχικά σχεδιαστεί για ένα μόνο κύτταρο. Χρησιμοποιείται όμως για ολόκληρο το πλαίσιο με την προϋπόθεση ότι τα κύτταρα που το αποτελούν είναι πανομοιότυπα, κάτι που ωστόσο στην πράξη δεν ισχύει απόλυτα.

Το μοντέλο αυτό ταιριάζει για την περιγραφή πλαισίων κρυσταλλικού πυριτίου αλλά χρειάζεται μερικές προσαρμογές για να περιγράψει τη συμπεριφορά πλαισίων λεπτού υμενίου. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι το μοντέλο αυτό περιγράφει επαρκώς τη συμπεριφορά πλαισίων που φτιάχνονται από CIS (Cu,Indio,Se₂)

Η βασική σχέση που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα για την περιγραφή του μοντέλου της μιας διόδου είναι:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N_{cs} \cdot \text{Gamma} \cdot K \cdot T_c}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1.28)$$

Όπου:

- I: το ρεύμα στην έξοδο του πλαισίου [A].
- V: η τάση στους ακροδέκτες εξόδου του πλαισίου [V].
- I_{ph}: φωτόρευμα [A]. Είναι ανάλογο της ολικής ακτινοβολίας, με διόρθωση που εξαρτάται από την θερμοκρασία T_c.
- I_D: ρεύμα διόδου [A].
- I₀: ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου που επίσης εξαρτάται από την θερμοκρασία.

- Rs: σε σειρά αντίσταση [ohm].
- Rsh: παράλληλη αντίσταση [ohm].
- q: φορτίο του ηλεκτρονίου. $q = 1.602 \times 10^{-19}$ Coulomb.
- K: σταθερά Boltzmann. $K = 1.381 \text{ E-23 J/K}$.
- Gamma: παράγοντας ποιότητας της διόδου, μεταξύ 1-2 για κρυσταλλικά πλαίσια. Οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης στην περιοχή επαφής.
- Ncs: αριθμός κυττάρων εν σειρά.
- Tc: θερμοκρασία των κυττάρων [°K].

Είναι φανερό ότι πρόκειται για την σχέση που συναντήσαμε πιο πάνω αρκεί να λάβουμε υπόψη ότι: $V_T = KT/q$, και $n = N_s n_{cell} = N_{cs} \text{ Gamma}$. Όπου προφανώς $N_s = N_{cs}$ είναι ο αριθμός των εν σειρά στοιχείων του πλαισίου και $n_{cell} = \text{Gamma}$. Προφανώς συμπίπτει και με τη σχέση που προτείνουν οι Beckmann&Duffie αν λάβουμε υπόψη τη σχέση μεταξύ των συντελεστών a και Gamma , $a = N_s \text{Gamma} K T_c / q$ και $N_{cs} = N_s$.

1.4.2 Φωτόρευμα στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Το φωτόρευμα μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις τιμές της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στις συνθήκες αναφοράς που συνήθως είναι οι πρότυπες. Έτσι έχουμε:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \cdot \left(I_{ph,ref} + mu ISC \cdot \frac{T_c}{T_{cref}} \right) \quad (1.29)$$

Όπου:

$G \text{ [W/m}^2\text{]}$: η πυκνότητα ισχύος της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια των κυττάρων για τις εκάστοτε συνθήκες.

$G_{ref} \text{ [W/m}^2\text{]}$: η πυκνότητα ισχύος της συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας αναφοράς.

$T_c \text{ [°K]}$: η θερμοκρασία λειτουργίας του κατάρρου στις εκάστοτε συνθήκες.

$T_{cref} \text{ [°K]}$: η θερμοκρασία αναφοράς. Και οι 2 λαμβάνονται σε μονάδες [°K].

μI_{SC} : θερμοκρασιακός συντελεστής φωτορεύματος (ή του ρεύματος βραχυκύκλωσης). Έχει μονάδες A/K και δίνεται από τον κατασκευαστή.

I_{phref} : το φωτόρευμα στις συνθήκες αναφοράς.

Η παραπάνω σχέση 1.29 μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το I_{ph} σε οποιοσδήποτε συνθήκες προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου αρκεί να γνωρίζουμε τα μεγέθη I_{phref} και μI_{SC} .

Σημείωση : Συνήθως ως συνθήκες αναφοράς επιλέγονται οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC) οπότε $G_{ref}=1000W/m^2$ και $T_{cref}=25^\circ C$.

1.4.3 Το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου στις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

Μεταβάλλεται ως προς τις συνθήκες αναφοράς ανάλογα με τη θερμοκρασία σύμφωνα με την έκφραση:

$$I_0 = I_{0ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{cref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_{Gap}}{Gamma \cdot K} \cdot \left(\frac{1}{T_{cref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (1.30)$$

Όπου E_{Gap} είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού (1.12 eV για κρυσταλλικό Si, 1.03 eV για CIS, 1.7 eV για άμορφο Si, 1.5 eV για CdTe).

Η παραπάνω σχέση μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το μέγεθος I_0 για διάφορες θερμοκρασίες όταν γνωρίζουμε τα μεγέθη T_{cref} , I_{0ref} καθώς και $Gamma$.

1.4.4 Καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου.

Πρώτα καθορίζεται η τιμή της R_{sh} . Όπως είδαμε η τιμή της R_{sh} θα μπορούσε να καθοριστεί από την κλίση της χαρακτηριστικής I-V κοντά στο σημείο βραχυκύκλωσης. Αυτό θα απαιτούσε λήψη πειραματικών σημείων ή την γνώση της καμπύλης I-V με μεγάλη ακρίβεια. Το τελευταίο δεν παρέχεται από τους κατασκευαστές. Έτσι στο πρόγραμμα PVSYST επιλέγεται μια τυπική τιμή για την R_{sh} . Αυτή καθορίζεται προσεγγιστικά λαμβάνοντας ένα κλάσμα του λόγου $V_{mpp}/I_{sc}-I_{mp}$. Για πλαίσια πυριτίου τιμή της R_{sh} είναι μεγάλη και δεν ενδιαφέρει τόσο ένας ακριβής καθορισμός της R_{sh} για τον καθορισμό της συμπεριφοράς του

πλαίσιου. Η τιμή της R_{sh} λαμβάνεται σταθερή και ίση με την τιμή που προκύπτει για τις πρότυπες συνθήκες για όλες τις υπόλοιπες συνθήκες.

Στη συνέχεια η διαδικασία που ακολουθείται στο PVSYST για τον καθορισμό των υπόλοιπων παραμέτρων του μοντέλου της μιας διόδου είναι αντίστοιχη με αυτή που προτείνουν οι Beckmann&Duffie. Αρχικά ο υπολογισμός των παραμέτρων γίνεται για τις συνθήκες αναφοράς και ύστερα με βάση τους τύπους που έχουμε δει οι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν για οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες.

Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα λαμβάνονται 3 εξισώσεις αρκεί να αντικατασταθούν τα ζεύγη τιμών $(I_{sc}, 0)$, $(0, V_{oc})$, (I_{mpp}, V_{mpp}) στην βασική εξίσωση του μοντέλου και να γίνουν οι απαραίτητες προσεγγίσεις. Οι σχέσεις που προκύπτουν είναι αντίστοιχες με αυτές των Beckman&Duffie. Έτσι έχουμε $I_{sc} = I_{ph}$,

$$I_0 = I_{ph} \cdot e^{-\frac{V_{oc}}{a}}, \quad R_s = \frac{a \ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_L} \right) - V_{mpp} + V_{oc}}{I_{mpp}}, \quad \text{όπου } a = \frac{\text{Gamma} \cdot K \cdot T_c}{q}.$$

Στο PVSYST ο συντελεστής Gamma επιλέγεται να έχει μια τυπική προκαθορισμένη σταθερή τιμή ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το πλαίσιο. Ο αυθαίρετος προκαθορισμός του Gamma έχει επιλεγεί καθότι αυτός εμφανίζεται να είναι ίσως η πιο σταθερή παράμετρος από αυτές που καθορίζουν το μοντέλο της μιας διόδου για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εξάλλου μια σχετική ανακρίβεια στον προσδιορισμό του δεν επηρεάζει καθοριστικά τη συμπεριφορά της χαρακτηριστικής I-V, τουλάχιστον για τα κρυσταλλικά πλαίσια. Γενικά για τα κρυσταλλικά πλαίσια η προτεινόμενη τιμή του Gamma είναι περίπου 1,3.

Παρέχονται επίσης ενδεικτικά τιμές για το συντελεστή Gamma ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα πλαίσια:

Si-MonoGamma = 1.3

SI-Poly Gamma = 1.35

a-SI: H Gamma = 1.4

CdTe Gamma = 1.5 (αμφιβόλου ισχύος)

CIS $\Gamma = 1.5$ (από μετρήσεις)

AsGa $\Gamma = 1.3$ (αμφιβόλου ισχύος)

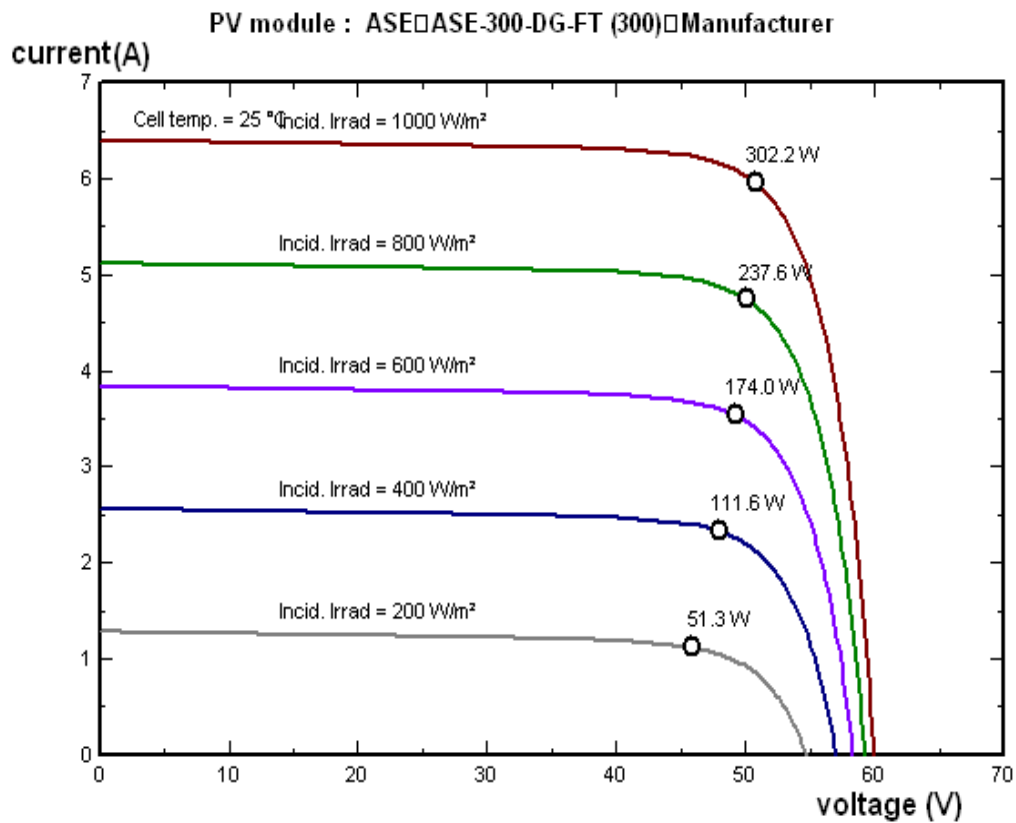
Θεωρητικά οι τιμές του Γ πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 1 και 2.

Με βάση λοιπόν το συντελεστή Γ υπολογίζεται η τιμή της R_s στις συνθήκες αναφοράς σύμφωνα με τη σχέση που δίνουν και οι Beckmann&Duffie, αρκεί να λάβουμε υπόψη τη σχέση μεταξύ Γ και α . Η τιμή της R_s θεωρείται αμετάβλητη ως προς τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας και λαμβάνεται σταθερή για όλες τις συνθήκες. Γενικά δηλαδή λαμβάνεται $R_s = R_{sref}$.

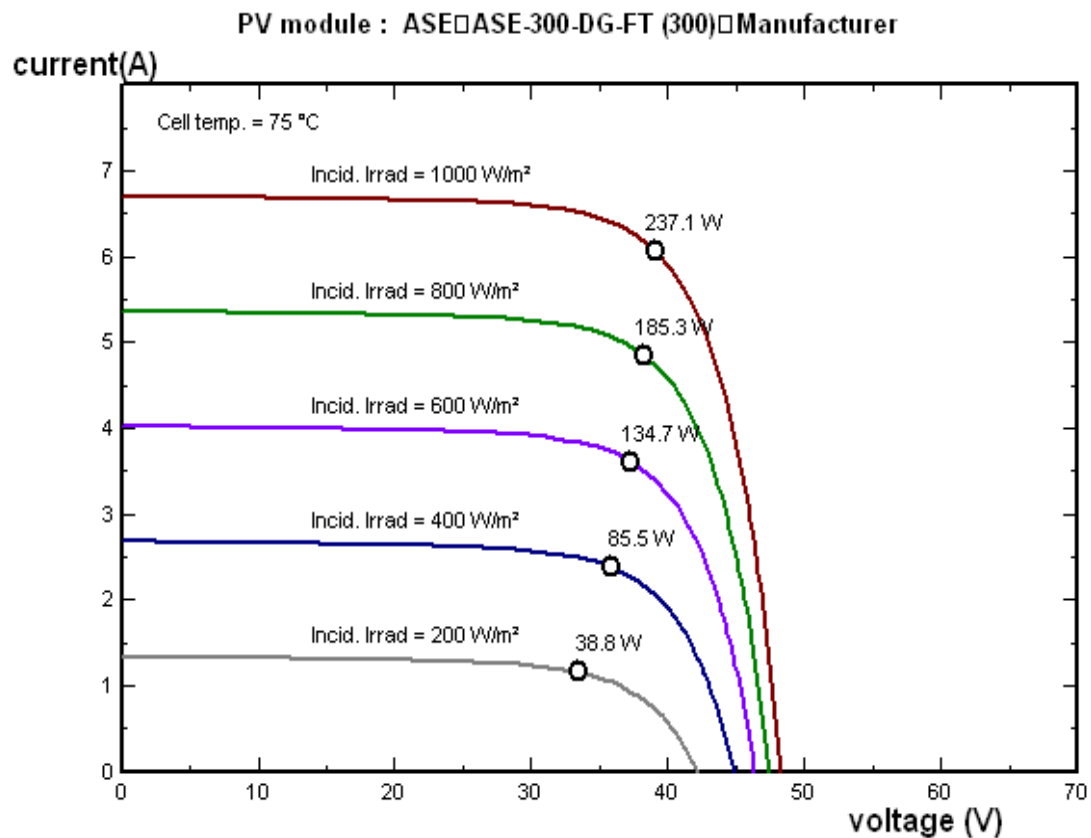
Συνεπώς, αν και προσεγγιστικά, το μοντέλο της μιας διόδου καθορίζεται πλήρως για τις συνθήκες αναφοράς. Οι τιμές Γ , R_s , R_{sh} θεωρούνται να παραμένουν σταθερές για όλες τις διαφορετικές από τις πρότυπες συνθήκες. Με βάση τις εξισώσεις 1.29 και 1.30 μπορούν να υπολογιστούν οι λοιπές παράμετροι για συνθήκες διαφορετικές από τις πρότυπες.

1.5 Γραφικές παραστάσεις

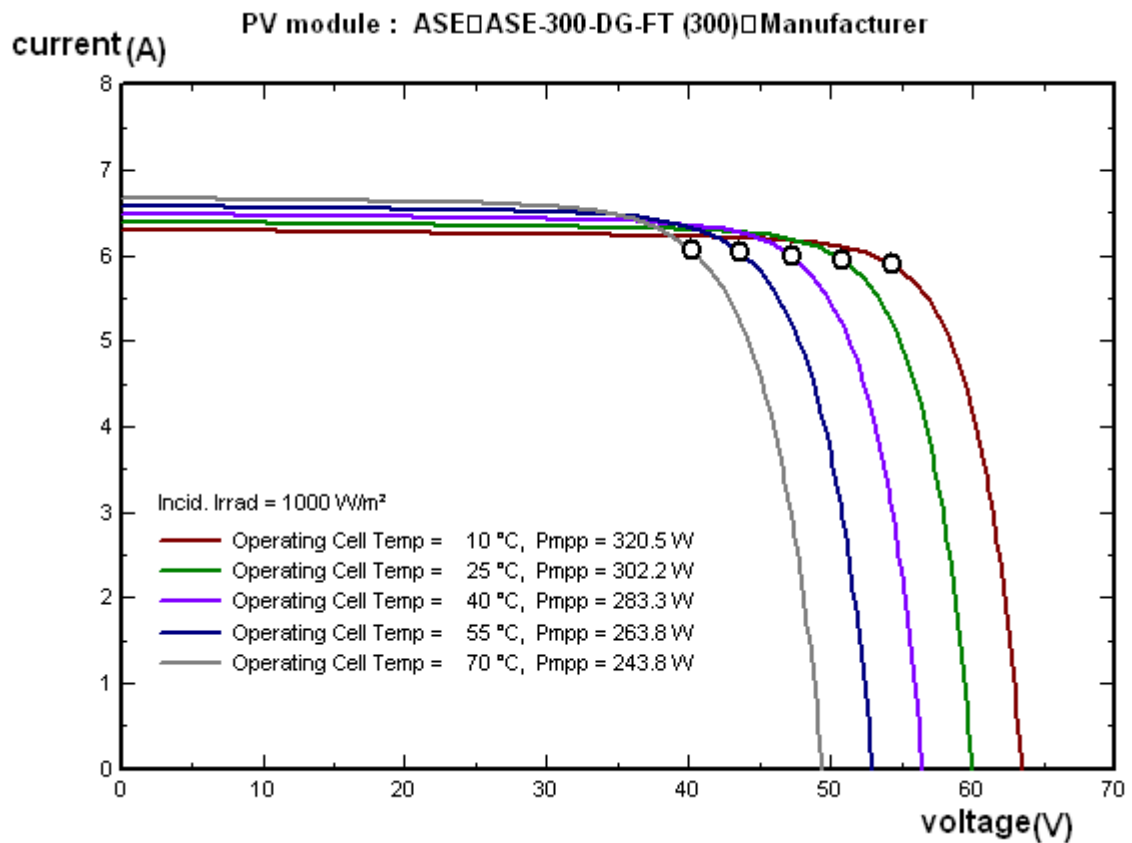
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται μια σειρά γραφικών παραστάσεων που δίνει το πρόγραμμα με βάση το μοντέλο της μιας διόδου. Στα σχήματα 4,5,6 φαίνεται η επίδραση της θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στην χαρακτηριστική I-V για διαφορετικές συνθήκες από τις STC. Επίσης στα σχήματα 7 και 8 μπορούμε να παρατηρήσουμε τις όποιες διαφοροποιήσεις στη χαρακτηριστική I-V λόγω διαφορετικών τιμών που θεωρητικά μπορούν να πάρουν οι αντιστάσεις R_s και R_{sh} . Το πλαίσιο είναι το ASE-300-DG-FT που χρησιμοποιούμε για το σχεδιασμό του φβ σταθμού.



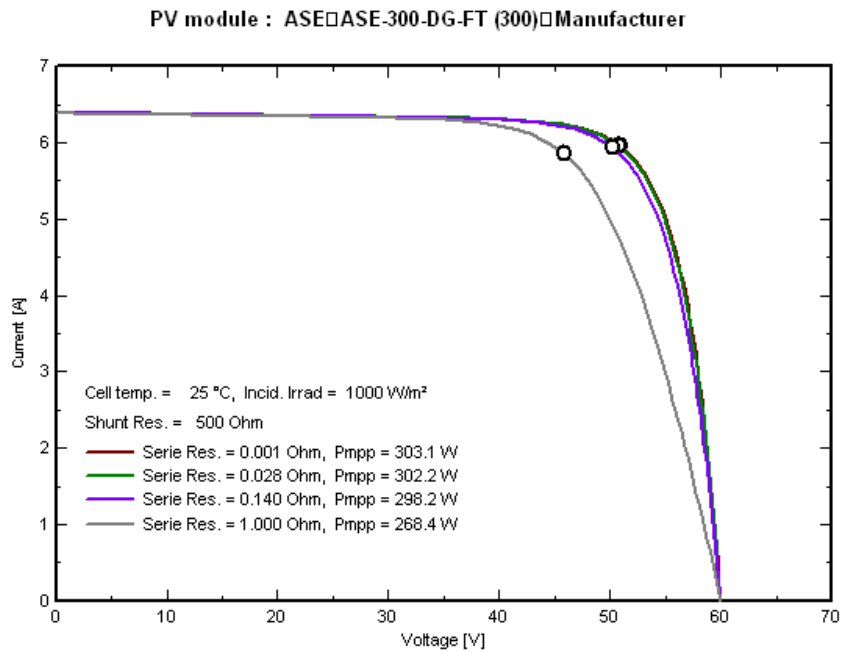
Σχέδιο 4 Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου παραμένει σταθερή στους 25°C. Με την μείωση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας παρατηρείται σημαντική μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της παραγόμενης ισχύος στο MPP. Αντίθετα η τάση ανοιχτοκύκλωσης μετατοπίζεται ελαφρά.



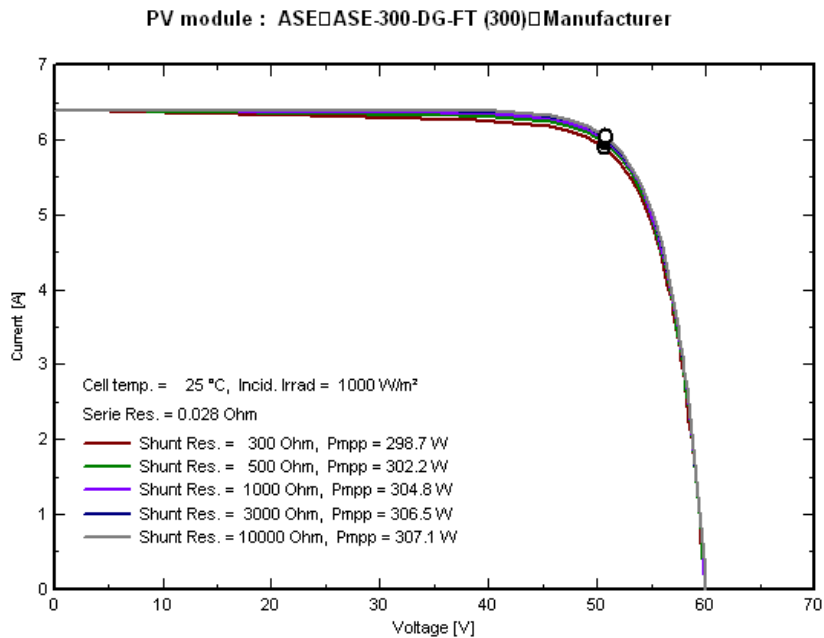
Σχέδιο 5 Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας πλαισίου παραμένει σταθερή στους 75°C. Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας (75°C > 25 °C) παρατηρείται μείωση της παραγόμενης ισχύος στο MPP για τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας. Το επόμενο σχήμα είναι περισσότερο αποσαφηνιστικό για την επίδραση της θερμοκρασίας.



Σχέδιο 6 Χαρακτηριστικές I-V για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου. Η τιμή της προσπίπτουσας ολικής ακτινοβολίας παραμένει σταθερή στα 1000 W/m². Με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου παρατηρείται μετατόπιση του MPP που αντιστοιχεί σε μείωση της παραγόμενης ισχύος. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ελαφρά. Η τάση Voc μειώνεται περισσότερο αισθητά κάτι που οφείλεται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών αγωγής της διόδου.

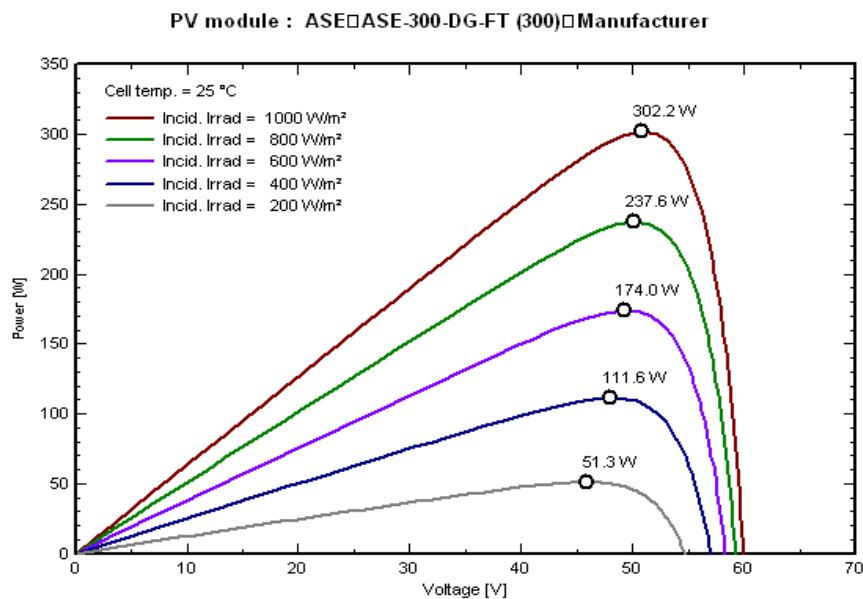


Σχέδιο 7. Ο καθορισμός της R_s έχει μεγαλύτερη σημασία για τη I-V χαρακτηριστική σε σχέση με την R_{sh} . Μπορούμε να δούμε την επίδραση της R_s όταν αυτή παίρνει ακραίες τιμές, δηλαδή κοντά στα 0Ω και κοντά στο 1Ω.

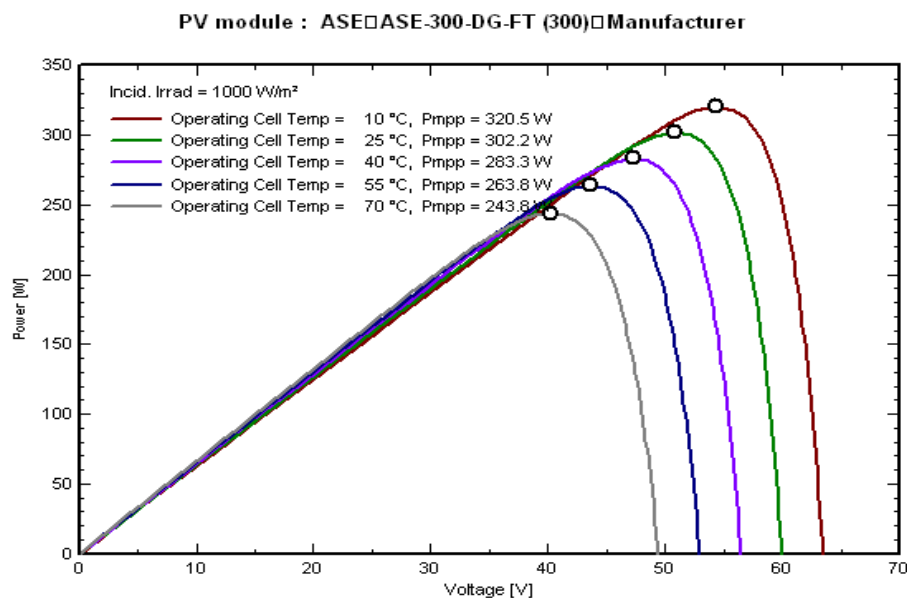


Σχέδιο 8. Ο καθορισμός της R_{sh} με μεγάλη ακρίβεια δεν έχει ιδιαίτερη σημασία για την χαρακτηριστική I-V του μοντέλου της μιας διόδου. Ακόμα και για μεγάλες διακυμάνσεις της R_{sh} δεν προκύπτουν μεγάλες μεταβολές στην καμπύλη και στο MPP.

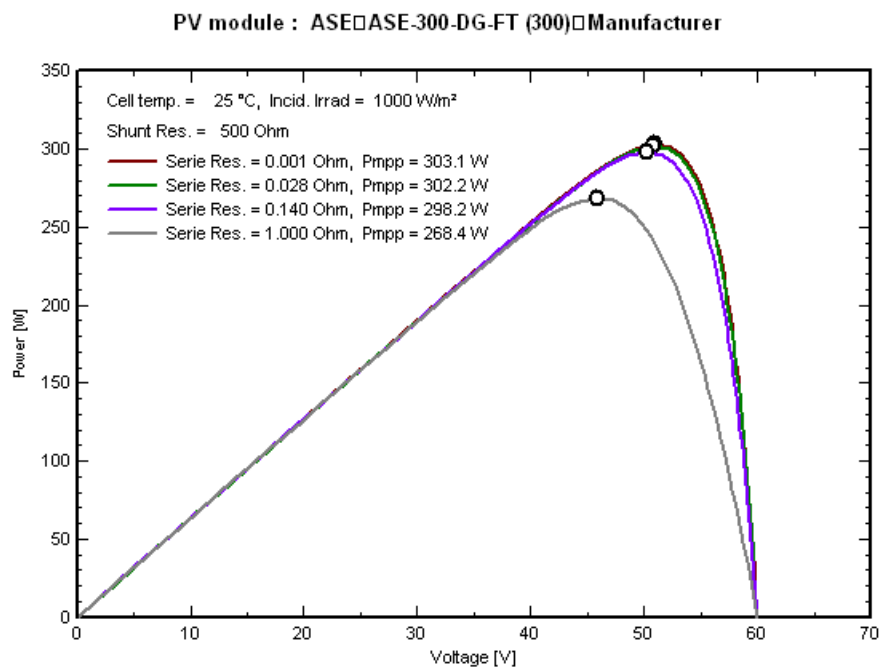
Στα σχήματα 9,10,11,12 φαίνεται η επίδραση μεγεθών όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η R_s και η R_{sh} στην παραγόμενη από το πλαίσιο ισχύ.



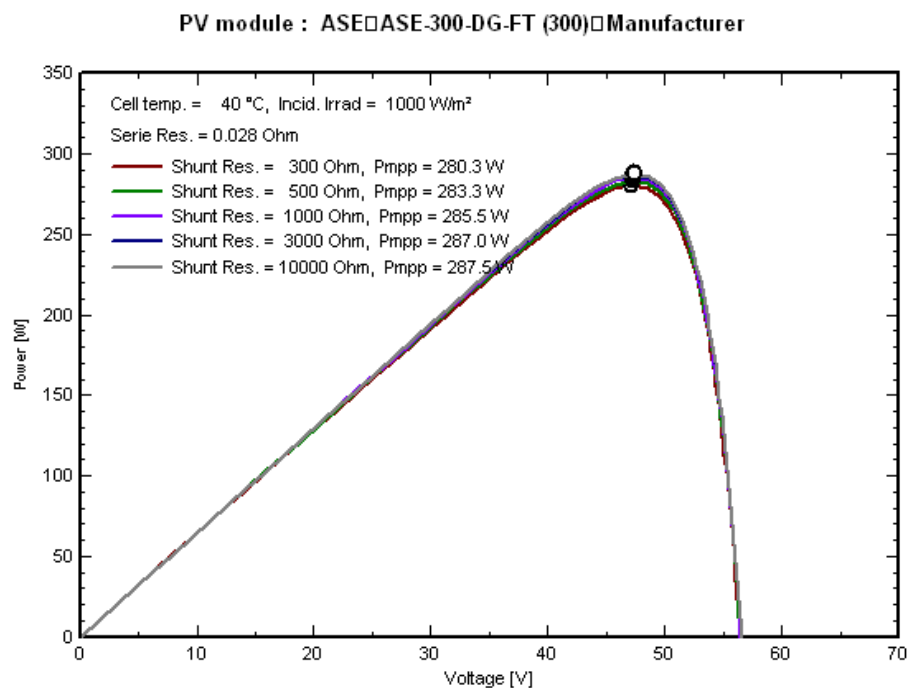
Σχέδιο 9. Είναι φανερό ότι η μείωση της ακτινοβολίας προκαλεί σημαντική μετατόπιση του MPP και της παραγόμενης ισχύος. Η μεταβολές στην V_{mpp} είναι σχετικά μικρές.



Σχέδιο 10. Η αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας προκαλεί σημαντική μετατόπιση του MPP και μείωση της παραγόμενης ισχύος σε αυτό το σημείο λειτουργίας.

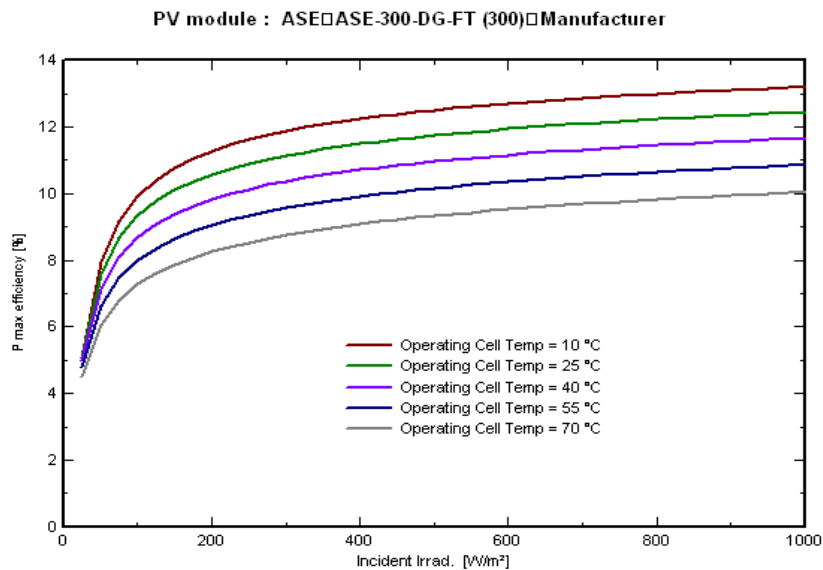


Σχέδιο 11. Για τυπικές μεταβολές στις τιμές της R_s (0,01-0.14Ω) οι μεταβολές στην παραγόμενη ισχύ δεν είναι μεγάλες. Ωστόσο για τις ακραίες τιμές της R_s 0.001Ω και 1Ω παρατηρούμε σημαντική μεταβολή στην παραγόμενη ισχύ.

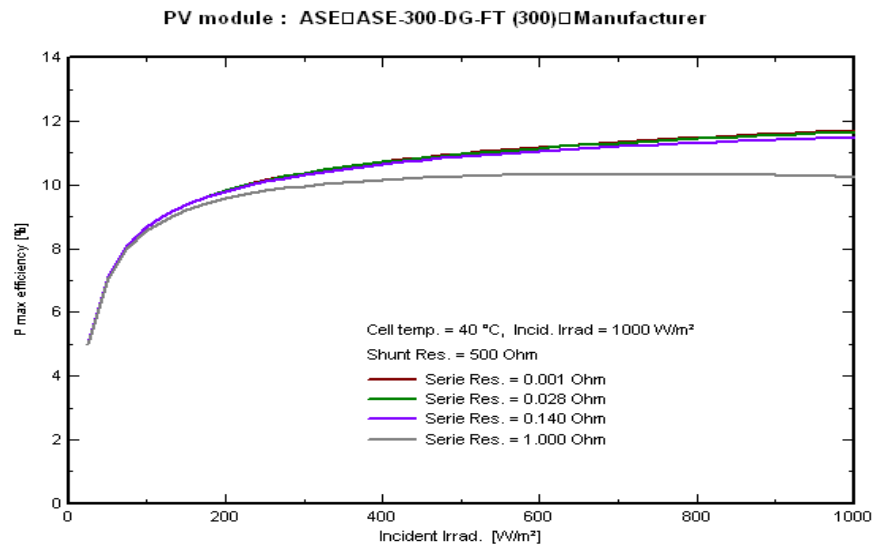


Σχέδιο 12. Οι μεταβολές που θεωρητικά μπορεί να πάρει η τιμή της R_{sh} δεν έχουν σημαντική επίδραση στην παραγόμενη ισχύ.

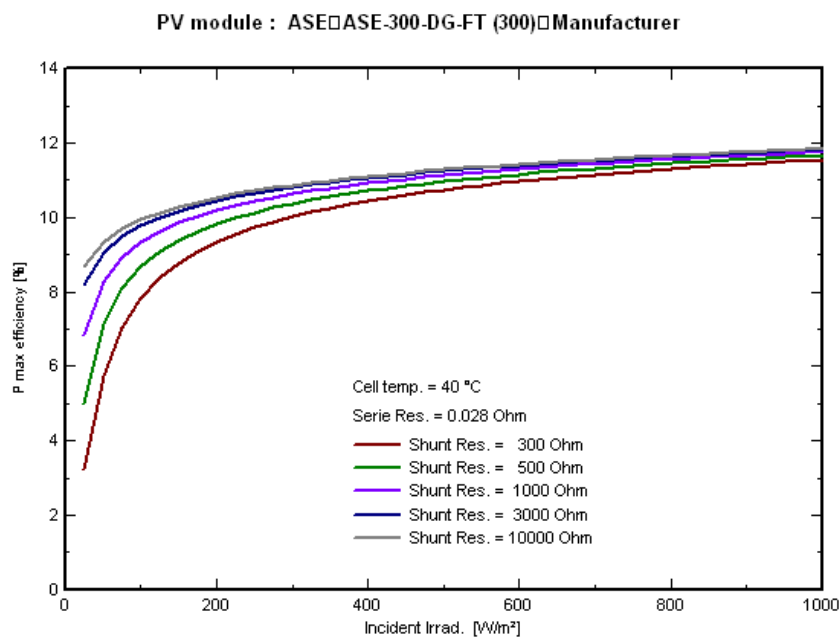
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η επίδραση που έχουν στην απόδοση του πλαισίου μεταβολές διάφορων παραγόντων όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία καθώς και οι τιμές που θεωρητικά μπορούν να πάρουν οι R_s και R_{sh} .



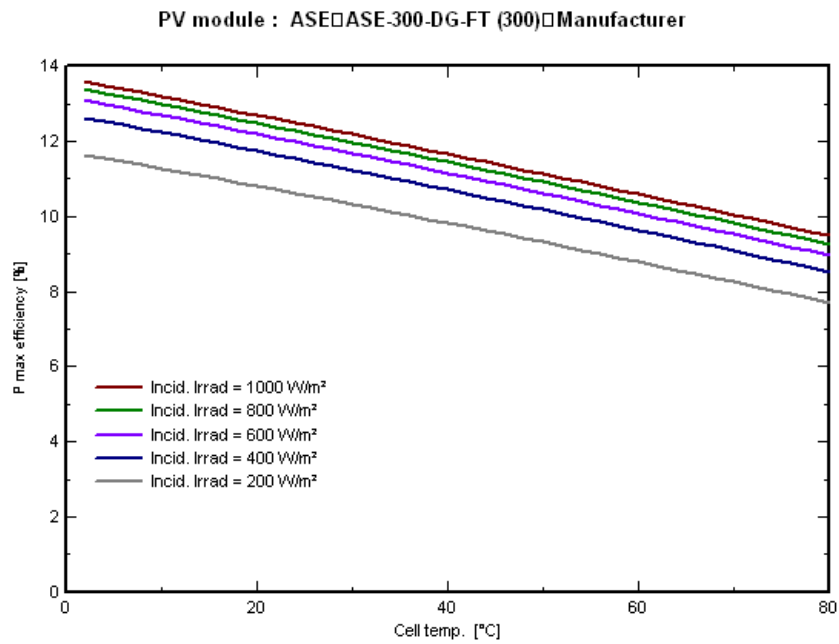
Σχέδιο 13. Όπως αναμενόταν ο μέγιστη απόδοση του πλαισίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας για τις ίδιες συνθήκες ακτινοβολίας.



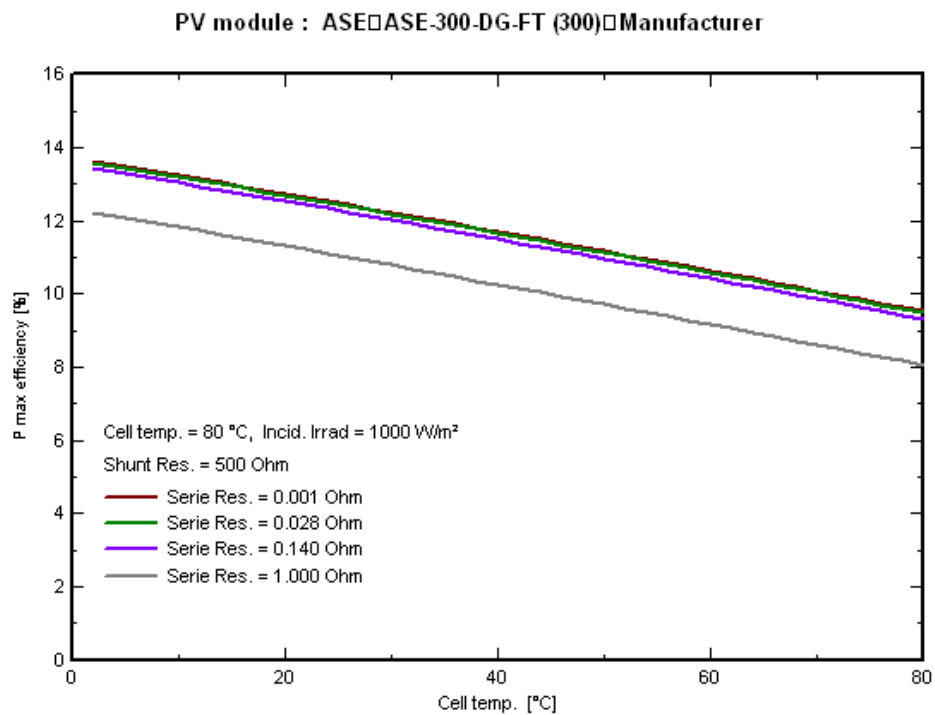
Σχέδιο 14. Για τις ακραίες τιμές που θεωρητικά μπορεί να πάρει η R_s παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στο βαθμό απόδοσης. Για μικρές μεταβολές της R_s οι μεταβολές στην απόδοση είναι μικρές.



Σχέδιο 15. Για μεγάλες τιμές της ακτινοβολίας ή επίδραση της αύξησης της R_{sh} στην μέγιστη απόδοση του πλαισίου είναι ασήμαντη.



Σχέδιο 16. Για μείωση της ακτινοβολίας και άνοδο της θερμοκρασίας ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Η μεταβολή είναι σχεδόν γραμμική.



Σχέδιο 17. Επίδραση της αύξησης της R_s στο βαθμό απόδοσης.

Κεφάλαιο 2

Απώλειες

2.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη.

2.1.1 Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής φωτοβολταϊκού στοιχείου ή πλαισίου (STC-Standard Test Conditions):

Η ακτινοβολία που προσπίπτει κάθετα στο συλλέκτη έχει πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας 1 kW/m^2 και φάσμα AM1,5. Η θερμοκρασία του πλαισίου είναι 25°C .

2.1.2 Ονομαστική ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ισχύς αιχμής ενός πλαισίου P_p : είναι η μέγιστη ισχύς με την οποία αυτό αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια κάτω από τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου STC.

Έστω για παράδειγμα ότι η ισχύς αιχμής ενός πλαισίου είναι 300 W_p . Αυτό σημαίνει ότι όταν το πλαίσιο δέχεται ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος $E=1\text{ kW/m}^2$, φάσματος AM1,5 και η θερμοκρασία του είναι 25°C τότε παράγει ηλεκτρική ενέργεια με ισχύ 300 W .

Κατά την λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες η θερμοκρασία του πλαισίου είναι διαφορετική από τους 25C και η πυκνότητα ισχύος της ΗΜ ακτινοβολίας από 0 ως 1200 W/m. Η μέγιστη παραγόμενη ισχύς είναι διαφορετική και μάλιστα μικρότερη από την ισχύ αιχμής του.

Μερικά από τα συνήθη στοιχεία των φβ πλαισίων που δίνουν οι κατασκευαστές για τις Πρότυπες Συνθήκες Ελέγχου (STC) είναι η ισχύς αιχμής P_p , η ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc} .

2.1.3 Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας ΦΒ κυψελίδας (Nominal Operating Cell Temperature-NOCT).

Σε κάθε πλαίσιο μπορεί να αναγράφεται επιπλέον και η θερμοκρασία την οποία αποκτά το πλαίσιο σε καθορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος που προσεγγίζουν μια μέση πραγματική κατάσταση. Αντιπροσωπευτικές τιμές αυτής της θερμοκρασίας μπορεί να είναι 45C-50C. Η περιοχή αυτή των θ αφορά τη μέση κατάσταση του υλικού του φβ στοιχείου στο χρονικό διάστημα 2-3 ώρες πριν και μετά το μεσημέρι μιας αίθριας καλοκαιρινής μέρας σε μέσα γεωγραφικά πλάτη.

Χαρακτηρίζεται ως Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας ΦΒ κυψελίδας- Nominal Operating Cell Temperature-NOCT conditions.

2.1.4 Συνθήκες λειτουργίας της φβ κυψελίδας κάτω από τις οποίες η θερμοκρασία της ισούται με την ονομαστική τιμή της (NOCT):

Το φβ πλαίσιο σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος.

Πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας $G_{NOCT}=800 \text{ W/m}^2$.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα $\theta_a = 20\text{C}$.

Μέση ταχύτητα ανέμου 1m/sec.

Η σημασία της NOCT:

Χαμηλή NOCT για την κυψελίδα σημαίνει ότι αποβάλλει ταχύτερα στο περιβάλλον το μέρος εκείνο της ηλιακής ακτινοβολίας που συμβάλλει ουσιαστικά στην αύξηση της θερμοκρασίας του. Άρα όσο μικρότερη είναι η NOCT για ένα πλαίσιο τόσο μικρότερη είναι η μείωση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε

σχέση με άλλο πλαίσιο ίδιας ισχύος αιχμής το οποίο όμως έχει μεγαλύτερη NOCT.
(4)

2.2 Απώλειες και συντελεστές απόδοσης.

2.2.1 Συντελεστής απόδοσης φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης (n_m) του πλαισίου προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m στην έξοδο του προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας $E \times S$.

$$n_m = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (4) (5)$$

Όπου E (W/m^2) είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φβ πλαισίου και S (m^2) η συνολική επιφάνεια του.

Η τιμή του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης του φβ πλαισίου n_m καθορίζεται από τις αποκλίσεις που υφίσταται από την τιμή του $n_{m,STC}$, ο οποίος προσδιορίζεται σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Δηλαδή ο συντελεστής απόδοσης αναφοράς ενός πλαισίου λαμβάνεται στις συνθήκες STC ($n_{m,STC}$) και είναι ο μέγιστος. Σε συνθήκες όμως πραγματικής λειτουργίας ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης n_m αποκλίνει από τον κανονικοποιημένο συντελεστή $n_{m,STC}$ λόγω απωλειών. Προκύπτει έτσι μικρότερος συντελεστής απόδοσης για το πλαίσιο κάτι που προφανώς σημαίνει μείωση της πραγματικής απόδοσης του πλαισίου για τις δοσμένες συνθήκες λειτουργίας σε σχέση με την απόδοσή του στις πρότυπες συνθήκες.

Σε συνθήκες λοιπόν διαφορετικές από τις πρότυπες οι απώλειες αφορούν κυρίως στη διαφορά της θερμοκρασίας λειτουργίας του πλαισίου από τη θερμοκρασία λειτουργίας του στις πρότυπες καθώς και στην διαφορά της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη από αυτήν που προσπίπτει στις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής.

Για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των απωλειών της απόδοσης του πλαισίου θα πρέπει για το συντελεστή n_m να λάβουμε υπόψη επιπλέον οπτικές

και θερμικές απώλειες. Οι απώλειες αυτές συμβάλουν περαιτέρω στη μείωση του συντελεστή απόδοσης n_m του πλαισίου σε σχέση με τον $n_{m,STC}$. Συνοψίζοντας, ο n_m μπορεί να αποδοθεί ως γινόμενο των επί μέρους στιγμιαίων συντελεστών ενεργειακών απωλειών που προσδιορίζουν την απόκλιση της απόδοσης από αυτή των πρότυπων συνθηκών. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$n_m = n_{STC} \times n_T \times n_{LI} \times n_S \times n_P \times n_R \times n_{καθ} \times n_D, \text{ όπου:}$$

- n_{STC} : απόδοσης φβ πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες STC.
- n_T : απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θ της κυψελίδας σε σχέση με τη θ αναφοράς 25 C
- n_{LI} : απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος HM ακτινοβολίας. (Low Irradiance losses)
- n_S : φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM1,5 (STC).
- n_P : απόκλισης λόγω της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.
- n_R : απόκλισης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου στο πλαίσιο. Ο n_R λαμβάνεται περίπου ίσος με 0.97 κάτι που αντιστοιχεί σε μέσες ετήσιες απώλειες $\approx 3\%$.
- $n_{καθ}$: συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα πλαισίου
- n_D : απωλειών από τη δίοδο αντεπιστροφής.

Τέλος να σημειώσουμε ότι η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι μικρότερη από την απόδοση καθενός από τα φβ στοιχεία που το απαρτίζουν. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μη πλήρη κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του πλαισίου από επιφάνεια στοιχείων, στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των φβ στοιχείων που απαρτίζουν το πλαίσιο και στην ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

2.2.2 Συντελεστής απόδοσης μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας (array).

Ο ολικός συντελεστής απόδοσης μιας φβ συστοιχίας (n_a) εκφράζεται με βάση το συντελεστή απόδοσης του πλαισίου (n_m) λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της εκ κατασκευής ανομοιογένειας (Mismatch) των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των

χρησιμοποιούμενων φβ πλαισίων ($n_{\text{ανομ}}$) καθώς επίσης και την απώλεια στα καλώδια σύνδεσης (Wiring) μεταξύ των πλαισίων της συστοιχίας (n_{ws}). Έτσι προκύπτει:

$$n_{\sigma} = n_m \times n_{\text{ανομ}} \times n_{\text{ws}} .$$

Οι απώλειες ανομοιογένειας αφορούν στην ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών I-V των πλαισίων που απαρτίζουν τη φβ συστοιχία και εκφράζονται από το συντελεστή ανομοιογένειας $n_{\text{ανομ}}$ ο οποίος παίρνει την τυπική τιμή 0.98.

Οι διατομές των καλωδίων σύνδεσης μεταξύ των φβ πλαισίων της συστοιχίας επιλέγονται έτσι ώστε οι απώλειες σε αυτά να μην ξεπερνούν το 2% με 3%. Μια τυπική τιμή για το συντελεστή απωλειών στις καλωδιώσεις της συστοιχίας λαμβάνεται $n_{\text{ws}}=0.98$.

2.2.3 Δίοδοι αντεπιστροφής. (6) (4)

Οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής λαμβάνονται υπόψη με το συντελεστή n_D που συνήθως παίρνει την τυπική τιμή $n_D = 0.99$ ανεξάρτητα από το πλήθος των φβ πλαισίων ανά κλάδο.

Οι δίοδοι αντεπιστροφής ή δίοδοι απομόνωσης χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν μια αλυσίδα πλαισίων με τέτοιο τρόπο ώστε η αλυσίδα να άγει ρεύμα στο ζυγό (ορθή πόλωση της διόδου) όταν τα κύτταρα φωτίζονται αλλά να εμποδίζουν τη ροή ρεύματος από το ζυγό στην αλυσίδα των πλαισίων (ανάστροφη πόλωση της διόδου) στην περίπτωση που για οποιοδήποτε λόγο η τάση εξόδου της αλυσίδας είναι μικρότερη από την τάση του ζυγού.

Οι δίοδοι αντεπιστροφής προκαλούν μια πτώση τάσης που αφαιρείται από την τάση εξόδου της συστοιχίας, προκαλούν δηλαδή απώλειες ενέργειας υπό μορφή θερμότητας όταν η συστοιχία παράγει ενέργεια.

Κατάλληλη τοποθέτηση διόδων αντεπιστροφής μπορεί να προλάβει σοβαρές ή ακόμα και καταστροφικές βλάβες όταν για κάποιο λόγο συμβεί βραχυκύκλωμα σε καλώδια, συνδετήρες, ακροδέκτες μεταξύ γειτονικών πλαισίων και αλυσίδων ή μεταξύ κυττάρων και μεταλλικών υποστρωμάτων των πλαισίων.

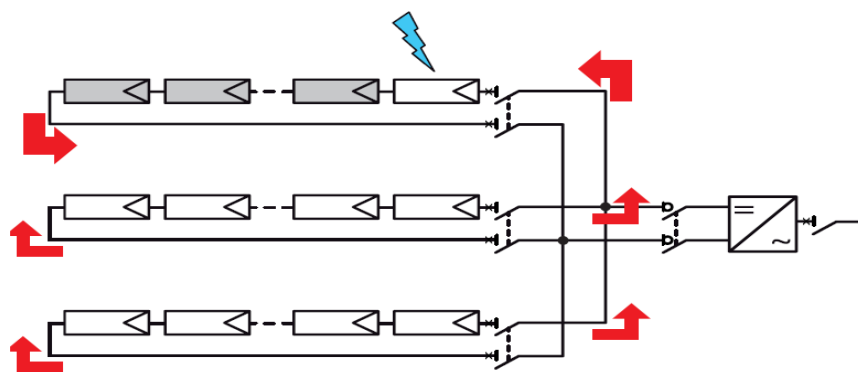
Ως δίοδοι αντεπιστροφής χρησιμοποιούνται συνήθως κοινές ανορθωτικές δίοδοι επαφής p-n με κατάλληλα χαρακτηριστικά. Παρουσιάζουν πτώση τάσης περί

τα 0.7V με 0.9V. σε μικρότερα συστήματα τάσεις μικρότερες των 24V μπορούν να χρησιμοποιηθούν δίοδοι schottky που παρουσιάζουν μικρότερη πτώση τάσης από τις κανονικές διόδους αλλά είναι πιο ακριβές.

Γενικά κριτήρια επιλογής διόδων αντεπιστροφής:

- Ελάχιστη δυνατή πτώση τάσης σε ορθή πόλωση σε ονομαστικό ρεύμα και πραγματική θερμοκρασία.
- Ικανοποιητική μέγιστη ανάστροφη τάση που πρέπει να σχετίζεται με τη μέγιστη τάση του ζυγού όπου συνδέονται οι αλυσίδες (strings) μαζί με τις υπερτιθέμενες στιγμιαίες υπερτάσεις καθώς και με τις πιθανές συνθήκες βραχυκύκλωσης των αλυσίδων.
- Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία λειτουργίας σε σταθερή κατάσταση.
- Αξιοπιστία.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια περίπτωση ροής ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε μια αλυσίδα όπου έχει συμβεί σφάλμα. Το σφάλμα μπορεί να αφορά όλους τους λόγους που είδαμε παραπάνω.



Σχέδιο 18. Ροή ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε μια συστοιχία. Στο σχήμα η προστασία γίνεται με διακοπτικά στοιχεία. (7)

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης των φωτοβολταϊκών I_{sc} είναι λίγο μεγαλύτερο από το I_{MPP} . Σε περίπτωση ωστόσο βραχυκυκλώματος σε μια αλυσίδα μιας συστοιχίας με πολλές παράλληλες αλυσίδες το ρεύμα βραχυκύκλωσης που θα διαρρέυσει την «προβληματική» αλυσίδα θα ισούται με το άθροισμα των ρευμάτων I_{sc} των

υπόλοιπων παράλληλων αλυσίδων. Αυτό το ρεύμα μπορεί να είναι αρκετά μεγάλο, ανάλογα με τον αριθμό των παράλληλων αλυσίδων και το I_{sc} του κάθε πλαισίου, και μπορεί να καταστρέψει συνολικά την αλυσίδα. Παράλληλα θέτει εκτός παραγωγής όλη τη συστοιχία.

Μια έκφραση για το αντίστροφο ρεύμα του παραπάνω τύπου είναι:

$$I_r = (n_{sp} - 1) \times I_{sc}$$

I_r : μέγιστο αντίστροφο ρεύμα

n_{sp} : αριθμός παράλληλων αλυσίδων

I_{sc} : ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός πλαισίου/αλυσίδας.

Να πούμε ότι αρκετοί σχεδιαστές εκτιμούν ότι οι δίοδοι αντεπιστροφής δεν προστατεύουν ικανοποιητικά τις συστοιχίες από τα αντίστροφα ρεύματα. Για αυτό και προτείνουν τον εφοδιασμό των συστοιχιών με διακοπτικά μέσα όπως ασφάλειες ή αυτόματους διακόπτες. Κάτι τέτοιο απεικονίζεται στο σχήμα.

2.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ και PVSYST

Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε για την εξομοίωση οι απώλειες της συστοιχίας ορίζονται ως όλοι εκείνοι οι παράγοντες που περιορίζουν την διαθέσιμη ενέργεια στην έξοδο της συστοιχίας σε σχέση με την ονομαστική διαθέσιμη ενέργεια στην έξοδο της υπό συνθήκες STC. Η τελευταία βασίζεται στην ονομαστική ισχύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων όπως αυτή ορίζεται από τον κατασκευαστή σε συνθήκες STC.

2.3.1 Απώλειες IAM [Incidence angle modifier-IAM)].

Είναι απώλειες οπτικού τύπου, λόγω ανάκλασης και διάδοσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο πλαίσιο. Ουσιαστικά εκφράζουν το «αδυνάτισμα» της ακτινοβολίας που τελικά φτάνει στην επιφάνεια των φβ κυττάρων σε σχέση με αυτή που θα προσέπιπτε αν δεν υπήρχαν τα παραπάνω φαινόμενα. Καθοριστικός παράγοντας για τα παραπάνω είναι η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του πλαισίου.

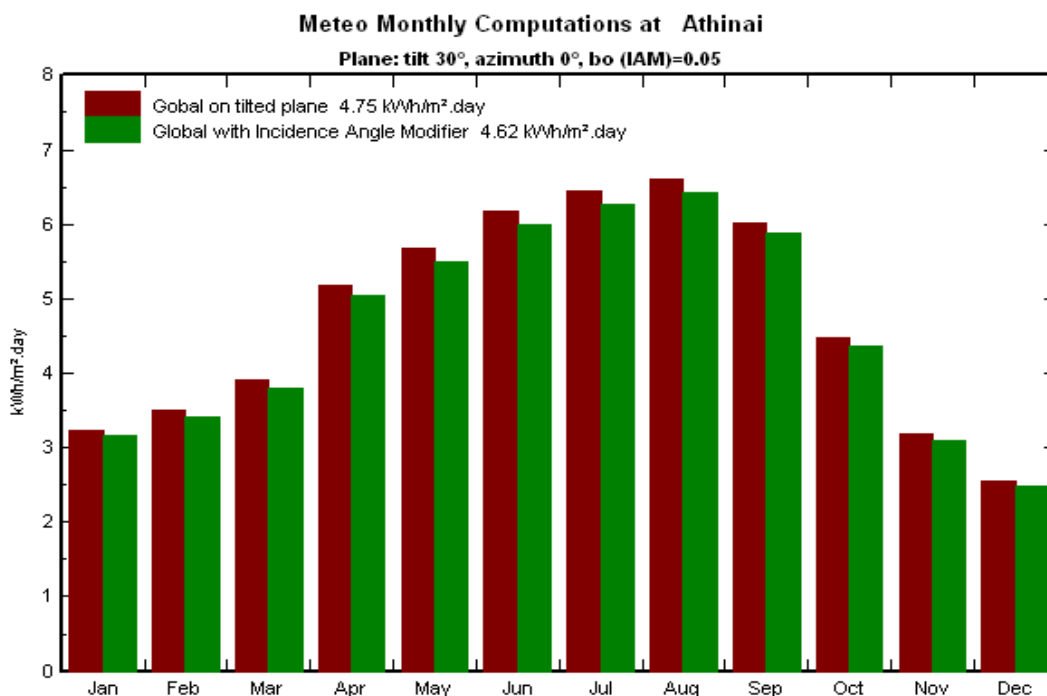
Αυτού του είδους οι απώλειες υπακούουν στους νόμους του Fresnel αναφορικά με την διάδοση της ακτινοβολίας και τις ανακλάσεις της πάνω στο προστατευτικό στρώμα γυαλιού που επικαλύπτει τα φβ κύτταρα των πλαισίων καθώς και πάνω στην ίδια την επιφάνεια των κυττάρων.

Το αδυνάτισμα αυτό προσεγγίζεται από ένα συντελεστή απωλειών (FactorIAM). Με τη χρήση μιας μεθόδου καθορισμού των εμπλεκόμενων παραμέτρων που ονομάζεται ashgray, ο συντελεστή συντελεστής αυτός καταλήγει να εξαρτάται από μια μόνο μεταβλητή, b_0 . (3) Έτσι προκύπτει:

$$FIAM = 1 - b_0 \cdot (1/\cos\theta - 1)$$

Όπου θ : η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στο πλαίσιο. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο διάνυσμα θέσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και στην κάθετο στην επιφάνεια του πλαισίου.

Ύστερα από μετρήσεις σε πραγματικά κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά πλαίσια προέκυψε μια ενδεικτική τιμή για την παράμετρο b_0 , $b_0 = 0.05$, η οποία και λαμβάνεται σταθερή κατά την εξομοίωση. Να σημειωθεί ότι στην μεταβλητή b_0 συχνά αποδίδεται η τιμή 0.1.



Σχέδιο 19. Επίδραση οπτικών απωλειών στην προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Στο παραπάνω σχήμα μπορούμε να δούμε για κάθε ένα μήνα του χρόνου την μέση ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Με κόκκινο χρώμα αν θεωρήσουμε μηδενικές οπτικές απώλειες του παραπάνω τύπου ενώ με πράσινο χρώμα αν λάβουμε υπόψη τις οπτικές απώλειες. Φαίνεται η αρκετά σημαντική επίδραση αυτών των απωλειών στην προσπίπτουσα ωφέλιμη ακτινοβολία στα φβ κύτταρα του πλαισίου. Το πλαίσιο βρίσκεται στο γεωγραφικό τόπο της Αθήνας έχοντας κλίση 30° και κατεύθυνση προς Νότο.

Σημείωση : Μια ικανοποιητική προσέγγιση των απωλειών τέτοιου τύπου προκύπτει αν χρησιμοποιήσουμε ένα συντελεστή απωλειών περίπου -3%. (6)

Εξάλλου όπως παρατηρούμε και από το σχήμα $4.75 \text{ KWh/m}^2 \times (1-0,3) \approx 6 \text{ KWh/m}^2$. Το ίδιο σχεδόν αποτέλεσμα παίρνουμε χοντρικά και από το πρόγραμμα PVSYST για εξομοίωση ενός έτους.

2.3.2 Θερμικές απώλειες λόγω της θερμοκρασίας των κυψελίδων.

Στις Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC) η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25°C. Ωστόσο στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας η θερμοκρασία των κυττάρων ανέρχεται σε τιμές αρκετά πιο υψηλές κάτι που όπως έχουμε δει επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κύτταρων και συνεπώς των πλαισίων και των συστοιχιών που αποτελούν τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Έχουμε αλλαγές στη I-V χαρακτηριστική, μετατοπίζεται το MPP και μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Για τον καθορισμό λοιπόν των θερμικών απωλειών, ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο της μιας διόδου, καθοριστικό ρόλο παίζει η εκτίμηση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων του πλαισίου καθορίζεται από μια θερμική ισορροπία. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα κύτταρα εν μέρει μετατρέπεται σε θερμότητα και εν μέρει σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι παράγοντες που εμπλέκονται σε αυτή τη διαδικασία είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία που φτάνει στα κύτταρα αφού διαδοθεί δια μέσου των διάφορων στρώσεων υλικών που τα καλύπτουν, η ικανότητα των κυττάρων να απορροφούν ακτινοβολία και να την μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια, η ικανότητα συνολικά του πλαισίου να απάγει θερμότητα, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η θερμοκρασία των κυττάρων. (2) Μια σχέση που περιγράφει την παραπάνω ισορροπία είναι:

$$k \times (T_{\text{cell}} - T_{\text{amb}}) = A \times G_{\text{inc}} \times (1 - \text{Eta}). \quad (3)$$

Έτσι η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού κυττάρου μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση :

$$T_c = \frac{A \cdot G_{\text{inc}} \cdot (1 - \text{Eta}) + k \cdot T_{\text{amb}}}{k}$$

k : ο παράγοντας θερμικών απωλειών που εκφράζει την απαγωγή θερμότητας στο περιβάλλον ή σε οποιαδήποτε κατασκευή εφάπτεται με τα πλαίσια και λαμβάνεται να έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος.

T_c : η θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου.

T_{amb} : η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

G_{inc} : η ολική προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία.

A: συντελεστής που εκφράζει την ικανότητα απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας αφού έχει περάσει μέσα από τις επιφάνειες που επικαλύπτουν τα κύτταρα. Παίρνει τυπική τιμή περίπου 0.9.

Eta: συντελεστής που εκφράζει την απόδοση του κυττάρου και αναφέρεται στην ικανότητα του να μετατρέπει την ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και λαμβάνεται περίπου 0, 1.

Με βάση τη σχέση αυτή προσδιορίζεται και η θερμική συμπεριφορά της συστοιχίας η οποία προφανώς εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και τη θέρμανση των φβ κυττάρων υπό την επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Καθοριστική σημασία για τα παραπάνω έχει ο παράγοντας θερμικών απωλειών k , ο οποίος εκφράζεται από το άθροισμα του σταθερού όρου k_c και έναν παράγοντα ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου k_v (3). Η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$k = k_c + k_v \times v$$

Όπου:

v : η ταχύτητα του ανέμου σε (m/sec).

k, k_c : σε μονάδες $W / m^2 K$.

k_v : σε μονάδες $(W / m^2 K) / (m/sec)$.

Οι παραπάνω παράγοντες εξαρτώνται από τον τρόπο στήριξης των φωτοβολταϊκών πλαίσια px σε προσόψεις, οροφές, επικλινή στηρίγματα κλπ. Για ελεύθερη κυκλοφορία αέρα ο συντελεστής k αναφέρεται και στις 2 πλευρές του φβ πλαισίου. Αν ωστόσο η πίσω πλευρά του πλαισίου είναι θερμικά μονωμένη η τιμή του k μειώνεται θεωρητικά στη μισή του τιμή, αφού η πίσω πλευρά επί της ουσίας δε συνεισφέρει στη μεταφορά θερμότητας.

Με την χρήση των παραπάνω σχέσεων και προφανώς με κατάλληλες μετρήσεις της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ταχύτητας του ανέμου είναι δυνατόν με ικανοποιητική προσέγγιση να

υπολογιστεί η θερμοκρασία υπό την οποία λειτουργούν τα ηλιακά κύτταρα των πλαισίων της συστοιχίας.

Για τα κύτταρα κρυσταλλικού Si, για κάθε 1°C βαθμό αύξησης της θ του κυττάρου έχουμε ελάττωση της απόδοσης του κατά περίπου 0,4% για λειτουργία στο MPP. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνολικές θερμικές απώλειες της συστοιχίας.

Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε :

Σύμφωνα με μετρήσεις που έγιναν σε εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών, όπου τα πλαίσια βρίσκονταν τοποθετημένα σε επικλινή στηρίγματα των οποίων η πίσω πλευρά δεν ήταν καλυμμένη και με την προϋπόθεση ότι υπήρχε ελεύθερη κυκλοφορία αέρα προτάθηκαν οι εξής τιμές για τις παραμέτρους k_c και k_v :

$$k_c = 20 \text{ W / m}^2 \text{ K} \quad \text{και} \quad k_v = 6 \text{ (W / m}^2 \text{ K) / (m/sec)}.$$

Οι τελικές μετρήσεις της θερμοκρασίας των πλαισίων είχαν μικρή απόκλιση από τις εκτιμήσεις με βάση το πρόγραμμα. Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν τιμές για την ταχύτητα του ανέμου ακριβώς στο επίπεδο ύψους των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι ταχύτητες αυτές είναι αρκετά μικρότερες από ταχύτητες που παρέχονται σε αρχεία με μετεωρολογικά στοιχεία από υπηρεσίες και σταθμούς μιας και συνήθως αυτές διεξάγονται σε μεγαλύτερο ύψος. Γι' αυτό και οι θερμοκρασίες που δίνει το πρόγραμμα για τη θερμοκρασία λειτουργίας της συστοιχίας είναι συγκριτικά χαμηλότερες κάτι που σημαίνει ότι μπορούμε να μιλάμε για σχετική υποεκτίμηση των θερμικών απωλειών. Δηλαδή μικρή ταχύτητα ανέμου συνεπάγεται μικρό συντελεστή k κάτι που σημαίνει μικρή θερμοκρασία λειτουργίας για το κύτταρο.

Γενικά πρέπει να πούμε ότι ο υπολογισμός της θ του κυττάρου επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα των μετρήσεων του ανέμου. Πολλές φορές δεν υπάρχουν μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου. Κάτι τέτοιο ισχύει για τη βάση δεδομένων του προγράμματος. Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού του k κατά τον οποίο η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται 1.5 m / sec .

Έτσι από τη σχέση $k = k_c + k_v \times v$ προκύπτει ότι :

$$k = 20 \text{ W / m}^2 \text{ K} + 6 (\text{W / m}^2 \text{ K}) / (\text{m/sec}) \times 1.5 (\text{m/sec}) = 29 \text{ W / m}^2 \text{ K}$$

ή διαφορετικά θεωρείται :

$k_c = 29 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ και $k_v = 0$ και συνεπώς $k = k_c = 29 \text{ W / m}^2 \text{ K}$. Να σημειωθεί ότι αυτή η τιμή μπορεί να μειωθεί έως και $15 \text{ W / m}^2 \text{ K}$ ανάλογα με τη μόνωση του πίσω μέρους του πλαισίου.

NOCT (Nominal Operation Condition Temperature)

Αρκετές φορές οι κατασκευαστές δίνουν το συντελεστή NOCT (Nominal Operation Condition Temperature), που είναι η θερμοκρασία που φτάνουν τα πλαίσια χάρις κάλυψη της πίσω πλευράς τους, υπό τις standard συνθήκες λειτουργίας οι οποίες θεωρούνται οι εξής :

Προσπίπτουσα ακτινοβολία $G_{inc} = 800$

Θερμοκρασία περιβάλλοντος $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$

Ταχύτητα ανέμου 1 m / sec

Κατάσταση λειτουργίας : ανοιχτό κύκλωμα – Open circuit

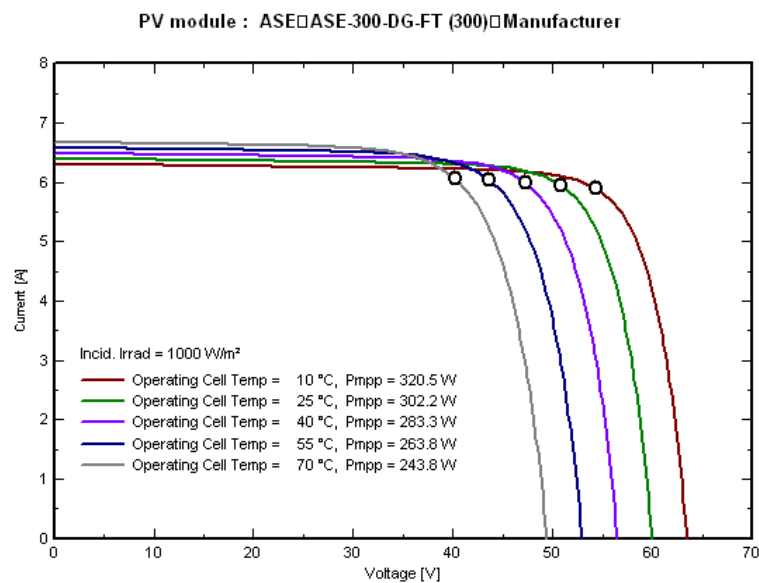
$$T_c = \frac{A \cdot G_{inc} \cdot (1 - \eta_{ta}) + k \cdot T_{amb}}{k} \quad \text{συνεπάγεται ότι :}$$

$$NOCT = T_c = \frac{A \cdot 800 (\text{W / m}^2) \cdot (1 - 0) + k \cdot 20^\circ\text{C}}{k}$$

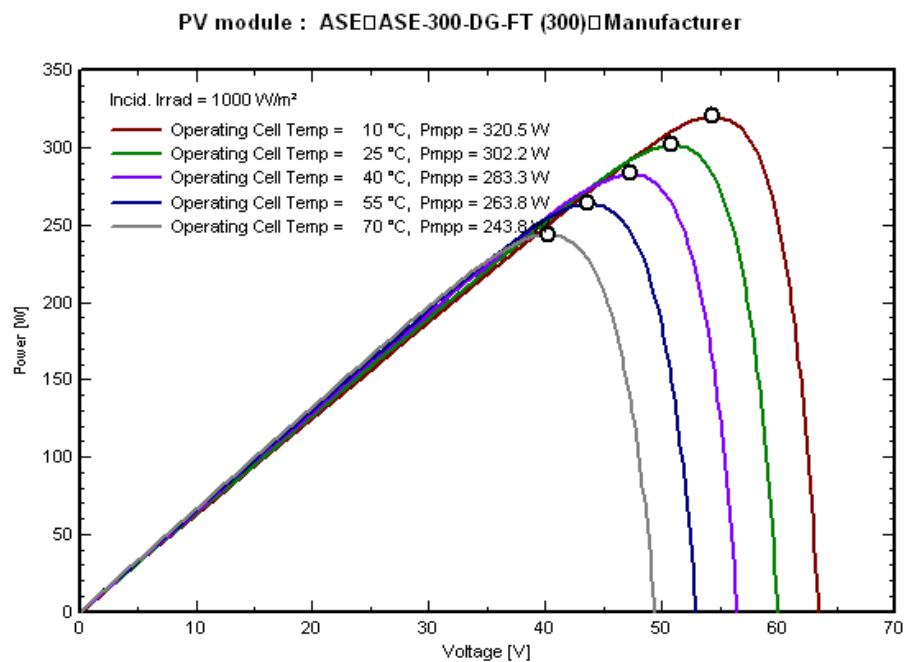
Ο καθορισμός της θερμοκρασίας του κυττάρου είναι εξαιρετικής σημασίας και για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων R_s και R_{sh} των κυττάρων των πλαισίων από τα οποία αποτελούνται οι συστοιχίες και τελικά η φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Οι R_{sh} και R_s αποτελούν βασικούς παράγοντες για τον καθορισμό των I-V χαρακτηριστικών σύμφωνα με το μοντέλο της 1 διόδου.

Ανάλογα λοιπόν με τη μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου έχουμε μεταβολές και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πλαισίων της συστοιχίας σε σχέση με αυτά στις συνθήκες STC. Οι μεταβολές αυτές αφορούν στις τιμές των V_{mpp} , I_{mpp} , I_{sc} , V_{oc} και συνεπώς στην παραγόμενη ισχύ $P(W)$ και στο βαθμό

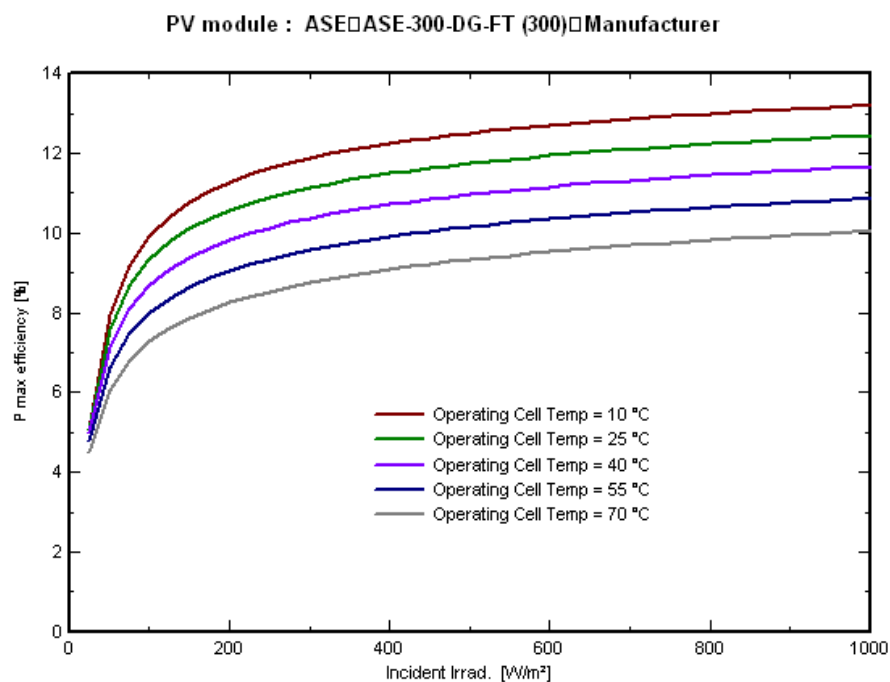
απόδοσης, $P_{\max}$ efficiency [%], των πλαισίων και τελικά της συστοιχίας. Για αύξηση της θερμοκρασίας άνω των 25°C και με την υπόθεση ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία παραμένει σταθερή στην τιμή των $1000\text{W}/\text{m}^2$ όπως βλέπουμε στα σχήματα που ακολουθούν οι απώλειες για τα πλαίσια που χρησιμοποιήσαμε αυξάνονται.



Σχέδιο 20. Επίδραση της θερμοκρασίας λειτουργίας του κυττάρου στη I-V χαρακτηριστική του πλαισίου.



Σχέδιο 21. Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας κυττάρου στο MPP και την παραγόμενη ισχύ του πλαισίου.



Σχέδιο 22. Επίδραση θερμοκρασίας λειτουργίας κυττάρου στην απόδοση του πλαισίου.

2.3.3 Απώλειες λόγω ανακρίβειας ποιοτικών χαρακτηριστικών πλαισίου (Module Quality Loss).

Μια ακόμα παράμετρος που πρέπει να λάβουμε υπόψη για τον καθορισμό των απωλειών του μελετώμενου συστήματος είναι η απώλεια λόγω ανακρίβειών των ποιοτικών χαρακτηριστικών των φβ πλαισίων (Module Quality Loss). Τις περισσότερες φορές οι κατασκευαστές των φβ παρέχουν ανακριβή στοιχεία για τα ονομαστικά χαρακτηριστικά των πλαισίων τα οποία όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό είναι για εμπορικούς λόγους υπερεκτιμημένα. Κάτι τέτοιο μπορεί να αφορά για παράδειγμα την ονομαστική ισχύ ή αλλιώς την ισχύ αιχμής που αποδίδει ο κατασκευαστής στο πλαίσιο για τις συνθήκες STC.

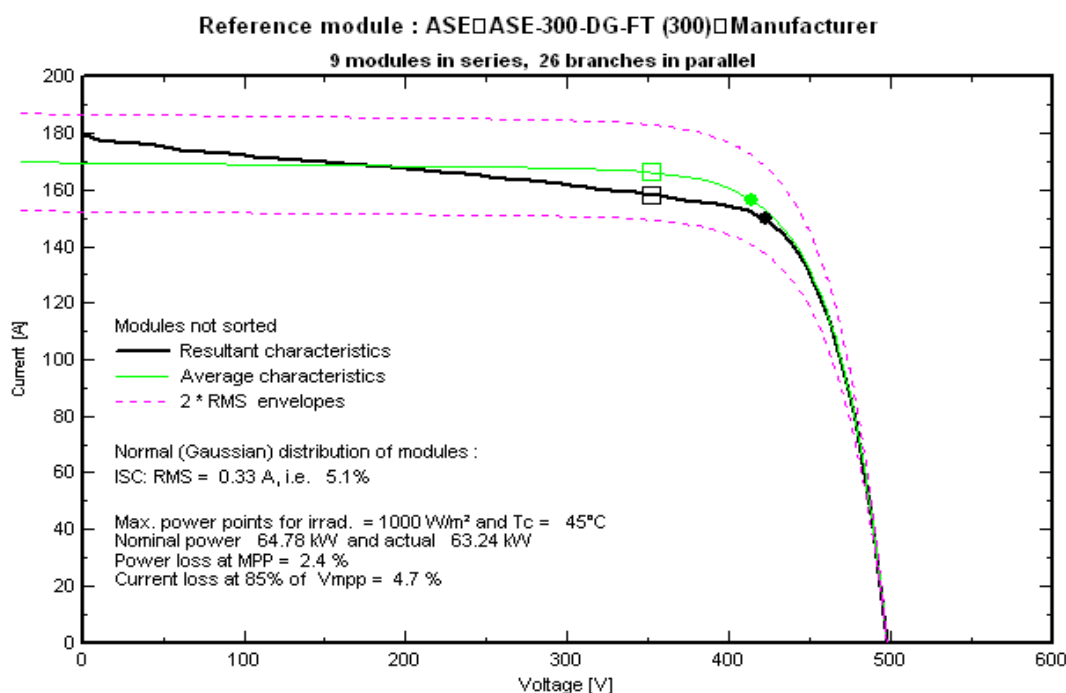
Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί για την περίπτωση αυτή έναν συντελεστή απωλειών ο οποίος έχει σταθερή τιμή κατά την διάρκεια της εξομοίωσης του συστήματος και λαμβάνεται ίσος με -3%.

Μέχρι σήμερα αυτού του είδους η ανακρίβεια ήταν ένας καθοριστικός παράγοντας αβεβαιότητας για την εκτίμηση της απόδοσης των φβ. Ωστόσο πρέπει να επισημανθεί ότι η κατάσταση προχωράει σε ένα ξεκαθάρισμα αφού στους περισσότερους καταλόγους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά για τα πλαίσια αναγράφεται πλέον ένας παράγοντας εγγυημένης διαβεβαίωσης για την ονομαστική ισχύ. Πχ Power tolerance = 3%.

2.3.4 Απώλειες λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ των χαρακτηριστικών των πλαισίων (Mismatch Loss). (3)

Οι απώλειες αναντιστοιχίας οφείλονται στο γεγονός ότι τα πλαίσια που αποτελούν τη συστοιχία στην πραγματικότητα δεν είναι μεταξύ τους πανομοιότυπα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των χαρακτηριστικές τάσης ρεύματος (I-V) των πλαισίων. Στην ουσία τα πλαίσια έχουν μεταξύ τους, έστω και ελάχιστα, διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στην πράξη αυτό το φαινόμενο επηρεάζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ολόκληρης της

συστοιχίας με συνέπεια να παρουσιάζεται απώλεια ισχύος στο MPP. Στο πρόγραμμα παρέχεται η δυνατότητα ποσοτικοποίησης αυτού του είδους απωλειών με τη χρήση ενός συντελεστή που του δίνεται η σταθερή τιμή -2% για λειτουργία στο MPP. Έχουμε δηλαδή 2% επιπλέον απώλειες λόγω της ανομοιογένειας μεταξύ των πλαισίων που απαρτίζουν τη συστοιχία.



Σχέδιο 23

2.3.5 Ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων. (3)

Οι ωμικές απώλειες λόγω καλωδιώσεων εκφράζουν την ενέργεια που χάνεται πάνω στις γραμμές, κατά την μετατροπή της σε θερμότητα. Οι καλωδιώσεις αφορούν στη σύνδεση μεταξύ των φβ πλαισίων εν σειρά για τη συγκρότηση μιας αλυσίδας πλαισίων (string), στις καλωδιώσεις που χρειάζονται για να συνδεθούν οι αλυσίδες μεταξύ τους στους κόμβους (κουτιά), στις καλωδιώσεις για να συνδεθούν οι κόμβοι με τους μετατροπείς. Προφανώς οι ωμικές απώλειες, που μεταφράζονται σε πτώση τάσης, ελαττώνουν την ωφέλιμη ενέργεια που τελικά φτάνει στη dc μεριά του μετατροπέα σε σχέση με αυτή που παράγεται από το σύνολο των πλαισίων της συστοιχίας και επηρεάζουν το σημείο μέγιστης ισχύος.

Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι στο σχεδιασμό του συστήματος πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή τύπου και μήκους καλωδίων, ώστε οι ωμικές απώλειες να περιορίζονται κοντά στην τυπική τιμή του 3%. Ταυτόχρονα βέβαια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχοι κανονισμοί ασφαλείας και βέλτιστης απόδοσης σχετικά με το ρεύμα, τη διατομή, το μήκος και την προκαλούμενη πτώση τάσης κατά μήκος των καλωδίων. Μπορεί τελικά η προκύπτουσα τιμή των απωλειών λόγω καλωδιώσεων να είναι μικρότερη ή και να υπερβαίνει την τιμή του 3%.

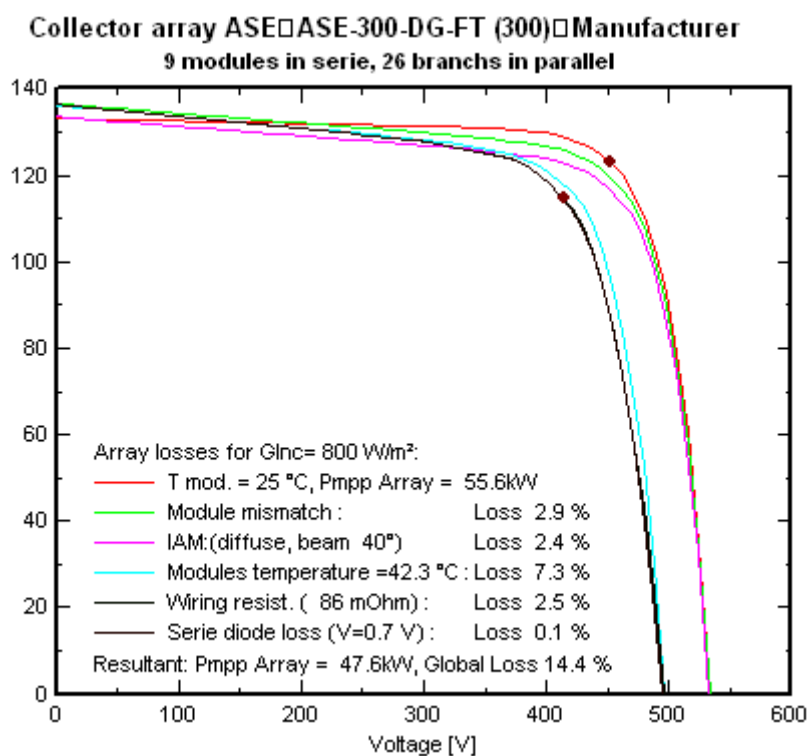
Στο πρόγραμμα που χρησιμοποιήσαμε οι θερμικές απώλειες ενέργειας εξαιτίας της πτώσης τάσης πάνω στη δίοδο αντεπιστροφής υπολογίζονται με βάση την πτώση τάσης πάνω στη δίοδο κατά την ορθή πόλωσή της, μαζί με τον υπολογισμό των απωλειών καλωδιώσεων, και εμφανίζονται στην τελική αναφορά για το υπό μελέτη σύστημα.

2.4 ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η επίδραση των συνολικών απωλειών στη I -V χαρακτηριστική κάθε υποσυστοιχίας του φβ σταθμού σε σχέση με τη I -V χαρακτηριστική της για θερμοκρασία 25°C. Είναι εμφανής η μετατόπιση του σημείου λειτουργίας MPP υπό την επίδραση των απωλειών.

Η πυκνότητα ισχύος της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 800 W/m^2 , η γωνία πρόσπτωσης είναι 40° , το ποσοστό της άμεσης προς τη συνολική ακτινοβολία (Beam / Global) είναι 20%, η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 20°C και η ταχύτητα ανέμου 1 m/sec .

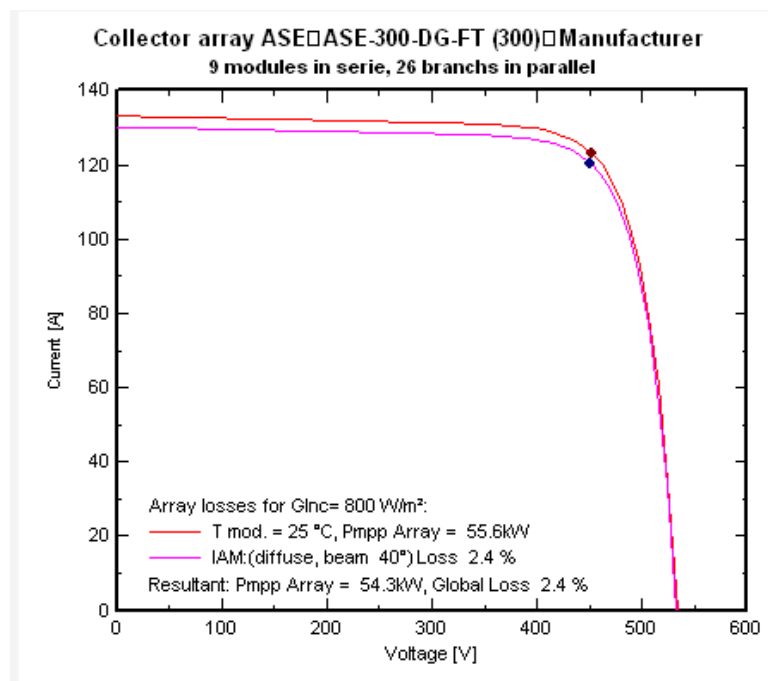
Κάθε συστοιχία αποτελείται από 26 αλυσίδες συνδεδεμένες παράλληλα και κάθε αλυσίδα αποτελείται από 9 πλαίσια σε σειρά. Οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής συνυπολογίζονται στις απώλειες καλωδιώσεων.



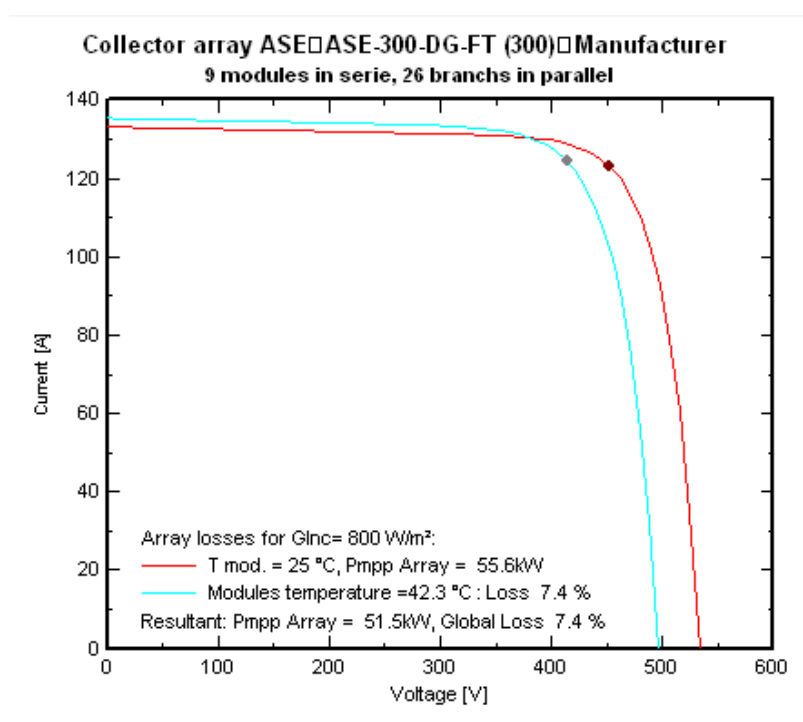
Σχέδιο 24. Επίδραση συνολικών απωλειών στη I-V χαρακτηριστική ολόκληρης της συστοιχίας.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ξεχωριστά η επίδραση κάθε τύπου απώλειας στη I-V χαρακτηριστική του πλαισίου που χρησιμοποιήσαμε σε σχέση με τη I-V χαρακτηριστική του για θερμοκρασία 25°C . Οι λοιπές συνθήκες παραμένουν οι ίδιες.

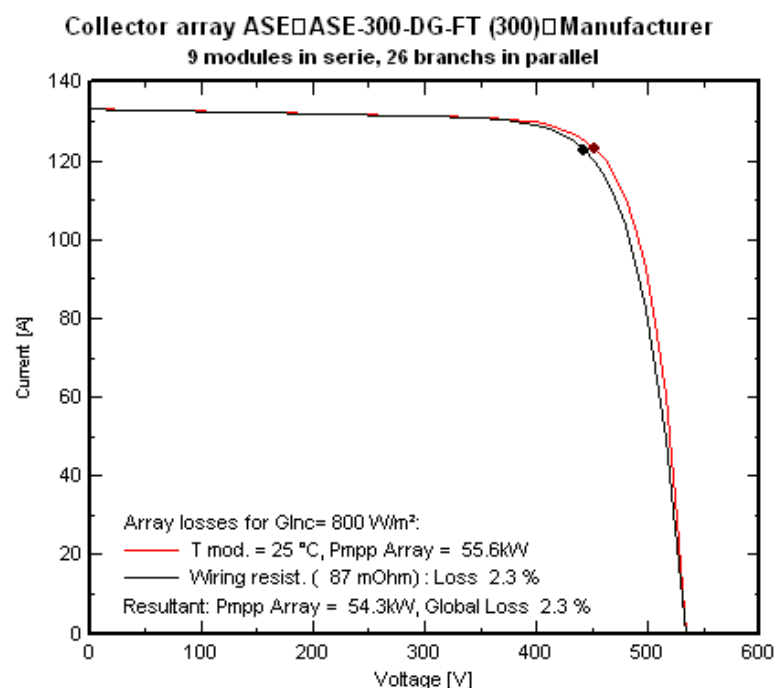
Εικόνα 1 επίδραση απωλειών αναντιστοιχίας



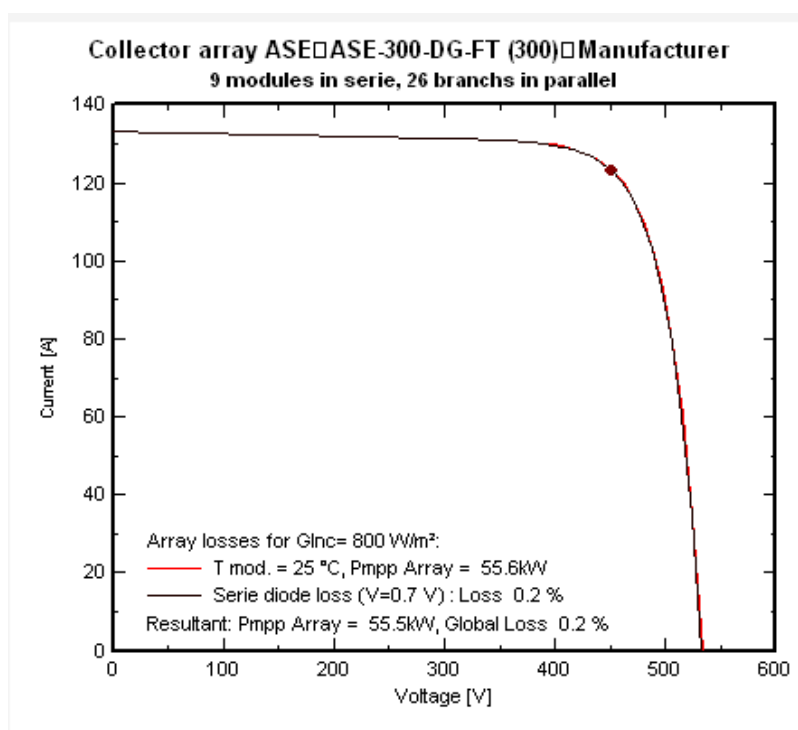
Σχέδιο 25. Επίδραση οπτικών απωλειών στη I-V χαρακτηριστική της συστοιχίας.



Σχέδιο 26. Επίδραση της θερμοκρασίας στη I-V χαρακτηριστική της συστοιχίας.



Σχέδιο 27. Επίδραση απωλειών λόγω καλωδιώσεων στη I-V χαρακτηριστική της συστοιχίας.



Σχέδιο 28. Επίδραση των απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής στη I-V χαρακτηριστική της συστοιχίας

Κεφάλαιο 3

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπέα

3.1 Εισαγωγή

Ο μετατροπέας τάσης είναι ένα ηλεκτρονικό σύστημα ισχύος που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Είναι συνεπώς ένα βασικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο μετατροπέας στην βασική του μορφή αποτελείται από κατάλληλη διάταξη ηλεκτρονικών διακοπών η συνδυασμένη λειτουργία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία τετραγωνικών παλμών διαδοχικά ορθών και αντεστραμμένων. Μια βελτιωμένη έκδοση των μετατροπέων είναι αυτή που στην έξοδο του παράγει τάση που έχει τη μορφή διαμορφωμένου ημιτόνου.

Η λειτουργία των μετατροπέων συνοδεύεται από παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων, κυρίως στους μετατροπείς απλού τετραγωνικού παλμού. Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων ανοίγματος και κλεισίματος των διακοπών επιτυγχάνουμε μικρή τροποποίηση της κυματομορφής εξόδου του κατά την οποία ο αρνητικό τετραγωνικό παλμός είναι μετατοπισμένος σε σχέση με τον θετικό κατά $T/6$ της περιόδου της συνολικής κυματομορφής. Το χρονικό εύρος των τετραγωνικών τμημάτων είναι $T/3$. Έχουμε δηλαδή μετατροπείς διαμορφωμένου τετραγωνικού παλμού. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται το μέγεθος

των ανώτερων αρμονικών και να έχουμε μικρότερη παραμόρφωση στο σήμα της θεμελιώδους συνιστώσας. Οι μετατροπείς μπορεί να διαθέτουν κατάλληλα φίλτρα που κόβουν τις ανώτερες αρμονικές και περιορίζουν σε ανεκτά επίπεδα την παραμόρφωση. (4)

3.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπέα

Στην παρούσα εργασία δε θα επεκταθούμε σε μια πιο λεπτομερή ανάλυση για τα κυκλωματικά στοιχεία, τον τρόπο λειτουργίας και τις αρμονικές του μετατροπέα. Θα αναφερθούμε κυρίως σε ορισμένα βασικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της συσκευής που χρειάζονται κυρίως για τη διαστασιολόγηση του συστήματος και την εκτίμηση της απόδοσής του. Τα χαρακτηριστικά αυτά χρησιμοποιούνται ως παράμετροι από το PVSYST, συνήθως παρέχονται σε σχετικούς καταλόγους που δίνουν οι κατασκευαστές και περιγράφονται στις 2 επόμενες παραγράφους.

3.3 Πλευρά εισόδου του μετατροπέα. (Input side)

Επί της ουσίας πρόκειται για την πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται με την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, η οποία παρέχει ισχύ υπό συνεχή dc τάση και ρεύμα. Τα μεγέθη που παραθέτουμε σε αυτήν την παράγραφο αναφέρονται στην dc πλευρά της συσκευής, δηλαδή σε συνεχές ρεύμα και τάση.

3.3.1 Κατάσταση λειτουργίας.

Ο μετατροπέας έχει ενσωματωμένες στην είσοδο του ηλεκτρονικές διατάξεις που επεξεργάζονται κατάλληλα το ρεύμα και την τάση εξόδου της φβ συστοιχίας ώστε για κάθε χρονική στιγμή να απορροφάμε τη μέγιστη ισχύ από τη συστοιχία. Η παραγωγή και άρα απορρόφηση μέγιστης ισχύος όπως είδαμε αντιστοιχεί στο MPP σημείο λειτουργίας. Με τη χρήση τέτοιων διατάξεων το σημείο λειτουργίας διατηρείται σταθερά στο MPP, προφανώς για τις εκάστοτε συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η κατάσταση λοιπόν λειτουργίας του μετατροπέα λαμβάνεται να αντιστοιχεί πάντα στο MPP. (6)

3.3.2 Ελάχιστη και μέγιστη MPP τάση.

Οι δύο αυτές χαρακτηριστικές τιμές της τάσης ορίζουν ένα «παράθυρο τάσης», άνω και κάτω όριο τάσης, μέσα στο οποίο ο inverter δύναται να αναζητήσει το MPP. Όταν καθορίζουμε την τάση MPP εξόδου της συστοιχίας αυτή θα πρέπει να βρίσκεται μέσα στο «παράθυρο τάσης» του μετατροπέα.

Το MPP όπως είδαμε καθορίζεται από την ρεύμα I_{MPP} και την τάση V_{MPP} . Τα μεγέθη αυτά παρέχονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων αλλά αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) όπου η θερμοκρασία λειτουργίας των κυττάρων λαμβάνεται 25°C .

Στις πραγματικές συνθήκες η θερμοκρασία λειτουργίας είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη και το MPP μετατοπίζεται. Έτσι μια καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό του MPP της γεννήτριας ώστε να εξεταστεί αν αυτό βρίσκεται μέσα στο παράθυρο τάσης είναι η θερμοκρασία να λαμβάνεται η θερμοκρασία λειτουργίας για 50°C με 60°C . (3)

3.3.3 Μέγιστη τάση.

Είναι η απόλυτη μέγιστη dc τάση κάτω από οποιοδήποτε συνθήκες που μπορεί να δεχθεί στην είσοδό του ο μετατροπέας. Η μέγιστη τάση εξόδου της συστοιχίας δεν πρέπει να υπερβαίνει αυτή την τιμή. Πρέπει λοιπόν να εξετάζουμε αν η V_{oc} της συστοιχίας είναι μικρότερη από το συγκεκριμένο όριο τάσης. Για να είμαστε στην ασφαλή πλευρά ή ακτινοβολία λαμβάνεται στους 1000 ενώ για τη θερμοκρασία μια καλή προσέγγιση είναι -10°C για την Ευρώπη. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες η V_{oc} ελαττώνεται.

3.3.4 Κατώφλι ισχύος (Power threshold)

Είναι η ελάχιστη ισχύς εισόδου που χρειάζεται ο inverter για να λειτουργήσει. Μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ισχύς που καταναλώνει ο ίδιος ο inverter για τη λειτουργία του.

3.3.5 Μέγιστο φωτοβολταϊκό ρεύμα (I_{pvmax})

Είναι το απόλυτο μέγιστο αποδεκτό ρεύμα στην είσοδο του inverter. Για την διαστασιολόγηση του συστήματος συνήθως εξετάζεται η απαίτηση το I_{mpp} της συστοιχίας να είναι μικρότερο από την παραπάνω τιμή.

3.3.6 Λοιπά στοιχεία

Άλλα στοιχεία τα οποία μπορεί κανείς να βρει στους καταλόγους με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κατασκευαστών, αλλά δε χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο πρόγραμμα για το σχεδιασμό και την εξομοίωση είναι τα εξής:

Η Ονομαστική Φωτοβολταϊκή Ισχύς που είναι μια συνήθης καθοριζόμενη παράμετρος για τους inverter. Εννοείται ως η συνιστώμενη ονομαστική ισχύς της φβ συστοιχίας σε STC συνθήκες.

Η Μέγιστη Φωτοβολταϊκή Ισχύς η τιμή της οποίας μπορεί να δίνεται μερικές φορές. Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη. Μπορεί να γίνει αντιληπτή ως η απόλυτη μέγιστη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε STC συνθήκες αν και ο ακριβής της ορισμός διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

3.4 Πλευρά εξόδου του μετατροπέα.

Εννοείται η πλευρά του μετατροπέα που συνδέεται στο δίκτυο ή εν γένει στο φορτίο που τροφοδοτεί. Προφανώς στην πλευρά εξόδου έχουμε εναλλασσόμενη(AC) τάση και ρεύμα. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εξετάζονται στις επόμενες υποπαραγράφους αναφέρονται στην ac πλευρά του μετατροπέα.

3.4.1 Ονομαστική ισχύς

Η ονομαστική ισχύς είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μεγέθη για τους μετατροπείς. Εννοείται ως η ισχύς που μπορεί να παρέχει διαρκώς στο δίκτυο. Όταν έχουμε υπέρβαση των ορίων, δηλαδή σε ακραίες περιπτώσεις υπερπαραγωγής ισχύος στο MPP, εφαρμόζεται κάποια μέθοδος περιορισμού, πχ μετατόπιση του σημείου λειτουργίας της I-V χαρακτηριστικής. Η ονομαστική ισχύς είναι το μόνο από τα μεγέθη που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης.

3.4.2 Μέγιστη AC ισχύς

Η σημασία της δεν είναι σαφώς ορισμένη αν και μερικές φορές παρέχεται από τους κατασκευαστές. Μπορεί να εννοηθεί ως η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει ο μετατροπέας στην έξοδο του για ένα χρονικό διάστημα μετά την υπέρβαση του οποίου επέρχεται η υπερθέρμανση της συσκευής οπότε και πρέπει να σταματήσει η λειτουργία της στο σημείο αυτό. Δεν χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα.

3.4.3 Ονομαστική AC τάση

Είναι η τάση υπό την οποία παρέχει την ονομαστική ισχύ του ο μετατροπέας στην έξοδό του. Εξαρτάται από την τάση του δικτύου για την οποία είναι σχεδιασμένος να συνδέεται ο μετατροπέας. Για μετατροπείς που συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο XT η ονομαστική πολική τάση εξόδου της συσκευής είναι στα 0.4 kV. Υπάρχουν και μετατροπείς με τάση εξόδου στα 20kV.

3.4.4 Ονομαστικό AC ρεύμα

Είναι το ρεύμα που δίνει στην έξοδο του ο μετατροπέας για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή ονομαστική τάση και ονομαστική ισχύ.

3.4.5 Μονοφασική ή τριφασική σύνδεση

Προφανώς αναφέρεται στον τρόπο σύνδεσης του μετατροπέα στην έξοδο του. Συνήθως έχουμε μονοφασική σύνδεση για μετατροπείς μικρότερους των 3kW ενώ τριφασική σύνδεση για μεγαλύτερους μετατροπείς.

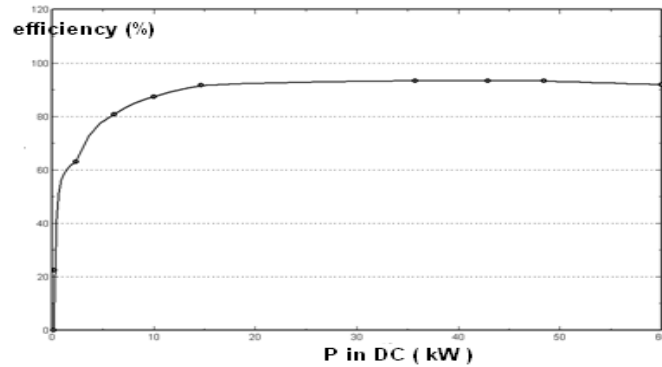
3.4.6 Συχνότητα δικτύου

Οι περισσότερη μετατροπείς μπορούν να συνδεθούν σε δίκτυο με συχνότητα 50 Hz και 60Hz. Για την Ελλάδα λαμβάνουμε 50 Hz.

3.5 Απόδοση

Γενικά οι μετατροπείς χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση (93%-97%) η οποία όμως εξαρτάται από την στιγμιαία ισχύ. Υπάρχει η απαίτηση ο μετατροπέας να έχει μεγάλη απόδοση και για μικρή ισχύ, συγκεκριμένα 90% για 10% της ονομαστικής ισχύος.

Συναντώνται γραφικές παραστάσεις της απόδοσης συναρτήσει της ισχύος εισόδου ή εξόδου της συσκευής αν και σπάνια δίνονται από τους κατασκευαστές.



Σχέδιο 29. Απόδοση μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος εισόδου της συσκευής

Να σημειώσουμε ακόμα ότι οι κατασκευαστές δίνουν την «ευρωπαϊκή απόδοση» που επιχειρεί να περιγράψει την απόδοση της συσκευής για την μέση παράγωγή ισχύος στις συνθήκες λειτουργίας ενός έτους.

Κεφάλαιο 4

Διαστασιολόγηση

4.1 Μετατροπείς

4.1.1 Υπολογισμός της συνολικής ονομαστικής ισχύος των μετατροπέων

Η ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς της συστοιχίας προσδιορίζεται στις συνθήκες STC. Ωστόσο υπό τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας η ισχύς που παίρνουμε στους τερματικούς ακροδέκτες της συστοιχίας είναι αρκετά μικρότερη από την ονομαστική ισχύ της εξαιτίας των απωλειών.

Σε κανονικές λοιπόν συνθήκες λειτουργίας ένας πρόχειρος υπολογισμός της αξιοποιήσιμης ισχύος που αποδίδει η φβ συστοιχία μπορεί να προκύψει αν μειώσουμε την ονομαστική της ισχύ κατά ένα ποσοστό περίπου 15% ή και παραπάνω. Αυτή προσεγγιστικά θα είναι και η ισχύς εισόδου του inverter.

Για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 500 kW έχουμε :

$$500\text{kW} \times 85\% = 425 \text{ kW}$$

Άρα η ισχύς που αποδίδει η φβ γεννήτρια στην είσοδο του inverter είναι περίπου 425 kW.

Για να υπολογίσουμε τώρα την συνολική ονομαστική τιμή της ισχύος του μετατροπέα αρκεί να θυμηθούμε ότι αυτή ορίζεται ως η ισχύς στην έξοδό του. Πρέπει συνεπώς να λάβουμε επιπλέον υπόψη το βαθμό απόδοσης της συσκευής.

Ο τύπος για την απόδοση του μετατροπέα είναι :

$$\text{Απόδοση} = (\text{Ρεξόδου} / \text{Ρ εισόδου}) \times 100\% \text{ ή}$$

$$\text{Ρεξόδου} = P_{\text{nominal}} = P_{\text{εισόδου}} \times \text{βαθμό απόδοσης}.$$

Για τη μέγιστη όμως ισχύ λειτουργίας λαμβάνεται ότι η απόδοση της συσκευής αυξάνεται κατά ένα ποσοστό περίπου 5%. Άρα μια προσεγγιστική τιμή της ονομαστικής του ισχύος προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την ισχύ εισόδου επί ένα ποσοστό (94+5)%. Να σημειώσουμε ότι η μέγιστη απόδοση του μετατροπέα είναι 94%. Έτσι προκύπτει:

$$\text{Ρεξόδου} = P_{\text{nominal}} = P_{\text{εισόδου}} \times \text{βαθμό απόδοσης}.$$

$$P_{\text{nominal}} = 425\text{kW} \times (0,94 + 0,05) \approx 420 \text{ kW}.$$

4.1.2 Αριθμός και «τοποθέτηση μετατροπέων»

Στην παρούσα εργασία επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους μετατροπείς μικρότερης ονομαστικής ισχύος. Ο μετατροπέας που επιλέγουμε, SMA 60 kW LV, έχει ονομαστική ισχύ 60kW, το άνω όριο τάσης για την V_{mpp} φτάνει τα 600V, ενώ η μέγιστη τάση ανέρχεται στα 650 V. Συνεπώς χρειαζόμαστε 7 τέτοιους μετατροπείς και η εγκατάσταση διαιρείται σε 7 φβ γεννήτριες.

Γενικώς προσπαθούμε να έχουμε αρκετά υψηλή τάση στην είσοδο του μετατροπέα κάτι που σημαίνει ότι για δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ το ρεύμα μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση των ωμικών απωλειών τουλάχιστον στο τμήμα των καλωδιώσεων από την έξοδο των φβ γεννητριών ως τον μετατροπέα. Από τα χαρακτηριστικά εισόδου του μετατροπέα βλέπουμε ότι η τάση μπορεί να είναι ικανοποιητικά υψηλή άρα το ρεύμα για δεδομένη ισχύ ικανοποιητικά μικρό. Για τα παραπάνω αρκεί να λάβουμε υπόψη τη σχέση $P = VI$.

Βασικό κριτήριο για να έχουμε μικρές ωμικές απώλειες είναι το μικρό ρεύμα, αφού η ισχύς απωλειών στις γραμμές μεταφοράς δίνεται από τη σχέση $P_{ap} = I^2 R$, όπου το ρεύμα είναι υψωμένο στο τετράγωνο. Παράλληλα όταν το ρεύμα είναι μικρό πετυχαίνουμε να χρησιμοποιήσουμε καλώδια μικρότερης διατομής.

Η συνολική αντίσταση μιας γραμμής αυξάνει όμως και με την αύξηση του μήκους της κάτι που μεταφράζεται σε μεγαλύτερη πτώση τάσης και σε αύξηση των απωλειών. Για να αντισταθμιστεί κάτι τέτοιο χρειάζονται μεγαλύτερες διατομές καλωδίων άρα και μεγαλύτερη μάζα χαλκού. Αυτό έχει κυρίως να κάνει με το μήκος των καλωδιώσεων που αφορούν στις παράλληλες συνδέσεις μεταξύ των αλυσίδων αλλά και με το μήκος των καλωδιώσεων μεταξύ εξόδου γεννήτριας και μετατροπέα.

Το ιδανικό σενάριο για την ελαχιστοποίηση των απωλειών θα ήταν η ισχύς να μεταφερόταν υπό τη μέγιστη δυνατή τάση, το ελάχιστο δυνατό ρεύμα και το μήκος των καλωδίων να ελαχιστοποιούνταν.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και ότι αναγκαστικά η εγκατάσταση έχει μεγάλη σχετικά έκταση επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε περισσότερους του ενός μετατροπείς. Έτσι έχουμε τη δυνατότητα να περιορίσουμε τις καλωδιώσεις για τη σύνδεση των παράλληλων αλυσίδων. Οι μετατροπείς τοποθετούνται κοντά στην έξοδο των φβ γεννητριών μειώνοντας το μήκος των καλωδίων μεταξύ εξόδου γεννητριών και μετατροπέα. Παράλληλα η ισχύς μεταφέρεται υπό ικανοποιητικά υψηλή τάση και το ρεύμα κινείται σε ανεκτά επίπεδα.

Με την επιλογή αυτή πετυχαίνουμε επίσης καλύτερο έλεγχο και μεγαλύτερη αξιοπιστία για το σύστημα συνολικά.

Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε ακόμα περισσότερους μετατροπείς μικρότερης ισχύος. Για παράδειγμα ένας για κάθε αλυσίδα ή για κάποιο μικρό αριθμό αλυσίδων. Αυτή η σύνδεση έχει το πλεονέκτημα να ελαττώνεται το μήκος των καλωδίων για τις παράλληλες συνδέσεις των αλυσίδων και να ελαττώνονται έτσι οι απώλειες στην dc τάση. Χρειάζονται όμως περισσότεροι μετατροπείς κάτι που μπορεί να αυξήσει το κόστος της εγκατάστασης.

Θα μπορούσαμε τέλος να χρησιμοποιήσουμε έναν κεντρικό μετατροπέα μεγάλης ονομαστικής ισχύος περίπου 420kW όπου θα κατέληγαν όλες οι αλυσίδες

αφού πρώτα συνδέονταν παράλληλα. Από σχετική έρευνα (8) συμπεράναμε όμως ότι ή τάση εισόδου ενός τέτοιου μετατροπέα δεν είναι πολύ μεγαλύτερη από τα 600V και συνεπώς το ρεύμα σε κάθε αλυσίδα δε θα μειώνονταν δραματικά. Για παράδειγμα για τον κεντρικό μετατροπέα της Solar Konzept με ονομαστική ισχύ 420kW η τάση Vmp_{pp} κυμαίνεται από 400V έως 600V. Συνεχίζοντας θα χρειαζόταν μεγαλύτερο μήκος και διατομή καλωδίων για την παράλληλη σύνδεση όλων των αλυσίδων υπό περίπου το ίδιο ρεύμα. Τέλος θα μειονεκτούσαμε από άποψη ελέγχου και αξιοπιστίας. Η χρήση όμως ενός μετατροπέα αντί περισσότερων πλεονεκτεί όταν κριτήριο είναι το κόστος.

Εμείς θα συνεχίσουμε τη μελέτη με βάση την αρχική μας επιλογή, η οποία να σημειώσουμε ότι κρίνεται ικανοποιητική αν και όχι απαραίτητα η βέλτιστη. Με μια πιο λεπτομερή συγκριτική μελέτη για τις περιπτώσεις που είδαμε πιο πάνω κανείς μπορεί να μπορεί να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος μέσα από την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Αν κριτήριο για την εγκατάσταση είναι το ελάχιστο κόστος προφανώς και πρέπει να ληφθούν υπόψη τα οικονομικά δεδομένα για να αποφασιστούν οι καταλληλότερες επιλογές. Με βάση αυτά μπορεί να κριθεί απαραίτητος ο συνολικός επανασχεδιασμός της εγκατάστασης.

4.2 ΦΒ συστοιχίες

4.2.1 Εκτίμηση του συνολικού αριθμού πλαισίων

Αρχικά θα προβούμε σε μια πρώτη εκτίμηση του συνολικού αριθμού των πλαισίων που απαιτούνται για την κάλυψη της εγκατεστημένης ισχύος που θέλουμε να έχει ο φωτοβολταϊκός σταθμός. Καθοριστικό ρόλο για αυτό το σκοπό έχει το μέγεθος της επιθυμούμενης συνολικής εγκατεστημένης ισχύος που ανέρχεται στα 500kW και η ονομαστική ισχύς του κάθε πλαισίου. Ο συνολικός αριθμός των πλαισίων προκύπτει από το πηλίκο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της εγκατάστασης προς την ονομαστική ισχύ του κάθε πλαισίου. Μιας και πρόκειται για μια εγκατάσταση με σχετικά μεγάλη ισχύ επιλέγουμε πλαίσια μεγάλης ονομαστικής

ισχύος. Χρησιμοποιούμε λοιπόν το μοντέλο ASE-300-DG-FT ονομαστικής ισχύος $P_n=300W$.

Πρόχειρος υπολογισμός συνολικού αριθμού πλαισίων:

$$\text{συνολικός αριθμός πλαισίων} = \frac{\text{τιμή εγκατεστημένης ισχύος}}{\text{ονομαστική τιμή ισχύος πλαισίου}}$$

$$\text{συνολικός αριθμός πλαισίων} = \frac{500 \cdot 10^3 \text{ W}}{300 \text{ W}} = 1666.6667 = 1667 \text{ πλαίσια}$$

4.2.2 Συμβατότητα συστοιχίας-μετατροπέα

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ κάθε φωτοβολταϊκής γεννήτριας και του μετατροπέα που βρίσκεται συνδεδεμένος στην έξοδο της. Πρέπει δηλαδή να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ τάσης και το ρεύματος εξόδου της γεννήτριας και τάσης και ρεύματος εισόδου του μετατροπέα. Αυτό είναι και ένα από τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν τον αριθμό των πλαισίων που συνδέονται εν σειρά συγκροτώντας μια αλυσίδα αλλά και τον αριθμό των αλυσίδων που συνδέονται παράλληλα. Με βάση το πιο πάνω σκεπτικό προχωράμε στη διαστασιολόγηση του συστήματος. Να σημειώσουμε ότι, για λόγους συμβατότητας της ορολογίας με το πρόγραμμα εξομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε, ο όρος συστοιχία (array) συμπίπτει με τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

4.2.3 Η τάση της συστοιχίας

Η φβ εγκατάσταση μπορεί να αποτελείται από μία ή περισσότερες μονάδες γεννήτριας. Γενικά ως μονάδα γεννήτριας θεωρείται το τμήμα της εγκατάστασης που παράγει ενέργεια συμπεριλαμβανομένου και του μετατροπέα. Συνεπώς κάθε μονάδα γεννήτριας αποτελείται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια και τον μετατροπέα. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια αποτελείται συνήθως από πολλές αλυσίδες πλαισίων (string) συνδεδεμένες παράλληλα. Στην περίπτωση μας η εγκατάσταση αποτελείται από 7 πανομοιότυπες μονάδες γεννήτριας.

Ο αριθμός των πλαισίων εν σειρά, δηλαδή ο αριθμός των πλαισίων της κάθε αλυσίδας, καθορίζει την τάση της αλυσίδας και επομένως ολόκληρης της συστοιχίας. Κάθε συστοιχία μπορεί να συγκροτείται από n αλυσίδες συνδεδεμένες παράλληλα.

Συνεπώς η τάση που θα εμφανιστεί στους ακροδέκτες εξόδου της συστοιχίας θα είναι ίση με την τάση της μιας αλυσίδας, με την προϋπόθεση προφανώς ότι η κάθε αλυσίδα απαρτίζεται από τον ίδιο αριθμό πλαισίων, τα οποία έχουν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Ισχύει δηλαδή γενικά για την τάση: $V_{array} = V_{string} = \lambda \times V_{\text{πλαισίου}}$, όπου λ ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων πλαισίων.

4.2.4 Συμβατότητα τάσης συστοιχίας και τάσης εισόδου μετατροπέα

Βασικό κριτήριο για τον καθορισμό του αριθμού των πλαισίων εν σειρά αποτελεί η επιθυμούμενη τάση στα άκρα της συστοιχίας. Η τάση της συστοιχίας πρέπει να καθοριστεί με βάση την τάση του μετατροπέα από την πλευρά της εισόδου του (inverter input voltage). Υπάρχουν 2 σημαντικές παράμετροι για την τάση : V_{max} και V_{mpp} . Με βάση αυτές καθορίζεται και ο αριθμός των εν σειρά πλαισίων.

Η μέγιστη τάση (V_{max}) που μπορεί να εμφανιστεί στα άκρα της συστοιχίας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη τάση από την dc πλευρά του μετατροπέα. Επομένως η τάση ανοιχτοκύκλωσης της αλυσίδας ($V_{oc-string}$), η οποία συμπίπτει με την τάση ανοιχτοκύκλωσης όλης της συστοιχίας ($V_{oc-array}$), απαιτείται να είναι μικρότερη από την μέγιστη τάση εισόδου του μετατροπέα. Υπενθυμίζουμε ότι μέγιστη τάση του μετατροπέα είναι η απόλυτη μέγιστη dc τάση κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας.

Επίσης η V_{mpp} της συστοιχίας πρέπει να βρίσκεται εντός του παράθυρου τάσης μέσα στα όρια του οποίου ο μετατροπέας μπορεί να «ψάξει» το σημείο MPP. Απαιτείται δηλαδή να βρίσκεται εντός του εύρους τάσης που ορίζεται από την Ελάχιστη και Μέγιστη MPP τάση του μετατροπέα.

Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα ο αριθμός των εν σειρά πλαισίων υπολογίζεται αυτόματα αρκεί να καθορίσουμε τον inverter που θα χρησιμοποιήσουμε. Προφανώς καθοριστική σημασία έχουν η μέγιστη τάση και τα όρια της MPP τάσης της συσκευής.

Έτσι δεδομένου ότι η μέγιστη τάση εισόδου του μετατροπέα Sunny Central 60 KVA LV είναι $V_{max} = 650$ V (maximum pv voltage = 650 V) και τα όρια τάσης για την τάση V_{mpp} κυμαίνονται από 300V έως 600V υπολογίζεται ο μέγιστος αριθμός των εν σειρά πλαισίων = 9.

4.2.5 Υπολογισμός του μέγιστου αριθμού πλαισίων εν σειρά

Για τον υπολογισμό αυτό διαιρούμε την μέγιστη τάση εισόδου του μετατροπέα με τη μέγιστη τάση που μπορεί να εμφανιστεί στην έξοδο του κάθε πλαισίου. Έχουμε δηλαδή:

$$\left(\begin{array}{c} \text{μεγιστος αριθμός πλαισίων} \\ \text{εν σειρά} \end{array} \right) = \frac{V_{\max,inv}}{V_{oc,πλαισίου}}$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{μεγιστος αριθμός πλαισίων} \\ \text{εν σειρά} \end{array} \right) = \frac{650V}{68,1V} \approx 9.5 \text{ πλαίσια}$$

Μπορούμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε το πολύ 9 πλαίσια εν σειρά. Σε αυτή την περίπτωση η προκύπτουσα μέγιστη τάση της αλυσίδας (ή και του group παράλληλων αλυσίδων) είναι μικρότερη από την από τη μέγιστη τιμή της τάσης εισόδου του μετατροπέα και άρα αποδέκτη:

$$V_{oc,array} = V_{oc,string} = 9 \times V_{oc,πλαισίου} = 9 \times 68.1V = 612.9V < 650 V$$

Προφανώς αν τοποθετούσαμε 10 πλαίσια σε σειρά τότε θα είχαμε:

$$V_{oc,array} = V_{oc,string} = 10 \times V_{oc,πλαισίου} = 10 \times 68.1V = 681 > 650 V$$

Δηλαδή η μέγιστη τάση της συστοιχίας θα υπερέβαινε την μέγιστη dc τάση του inverter. Η επιλογή αυτή λοιπόν κρίνεται ακατάλληλη.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι η V_{oc} πλαισίου λαμβάνεται για θερμοκρασία $\theta = -10 \text{ C}$.

4.2.6 Έλεγχος τάσης στο MPP

Τώρα πρέπει να εξετάσουμε αν η τάση V_{mpp} κάθε φωτοβολταϊκής γεννήτριας βρίσκεται εντός των ορίων τάσης για τα οποία ο μετατροπέας μπορεί να «ψάξει» το σημείο MPP. Να σημειώσουμε ότι η τάση κάθε φωτοβολταϊκής γεννήτριας ισούται με την τάση στα άκρα κάθε αλυσίδας από n πλαίσια σε σειρά. Η $\phi\beta$ γεννήτρια μπορεί να απαρτίζεται με τη σειρά της από περισσότερες παράλληλες αλυσίδες. Έτσι έχουμε:

$V_{mpp,array} = V_{mpp,string} = 9 \times V_{mpp,πλαίσιου} = 9 \times 42.5V = 383V$, η οποία είναι μια αποδεκτή τιμή αφού βρίσκεται εντός των ορίων τάσης μέσα στα οποία ο inverter Sunny Central 60 KVA LV μπορεί να «ψάξει» για το σημείο V_{mpp} . ($300V < 383V < 600V$).

Συνοψίζοντας, ο μέγιστος αριθμός των εν σειρά πλαισίων = 9.

Να σημειώσουμε ότι η τιμή της V_{mpp} του πλαισίου λαμβάνεται για θερμοκρασίες από 50 C ως και 60 C. Εδώ για 60 C.

4.2.7 Αριθμός παράλληλων αλυσίδων

Αφού λοιπόν έχουμε υπολογίσει τον αριθμό των πλαισίων εν σειρά που συγκροτούν την κάθε μια αλυσίδα ο υπολογισμός του αριθμού παράλληλων αλυσίδων είναι εύκολη υπόθεση. Ο συνολικός αριθμός παράλληλων αλυσίδων προκύπτει από το πηλίκο του συνολικού αριθμού πλαισίων προς τον μέγιστο αριθμό των πλαισίων της κάθε αλυσίδας:

$$\left(\frac{\text{συνολικός αριθμός}}{\text{παράλληλων αλυσίδων}} \right) = \frac{\text{συνολικός αριθμός πλαισίων}}{\text{μέγιστος αριθμός πλαισίων αλυσίδας}}$$

$$\left(\frac{\text{αριθμός παράλληλων}}{\text{αλυσίδων}} \right) = \frac{1667 \text{ πλαίσια}}{9 \text{ πλαίσια}} = 185$$

Όπως είδαμε συνολικά για την εγκατάσταση απαιτούνται 7 μετατροπείς. Σε κάθε μετατροπέα αντιστοιχεί μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Κάθε γεννήτρια αποτελείται από κ παράλληλες αλυσίδες. Άρα σε κάθε μετατροπέα αντιστοιχούν κ παράλληλες αλυσίδες. Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των παράλληλων αλυσίδων κάθε γεννήτριας αρκεί να διαιρέσουμε το συνολικό αριθμό των παράλληλων αλυσίδων με τον απαιτούμενο αριθμό των μετατροπέων:

$$\left(\frac{\text{αριθμός παράλληλων}}{\text{αλυσίδων της μιας γεννήτριας}} \right) = \frac{\text{συνολικός αριθμός παράλληλων αλυσίδων}}{\text{συνολικός αριθμός μετατροπέων}}$$

$$\left(\frac{\text{αριθμός παράλληλων}}{\text{αλυσίδων της μιας γεννήτριας}} \right) = \frac{185}{7} = 26.4 = 26$$

Συνοψίζοντας, κάθε φβ γεννήτρια αποτελείται από 26 παράλληλες αλυσίδες και κάθε αλυσίδα έχει 9 πλαίσια σε σειρά. Στην έξοδο κάθε γεννήτριας εγκαθιστούμε έναν μετατροπέα. Άρα τελικά ο φβ σταθμός στο σύνολο του θα αποτελείται από $9 \times 26 \times 7 = 1638$ πλαίσια και η συνολική εγκατεστημένη ισχύς θα είναι περίπου 492KW.

4.2.8 Συμβατότητα ρεύματος συστοιχίας και μετατροπέα

Έχουμε ήδη εξετάσει την απαίτηση της συμβατότητας μεταξύ τάσης εξόδου της γεννήτριας και τάσης εισόδου του μετατροπέα. Το ίδιο θα κάνουμε και για το ρεύμα. Η απαίτηση της συμβατότητας για το ρεύμα ικανοποιείται αρκεί το ρεύμα I_{mp} στην έξοδο της φβ γεννήτριας να μην υπερβαίνει το μέγιστο ρεύμα εισόδου του μετατροπέα $I_{pv,max}$.

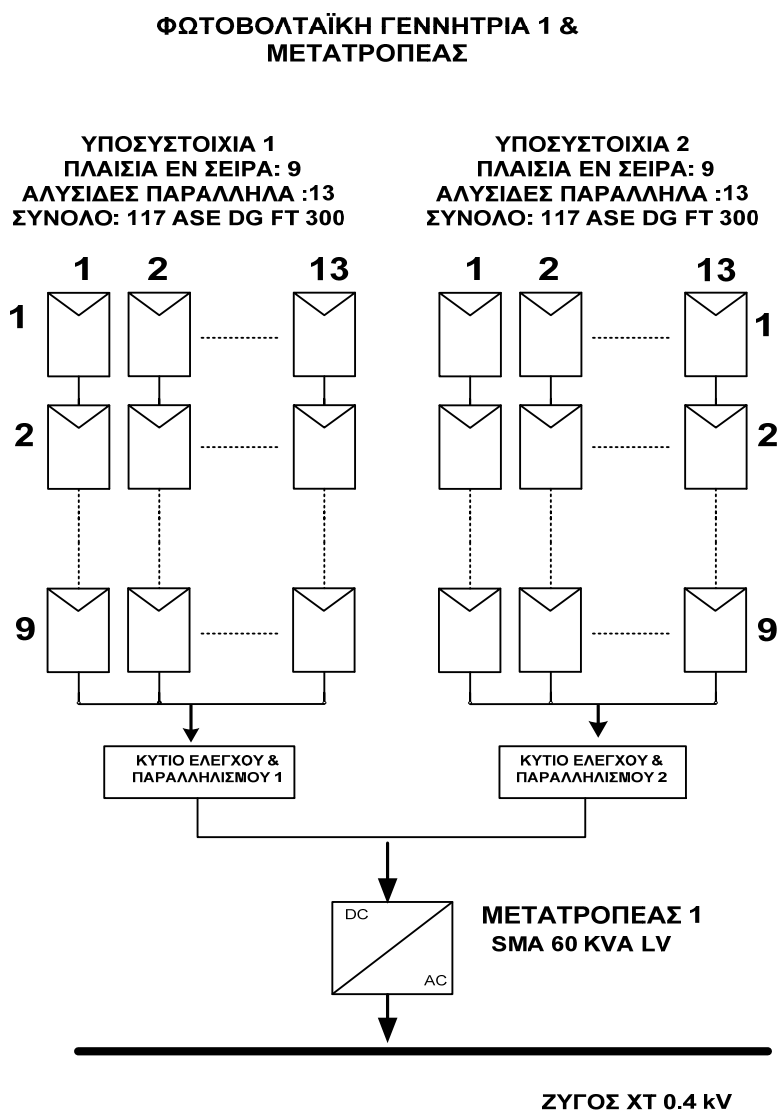
Γενικώς ισχύει ότι το ρεύμα που διαρρέει ένα πλαίσιο μιας αλυσίδας είναι το ίδιο με το ρεύμα που διαρρέει συνολικά την αλυσίδα με την προϋπόθεση τα πλαίσια της αλυσίδας να παρουσιάζουν τα ίδια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στους 60 C για κάθε πλαίσιο το ρεύμα I_{mp} είναι 6.05 A. Έτσι έχουμε $I_{mp,πλαισίου} = I_{mp,αλυσίδας} = 6.05$ A. Για κάθε φβ γεννήτρια που αποτελείται από 26 παράλληλες αλυσίδες το συνολικό ρεύμα στο σημείο λειτουργίας MPP είναι: $I_{mp,array} = 26 I_{mp,αλυσίδας} = 6.05 \text{ A} \times 26 = 157$ A. Το μέγιστο ρεύμα εισόδου του μετατροπέα δίνεται $I_{pv,max} = 215$ A. Άρα ισχύει ότι $I_{mp,array} (= 157 \text{ A}) < I_{pv,max} (= 215 \text{ A})$. Συνεπώς και για το ρεύμα υπάρχει συμβατότητα μεταξύ γεννήτριας και μετατροπέα.

Να σημειώσουμε ότι για ακόμα και για το μέγιστο ρεύμα που θεωρητικά μπορεί να δώσει το πλαίσιο η προϋπόθεση της συμβατότητας ικανοποιείται. Έτσι για $I_{sc,πλαισίου} = 6.61$ A στους 60 C προκύπτει $I_{sc,array} = 26 I_{sc,πλαισίου} = 172$ A. Και πάλι $I_{sc,array} < I_{pv,max}$.

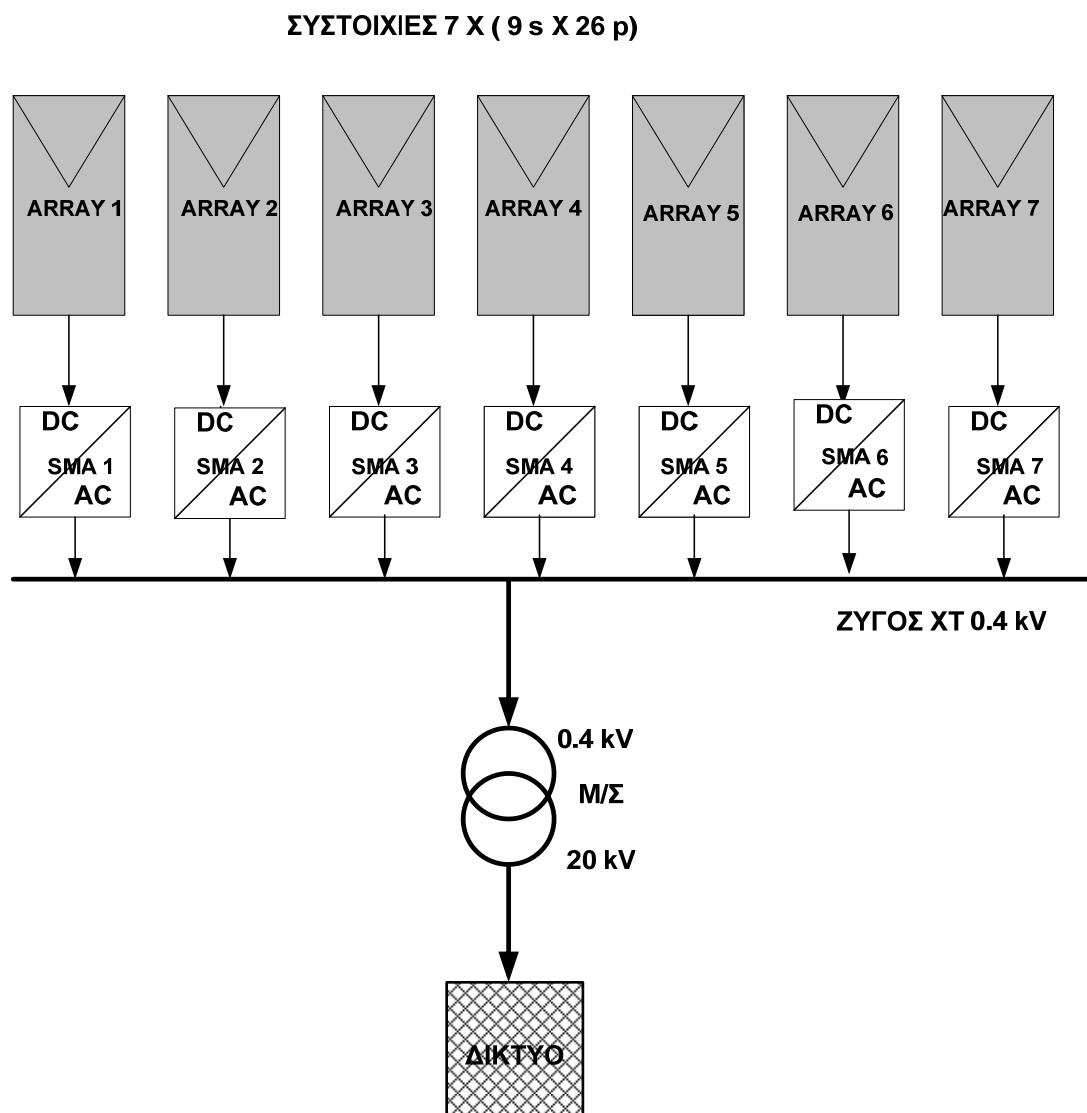
Συμπέρασμα : για το συγκεκριμένο πλαίσιο και μετατροπέα η επιλογή κάθε φωτοβολταϊκή γεννήτρια να αποτελείται από 26 παράλληλες αλυσίδες των 9 πλαισίων εν σειρά ικανοποιεί τις προϋποθέσεις συμβατότητας, μεταξύ γεννήτριας και μετατροπέα, τόσο για την τάση όσο και για το ρεύμα.

4.3 Μονογραμμικό σχέδιο

Ακολουθώς παρουσιάζεται το μονογραμμικό σχέδιο που αντιστοιχεί σε μια φβ γεννήτρια καθώς και το σχέδιο ολόκληρης της εγκατάστασης.



Σχέδιο 30. Στο σχήμα φαίνεται η διάταξη της μιας εκ των 7 φβ γεννητριών/ συστοιχιών. Η συστοιχία χωρίζεται σε 2 υποσυστοιχίες. Οι αλυσίδες των υποσυστοιχιών συνδέονται μεταξύ τους στα κυτία παραλληλισμού και ελέγχου. Κατόπιν η γραμμές καταλήγουν στον μετατροπέα dc/ac. Η έξοδος του μετατροπέα καταλήγει στο ζυγό ΧΤ, όπου συνδέονται και οι υπόλοιποι μετατροπείς



Σχέδιο 31. Στο σχήμα φαίνεται η συνολική εικόνα της εγκατάστασης. Οι 7 πανομοιότυπες συστοιχίες συνδέονται κάθε μία σε έναν μετατροπέα. Οι μετατροπείς συνδέονται στους ζυγούς ΧΤ. Διαμέσου του Μ/Σ ανύψωσης τροφοδοτείται το Δίκτυο της ΔΕΗ. Οι διατάξεις προστασίας παραλείπονται.

4.4 Τελικά αποτελέσματα για το σύστημα

4.4.1 Αποδοτικότητες, λόγος επίδοσης, αποδόσεις.

Η αποδοτικότητα της φβ συστοιχίας (array Yield, Y_a) ορίζεται ως το πηλίκο της αποδιδόμενης ημερησίως (σε μηνιαία ή ετήσια βάση) ηλεκτρικής ενέργειας δια της ισχύος αιχμής της συστοιχίας. Έτσι έχουμε: $Y_a = E_{array} / P_p$ με μονάδες Wh/Wp/day. Εκφράζει την ενέργεια που αποδίδει κάθε εγκατεστημένο kWp στην έξοδο της συστοιχίας σε μία ημέρα.

Η αποδοτικότητα του φβ συστήματος (final Yield, Y_f) ορίζεται με παρόμοιο τρόπο. Είναι δηλαδή το πηλίκο της ημερησίως (σε μηνιαία ή ετήσια βάση) διαθέσιμης ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο του μετατροπέα δια της ισχύος αιχμής. Έτσι έχουμε: $Y_f = E_{outsyst} / P_p$ με μονάδες Wh/Wp/day. Εκφράζει την ενέργεια που παίρνουμε στην έξοδο του συστήματος από κάθε εγκατεστημένο kWp σε μια ημέρα.

Η αποδοτικότητα αναφοράς του φβ συστήματος (reference system Yield, Y_r) είναι η ιδανική αποδοτικότητα του συστήματος χωρίς καμία απώλεια. Θεωρούμε δηλαδή ότι η συστοιχία λειτουργεί υπό συντελεστή απόδοσης που αντιστοιχεί στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου και η προσπίπτουσα ολική ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια των κυττάρων χωρίς να υφίσταται οπτικές απώλειες λόγω διάθλασης ή ανάκλασης. Οι λοιπές απώλειες τόσο της συστοιχίας όσο και του μετατροπέα δεν λαμβάνονται υπόψη. Έτσι μπορούμε να γράψουμε: $Y_r = E_{array, optimum} / P_p$. Η Y_r συμπίπτει αριθμητικά με την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο επίπεδο του συλλέκτη εκφρασμένη σε μονάδες kWh/m²/day. Υπό την προϋπόθεση ότι η μέγιστη προσπίπτουσα πυκνότητα ακτινοβολίας είναι 1000/m².

Ο λόγος επίδοσης (Performance Ratio) μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας (PRa) ή ενός φβ συστήματος (PRs) ισούται με το πηλίκο της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας E προς την ενέργεια E_{array} (G_t , n_{STC}) που θα απέδιδε η φβ συστοιχία, αν λειτουργούσε ιδανικά χωρίς επιπλέον απώλειες δεχόμενη κάθε στιγμή την ίδια πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της μέρας. Έτσι έχουμε:

$$PR_{array} = E_{array} / E_{array} (G_t, n_{STC}) \text{ για τη συστοιχία και}$$

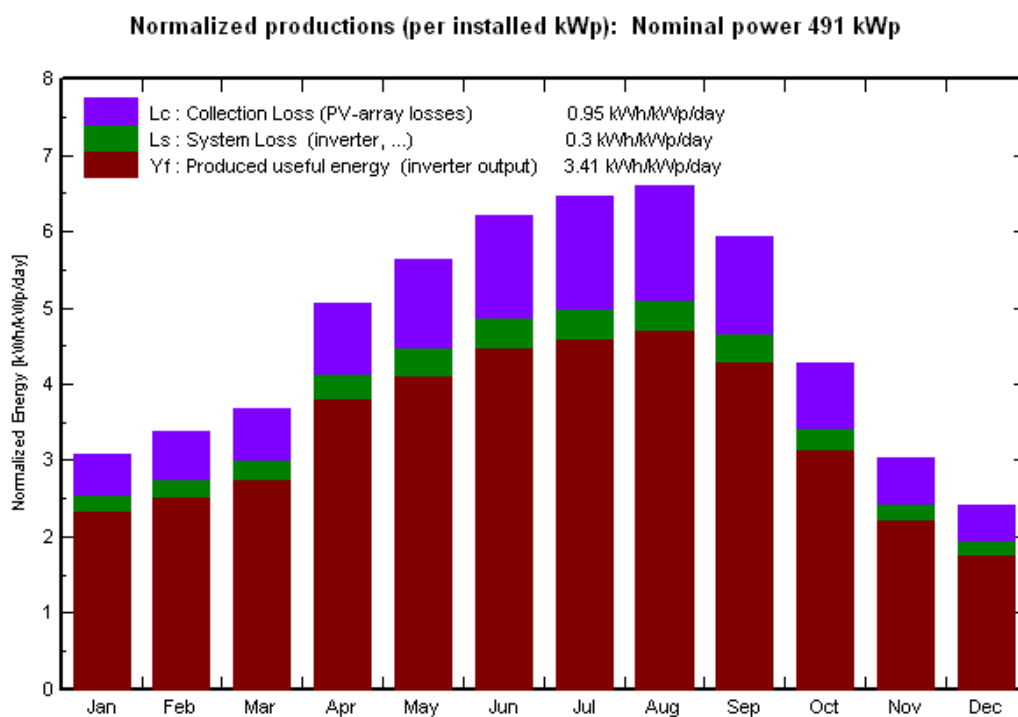
$PR_s = E_s / E_{array} (G_t, n_{STC})$ (8) για το σύστημα συνολικά ενώ εναλλακτικά μπορούμε να γράψουμε $PR_s = Y_f / Y_r$ (4).

Με βάση τα παραπάνω ορίζονται και τα ακόλουθα μεγέθη:

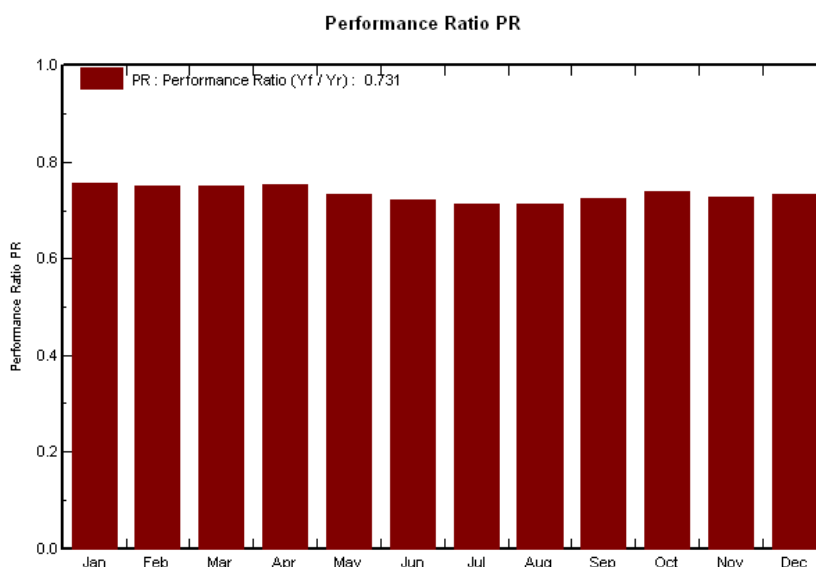
L_c = Collection Loss = $Y_r - Y_a$. Εκφράζει το σύνολο των απωλειών της συστοιχίας.

L_s = System Loss = $Y_a - Y_f$ εκφράζει τις απώλειες του μετατροπέα.

Ακολουθώς παρουσιάζονται γραφήματα για τις απώλειες, τις αποδοτικότητες του και το λόγο επίδοσης του συστήματος.



Σχέδιο 32. Γράφημα όπου φαίνονται οι αποδοτικότητες και οι απώλειες του συστήματος για κάθε μήνα του έτους. Στο σχήμα μπορούμε να δούμε και τις συνολικές αποδοτικότητες και τις απώλειες του συστήματος για όλο το έτος.



Σχέδιο 33. Στο σχήμα φαίνεται ο λόγος επίδοσης PR του συστήματος για κάθε μήνα του έτους. Επίσης φαίνεται η συνολική επίδοση του συστήματος για όλο το έτος.

4.4.2 Ακτινοβολία, αποδιδόμενη ενέργεια και αποδόσεις.

GlobHor: (Global Horizontal) πυκνότητα της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο επίπεδο οριζόντιου συλλέκτη στον γεωγραφικό τόπο που βρίσκεται ο σταθμός. Μονάδες KWh/m^2 και εκφράζει πυκνότητα ενέργειας. Εδώ αναφέρεται σε ολικές μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

GlobInc: (Global Incident) πυκνότητα της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο επίπεδο κεκλιμένου συλλέκτη στον γεωγραφικό τόπο που βρίσκεται ο σταθμός. Προκύπτει από την GlobHor όπου λαμβάνεται υπόψη η κλίση του συλλέκτη. Μονάδες KWh/m^2 και εκφράζει πυκνότητα ενέργειας. Εδώ αναφέρεται σε συνολικές μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

GlobalEff: (Effective Global) αξιοποιήσιμη πυκνότητα της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στο επίπεδο κεκλιμένου συλλέκτη στον γεωγραφικό τόπο που βρίσκεται ο σταθμός. Προκύπτει από την GlobInc αφού ληφθούν υπόψη οι οπτικές απώλειες (IAM) λόγω διάδοσης και ανάκλασης. Μονάδες KWh/m^2 και εκφράζει πυκνότητα ενέργειας. Εδώ αναφέρεται σε συνολικές μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

Tamb: (Tambient) θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αναφέρεται σε μέσες μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

Earray: αξιοποιήσιμη ενέργεια στην έξοδο της συστοιχίας αφού ληφθούν υπόψη οι απώλειες για την ακτινοβολία και τη λειτουργία της συστοιχίας. Μονάδες KWh. Αναφέρεται σε συνολικές μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

EOutInv: διαθέσιμη ενέργεια στην έξοδο των μετατροπέων, δηλαδή στην έξοδο του συστήματος, αφού ληφθούν υπόψη όλες οι απώλειες του συστήματος. Μονάδες KWh. Αναφέρεται σε συνολικές μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

EffArrR: (Array Efficiency Rough area) είναι η απόδοση της συστοιχίας με βάση την ολική επιφάνεια της και όχι μόνο η καθαρή επιφάνεια των κυττάρων. Προκύπτει από τα παραπάνω ως εξής: $\text{EffArrR} = \text{Earray} / (\text{GlobInc} \times \text{Sarray})$. Αναφέρεται σε μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

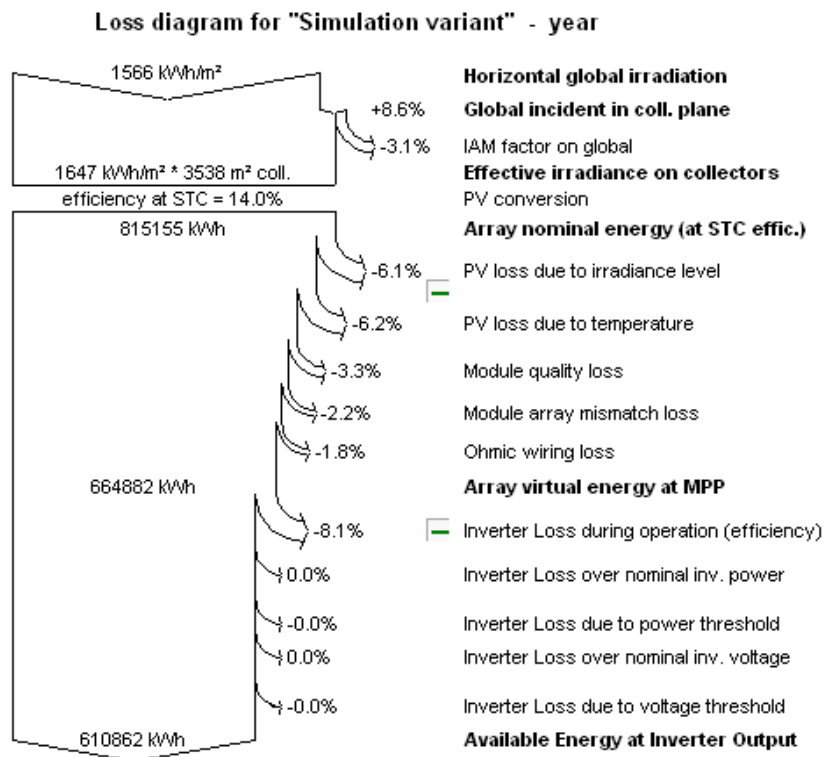
EffSysR: (System Efficiency Rough area) είναι η απόδοση συνολικά του συστήματος με βάση την ολική επιφάνεια της και όχι μόνο η καθαρή επιφάνεια των κυττάρων. Προκύπτει από τα παραπάνω ως εξής: $\text{EffSysR} = \text{EOutInv} / (\text{GlobInc} \times \text{Sarray})$. Αναφέρεται σε μηνιαίες και ετήσιες τιμές.

Simulation variant
Balances and main results

	GlobHor	T Amb	GlobInc	GlobEff	EArray	EOutInv	EffArrR	EffSysR
	kWh/m ²	°C	kWh/m ²	kWh/m ²	kWh	kWh	%	%
January	66.0	11.60	95.7	92.8	38860	35549	10.22	9.35
February	74.0	10.90	94.3	91.5	38052	34792	10.15	9.28
March	104.0	11.80	114.3	110.6	46009	42098	10.13	9.27
April	147.0	13.90	152.1	147.2	61135	56271	10.11	9.31
May	182.0	18.00	174.4	168.5	68305	62785	9.85	9.06
June	201.0	22.10	186.6	180.2	71879	66213	9.69	8.92
July	213.0	25.60	200.7	194.1	76116	70191	9.54	8.80
August	200.0	26.30	204.9	199.0	77835	71746	9.55	8.80
September	155.0	24.30	178.3	173.2	68723	63426	9.69	8.95
October	106.0	20.50	132.6	128.8	52224	48075	9.90	9.12
November	66.0	16.40	91.2	88.5	35848	32662	9.88	9.00
December	52.0	13.50	75.0	72.6	29822	27055	10.00	9.08
Year	1566.1	17.95	1700.1	1646.9	664809	610862	9.83	9.04

Σχέδιο 34. Στον πίνακα φαίνεται η ακτινοβολία σε οριζόντιο και κεκλιμένο επίπεδο, η αξιοποιήσιμη ακτινοβολία στην επιφάνεια των κυττάρων, η ενέργεια που αποδίδει η συστοιχία, η ενέργεια στην έξοδο των μετατροπέων και οι σχετικές αποδόσεις για κάθε μήνα και για όλο το έτος.

4.4.3 Διαγράμματα απωλειών

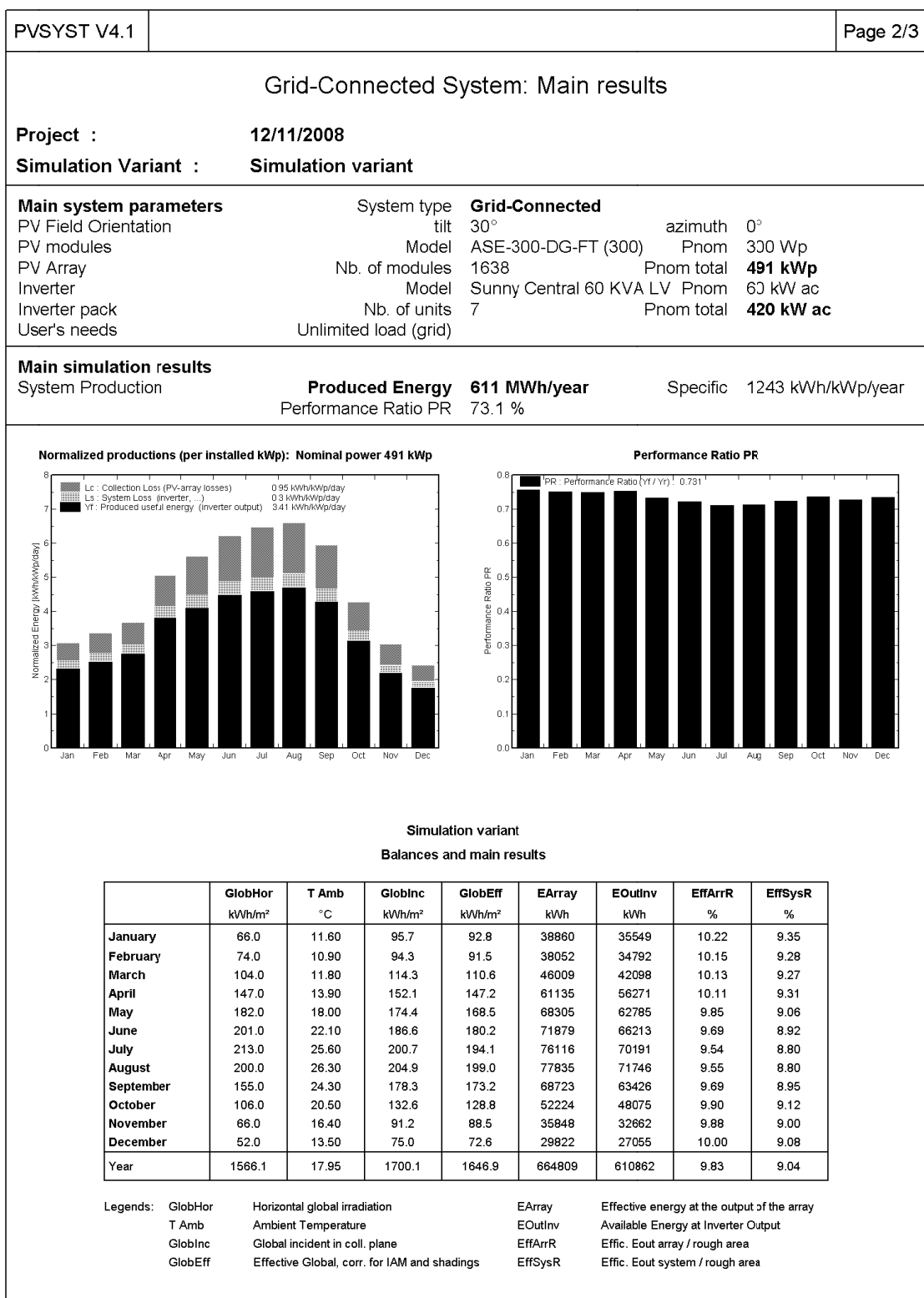


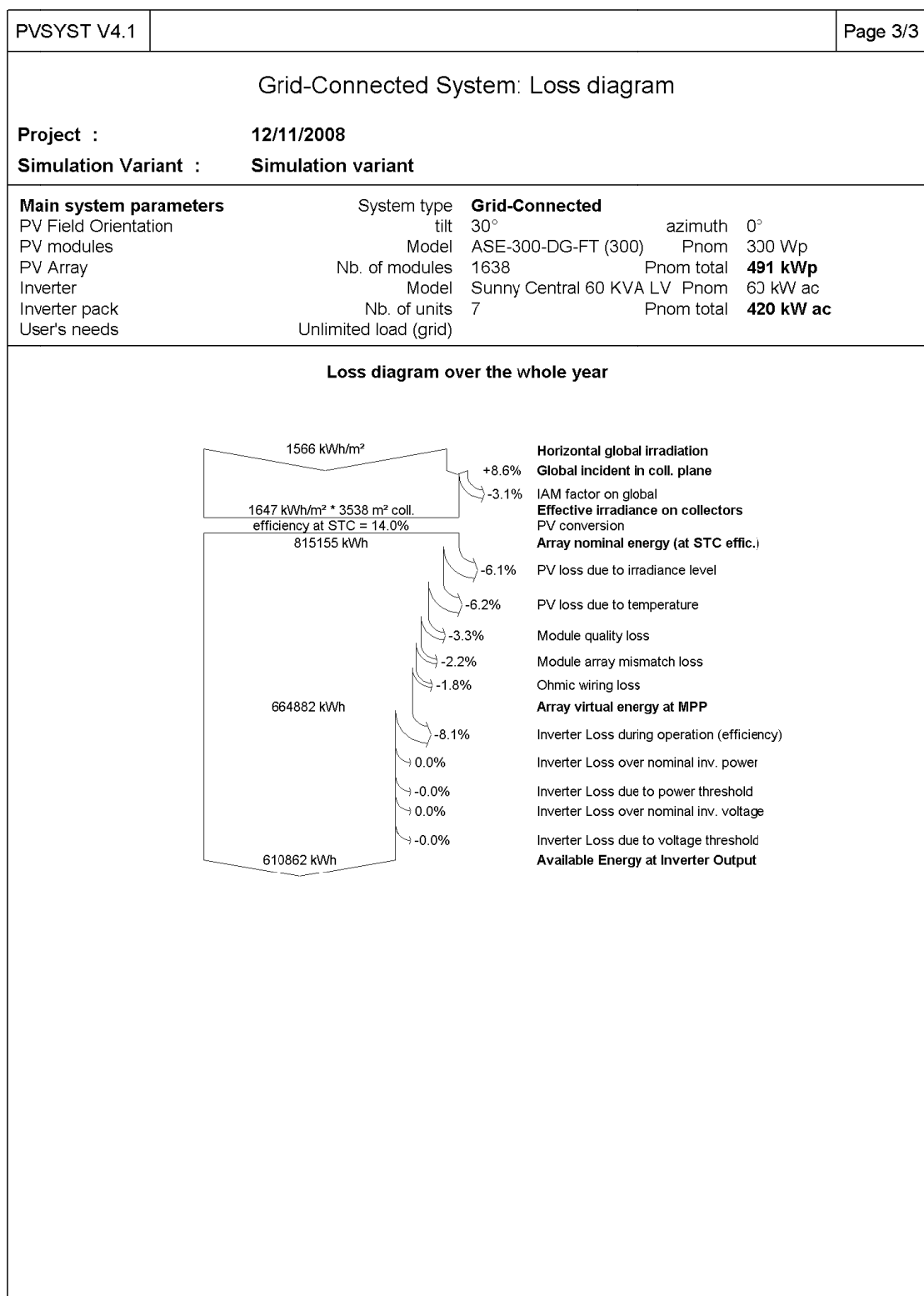
Σχέδιο 35. Στο διάγραμμα φαίνονται αναλυτικά οι συνολικές απώλειες. Βλέπουμε τις οπτικές απώλειες λόγω ακτινοβολίας

4.4.4 Συγκεντρωτική αναφορά του συστήματος

Παρουσιάζεται η τελική αναφορά του συστήματος. Έχει πραγματοποιηθεί εξομοίωση για διάστημα ενός έτους. Τα μεγέθη που εμφανίζονται έχουν αναλυθεί στις προηγούμενες υποπαραγράφους.

PVSYST V4.1					Page 1/3
Grid-Connected System: Simulation parameters					
Project :	12/11/2008				
Geographical Site	Athinai		Country	Greece	
Situation	Latitude	38.0°N	Longitude	23.4°E	
Time defined as	Legal Time	Time zone UT+2	Altitude	107 m	
	Albedo	0.20			
Meteo data :	Athinai , synthetic hourly data				
Simulation Variant :	Simulation variant				
	Simulation date	20/01/09 09h09			
Simulation parameters					
Collector Plane Orientation	Tilt	30°	Azimuth	0°	
Horizon	Free Horizon				
Near Shadings	No Shadings				
PV Array Characteristics					
PV module	Si-poly	Model	ASE-300-DG-FT (300)		
		Manufacturer	ASE		
Number of PV modules		In series	9 modules	In parallel	182 strings
Total number of PV modules		Nb. modules	1638	Unit Nom. Power	300 Wp
Array global power		Nominal (STC)	491 kWp	At operating cond.	443 kWp (50°C)
Array operating characteristics (50°C)		U mpp	404 V	I mpp	1097 A
Total area		Module area	3976 m²	Cell area	3538 m²
PV Array loss factors					
Heat Loss Factor	ko (const)	29.0 W/m²K	kv (wind)	0.0 W/m²K / m/s	
=> Nominal Oper. Coll. Temp. (800 W/m², Tamb=20°C,	wind 1 m/s)		NOCT	45 °C	
Wiring Ohmic Loss	Global array res.	12.4 mOhm	Loss Fraction	3.0 % at STC	
Serie Diode Loss	Voltage Drop	0.7 V	Loss Fraction	0.2 % at STC	
Module Quality Loss			Loss Fraction	3.0 %	
Module Mismatch Losses			Loss Fraction	2.0 % at MPP	
Incidence effect, ASHRAE parametrization	IAM = 1-bo (1/cos i - 1)		bo Parameter	0.05	
System Parameter	System type	Grid-Connected System			
Inverter	Model	Sunny Central 60 KVA LV			
	Manufacturer	SMA			
Inverter Characteristics	Operating Voltage	300-600 V	Unit Nom. Power	60 kW AC	
Inverter pack	Number of Inverter	7 units	Total Power	420 kW AC	
User's needs :	Unlimited load (grid)				



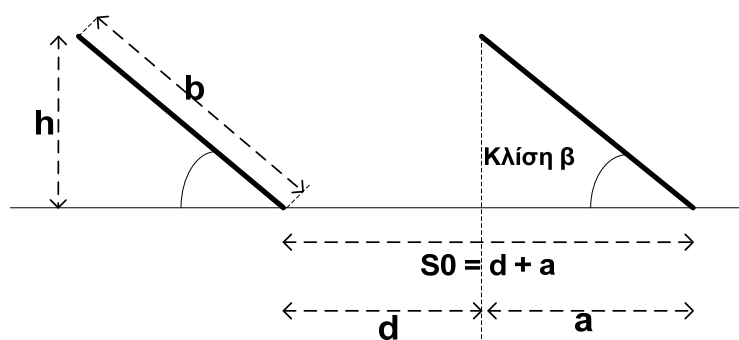


4.5 Τοποθέτηση πλαισίων

4.5.1 Τοποθέτηση για αποφυγή σκίασης

Παρότι για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την ανατολή και αντίστοιχα πριν τη δύση του ηλίου η πίσω συστοιχία σκιάζεται από την αμέσως νοτιότερη, το ποσοστό της μείωσης της διαθέσιμης ημερήσιας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας, που αντιστοιχεί στη συστοιχία δεν πρέπει να ξεπερνά το 5%. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί στη μέρα του έτους με τις χειρότερες συνθήκες για τη σκίαση. Αυτή η μέρα είναι η 22^η μέρα του Δεκεμβρίου για κάθε τόπο που βρίσκεται στο βόρειο ημισφαίριο και ο ήλιος έχει τη χαμηλότερη τροχιά του. Μετά τη μέρα αυτή η σκιά ελαττώνεται σταδιακά. Της επόμενες δηλαδή μέρες το ποσοστό μείωσης της διαθέσιμης ημερήσιας ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας μειώνεται σταδιακά μέχρι την ελάχιστη τιμή του που λαμβάνεται για τις 21 Ιουνίου. Επιλέγοντας συνεπώς την βέλτιστη τοποθέτηση των συστοιχιών για την χειρότερη περίπτωση έχουμε την καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας για όλο το έτος.

Προκειμένου να έχουμε την βέλτιστη τοποθέτηση των συστοιχιών χρησιμοποιούμε τον λόγο $r = d / h$. Το r λαμβάνεται από σχετικούς πίνακες ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Όσο το γεωγραφικό πλάτος μεγαλώνει έχουμε μεγάλη αύξηση για το d . Για την Αθήνα με γεωγραφικό πλάτος 38° το r λαμβάνεται περίπου 2.6. το παρακάτω σχήμα δείχνει τα γεωμετρικά μεγέθη που εμπλέκονται στον υπολογισμό της βέλτιστης απόστασης μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών απείρου μήκους ώστε να πληρείται το κριτήριο του 5%. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε για τον υπολογισμό της απόστασης S_0 προκύπτουν εύκολα με βάση το σχέδιο 36.



Σχέδιο 36

Με δοσμένο το $r = 2.6$ από το σχέδιο 36 γίνεται εύληπτο ότι καθοριστικό ρόλο για τον υπολογισμό του βέλτιστου S_0 έχουν η κλίση των πλαισίων και ο μήκος b . Τα πλαίσια που έχουμε έχουν μεγάλες διαστάσεις έτσι κάθε συστοιχία, αν τη θεωρήσουμε σε οριζόντιο επίπεδο, μπορεί να έχει ως πλάτος τη μεγάλη πλευρά του πλαισίου δηλαδή 1.892 m. Η βέλτιστη σταθερή κλίση για την Ελλάδα προκειμένου να έχουμε την καλύτερη ετήσια απόδοση είναι 30° . Επομένως έχουμε:

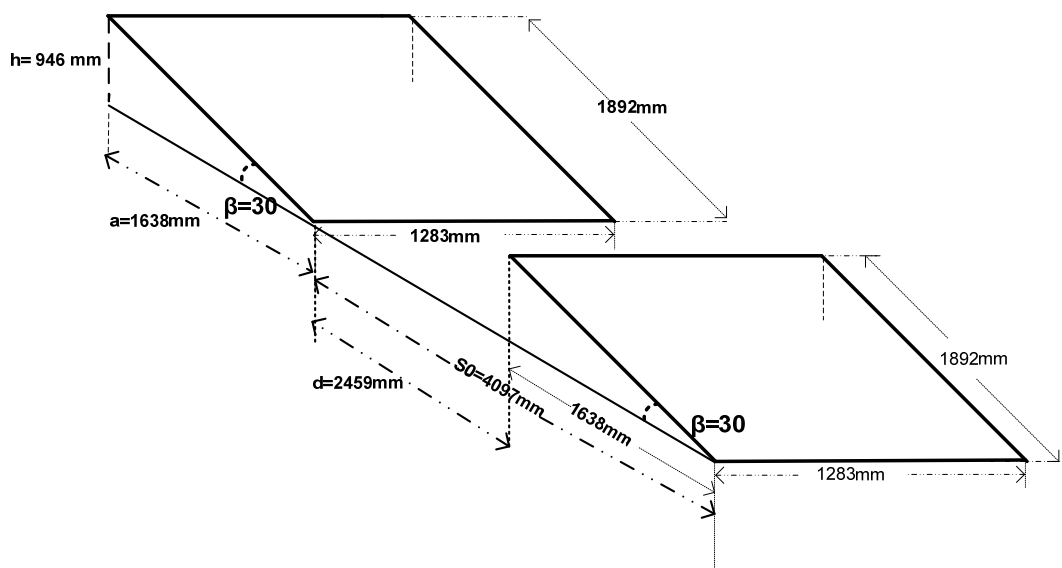
$$r = 2.6, b = 1892\text{mm και } \beta = 30^\circ$$

$$h = b \times \sin 30 = 1892 \sin 30 = 946\text{mm}$$

$$d = r \times h = 2.6 \times 946 \text{ mm} = 2459, 6 \text{ mm}$$

$$a = b \cos 30 = 1892 \cos 30 = 1638.5\text{mm}$$

$$S_0 = a + d = 1638.5 + 2459.6 = 4098.1\text{mm} \approx 4\text{m}$$



Σχέδιο 37. Τοποθέτηση για αποφυγή σκίασης. Στο σχήμα φαίνονται οι τιμές των αποστάσεων ώστε το ποσοστό μείωσης της διαθέσιμης ημερήσιας ακτινοβολίας να είναι μικρότερο από 5% για τη χειρότερη περίπτωση σκίασης.

Με αυτήν την επιλογή τοποθέτησης μιας υποσυστοιχίας με 13 παράλληλες αλυσίδες και 9 πλαίσια εν σειρά είναι περίπου 51m και το πλάτος της 11.5m. Άρα η επιφάνεια για την εγκατάσταση της υποσυστοιχίας είναι 586.5m^2 . Έχουμε 14 πανομοιότυπες υποσυστοιχίες άρα η επιφάνεια που χρειάζεται μόνο για τις συστοιχίες ανέρχεται στα 8204m^2 .

4.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετατροπέα και πλαισίου

Sunny Central 60KVA LV	
Μεγέθη εισόδου	
PV πεδίο τάσης, MPPT (V_{pv})	300V-600V
Μέγιστη τάση εισόδου $V_{pv,max}$	650V
Μέγιστη ένταση εισόδου $I_{pv,max}$	215A
Μέγιστος αριθμός string (παράλληλα)	3
Προτεινόμενη μέγιστη pv ισχύς P_{pv}	70kWp
Μεγέθη εξόδου	
Ονομαστική AC ισχύς	60kW
Ονομαστική AC ένταση	87A
Αρμονικές	< 3%
Διαφορά φάσης ($\cos \phi$)	1
Προστασία υπέρτασης	ναι
Απόδοση	94%

ASE 300 DG FT – Si poly		
Ονομαστική ισχύς	P _{mpp}	300kW _p
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος	V _{mpp}	51.2V
Τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος	I _{mpp}	5.9A
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	I _{sc}	6.4A
Τάση ανοιχτού κυκλώματος	V _{oc}	60V
Διαστάσεις	1892x1283	
Πάχος γυάλινης επιφάνειας	8mm	
Πάχος συλλέκτη	50.8mm	
Βάρος	50kgr	
Αριθμός κυψελών αν συλλέκτη	216	
Απόκλιση ισχύος	-0.41 %/°C	
Απόκλιση τάσης ανοιχτού κυκλώματος	-233 mV/°C	
Απόκλιση ρεύματος sc	6.1mA mV/°C	

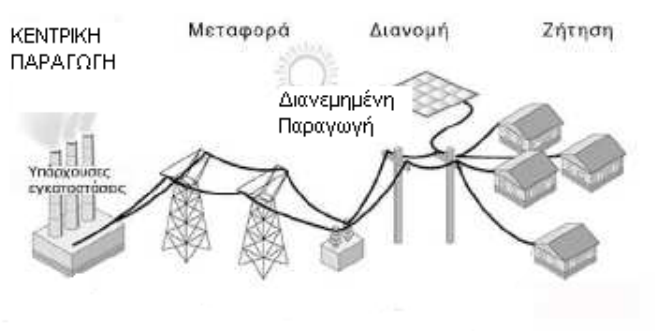
Κεφάλαιο 5

Νησιδοποίηση

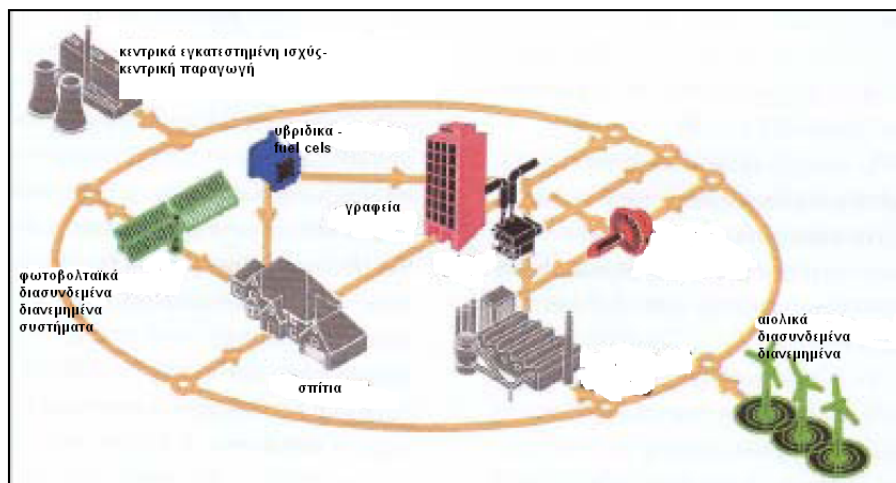
5.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

5.1.1 Διανεμημένη παραγωγή

Με τον όρο αυτό μπορούν να χαρακτηριστούν εγκαταστάσεις παραγωγής οι οποίες συνδέονται κατά κανόνα στο δίκτυο (στη ΜΤ ή τη ΧΤ) και βρίσκονται πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες. Ως εγκαταστάσεις διανεμημένης παραγωγής χαρακτηρίζονται κυρίως οι εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παρότι δεν βρίσκονται αναγκαστικά πιο κοντά στους τελικούς καταναλωτές. Εναλλακτικά η Διανεμημένη Παραγωγή (ΔΠ) αποκαλείται και Αποκεντρωμένη Παραγωγή.



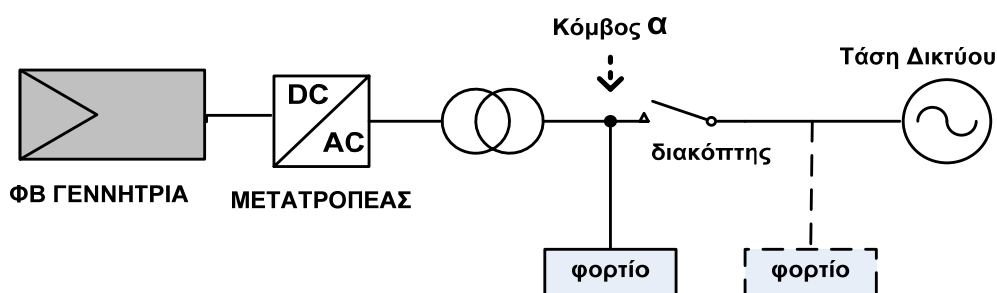
Σχέδιο 38. Σχηματική απεικόνιση κεντρικής και διανεμημένης παραγωγής



Σχέδιο 39. Σχηματική απεικόνιση κεντρικής και διανεμημένης παραγωγής

5.1.2 Τι είναι το φαινόμενο της νησιδοποίησης

Αναφέρεται σε διανεμημένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία είναι διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο. Όταν το διανεμημένο σύστημα συνεχίζει να παρέχει ισχύ σε ένα τμήμα του δικτύου της ΔΕΗ ενώ το τμήμα αυτό έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο τότε λέμε ότι εμφανίζεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Το διανεμημένο σύστημα δηλαδή συμπεριφέρεται σαν μια νησίδα ηλεκτρικής ενέργειας που τροφοδοτεί το τμήμα του δικτύου στο οποίο παραμένει συνδεδεμένο. Η νησιδοποίηση συμβαίνει λοιπόν κυρίως σε διανεμημένα διασυνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο συστήματα βασική κατηγορία των οποίων αποτελούν και τα φωτοβολταϊκά.



Σχέδιο 40 Στο σχήμα απεικονίζεται μια απλοποιημένη διάταξη ενός διανεμημένου διασυνδεδεμένου με το κεντρικό δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος. Το φ/β σύστημα αποτελείται από τη φ/β γεννήτρια και τον μετατροπέα dc/ac. Το κεντρικό δίκτυο απεικονίζεται σαν μια πηγή τάσης. Στον κόμβο α βρίσκεται συνδεδεμένο ένα φορτίο που θα μπορούσε να αναπαριστά ένα ολόκληρο κομμάτι του δικτύου. Αν ο διακόπτης για κάποιο

λόγο ανοίξει και το φωτοβολταϊκό συνεχίζει να παρέχει ισχύ στα στοιχεία που βρίσκονται αριστερά του διακόπτη τότε λέμε ότι το φ/β «νησιδοποιεί».

5.1.2 Λόγοι για τους οποίους η νησιδοποίηση είναι ανεπιθύμητη.

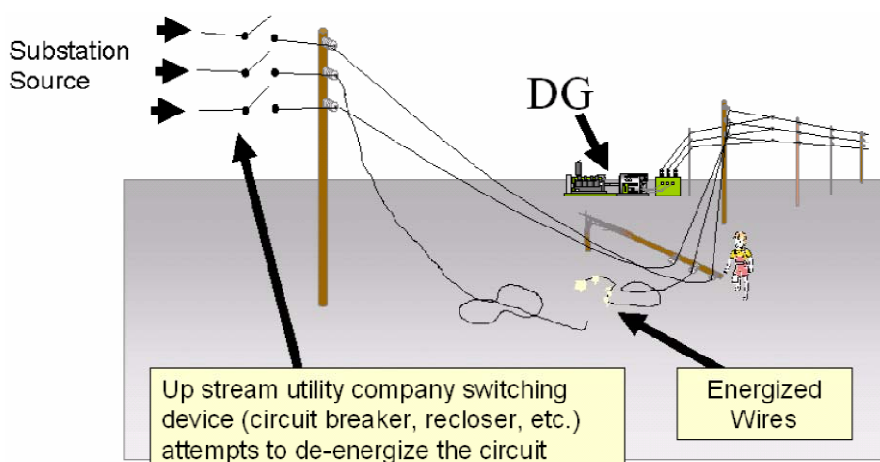
Όταν συμβαίνει το φαινόμενο της νησιδοποίησης τότε εμφανίζονται μια σειρά από αρνητικές επιπτώσεις που έχουν να κάνουν με την ασφάλεια, την αξιοπιστία του δικτύου και την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος.

Το φαινόμενο της νησιδοποίησης μπορεί να αποτελέσει θανάσιμο κίνδυνο για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου στο οποίο συμβαίνει νησιδοποίηση. Το προσωπικό μπορεί να δουλεύει στο συγκεκριμένο τμήμα το οποίο έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο αλλά τροφοδοτείται ακόμα από κάποιο διασυνδεδεμένο σύστημα. Τότε δουλεύει υπό τάση και μάλιστα εν αγνοία του, οπότε διατρέχει άμεσο κίνδυνο ηλεκτροπληξίας.

Όταν υπάρχει το φαινόμενο εμφανίζεται σοβαρός κίνδυνος διαταραχών στη συχνότητα και στην τάση και διακύμανσης αυτών εκτός των προβλεπόμενων και προκαθορισμένων ορίων. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι καταστροφικό για όποια συσκευή συνεχίζει να τροφοδοτείται από το νησιδοποιημένο τμήμα.

Αν το νησιδοποιημένο τμήμα επανασυνδεθεί εκτός φάσης με το κεντρικό δίκτυο τότε μπορεί να εμφανιστούν διαταραχές στην ίδια τη λειτουργία του δικτύου αλλά και να υπάρξουν καταστροφές στον εξοπλισμό του διασυνδεδεμένου δικτύου ή σε οποιοδήποτε συνδεδεμένο εξοπλισμό.

Για λόγους όπως οι παραπάνω υπάρχει η απαίτηση το φαινόμενο να εντοπίζεται και να παύεται έγκαιρα. Με αυτό το ρόλο επιφορτίζονται οι σύγχρονοι inverters ως σημείο διεπαφής του δικτύου με το διανεμημένο σύστημα. Η ΔΕΗ απαιτεί από τους διασυνδεδεμένους διανεμημένους παραγωγούς να χρησιμοποιούν αντιστροφείς που είναι εφοδιασμένοι με τα κατάλληλα συστήματα «αντινησιδοποίησης». (9)



- I. **Increased danger to the public means that the industry must be careful with islanding issues**

Σχέδιο 41. Ανεπιθύμητη νησιδοποίηση λόγω βραχυκυκλώματος σε κάποιο σημείο του Δικτύου.

5.2 Τεχνικές ανίχνευσης και διακοπής της νησιδοποίησης

5.2.1 «Τοπικές» τεχνικές ανίχνευσης

Υπάρχουν πολλές τεχνικές αντινησιδοποίησης. Μια σημαντική κατηγορία αποτελούν οι τεχνικές «τοπικής ανίχνευσης» και διακοπής του φαινομένου της νησιδοποίησης, οι οποίες προτιμούνται για διασυνδεδεμένα συστήματα (ΔΣ) που χρησιμοποιούν μετατροπείς συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο -inverters(dc-ac) όπως είναι και τα φωτοβολταϊκά. Οι μέθοδοι τοπικής ανίχνευσης βασίζονται κυρίως σε μετρήσεις σημάτων τάσης και ρεύματος στην τοποθεσία του διασυνδεδεμένου συστήματος. Μεγάλο βάρος της έρευνας δίδεται στις τεχνικές αυτού του τύπου μιας και έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι πιο οικονομικές. Οι «τοπικές» τεχνικές μπορούν να χωριστούν με τη σειρά τους σε 2 κατηγορίες : τις παθητικές (passive) και τις ενεργητικές (active). (10)

5.2.2 Οι παθητικές τεχνικές

Οι παθητικές τεχνικές προκειμένου να ανιχνεύσουν τη νησιδοποίηση παρακολουθούν παραμέτρους όπως η τάση , η συχνότητα και η διαφορά φάσης που «βλέπει» ο συνδεδεμένος στο δίκτυο μετατροπέας. Όταν αυτές υπερβούν κάποια

καθορισμένα όρια που υποδεικνύουν ότι το κεντρικό δίκτυο έχει αποσυνδεθεί αναγκάζουν τον μετατροπέα να σταματήσει την παροχή ισχύος.

Οι παθητικές τεχνικές έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της ισχύος που παρέχει το διανεμημένο σύστημα στο δίκτυο, αφού δεν εισάγουν κάποια διαταραχή σε αυτό. Μειονεκτούν ωστόσο στο γεγονός ότι δεν μπορούν πάντα να ανιχνεύσουν την εμφάνιση του φαινομένου, παρουσιάζουν δηλαδή μια σχετικά μεγάλη ζώνη μη ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης (large NDZ).

5.2.3 Οι ενεργητικές τεχνικές.

Γενική αρχή λειτουργίας : βασίζονται στην εισαγωγή σκόπιμων «διαταραχών- παρενοχλήσεων» στη πλευρά της εξόδου του διανεμημένου συστήματος, δηλαδή από το ΔΣ προς την πλευρά του δικτύου. Οι διαταραχές αυτές αφορούν την τάση, το ρεύμα και τη συχνότητα. Δεδομένου ότι το δίκτυο χαρακτηρίζεται από σταθερότητα στην τάση και τη συχνότητα και χαμηλή εμπέδηση , με τη λήψη μετρήσεων σχετικά με τη συμπεριφορά του δικτύου υπό την επίδραση των παραπάνω διαταραχών είναι δυνατός ο εντοπισμός του φαινομένου της νησιδοποίησης.

Οι ενεργητικές τεχνικές πλεονεκτούν έναντι των παθητικών στο γεγονός ότι είναι πιο αξιόπιστες αναφορικά με την ανίχνευση του φαινομένου, δηλαδή παρουσιάζουν μια σχετικά πιο μικρή ζώνη μη ανίχνευσης (NDZ).

Έχουν ωστόσο το μειονέκτημα ότι επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα της ισχύος που παρέχεται από το διανεμημένο σύστημα ακριβώς επειδή βασίζονται στην εισαγωγή σκόπιμων «διαταραχών», όπως προαναφέραμε. Να πούμε επίσης ότι σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να υποβαθμίσουν την σταθερότητα του διανεμημένου συστήματος ακόμα και υπό κανονική λειτουργία δηλαδή ακόμα και όταν δεν υπάρχει το φαινόμενο της νησιδοποίησης.

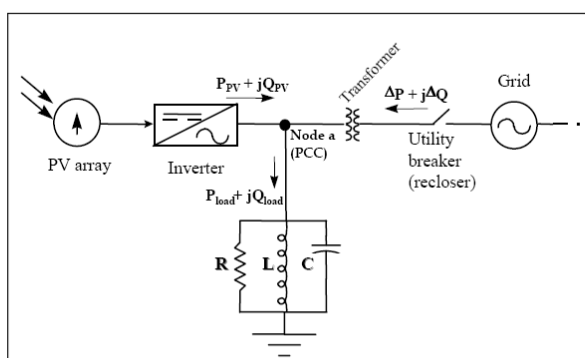
5.3 Περιγραφή παθητικών τεχνικών

Στην παράγραφο αυτή θα περιγράψουμε μερικές από τις πιο βασικές παθητικές τεχνικές για ΔΣ που χρησιμοποιούν μετατροπείς. Αυτές είναι:

- παραδοσιακές τεχνικές υπέρτασης/υπότασης και υπερσυχνότητας/υποσυχνότητας (ρελε).
- ανίχνευση αρμονικών τάσης.
- ανίχνευση μεταβολών φάσης.

5.3.1 Παραδοσιακές τεχνικές με ρελέ υπέρτασης/υπότασης και υπερσυχνότητας/υποσυχνότητας

Figure 1. PV System/Utility Feeder Configuration Showing Definitions of Power Flows and Terms



Report IEA T5-09: 2002

Υπάρχει η απαίτηση οι inverter που χρησιμοποιούνται σε διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα να διαθέτουν συστήματα προστασίας έναντι υπερτάσεων-υποτάσεων (OVP/UMP) και υπερσυχνότητας –υποσυχνότητας (OFP/UPF). Αυτές οι μέθοδοι προστασίας, οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιούν ρελε αλλά και συστήματα λογισμικού, εκτός των άλλων σκοπών προστασίας της εγκατάστασης και του δικτύου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης. Σκοπός τους στην περίπτωση αυτή είναι να αναγκάζουν τον inverter να διακόπτει την παροχή ισχύος στο δίκτυο αν το πλάτος της τάσης ή η συχνότητα υπερβούν κάποια καθορισμένα όρια στο κοινό σημείο σύνδεσης του διανεμημένου συστήματος με το δίκτυο.

Στο σχήμα απεικονίζεται ο κόμβος α που αποτελεί το κοινό σημείο σύνδεσης μεταξύ δικτύου και μετατροπέα(βασικό στοιχείο των Φ/Β ΔΣ) και η ροή πραγματικής και άεργου ισχύος στον κόμβο.

Όταν ο διακόπτης(utility breaker) είναι κλειστός και το δίκτυο είναι συνδεδεμένο τότε έχουμε: *Ροή πραγματικής και άεργου ισχύος από το διασυνδεδεμένο σύστημα μέσω του inverter στον κόμβο α :* $S_{PV} = P_{PV} + j Q_{PV}$ και

Ροή ισχύος από τον κόμβο α προς το τοπικό φορτίο:

$$S_{load} = P_{load} + j Q_{load} .$$

Αθροίζοντας τις παραπάνω ροές ισχύος παίρνουμε την *ισχύ που ρέει από το κεντρικό δίκτυο στον κόμβο α :* $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$ και $\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV}$.

Αν ο μετατροπέας λειτουργεί με σχεδόν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος $\cos\phi = 1$, δηλαδή η τάση και το ρεύμα στην έξοδο του είναι σε φάση, τότε έχουμε $Q_{PV} = 0$ και άρα $\Delta Q = Q_{load}$. Εννοείται ότι παραμένει $\Delta P = P_{load} - P_{PV}$.

Η συμπεριφορά του συστήματος τη στιγμή που το δίκτυο αποσυνδέεται εξαρτάται από τα μεγέθη ΔP και ΔQ τη στιγμή πριν ο διακόπτης ανοίξει και σχηματιστεί νησίδα. Έτσι:

Αν $\Delta P \neq 0$ πριν το άνοιγμα του διακόπτη τότε: Με το άνοιγμα του διακόπτη εμφανίζεται μεταβολή της πραγματικής ισχύος που ρέει από το δίκτυο στο κοινό σημείο διασύνδεσης. Η μεταβολή αυτή, από ΔP σε μηδέν, μεταφράζεται και σε μεταβολή του πλάτους της τάσης V_a που «βλέπει» ο μετατροπέας στους τερματικούς του ακροδέκτες. Έτσι τα ρελέ προστασίας από υπερτάσεις / υποτάσεις μπαίνουν σε λειτουργία. Συνεπώς το διασυνδεδεμένο σύστημα αποσυνδέεται και να διακόπτεται η νησιδοποίηση.

$$P_{load} = \frac{V_a^2}{R}$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την πραγματική ισχύ που καταναλώνεται από το RLC φορτίο. Υποθέτουμε ότι η πραγματική αντίσταση R δεν μεταβάλλεται αλλά παραμένει σταθερή. Επίσης σταθερή θεωρούμε ότι παραμένει και η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αν τη στιγμή λοιπόν που ανοίγει ο διακόπτης η

πραγματική ισχύς που παράγει το ΔΣ δεν συμπίπτει με τη πραγματική ισχύ που καταναλώνει το φορτίο τότε σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η τάση V_a θα πρέπει να ανέλθει ή να κατέλθει ώστε η παραγόμενη ισχύς να εξισωθεί με την καταναλισκόμενη. Η V_a δηλαδή μεταβάλλεται ώσπου να γίνει $P_{load} = P_{PV}$. Αν με τη μεταβολή αυτή η V_a υπερβεί τα όρια τάσης για τα οποία ενεργοποιούνται τα ρελε προστασίας από υπερτάσεις / υποτάσεις τότε ταυτόχρονα το ΔΣ αποσυνδέεται και διακόπτεται η νησιδοποίηση.

Για $\Delta Q \neq 0$ πριν ανοίξει ο διακόπτης τότε: Με το άνοιγμα του διακόπτη και την αποσύνδεση του δικτύου έχουμε μεταβολή της άεργου ισχύος, η οποία ρέει από το δίκτυο προς τον κόμβο α. Η άεργος δηλαδή ισχύς που δίνει το δίκτυο μεταβάλλεται από ΔQ σε μηδέν. Αυτή η μεταβολή μεταφράζεται σε μεταβολή της συχνότητας της τάσης στην έξοδο του inverter. Έτσι τα ρελε υποσυχνότητας / υπερσυχνότητας μπαίνουν σε λειτουργία και το διανεμημένο σύστημα αποσυνδέεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η νησιδοποίηση να ανιχνευθεί και να σταματήσει.

$$Q_{load} = V_a^2 [(\omega L)^{-1} - \omega C]$$

Η παραπάνω σχέση δίνει την άεργο ισχύ που καταναλώνεται από το RLC φορτίο. Αν τη στιγμή που ο διακόπτης ανοίγει και το δίκτυο αποσυνδέεται η άεργος ισχύς που παράγει το ΔΣ δε συμπίπτει με την άεργο ισχύ που καταναλώνει το φορτίο τότε η συχνότητα της τάσης στον κόμβο α (V_a) πρέπει να μεταβληθεί ώσπου η παραγόμενη ισχύς να εξισωθεί με την καταναλισκόμενη. Το ω δηλαδή μεταβάλλεται ώσπου να γίνει $Q_{load} = Q_{PV}$.

Ο inverter ρυθμίζεται να λειτουργεί πρακτικά με σχεδόν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, $\cos \phi = 1$ άρα $\sin \phi = 0$. Αυτό σημαίνει ότι η άεργος ισχύς που παράγει το φβ ΔΣ είναι πρακτικά μηδέν: $Q_{PV} = V I \sin \phi = 0$. Επιπλέον ϕ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος στους τερματικούς ακροδέκτες του μετατροπέα. Ο μετατροπέας συνεπώς αναζητά τη συχνότητα για την οποία το $Q=0$ και άρα η διαφορά φάσης είναι μηδέν. Ταυτόχρονα όμως το ισοζύγιο άεργου ισχύος απαιτεί $Q_{load} = Q_{PV}$. Συνεπώς τα παραπάνω ικανοποιούνται όταν $Q_{PV} = Q_{load} = 0$. Με $Q_{load} = 0$ προκύπτει ότι η καινούργια συχνότητα στην οποία ρυθμίζεται ο inverter είναι η συχνότητα συντονισμού του RLC φορτίου. Αυτή η αλλαγή στη συχνότητα

μπορεί να εντοπιστεί από τα ρελε υποσυχνότητας/ υπερσυχνότητας και άρα να διακοπεί η νησιδοποίηση.

Διευκρινιστικά ακολουθούν τύποι υπολογισμού άεργου ισχύος και συχνότητας συντονισμού ενός $L // C$ φορτίου υπό τάση V :

Άεργος ισχύς: (11)

$$Q = V^2 B \quad \text{άεργος ισχύς φορτίου}$$

$$Q_L = V^2 B_L = V^2 (\omega L)^{-1} \quad \text{άεργος ισχύς επαγωγικού φορτίου}$$

$$Q_C = V^2 B_C = - V^2 (\omega C) \quad \text{άεργος ισχύς χωρητικού φορτίου}$$

Για $L // C$ φορτίο με τάση V στα άκρα του ισχύει:

$$Q_{LC} = Q_L + Q_C = V^2 (B_L + B_C) = V^2 [(\omega L)^{-1} - (\omega C)]$$

Συχνότητα συντονισμού:

$$Q_{LC} = V^2 [(\omega L)^{-1} - (\omega C)] = 0$$

$$[(\omega L)^{-1} - (\omega C)] = 0$$

$$\omega = (1/LC)^{1/2}$$

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι αυτή μπορεί να αστοχήσει αν η παραγωγή ισχύος του συστήματος και του εναπομένοντος δικτύου είναι «ταιριασμένες» όταν το κεντρικό δίκτυο αποσυνδέεται. Σε αυτή την περίπτωση οι αλλαγές στην πραγματική και άεργο ισχύ και επομένως οι μεταβολές που αυτές συνεπάγονται στην τάση και τη συχνότητα μπορεί να μην είναι επαρκείς ώστε να ενεργοποιηθούν τα ρελε προστασίας. Αρά η νησιδοποίηση δεν ανιχνεύεται-διακόπτεται.

5.3.2 .Ανίχνευση Αρμονικών Τάσης

Συμπεράσματα για την ανίχνευση και διακοπή της νησιδοποίησης μπορούν να εξαχθούν από την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD) της τερματικής τάσης του ΔΣ. Καταγράφεται λοιπόν η ολική παραμόρφωση (THD) της τάσης εξόδου του μετατροπέα και αυτός αποκόπτεται αν η THD υπερβεί κάποιο καθορισμένο όριο.

Σε κανονική λειτουργία ένα στιβαρό κεντρικό δίκτυο μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν μια πηγή τάσης με σχεδόν μηδενική εμπέδηση διατηρώντας μόνο μια μικρή παραμόρφωση τάσης (THD περίπου μηδέν) στους τερματικούς ακροδέκτες του μετατροπέα. Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο η αντίσταση που βλέπει ο inverter στους τερματικούς του ακροδέκτες είναι αυτή του δικτύου και άρα πολύ μικρή.

Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται τότε η εμπέδηση που βλέπει ο μετατροπέας στους τερματικούς ακροδέκτες του αυξάνεται και είναι αυτή του εναπομείναντος τοπικού φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αρμονικές ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα να προκαλέσουν αύξηση των αρμονικών της τερματικής τάσης. Συνεπώς τότε έχουμε αύξηση του THD και ανίχνευση της νησιδοποίησης. (12) (10)

Μια άλλη προσέγγιση είναι να καταγράφονται μεταβολές σε συγκεκριμένες αρμονικές της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Πιο συγκεκριμένα μεταβολές στην τρίτη αρμονική της τερματικής τάσης του διασυνδεδεμένου συστήματος μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό της νησιδοποίησης. Από πειράματα που έχουν γίνει εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η τρίτη αρμονική θα αυξηθεί σημαντικά αν συμβεί νησιδοποίηση κι αυτό εξαιτίας της μαγνητικής υστέρησης των μετασχηματιστών που παραμένουν συνδεδεμένοι στο ΔΣ μετά την εμφάνιση της νησιδοποίησης. (10) Μπορούμε λοιπόν έτσι να εντοπίσουμε τη νησιδοποίηση.

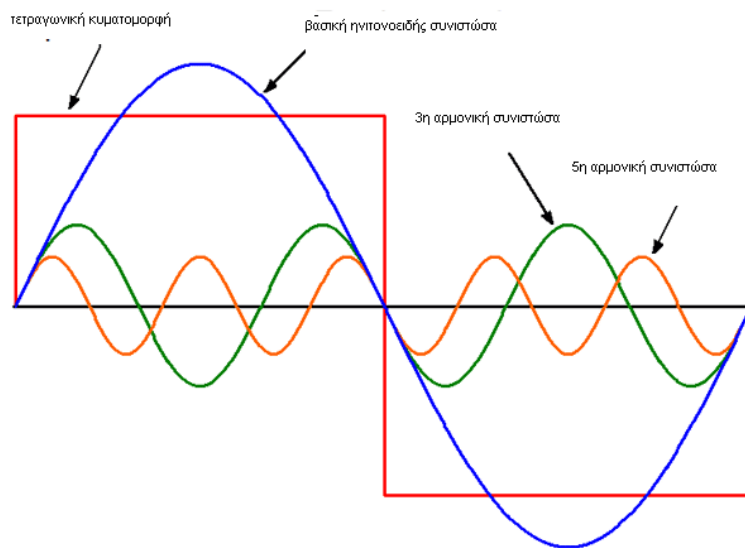
Και αυτή η μέθοδος έχει αδύναμο σημείο. Έτσι στην περίπτωση που το RLC φορτίο λειτουργεί ως κατωδιαβατό (low pass) φίλτρο τότε οι αρμονικές που χρησιμεύουν για τον εντοπισμό του φαινομένου μπορεί να αποκοπούν από το ίδιο το φορτίο-φίλτρο. Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση η μέθοδος μπορεί να αποτύχει.

Ολική Αρμονική Παραμόρφωση THD :

Με τη χρήση και λειτουργία κατάλληλων διακοπτικών στοιχείων σε κατάλληλη διάταξη ο inverter μετατρέπει την dc τάση σε εναλλασσόμενη τετραγωνική κυματομορφή τάσης. Αυτή αναλύεται κατά fourier σε σειρά ημιτόνων αποτελούμενη από απείρους όρους. Μας ενδιαφέρει η βασική αρμονική συνιστώσα (50 Hz) που είναι και η συχνότητα του δικτύου.

Εκτός από τη βασική λοιπόν αρμονική της τάσης εξόδου του inverter έχουμε και παραγωγή μεγάλου πλήθους αρμονικών υψηλών συχνοτήτων οι οποίες όμως μπορεί να απομακρύνονται από κατάλληλα φίλτρα. Η ποιότητα της κυματομορφής τάσης της εξόδου του inverter μπορεί να εκφραστεί από την ολική αρμονική παραμόρφωση THD η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της τετραγωνικής ρίζας των τετραγώνων των αρμονικών τάσης προς τη θεμελιώδη αρμονική της τάσης.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$



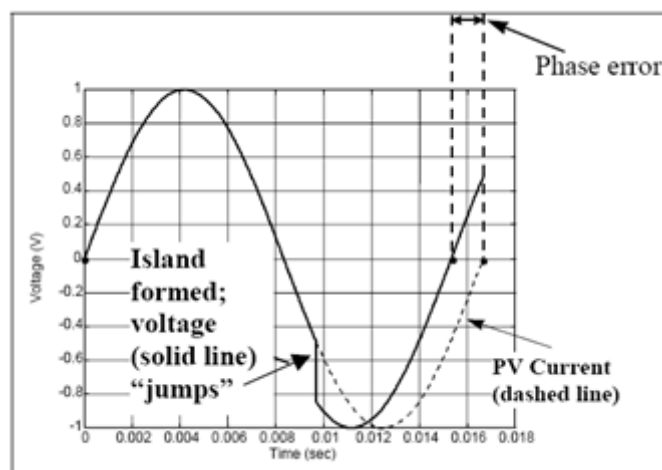
5.3.3. Ανίχνευση μεταβολών φάσης (phase jump)

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην παρακολούθηση της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος στους τερματικούς ακροδέκτες του μετατροπέα. Ο εντοπισμός ενός ξαφνικού άλματος στη διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος υποδεικνύει ότι βρισκόμαστε αντιμέτωποι με το φαινόμενο της νησιδοποίησης.

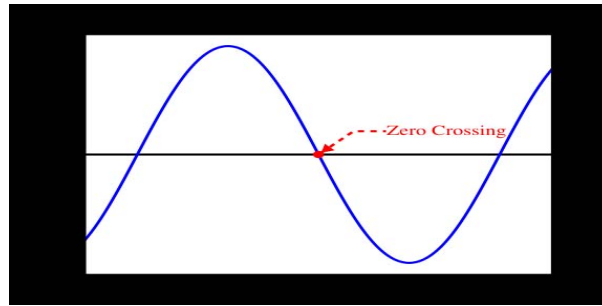
Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η κυματομορφή ρεύματος της εξόδου του μετατροπέα θα είναι (σχεδόν) συγχρονισμένη με την τάση εξόδου του μετατροπέα ($\cos\phi \approx 1$ και $\phi \approx 0$) και άρα συγχρονισμένη με την τάση του δικτύου. Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται τότε η τάση στη μεριά εξόδου του μετατροπέα θα

συγχρονιστεί με την τάση του απομένοντος τοπικού φορτίου. Συνεπώς θα έχουμε μια απότομη αλλαγή στη διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης στη μεριά εξόδου του μετατροπέα και έτσι ανιχνεύουμε τη νησιδοποίηση.

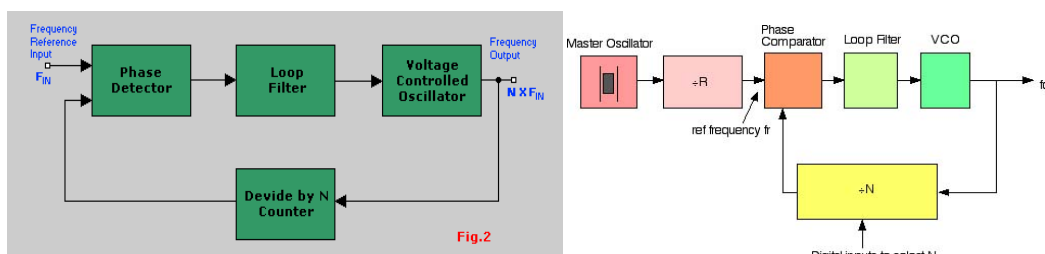
Όπως είδαμε όταν δεν υπάρχει νησιδοποίηση το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα διατηρείται σε φάση με το κεντρικό δίκτυο μέσω της ανίχνευσης των σημείων τομής της κυματομορφής της τάσης v_a με τον άξονα του χρόνου (zero crossings). Γενικά βασικό συστατικό της παραπάνω διαδικασίας αποτελεί το κύκλωμα PLL. Ένα φίλτρο εισόδου αφαιρεί θόρυβο και αρμονικές ανώτερης τάξης από το σήμα εισόδου v_a . Ο συγκριτής φάσης παράγει ένα σήμα του οποίου η ένταση είναι ανάλογη του σφάλματος φάσης μεταξύ των σημάτων που δέχεται στην εισοδό του. Τα σήματα εισόδου του συγκριτή φάσης είναι το φιλτραρισμένο σήμα v_a και η έξοδος του ταλαντωτή, ο οποίος ελέγχεται από τάση. Στα πιο σύγχρονα PLL συγκριτής φάσης χρησιμοποιεί κάποιου είδους μέτρησης του χρόνου μεταξύ των σημείων τομής της κυματομορφής της τάσης με τον άξονα του χρόνου των 2 σημάτων (κυματομορφών) εισόδου του για να καθορίσει το σφάλμα φάσης.



Σχέδιο 42. Διάγραμμα που δείχνει τη λειτουργία της μεθόδου Phase Jump Detection



Το PLL είναι ένας βρόχος ανατροφοδότησης όπου γίνεται σύγκριση της φάσης στην είσοδο με τη φάση στην έξοδο. Τα σύγχρονα PLL μπορούν να συγκρίνουν και τη συχνότητα. Η φάση εξόδου ενός PLL μπορεί να συγχρονιστεί με τη φάση ενός σήματος αναφοράς αν χρησιμοποιηθεί ένας ανιχνευτής φάσης για να καθορίζει πότε τα σήματα είναι συγχρονισμένα και αν αλλάξει στιγμιαία η συχνότητα του ταλαντωτή. Σε γενικές γραμμές ένας PLL βρόχος είναι ένα σύστημα ελέγχου το οποίο παράγει ένα σήμα που έχει μια σταθερή σχέση με τη φάση ενός σήματος αναφοράς. Το PLL αποκρίνεται τόσο στη συχνότητα όσο και τη φάση των σημάτων εισόδου του αυξάνοντας ή ελαττώνοντας τη συχνότητα ενός ελεγχόμενου ταλαντωτή μέχρι που η έξοδός του να ταιριάζει με τη συχνότητα και τη φάση ενός σήματος αναφοράς. Ο συγκριτής φάσης συγκρίνει τις συχνότητες και φάσεις 2 σημάτων εισόδου και έχει ως έξοδο σήμα ανάλογο της διαφοράς τους (σήμα σφάλματος). Τα 2 σήματα εισόδου του είναι το σήμα αναφοράς (που έχει τη συχνότητα αναφοράς) και η έξοδος του VCO. Αν η f_{ref} δεν ισούται με την f_{vco} τότε το σήμα σφάλματος αναγκάζει το vco να μεταβάλλει την έξοδο του ώστε αυτή να συμπίπτει με την f_{ref} . Έτσι ο vco γρήγορα κλειδώνει στην f_{ref} διατηρώντας μια φεζαρισμένη σχέση με το σήμα εισόδου.



Σχέδιο 43. Βασικό κύκλωμα PLL (13)

5.4 Περιγραφή ενεργητικών τεχνικών

Στην παράγραφο αυτή θα εξετάσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας μερικών βασικών ενεργητικών τεχνικών έναντι νησιδοποίησης. Αυτές είναι:

- Μέτρηση εμπέδησης του δικτύου (Impedance measurement)
- Ανίχνευση της εμπέδησης για συγκεκριμένη συχνότητα
- Τεχνικές μεταβολής της συχνότητας και της φάσης με θετική ανάδραση
- Μέθοδος μεταβολής του πλάτους της τάσης με θετική ανάδραση (Sandia Voltage Shift)

5.4.1 Μέτρηση εμπέδησης του δικτύου (Impedance measurement)

Κατά τη μέθοδο αυτή μετράμε περιοδικά την εμπέδηση που «βλέπει» το διασυνδεδεμένο σύστημα στους τερματικούς ακροδέκτες του, άρα ουσιαστικά μετράμε την εμπέδηση του δικτύου. Όταν το κεντρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο τότε η εμπέδηση που «βλέπει» το ΔΣ είναι πολύ μικρή. Όταν όμως έχουμε αποσύνδεση τότε η εμπέδηση που «βλέπει» είναι μεγάλη -αυτή του εναπομείναντος φορτίου. Με την ανίχνευση αυτής της πιθανής μεταβολής στη μετρούμενη εμπέδηση μπορούμε να συμπεράνουμε αν το κεντρικό δίκτυο έχει αποσυνδεθεί και έτσι να εντοπίσουμε το φαινόμενο της νησιδοποίησης.

Με αυτή τη μέθοδο ουσιαστικά μετράμε ανά περιόδους το λόγο dv_a / di και για αυτό η μέθοδος ονομάζεται και μέτρηση της εμπέδησης. Όταν λοιπόν ο λόγος $\Delta Z = dv_a / di$ μετρηθεί να υπερβαίνει την τιμή πx των 0.5-1 ohm τότε ουσιαστικά ανιχνεύεται το φαινόμενο της νησιδοποίησης. Τότε το ΔΣ πρέπει να αποσυνδεθεί μέσα σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα πx 0.5 sec.

Μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το διανεμημένο διασυνδεδεμένο σύστημα (ΔΣ) ως μια πηγή ρεύματος που τροφοδοτεί το δίκτυο με ρεύμα το οποίο περιγράφεται από τη σχέση :

$$i_{\Delta\Sigma} = I_{\Delta\Sigma} \sin(2\pi f_{\Delta\Sigma} + \theta_{\Delta\Sigma})$$

Βλέπουμε ότι υπάρχουν 3 παράμετροι του ρεύματος της εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος που μπορούν να μεταβληθούν : το πλάτος $I_{\Delta\Sigma}$, η συχνότητα $f_{\Delta\Sigma}$ και η φάση $\theta_{\Delta\Sigma}$. Με τη μέθοδο μεταβολής της εξόδου επιβάλλουμε μια περιοδική διαταραχή σε μια από αυτές τις τρεις παραμέτρους, συνήθως στο πλάτος. Μια διαταραχή στο πλάτος του ρεύματος συνεπάγεται και διαταραχή στην πραγματική ισχύ. Το μέγεθος της διαταραχής στην τάση που προκαλείται από μια διαταραχή ρεύματος όπως παραπάνω εξαρτάται από τις ονομαστικές τιμές της αντίστασης R και της ισχύος του δικτύου. Η σχέση δίνεται:

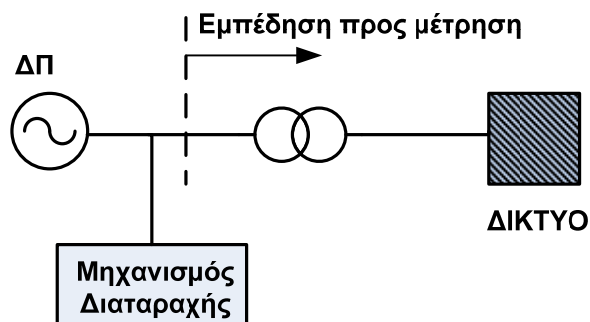
$$P = V^2/R \rightarrow V^2 = PR \rightarrow V = (PR)^{1/2} \rightarrow$$

$$dV/dP = R^{1/2} (P^{1/2}) / dP \rightarrow dV/dP = (1/2) R^{1/2} P^{-1/2} \rightarrow$$

$$\Delta V = \frac{\Delta P}{2} \sqrt{\frac{R}{P}} \quad (9)$$

Με τη σκόπιμη λοιπόν μετρήσιμη διαταραχή ΔI μπορούμε να έχουμε μια μετρήσιμη μεταβολή της πραγματικής ισχύος ΔP και άρα σύμφωνα με την παραπάνω σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε μια μεταβολή στην τάση ΔV . Όταν το κεντρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο δεν βλέπουμε την παραπάνω μεταβολή ΔV αφού ένα ισχυρό δίκτυο χαρακτηρίζεται από σταθερότητα στην τάση. Αν το δίκτυο αποσυνδεθεί αυτή η διαταραχή θα οδηγήσει στην ανίχνευση μιας αλλαγής στην τάση V_a στον κόμβο a , η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και αποτροπή της νησιδοποίησης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί και ως μέθοδος μέτρησης της εμπέδησης. Αν δηλαδή πάρουμε το λόγο $\Delta V / \Delta I$ ουσιαστικά μετράμε την εμπέδηση του δικτύου.

Αν και το δίκτυο έχει πολύ μικρή εμπέδηση στην πράξη αυτή δεν είναι μηδενική. Έτσι πρέπει να υπάρχει ένα κατώτερο όριο εμπέδησης για το οποίο θα θεωρείται ότι το δίκτυο είναι ακόμα συνδεδεμένο. Αν η εμπέδηση του τοπικού φορτίου είναι μικρότερη από αυτό το κατώτερο όριο τότε υπάρχει ο κίνδυνος να μην εντοπιστεί η νησιδοποίηση ακόμα κι αν στην πραγματικότητα το φαινόμενο συμβαίνει.



Σχέδιο 44. Μέτρηση εμπέδησης

5.4.2 Ανίχνευση της εμπέδησης για συγκεκριμένη συχνότητα

Μια εκδοχή της μεθόδου Ανίχνευσης Αρμονικών που είναι μια παθητική μέθοδος βασίζεται στη μελέτη των επιπτώσεων των αρμονικών ρεύματος που εισάγονται ακούσια στο δίκτυο μέσω του inverter. Η μέθοδος τώρα της ανίχνευσης της εμπέδησης για συγκεκριμένη συχνότητα βασίζεται στη μελέτη των επιπτώσεων που έχει η ηθελημένη εισαγωγή μιας συγκεκριμένης αρμονικής ρεύματος μέσω του inverter στο δίκτυο. Αν και θα μπορούσαμε να τη χαρακτηρίσουμε ως μια ειδική περίπτωση της μεθόδου Ανίχνευσης Αρμονικών και άρα όπως είδαμε παθητική επειδή ακριβώς η παραπάνω εισαγωγή είναι εκούσια η μέθοδος μπορεί να καταταχθεί στις ενεργές μεθόδους.

Όταν το κεντρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο και δεδομένου ότι του αντιστοιχεί μια εμπέδηση πολύ μικρότερη από το τοπικό φορτίο τότε η εισαγόμενη αρμονική ρεύματος ρέει στο δίκτυο και συνεπώς δεν παρατηρείται καμιά ανωμαλία στην τάση.

Όταν όμως το δίκτυο αποσυνδέεται τότε η εισαγόμενη αρμονική ρέει στο φορτίο που απομένει συνδεδεμένο με το ΔΣ και χαρακτηρίζεται από μια εμπέδηση συνήθως μεγαλύτερη από αυτή του δικτύου. Τότε το φορτίο παράγει μια αρμονική τάσης η οποία μπορεί να ανιχνευτεί. Το όνομα της μεθόδου προκύπτει από το γεγονός ότι το πλάτος της παραγόμενης αρμονικής τάσης θα είναι ανάλογο της εμπέδησης του φορτίου για τη συχνότητα της συγκεκριμένης αρμονικής. Το τοπικό φορτίο συνήθως αντιμετωπίζεται ως ένα RLC παράλληλα. (10) (9) (12)

5.4.3 Τεχνικές μεταβολής της συχνότητας και της φάσης που χρησιμοποιούν θετική ανάδραση (Frequency and phase shift techniques-positive feedback)

5.4.3.α Γενική αρχή λειτουργίας

Ο μετατροπέας διαθέτει κυκλώματα ελέγχου που ελέγχουν και ρυθμίζουν την συχνότητα, τη φάση και την άεργο ισχύ στους τερματικούς ακροδέκτες του. Η συσκευή μπορεί λοιπόν να ρυθμίζει κάθε φορά τα μεγέθη εξόδου της ώστε να συγχρονίζονται στη συχνότητα του φορτίου που βλέπει στους τερματικούς της ακροδέκτες.

Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται ο μετατροπέας δεν δουλεύει πλέον στη συχνότητα του δικτύου αλλά τείνει να συγχρονιστεί σε μια νέα σταθερή συχνότητα η οποία είναι η συχνότητα συντονισμού του φορτίου που παραμένει συνδεδεμένο στους τερματικούς του ακροδέκτες. Όμως με κατάλληλη εφαρμογή θετικής ανάδρασης στα κυκλώματα έλεγχου του inverter επιτυγχάνεται μια γρήγορη μεταβολή της συχνότητας εξόδου του πάνω ή κάτω από κάποιο κατώφλι (συχνότητας), η υπέρβαση του οποίου σηματοδοτεί την ανίχνευση και διακοπή της νησιδοποίησης με τη χρήση και λειτουργία κατάλληλων ρελε προστασίας έναντι υποσυχνοτήτων/υποσυχνοτήτων.

Συνεπώς κατά την αποσύνδεση του δικτύου χωρίς την εφαρμογή θετικής ανάδρασης η συχνότητα εξόδου της συσκευής αλλάζει σε ένα νέο σταθερό σημείο λειτουργίας το οποίο καθορίζεται από το τοπικό απόμειναν φορτίο. Με τη θετική ανάδραση όμως εισάγεται αστάθεια που απομακρύνει τη συχνότητα εξόδου του inverter από το νέο σταθερό σημείο στο οποίο τείνει να συγχρονιστεί, «οδηγώντας» την ταυτόχρονα στην υπέρβαση των ορίων (της συχνότητας) για τα οποία έχουμε ανίχνευση της νησιδοποίησης.

Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας έχουν τα πλεονεκτήματα να είναι ιδιαίτερα γρήγορες στον εντοπισμό και διακοπή της νησιδοποίησης, να διαθέτουν μια περιορισμένη ζώνη μη ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης και να είναι εύκολα ενσωματώσιμες στα κυκλώματα ελέγχου του μετατροπέα. Τέλος με κατάλληλο σχεδιασμό της ανάδρασης μπορούν να γίνουν ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε συστήματα που χρησιμοποιούν πολλούς μετατροπείς. (12)

Παρακάτω περιγράφονται δύο βασικές τεχνικές αυτού του τύπου, η Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση [AFDPF(with positive feedback) or Sandia Frequency Drift] και η Slip Mode Frequency Shift (SMS). Αρχικά

περιγράφεται και η «απλή» μέθοδος Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας (AFD) η οποία είναι μια μέθοδος μεταβολής της συχνότητας χωρίς θετική ανάδραση ωστόσο αποτελεί βάση της μεθόδου «Μεταβολή της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση».

5.4.3.β Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας (Active Frequency Drift - AFD)

Με την μέθοδο αυτή το ρεύμα που εισάγεται στον κόμβο α από τον μετατροπέα παραμορφώνεται ανεπαίσθητα ώστε να προκαλείται μια συνεχής μεταβολή στη συχνότητα. Όταν με την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας η συχνότητα υπερβεί κάποια όρια τότε μπαίνουν σε λειτουργία κατάλληλα ρελε (υπερσυχνότητας) και το ΔΣ αποσυνδέεται. Αυτή η διαδικασία συμβαίνει μόνο όταν το κεντρικό δίκτυο είναι αποσυνδεδεμένο. Όταν όμως το ΔΣ είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο είναι αδύνατον να αλλάξει η συχνότητα εξαιτίας της σταθερότητας στη συχνότητα που επιβάλλεται από το δίκτυο.

Όταν λοιπόν το ΔΣ αποσυνδέεται από το δίκτυο η συχνότητα της Va αναγκάζεται να ανέλθει ή να κατέλθει αφού ο μετατροπέας προσπαθεί να συγχρονιστεί με τη συχνότητα συντονισμού του φορτίου που βλέπει στους ακροδέκτες του.

Στο σχήμα φαίνεται ένα παράδειγμα κυματομορφής ρεύματος εξόδου inverter που προκαλεί αύξηση της συχνότητας σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο καθώς και μια μη παραμορφωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή. Φαίνονται και τα παρακάτω μεγέθη:

T_{vutil} είναι η περίοδος της τάσης του δικτύου,

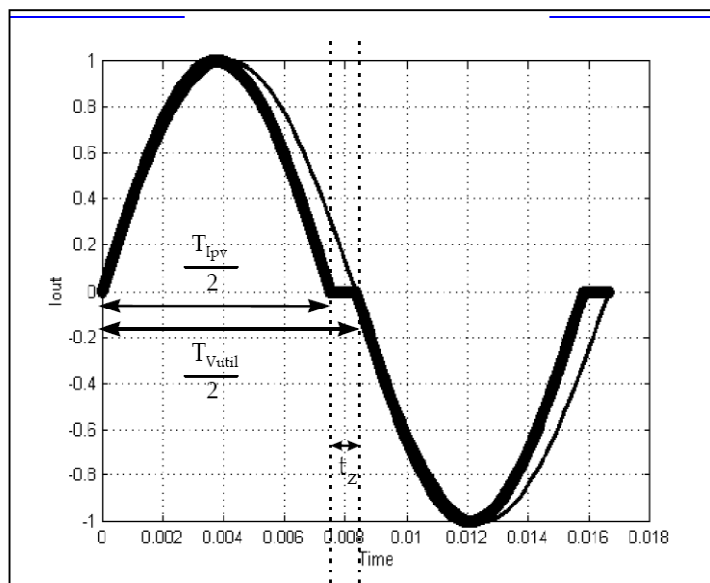
$T_{I_{pv}}$ είναι η περίοδος του ημιτονοειδούς κομματιού της κυματομορφής ρεύματος εξόδου του inverter,

T_z είναι ο χρόνος όπου το πλάτος του ρεύματος είναι μηδέν

Ορίζεται ο λόγος cf (chopping fraction)

$$cf = \frac{T_z}{\frac{T_{vutil}}{2}}$$

Ο λόγος cf επιτρέπει την ανίχνευση της νησιδοποίησης διαμέσου της ανοδικής ή καθοδικής μεταβολής της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Με την ανίχνευση αυτής της μεταβολής επιτυγχάνεται η αποσύνδεση του ΔΣ. Εξαιτίας όμως της καθορισμένης τιμής του λόγου cf η μέθοδος αυτή αργεί να ανιχνεύσει τη νησιδοποίηση.

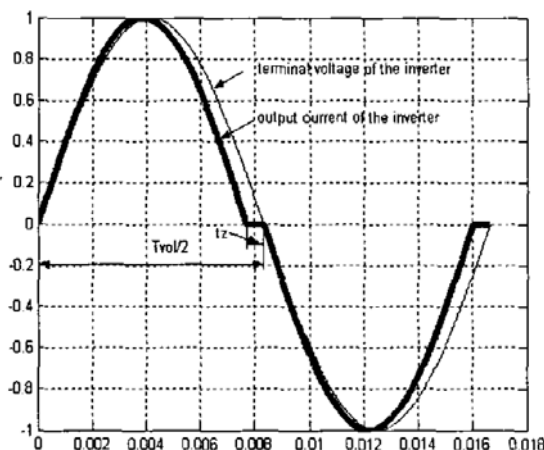


Σχέδιο 45. Παράδειγμα κυματομορφής που χρησιμοποιείται στην μέθοδο «Ενεργός μεταβολή της Συχνότητας - AFD» για την ανίχνευση και διακοπή της νησιδοποίησης. Δείχνεται επίσης μια καθαρά ημιτονοειδής κυματομορφή .

Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο: στην πρώτη ημιπερίοδο ($T_{vutil} / 2$) το ημιτονοειδές κομμάτι της κυματομορφής του ρεύματος εξόδου του inverter παρουσιάζει μια συχνότητα ελάχιστα μεγαλύτερη από τη συχνότητα της τάσης του δικτύου ($T_{I_{pv}}/2$ μικρότερο από $T_{vutil} / 2$) . Όταν η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου του inverter γίνεται για πρώτη φορά μηδέν παραμένει μηδέν ώσπου να αρχίσει η δεύτερη ημιπερίοδος, δηλαδή για το χρονικό διάστημα T_z .

Για το δεύτερη ημιπερίοδο ($T_{vutil} / 2$) το ρεύμα ακολουθεί ημιτονοειδή κυματομορφή που τώρα όμως είναι αρνητική. Όταν το ρεύμα του inverter γίνεται πάλι μηδέν παραμένει μηδέν μέχρι η που η κυματομορφή της τάσης του δικτύου να τμήσει τον άξονα του χρόνου (χρονικό διάστημα T_z).

Στην περίπτωση που το δίκτυο αποσυνδέεται: Όταν αυτή η κυματομορφή του ρεύματος εφαρμόζεται σε ένα ωμικό φορτίο σε κατάσταση νησιδοποίησης η τάση θα ακολουθήσει την παραμορφωμένη κυματομορφή του ρεύματος και θα γίνει μηδέν σε μικρότερο χρόνο από ότι για μια καθαρά ημιτονοειδή κυματομορφή ρεύματος. Αυτό συνεπάγεται ότι το δεύτερο σημείο τομής της τάσης με τον άξονα του χρόνου θα εμφανιστεί νωρίτερα από το αναμενόμενο ($T_{vutil} - T_z$ μικρότερο T_{vutil}). Έτσι προκύπτει σφάλμα στη διαφορά φάσης μεταξύ V_a και i_{pv-inv} . Ο μετατροπέας αυξάνει την συχνότητα του i_{pv-inv} για να διορθώσει το σφάλμα στη διαφορά φάσης. Η τάση του ωμικού φορτίου ακολουθώντας την κυματομορφή του ρεύματος εμφανίζει πάλι πιο νωρίς σημείο μηδενισμού (τομή με τον άξονα του χρόνου) σε σχέση με το αναμενόμενο. Ο inverter για άλλη μια φορά ανιχνεύει σφάλμα στη φάση τάσης ρεύματος και αυξάνει πάλι τη συχνότητα. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τελικά η συχνότητα να υπερβεί κάποιο πάνω ή κάτω όριο και να ενεργοποιηθούν τα ρελέ προστασίας έναντι υπερσυχνότητας / υποσυχνότητας. Τότε το ΔΣ αποσυνδέεται και η νησιδοποίηση σταματά.



5.4.3.γ Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση [AFDPF(with positive feedback) or Sandia Frequency Drift]

Αν στην προηγούμενη μέθοδο προσθέσουμε θετική ανάδραση τότε προκύπτει μια βελτιωμένη μέθοδος, η Ενεργός Μεταβολή της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση. Η θετική ανάδραση εφαρμόζεται στη συχνότητα της τάσης v_a για να οδηγηθεί τελικά εκτός των αποδεκτών ορίων. Για την εισαγωγή της θετικής ανάδρασης το cf , όπως

αυτό φαίνεται στο σχήμα 7, εκφράζεται ως συνάρτηση του σφάλματος στη συχνότητα της γραμμής.

Μια σχέση που δίνει το cf μπορεί να είναι η :

$$cf = cf_0 + K (f_a - f_{line}) \text{ όπου}$$

cf_0 είναι ο λόγος cf όταν δεν υπάρχει σφάλμα στη συχνότητα

K είναι ένα κέρδος επιτάχυνσης που δεν αλλάζει κατεύθυνση (accelerating gain)

f_a είναι η μετρούμενη συχνότητα της v_a

f_{line} η συχνότητα της γραμμής.

Όταν το δίκτυο είναι συνδεδεμένο και δεν υπάρχει νησιδοποίηση, ανιχνεύονται ανεπαίσθητες αλλαγές στη συχνότητα και η μέθοδος προσπαθεί να αυξήσει τη μεταβολή στη συχνότητα όμως η σταθερότητα του δικτύου εμποδίζει οποιαδήποτε μεταβολή.

Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται και η συχνότητα f_a αυξάνεται τότε και το σφάλμα συχνότητας αυξάνεται. Το cf επίσης αυξάνεται και ο inverter αυξάνει τη συχνότητα του. Ο inverter λοιπόν λειτουργεί ώστε να εντείνει την απόκλιση της συχνότητας και με τη συνέχιση αυτής της διαδικασίας έχουμε παραβίαση των ορίων (για τη συχνότητα) όπου ενεργοποιούνται τα συστήματα προστασίας έναντι υπερσυχνοτήτων.

Η τελευταία πλεονεκτεί της προηγούμενης αφού είναι ταχύτερη στην ανίχνευση και διακοπή της νησιδοποίησης ενώ έχει και μικρότερη NDZ.

5.4.3.δ Slip Mode Frequency Shift (SMS)

Η μέθοδος χρησιμοποιεί θετική ανάδραση για να αποσταθεροποιήσει τον μετατροπέα όταν το κεντρικό δίκτυο αποσυνδέεται και να αποτρέψει τη λειτουργία του σε ένα νέο σταθερό σημείο. Η ανάδραση εφαρμόζεται στη φασική γωνία (φ) που έχει η τάση V_a στο κοινό σημείο διασύνδεσης a . Η εφαρμοζόμενη ανάδραση δεν επηρεάζει τη συχνότητα του δικτύου.

Συνήθως ο inverter λειτουργεί υπό σχεδόν μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης εξόδου ρυθμίζεται να είναι

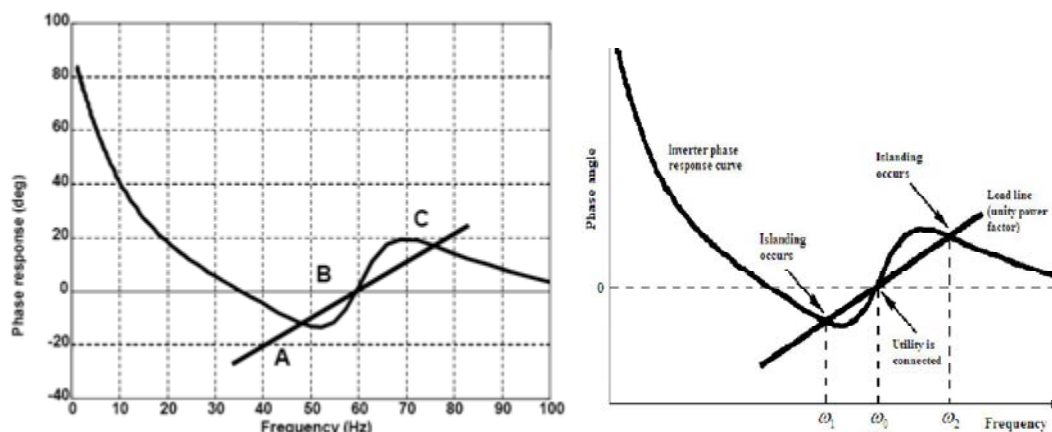
μηδέν, ή τουλάχιστον όσο γίνεται πιο κοντά στο μηδέν. Στη μέθοδο όμως αυτή η διαφορά φάσης ρεύματος-τάσης, αντί να είναι πάντα μηδέν, ρυθμίζεται να είναι συνάρτηση της συχνότητας της τάσης του κοινού σημείου σύνδεσης (V_a) όπως στο σχήμα 5 (καμπύλη μορφής-S). Στο σχήμα 5 φαίνονται οι καμπύλες φάσης-συχνότητας του inverter (μορφής-S) και ενός RLC φορτίου με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (ευθεία γραμμή). Για μια περιοχή κοντά στη συχνότητα δικτύου ω_0 οι παραπάνω καμπύλες σχεδιάζονται έτσι ώστε: η φάση του inverter να αυξάνεται ταχύτερα από τη φάση του RLC φορτίου. Αυτό καθιστά την συχνότητα του δικτύου ένα ασταθές σημείο λειτουργίας για τον inverter

Όσο το κεντρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο έχουμε σταθερό σημείο λειτουργίας για τη συχνότητα και τη διαφορά φάσης. Αυτό είναι το σημείο τομής της καμπύλης φορτίου και inverter, δηλαδή το σημείο B όπου έχουμε συχνότητα 60 Hz και διαφορά φάσης 0.

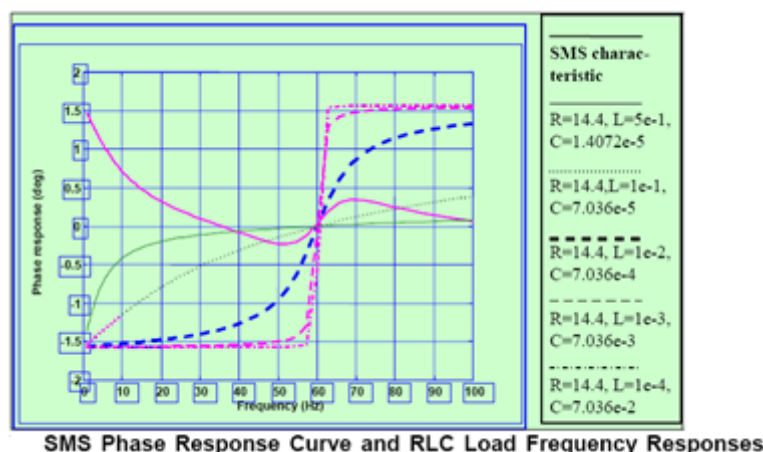
Όταν όμως το κεντρικό δίκτυο αποσυνδέεται το νέο σημείο λειτουργίας για τον inverter και το φορτίο πρέπει να βρίσκεται σε κάποιο σημείο τόμής της χαρακτηριστικής καμπύλης φάσης-συχνότητας του inverter (καμπύλη-S) και της καμπύλης φάσης-συχνότητας του φορτίου (ευθεία γραμμή). Όταν το λοιπόν δίκτυο αποσυνδέεται : αν υπάρξει κάποια μικρή διαταραχή στη συχνότητα της τάσης στον κόμβο α (V_a) ,λόγω της μορφής-S της χαρακτηριστικής (διαφοράς φάσης - συχνότητας) του μετατροπέα θα προκληθεί αύξηση του σφάλματος φάσης. Αυτός είναι ο μηχανισμός της θετικής ανάδρασης και δημιουργεί μια κλασσική αστάθεια. Αυτή η αστάθεια του inverter στο ω_0 προκαλεί την περαιτέρω ενίσχυση της διαταραχής από τον ίδιο τον inverter. Έτσι το σύστημα οδηγείται σε ένα νέο σημείο λειτουργίας, δηλαδή στο σημείο A ή C, ανάλογα με την κατεύθυνση της διαταραχής. Αν η χαρακτηριστική διαφοράς φάσης-συχνότητας του inverter είναι κατάλληλα σχεδιασμένη για το RLC φορτίο ώστε τα σημεία A και C να βρίσκονται εκτός των ορίων για τη συχνότητα τότε τα ρελε υπερσυχνότητας / υποσυχνότητας θα θέσουν τον inverter εκτός λειτουργίας και το ΔΣ θα αποσυνδεθεί.

Η SMS μπαίνει σε εφαρμογή μέσα από τον κατάλληλο σχεδιασμό του φίλτρου εισόδου του PLL. Ας πάρουμε πρώτα την περίπτωση που το φίλτρο εισόδου του PLL

δεν έχει SMS. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά φάσης ρεύματος-τάσης θα ήταν μηδέν για όλες τις συχνότητες της γραμμής. Αν στη νησίδα είχαμε μια διαταραχή της συχνότητας προς τα πάνω, το PLL θα ανίχνευε ένα αρνητικό σφάλμα φάσης και θα μείωνε τη συχνότητά με αποτέλεσμα να φέρει σε φάση το ρεύμα εξόδου του μετατροπέα και την τάση στον κόμβο α. Τώρα ας πάρουμε την περίπτωση που το PLL έχει SMS και η χαρακτηριστική καμπύλη φάσης και συχνότητας του φίλτρου εισόδου του PLL συμπίπτει με την SMS-καμπύλη όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 6. Όταν η συχνότητα αυξάνεται τότε εξαιτίας της θετικής ανάδρασης στη φάση που προκαλείται από την SMS- χαρακτηριστική στο φίλτρο εισόδου του PLL, το PLL αυξάνει τη συχνότητα του. Το PLL λειτουργεί στην λάθος κατεύθυνση για να διορθώσει το σφάλμα φάσης. Αυτή η κατάσταση συνεχίζεται μέχρι που να φτάσουμε σε μια συχνότητα για την οποία οι χαρακτηριστικές καμπύλες συχνότητας-φάσης του φορτίου και του μετατροπέα τέμνονται ξανά(σημείο C). Μπορούμε έτσι να δούμε την αστάθεια που εισάγει το SMS. Ενεργεί ώστε να οδηγήσει το σημείο λειτουργίας μακριά από τη συχνότητα του δικτύου μιας και η φάση του αυξάνει ταχύτερα και προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη φάση του φορτίου. (9) (10) (12)



Σχέδιο 46. Γραφική παράσταση της φάσης μεταξύ τάσης-ρεύματος και συχνότητας σε μετατροπέα που χρησιμοποιεί την SMS μέθοδο



5.4.4 Μεταβολή Τάσης με Θετική Ανάδραση - Sandia Voltage Shift (SVS)

Είναι μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιούν θετική ανάδραση για την αποτροπή της νησιδοποίησης. Στην SVS μέθοδο η θετική ανάδραση εφαρμόζεται στο πλάτος της V_a . Αν υπάρξει ελάττωση στο πλάτος της V_a ο μετατροπέας μειώνει το ρεύμα εξόδου και έτσι μειώνει και την ισχύ εξόδου του. Αν το κεντρικό δίκτυο είναι συνδεδεμένο υπάρχει μηδαμινή επίπτωση από την μείωση της ισχύος.

Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται και υπάρχει μείωση της V_a θα υπάρξει επιπλέον μείωση της V_a όπως επιβάλλεται από την απόκριση του RLC σύμφωνα με το νόμο του Ohm όταν υπάρχει μείωση του ρεύματος που το διαρρέει. Αυτή η επιπλέον μείωση του πλάτους της τάσης V_a οδηγεί με τη σειρά της σε περαιτέρω μείωση του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα ή οποία τελικά οδηγεί σε μια μείωση της τάσης που μπορεί να ανιχνευθεί από τα ρελέ προστασίας έναντι υπότασης.

Είναι δυνατό να αυξηθεί ή να ελαττωθεί η ισχύς εξόδου του μετατροπέα ώστε να έχουμε λειτουργία των προστασιών έναντι υπέρτασης ή έναντι υπότασης αντίστοιχα. Προτιμάται ωστόσο η δεύτερη περίπτωση από την πρώτη, δηλαδή μείωση της ισχύος εξόδου και λειτουργία των προστασιών έναντι υπότασης, αφού έτσι είναι λιγότερο πιθανό να έχουμε καταστροφή του εξοπλισμού.

Ύστερα από έρευνα έχει προταθεί η λογική της επιτάχυνσης της απόκρισης. Το σκεπτικό είναι ότι ο μετατροπέας αποκρίνεται σε μικρές αλλαγές στην πραγματική και άεργο ισχύ οι οποίες είναι επαρκείς για μια περαιτέρω μεταβολή τους στην ίδια

κατεύθυνση. Αν τότε η τάση ή η συχνότητα συνεχίζει να αλλάζει στην ίδια κατεύθυνση η απόκριση επιταχύνεται εκθετικά μέχρι να υπάρξει ενεργοποίηση προστασιών έναντι υπέρτασης ή υπερσυχνότητας. Για παράδειγμα η μείωση στην ισχύ όταν έχουμε νησιδοποίηση θα μπορούσε να είναι 0.5%, 1%, 2%, 4%, 8%, 16%, 32% και η προστασία έναντι υπότασης να ενεργοποιούνταν. Η επιτάχυνση βελτιώνει το χρόνο απόκρισης, κρατάει τις μεταβολές στην ισχύ πολύ μικρές (συνήθως $\leq 1\%$) όταν το δίκτυο είναι παρόν, και δουλεύει καλά σε συστήματα όπου χρησιμοποιούνται πολλοί μετατροπείς.

Η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά αποτελεσματική μιας και έχει μια πολύ μικρή ζώνη μη ανίχνευσης του φαινομένου της νησιδοποίησης και παρά το γεγονός ότι είναι ενεργή δεν δημιουργεί προβλήματα στην ποιότητα της ισχύος του κεντρικού δικτύου με την προϋπόθεση βέβαια ότι αυτό είναι ικανοποιητικά ισχυρό. (10) (9)

5.5 Τυπική συσκευή αυτόματης αποσύνδεσης μεταξύ παραγωγού και δικτύου.

Η συσκευή που βρίσκεται ενσωματωμένη στον μετατροπέα παίζει το ρόλο μιας διεπιφάνειας ασφαλείας μεταξύ του ΔΣ και του δικτύου εξασφαλίζοντας την αυτόματη αποσύνδεση του ΔΣ σε περίπτωση νησιδοποίησης. Το βασικό κύκλωμα ελέγχου και αποσύνδεσης επιβάλλεται από τον κανονισμό DIN VDE 0126 και φαίνεται στο σχήμα.

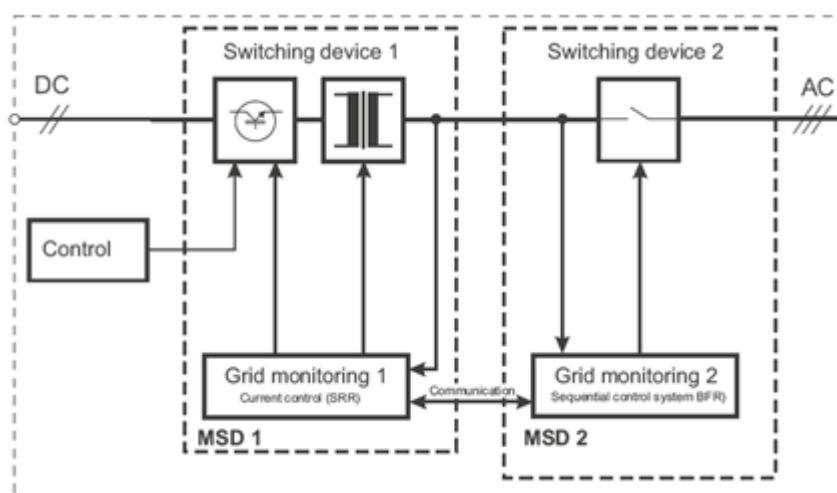
Αποτελείται από δυο διακοπτικές διατάξεις (MSD) σε σειρά που διαρκώς παρακολουθούν μεγέθη του δικτύου και διαθέτουν αυτόματα στοιχεία αποσύνδεσης (διακόπτες-ρελε) που ενεργοποιούνται όταν χρειαστεί.

Τα 2 MSD είναι συνδεδεμένα σε σειρά αλλά ελέγχονται και λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Τα μετρούμενα μεγέθη είναι η εμπέδηση δικτύου, η τάση, και η συχνότητα. Έχουμε αποσύνδεση όταν οι τιμές των μετρήσεων υπερβούν τα αντίστοιχα καθορισμένα όρια για τα μεγέθη αυτά. Στις διατάξεις χρησιμοποιούνται διάφορες από τις παθητικές και ενεργητικές μεθόδους ανίχνευσης και διακοπής της νησιδοποίησης που είδαμε παραπάνω. (9)

Οι κατασκευαστές των μετατροπέων δεν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον ακριβή τρόπο προστασίας έναντι νησιδοποίησης. Σε μια προσπάθεια να υπερκεράσουμε τα «βιομηχανικά μυστικά» που όμως απέτυχε καταφέραμε να βρούμε μόνο τα ακόλουθα τετριμμένα στοιχεία που αφορούν την καθιερωμένη συσκευή για προστασία έναντι νησιδοποίησης για την εταιρία SMA.

Στη συσκευή ανίχνευσης και αυτόματης διακοπής σε περίπτωση νησιδοποίησης η SMA υιοθετεί μερικές από τις μεθόδους που συναντήσαμε στις προηγούμενες παραγράφους. Πρόκειται για συνδυασμό ενεργητικών και παθητικών τεχνικών. Έτσι έχουμε τις 3 ακόλουθες περιπτώσεις. Παρακολούθηση και μέτρηση εμπέδησης (ενεργητική μέθοδος) έχουμε ανίχνευση και αποσύνδεση σε περίπτωση απότομης μεταβολής της. Λειτουργεί όταν $\Delta Z \geq 1 \text{ Ohm}$. (παλιότερα ήταν στο 0.5 ohm). Παρακολούθηση τάσης (παθητική μέθοδος) μεταβολή στο πλάτος και τη φάση-τριφασική καταγραφή. Παρακολούθηση συχνότητας με τη χρήση ταλαντωτή. (14)

Το βασικό τυποποιημένο κύκλωμα της συσκευής για προστασία έναντι νησιδοποίησης σύμφωνα με τον κανονισμό DIN VDE 0126 παρατίθεται στο παρακάτω σχέδιο.



Σχέδιο 47. Τυπική συσκευή παρακολούθησης και διακοπής έναντι νησιδοποίησης

Κεφάλαιο 6

Προστασίες

6.1 Βασικές έννοιες

Οι διατάξεις προστασίας αποσκοπούν στην εξασφάλιση της λειτουργίας διαφόρων στοιχείων σε μια ευρεία περιοχή και στην απόζευξη των στοιχείων εκείνων, τα οποία σε περιπτώσεις *υπερφορτίσεων* και *σφαλμάτων* κινδυνεύουν να καταπονηθούν περισσότερο από όσο επιτρέπεται και να καταστραφούν.

Υπερένταση: χρησιμοποιείται για ένταση μεγαλύτερη της ονομαστικής που μπορεί να εμφανιστεί σε α)λειτουργία χωρίς σφάλμα ή β)σε βραχυκύκλωμα.

Υπερφόρτιση: ένταση μεγαλύτερη της ονομαστικής που δεν οφείλεται σε σφάλμα.

Η προστασία έναντι υπερεντάσεων είναι η προστασία διάφορων στοιχείων της εγκατάστασης τόσο έναντι ρευμάτων υπερφόρτισης όσο και έναντι ρευμάτων βραχυκυκλώσεως. \

Τα ρεύματα υπερφόρτισης μπορεί να μην καταστρέφουν άμεσα στοιχεία της εγκατάστασης ωστόσο συμβάλλουν καθοριστικά στην ανύψωση της θερμοκρασίας τους και τελικά στην πρόωρη γήρανση του στοιχείου που διαρρέουν. Όσο

μεγαλύτερη είναι η διάρκεια και το μέγεθος της μη επιτρεπτής θερμοκρασίας εξαιτίας των παραπάνω ρευμάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η «φθορά» που του προκαλούν. Να σημειώσουμε ακόμα ότι όταν οι εντάσεις υπερφορτίσεως έχουν μεγάλες τιμές και δε διακοπούν έγκαιρα μπορεί τελικά να οδηγήσουν και σε βραχυκύκλωμα. Τέλος πρέπει να επισημανθεί ότι σημαντικές υπερεντάσεις βραχείας διάρκειας εμφανίζονται και κατά την κανονική λειτουργία χωρίς να προκαλούν ανεπίτρεπτη ανύψωση της θερμοκρασίας πχ τα ρεύματα ζεύξεως μετασχηματιστών.

Τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι τόσο μεγάλα ώστε σε πολύ σύντομο χρόνο να προκαλούν ανεπίτρεπτες υπερθερμάνσεις όχι μόνο στο σημείο του σφάλματος αλλά και σε άλλα στοιχεία που διαρρέονται από το ρεύμα αυτό. Οι υπερθερμάνσεις αυτές είναι υπεύθυνες για καταστροφή του εξοπλισμού ή ακόμα και για πυρκαγιά.

Γίνεται συνεπώς σαφές ότι οι υπερεντάσεις πρέπει να διακόπτονται σε σχετικά σύντομο χρόνο χωρίς να προλάβουν να προκαλέσουν υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης θερμοκρασίας. (15)

6.2 Διατάξεις προστασίας XT

Οι διατάξεις προστασίας έναντι υπερεντάσεων (ρεύματα υπερφόρτισης και ρεύματα βραχυκυκλώσεως) πρέπει:

- Να επιτρέπουν τη ροή των παροδικών υπερεντάσεων κατά την κανονική λειτουργία όπως είναι τα ρεύματα ζεύξεως μετασχηματιστών.
- Να διακόπτουν την τροφοδότηση πριν η θερμοκρασία του στοιχείου που προστατεύουν υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή.
- Να διακόπτουν στο μικρότερο δυνατό χρόνο τα ρεύματα βραχυκύκλωσης.
- Να εξασφαλίζουν τη διακοπή μόνο του τμήματος του κυκλώματος στο οποίο παρουσιάζεται η υπερένταση (επιλογική προστασία).

Οι διατάξεις προστασίας συγκροτούνται κυρίως από μέσα προστασίας που λειτουργούν με κριτήριο το ρεύμα. Έτσι έχουμε: ασφάλειες τηκτών, αυτόματους διακόπτες και ηλεκτρονόμους (ρελαί) υπερεντάσεως.

6.2.1 Ασφάλειες

Οι ασφάλειες είναι βασικά ένα μεταλλικό νήμα που παρεμβάλλεται στη γραμμή την οποία προστατεύει. Το νήμα αυτό (τηκτό) υπερθερμαίνεται και τήκεται διακόπτοντας το κύκλωμα όταν η ένταση του ρεύματος υπερβεί για ορισμένο χρόνο μια ορισμένη τιμή. Το νήμα της ασφάλειας περιβάλλεται από άμμο, όπου γίνεται η σβέση του ηλεκτρικού τόξου, το οποίο δημιουργείται κατά τη διακοπή του ρεύματος. Η άμμος βρίσκεται σε ένα μονωτικό περίβλημα συνήθως από πορσελάνη.

Οι ασφάλειες είναι τα πιο φθηνά και αποτελεσματικά μέσα προστασίας έναντι ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Παρέχουν επίσης προστασία έναντι υπερφορτίσεως γραμμών όχι όμως μετασχηματιστών και κινητήρων. Κατασκευαστικά έχουμε βασικά 2 είδη ασφαλειών τις κοχλιωτές και τις μαχαιρωτές .

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ασφαλειών είναι τα ακόλουθα:

- ο In : ονομαστική ένταση ασφάλειας είναι η μέγιστη ένταση συνεχούς φόρτισης χωρίς υπέρβαση της μέγιστης θερμοκρασίας του τηκτού και των ακροδεκτών.
- ο Κάτω Οριακή Ένταση : η μέγιστη ένταση η οποία μπορεί να διαρρέει την ασφάλεια συνεχώς χωρίς να προκαλεί τήξη της. Δεν επιτρέπεται όμως να διαρρέεται συνεχώς από την ένταση αυτή.
- ο Μέγιστη ένταση είναι η ένταση που δεν προκαλεί τήξη της ασφάλειας εντός 2 ωρών πχ 1.3 In.
- ο Ελάχιστη ένταση η οποία προκαλεί οπωσδήποτε τήξη της ασφάλειας εντός 2 ωρών πχ 1.6 In.

Οι ασφάλειες τήκονται για μεγάλες εντάσεις σε τόσο μικρό χρόνο, ώστε να μην μπορεί να αναπτυχθεί το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_s . Η μέγιστη τιμή έντασης βραχυκύκλωσης περιορίζεται από το κρουστικό ρεύμα I_s στο ρεύμα διέλευσης I_D .

6.2.2 Αυτόματοι Διακόπτες Ισχύος

Οι διακόπτες ισχύος ονομάζονται και αυτόματοι και χρησιμοποιούνται και στην προστασία ΧΤ. Όπως είδαμε είναι σε θέση να διακόψουν ή να ζεύξουν ένα κύκλωμα σε συνθήκες ομαλής ή ανώμαλης λειτουργίας, δηλαδή και σε βραχυκύκλωμα. Οι διακόπτες ισχύος έχουν θάλαμο σβέσης ενώ μπορεί να φέρουν σε κάθε φάση θερμικό στοιχείο για προστασία έναντι υπερφόρτισης , ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο για

προστασία έναντι ρευμάτων βραχυκύκλωσης, στοιχείο έλλειψης τάσης, βοηθητικές επαφές σήμανσης και μανδάλωσης, καθώς και στοιχεία καθυστέρησης της πτώσης. Οι αυτόματοι διακόπτες ισχύος κατασκευάζονται από 20 A ως 5000 A .

Οι επαφές ισχύος απομακρύνονται με τη βοήθεια ελατηρίου που πρέπει να οπλιστεί μετά την πτώση του διακόπτη. Ο οπλισμός μπορεί να γίνεται χειροκίνητα με κουμπί, μοχλό ή με κινητήρα οπότε ο οπλισμός γίνεται από μακριά.

Τα χαρακτηριστικά των διακοπών ισχύος είναι τα ακόλουθα :

- Η τάση $\pi\chi$ 400V
- Το ονομαστικό (μέγιστο) συνεχώς επιτρεπόμενο ρεύμα, $\pi\chi$ 2000 A.
- Το θερμικό ρεύμα ενός δευτερολέπτου, δηλαδή η αντοχή των επαφών για 1 sec, $\pi\chi$ 40 kA. Δίνεται συνήθως για μεγάλους διακόπτες >800 A.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα απόξευξης $\pi\chi$ $I_k=110kA$ υπό συγκεκριμένο $\cos\phi$ $\pi\chi$ $\cos\phi=0,4$. Είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αποξεύξει ένας διακόπτης ισχύος. Καμιά φορά δίνεται και η μέγιστη ισχύς απόξευξης $\sqrt{3} V_n I_k$.
- Περιοχή ρύθμισης του θερμικού ή ηλεκτρονικού στοιχείου $I=f(t)$, αν υπάρχει ($\pi\chi$ 1100-2000A).
- Περιοχή ρύθμισης στιγμιαίου (ηλεκτρομαγνητικού) στοιχείου, αν υπάρχει ($\pi\chi$ 6000 – 24000 A).
- Ρελαί έλλειψης τάσης και ρύθμισής του, αν υπάρχει.
- Ρελαί υπέρτασης και ρύθμισής του, αν υπάρχει.
- Μηχανισμός οπλισμού με κινητήρα ή χειροκίνητα. Τάση λειτουργίας κινητήρα.
- Βοηθητικές επαφές για σήμανση, μανδάλωση κλπ.
- Συστήματα ψύξης επαφών με ανεμιστήρα σε μεγάλους διακόπτες $\pi\chi$ 4000 A.

Οι μικροί διακόπτες ισχύος και οι μικροαυτόματοι έχουν όριο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αν το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπερβαίνει αυτό το όριο τότε πρέπει να προτάσσονται ασφάλειες μέχρι 3 βαθμίδες παραπάνω.

Οι διακόπτες ισχύος προτιμώνται έναντι ασφαλειών όταν δεν μπορεί να γίνει επιλεκτική συνεργασία με άλλα μέσα προστασίας. Συνήθως αυτό εμφανίζεται για ρεύματα >400 A.

Οι σύγχρονοι διακόπτες ισχύος έχουν ηλεκτρονόμους που επιτρέπουν επακριβή ρύθμιση τόσο του ρεύματος ρύθμισης όσο και της μορφής της καμπύλης των θερμικών και ηλεκτρομαγνητικών στοιχείων. (15) (16)

6.3 Διατάξεις προστασίας MT

6.3.1 Ασφάλειες YT

Για την προστασία γραμμών MT και μετασχηματιστών (XT-MT) χρησιμοποιούνται συχνά ασφάλειες YT υψηλής ικανότητας διακοπής. Αν και οι ασφάλειες αυτές ονομάζονται ασφάλειες YT τοποθετούνται σε δίκτυα MT, $1\text{kV} \leq V_n \leq 35\text{kV}$. Δεν κατασκευάζονται ασφάλειες για δίκτυα YT, $35\text{kV} \leq V_n \leq 150\text{kV}$.

Οι ασφάλειες YT των μετασχηματιστών πρέπει να συνεργάζονται επιλογικά με τα μέσα προστασίας της XT.

Οι ασφάλειες YT διακόπτουν μεγάλες εντάσεις βραχυκύκλωσης πριν από την εμφάνιση του κρουστικού ρεύματος I_s . Με τον περιορισμό της έντασης από I_s στην ένταση διελεύσεως I_D επιτυγχάνεται η διακοπή ρευμάτων υψηλής έντασης αφού η διακοπή γίνεται σε τόσο μικρό χρόνο ώστε το ρεύμα να μην αποκτήσει σχετικά μεγάλη τιμή.

Για τις ασφάλειες YT οι ελάχιστες εντάσεις διακοπής $I_{\alpha \min}$ ώστε οι ασφάλειες να τήκονται οπωσδήποτε είναι πολύ μεγαλύτερες από την ονομαστική τους ένταση I_{An} . Για παράδειγμα για ασφάλειες ονομαστικής έντασης $I_{An} = 40\text{ A}$ είναι, για όλες τις τάσεις $1\text{kV} \leq V_n \leq 35\text{kV}$, $I_{\alpha \min} = 3 \times 40\text{ A} = 120\text{ A}$.

Επίσης η ισχύς διακοπής έχει τόσο υψηλές τιμές ώστε να είναι κατάλληλες για κάθε δίκτυο MT. Ένα ακόμα μέγεθος που χαρακτηρίζει τις ασφάλειες YT είναι και η ισχύς διακοπής S_{α} . Η ικανότητα (ένταση) διακοπής δίνεται από τη σχέση:

$$I_{\alpha} = S_{\alpha} / V_n \sqrt{3}.$$

6.3.2 Διακόπτες ισχύος MT

Οι διακόπτες ισχύος (circuit breakers, Leistungsschalter) λέγονται και αυτόματοι. Ανοίγουν και κλείνουν ένα κύκλωμα υπό οποιεσδήποτε συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε βραχυκυκλώματα. Έτσι χρησιμοποιούνται στην προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων. Τα ρεύματα που μπορούν να διακόψουν σε δίκτυο 20 kV είναι 7 kA και πάνω. Η θεωρητική μέγιστη κρουστική τιμή που αντιστοιχεί σε ένταση 7 kA είναι 20 kA. Ο διακόπτης ισχύος είναι σε θέση να αντέξει αμέσως μετά την διακοπή του τόξου στην επιβαλλόμενη τάση του δικτύου των 20 kV.

Βασική κατηγορία των διακοπών ισχύος που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι (πτωχού) ελαίου. Η σβέση του δημιουργούμενου ηλεκτρικού τόξου γίνεται με έντονη ροή ελαίου γύρω από το τόξο. Οι επαφές των διακοπών συγκρατούνται στη θέση τους με ένα ελατήριο.

Υπάρχουν και διακόπτες που χρησιμοποιούνται πιο σπάνια και στηρίζονται σε άλλες αρχές όπως κενού, αέρος μαγνητικού φυσήματος, SF₆.

Ο διακόπτης ανοίγει αυτόματα παίρνοντας εντολή από ηλεκτρονόμους οπότε έχουμε αυτόματους με δευτερογενή προστασία. Αντί ηλεκτρονόμων ο αυτόματος μπορεί να διεγείρεται από ενσωματωμένο θερμικό και στιγμιαίο στοιχείο (ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο) από το ίδιο ρεύμα οπότε και έχουμε αυτόματους με πρωτογενή λειτουργία.

Η δευτερογενής προστασία είναι πιο ακριβή από την πρωτογενή αλλά πλεονεκτεί στο ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πιο μεγάλα ρεύματα και να συντονιστεί πιο εύκολα με άλλα μέσα προστασίας για την επίτευξη της προστασίας με επιλεκτικότητα. Το κλείσιμο του διακόπτη μπορεί να γίνεται χειροκίνητα ή με χρήση κινητήρα.

Να σημειώσουμε ότι οι σύγχρονοι αυτόματοι διακόπτες μπορεί να έχουν ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου για ρυθμίσεις προστασίας έναντι εντάσεων υπερφόρτισης και βραχυκυκλώματος κάτι που τους καθιστά πιο ακριβείς αναφορικά με τη συνεργασία τους με άλλα μέσα προστασίας.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των διακοπών ισχύος είναι τα ακόλουθα:

- Ονομαστική τάση (rated voltage), συνήθως $V_r = 20/24 \text{ kV}$.
- Ονομαστική ένταση (rated current), είναι η διαρκώς επιτρεπόμενη ένταση $p\chi I_r (=I_n) = 630 \text{ A}$.
- Ονομαστικό ρεύμα ζεύξης, σε βραχυκύκλωμα, $p\chi 20 \text{ kA}$. αυτό είναι το ρεύμα που ρέει όταν ο διακόπτης κλείνει σε βραχυκύκλωμα.
- Ονομαστική διάρκεια βραχυκυκλώματος, συνήθως 3 sec .
- Ισχύς απόζευξης $S_k = I_k V_k \sqrt{3}$, $p\chi 350, \dots 560 \text{ MVA}$.
- Αντοχή επαφών σε χειρισμούς στο ονομαστικό ρεύμα. Για παράδειγμα 500 φορές στο ονομαστικό ρεύμα και 1000 φορές στο μισό του ονομαστικού ρεύματος.
- Αντοχή σε εναλλασσόμενη τάση, $p\chi 50 \text{ kV } 1 \text{ min}$. Κρουστική τάση από πόλο σε πόλο και από πόλο σε γη $p\chi 125 \text{ kV}$.

Το σύστημα προστασίας με διακόπτες ισχύος αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Τριπολικό διακόπτη με τις επαφές.
- Βοηθητικές επαφές.
- Μηχανισμό ελατηρίου. Το ελατήριο ασκεί δύναμη για να αποχωριστούν οι επαφές με επαρκή ταχύτητα κατά την απόζευξη. Μετά από κάθε απόζευξη το ελατήριο πρέπει να ενταθεί. Η ένταση του ελατηρίου μπορεί να γίνει χειροκίνητα με μοχλό ή με κινητήρα. Το ελατήριο αφού ενταθεί αυτοσυγκρατείται.
- Πηνίο εργασίας (ζεύξης), ηλεκτρομαγνήτης που κλείνει το διακόπτη.
- Πηνίο που ελευθερώνει την απόζευξη, δηλαδή επενεργεί την απόζευξη.
- Μπορεί να υπάρχει πηνίο έλλειψης τάσης .
- Σύστημα ελέγχου, $p\chi$ ηλεκτρονόμους που διεγείρουν το σύστημα συγκράτησης του ελατηρίου.
- Σύστημα τροφοδοσίας $p\chi$ πηγή συνεχούς τάσης που τροφοδοτεί το σύστημα ελέγχου $p\chi$ ηλεκτρονόμους.
- Επειδή οι διακόπτες ισχύος δεν έχουν ορατές επαφές πρέπει να συνοδεύονται από αποζεύκτη. Η σειρά χειρισμών του διακόπτη φορτίου και του αποζεύκτη είναι:
- Στο άνοιγμα: πρώτα ανοίγει ο διακόπτης ισχύος και μετά ο αποζεύκτης.
- Στο κλείσιμο : πρώτα κλείνει ο αποζεύκτης και μετά ο διακόπτης ισχύος.

Πρέπει να υπάρχει κατάλληλη μανδάλωση του αποζεύκτη και του διακόπτη. (16)

6.3.3 Διακόπτες φορτίου

Οι διακόπτες φορτίου μπορεί να χειρίζονται υπό κανονικές ονομαστικές συνθήκες. Διακόπτουν ή συνδέουν κυκλώματα υπό ονομαστικό φορτίο αλλά όχι σε μεγαλύτερα ρεύματα.

Για να διακόψουμε χρειάζονται ένα θάλαμο σβέσης. Για μικρό αριθμό χειρισμού χρησιμοποιούνται διακόπτες φορτίου με αέρα ή μονωτικά τοιχώματα. Το ηλεκτρικό τόξο που δημιουργείται ψύχεται πάνω στα τοιχώματα. Για μεγάλο αριθμό χειρισμών χρησιμοποιούνται διακόπτες κενού ή SF6.

Οι διακόπτες φορτίου μπορεί να έχουν ορατές επαφές για να βλέπει κανείς από έξω αν ο διακόπτης είναι κλειστός ή ανοιχτός. Αν ο διακόπτης δεν έχει ορατές επαφές τότε πρέπει να συνοδεύεται από αποζεύκτες. Αποζεύκτες και διακόπτες φορτίου είναι αλληλομανδαλωμένοι. Στο εμπόριο είναι σύνηθες να βρίσκονται σαν συνδυασμένη μονάδα διακόπτης φορτίου-αποζεύκτης.

Χαρακτηριστικά διακοπτών φορτίου:

- Ονομαστική τάση (rated voltage), συνήθως $V_r=20/24 \text{ kV}$.
- Ονομαστική ένταση, πχ $I_r (=I_n) = 400 \text{ A}$, είναι η διαρκώς επιτρεπόμενη ένταση.
- Ένταση διακοπής, πχ 400 A υπό $\cos\phi=0.7$, : είναι η ένταση φορτίου που μπορεί να διακοπεί υπό ορισμένο $\cos\phi$ και αριθμό κύκλων, πχ 500 φορές.
- Ένταση διακοπής ρεύματος ΜΣ, πχ 40 A .
- Ένταση ζεύξης : είναι η ένταση που διαρρέει το κύκλωμα αμέσως μετά τη ζεύξη.
- Ένταση διακοπής χωρητικού φορτίου πχ 40 A .
- Θερμική αντοχή 1sec, πχ 16 kA : είναι το ρεύμα που αντέχει ο διακόπτης για ένα sec.
- Ηλεκτροδυναμική αντοχή, πχ 40 kA .

6.3.4 Αποζεύκτες

Οι αποζεύκτες είναι διακόπτες που ανοίγουν ένα κύκλωμα υπό ελάχιστο φορτίο και κλείνουν υπό ελάχιστη τάση. Δηλαδή, πρέπει να χειρίζονται χωρίς ρεύμα ή τάση στους πόλους τους. Χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουμε ορατές επαφές και να

είμαστε σίγουροι ότι έχουμε απομονώσει ένα κύκλωμα, έτσι ώστε να γίνουν με ασφάλεια εργασίες πάνω σε αυτό.

Σε κλειστή κατάσταση πρέπει οι αποζεύκτες να αντέχουν στα ρεύματα σφαλμάτων. Σε ανοιχτή κατάσταση οι αποζεύκτες πρέπει να αντέχουν στις υπερτάσεις της εγκατάστασης.

Οι αποζεύκτες δεν πρέπει να χειρίζονται υπό φορτίο. Γι' αυτό πρέπει να μανδαλώνονται με τους διακόπτες φορτίου ή ισχύος όπου ανήκουν.

Η σειρά χειρισμών του διακόπτη φορτίου και του αποζεύκτη είναι:

- Στο άνοιγμα: πρώτα ανοίγει ο διακόπτης φορτίου και μετά ο αποζεύκτης.
- Στο κλείσιμο : πρώτα κλείνει ο αποζεύκτης και μετά ο διακόπτης φορτίου.

6.4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία μιας εγκατάστασης καταναλωτή ή παραγωγού που συνδέεται στο δίκτυο ΜΤ είναι ο Μετασχηματιστής υποβιβασμού ή ανύψωσης αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό θα ασχοληθούμε ιδιαίτερα με τις διατάξεις προστασίας που αφορούν στο στοιχείο αυτό, αν και ταυτόχρονα είναι σε θέση να προστατέψουν και άλλα στοιχεία μιας εγκατάστασης.

6.4.1 Πλευρά ΜΤ

Στην πλευρά ΜΤ για ΜΣ ονομαστικής ισχύος $S_n \leq 1000$ kVA εγκαθίστανται συνήθως ασφάλειες ΥΤ, οι οποίες πρέπει να προστατεύουν τη γραμμή από τις εντάσεις βραχυκυκλώσεως. Οι ασφάλειες αυτές προστατεύουν επίσης και το ΜΣ έναντι ρευμάτων βραχυκυκλώσεως μεγάλων τιμών από εσωτερικά σφάλματα. Με τις ασφάλειες ΥΤ δεν παρέχεται προστασία έναντι ρευμάτων υπερφόρτισης ή εσωτερικών σφαλμάτων με σχετικά μικρές τιμές έντασης. Κι αυτό επειδή για την τήξη των ασφαλειών ΥΤ απαιτείται το ελάχιστο ρεύμα διακοπής $I_{a \min} = 3 \times I_{An}$, όπου I_{An} το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας.

6.4.2 Πλευρά ΧΤ

Στην πλευρά ΧΤ εγκαθίστανται ασφάλειες ή αυτόματοι διακόπτες.

Οι ασφάλειες προστατεύουν :

- Τις γραμμές και το ΜΣ έναντι εντάσεων βραχυκύκλωσης
- Τις γραμμές έναντι υπερφόρτισης
- Εν μέρει το ΜΣ έναντι υπερφόρτισης. Η προστασία αυτή δεν θεωρείται πλήρης.

Οι αυτόματοι διακόπτες προστατεύουν:

- Τις γραμμές και το ΜΣ έναντι εντάσεων βραχυκύκλωσης.
- Τις γραμμές και το ΜΣ έναντι υπερφόρτισης.
- Το ΜΣ έναντι υπερφόρτισης.

Οι αυτόματοι διακόπτες όπως είδαμε μπορεί να φέρουν θερμικό στοιχείο υπερφόρτισης και ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο υπέρεντασης.

6.4.3 Ρεύματα ζεύξεως ΜΣ

Κατά τη ζεύξη των ΜΣ σε κενή λειτουργία ρέουν δια του πρωτεύοντος τυλίγματος (πλευρά MT) ρεύματα τα οποία μπορούν να αποκτήσουν τιμές κορυφής πολύ μεγαλύτερες από την τιμή κορυφής του ονομαστικού ρεύματος. Τα ρεύματα ζεύξεως είναι μεταβατικά ρεύματα μαγνήτισης του πυρήνα, στον οποίο υπάρχει ένα μεταβατικό πεδίο, χωρίς τη δυνατότητα ροής των ρευμάτων στο δευτερεύον τύλιγμα (πλευρά XT) . Οι ασφάλειες YT δεν πρέπει να τήκονται από το ρεύμα ζεύξεως. Το ρεύμα ζεύξεως μπορεί να δίνεται από τον κατασκευαστή του ΜΣ. Αν όμως δεν είναι γνωστό μπορεί να προσεγγιστικά να ληφθεί $I_z = 12 I_n$ και οι ασφάλειες YT να καθοριστούν από την απαίτηση του χρόνου τήξεως $t \leq 0.1 \text{ sec}$ για ένταση $I = 12 I_n$.

Για ΜΣ ισχύος 500kVA , 0.4/20 kV έχουμε για την πλευρά της MT (20kV) πρωτεύον

$$I_{n\pi} = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_n}$$

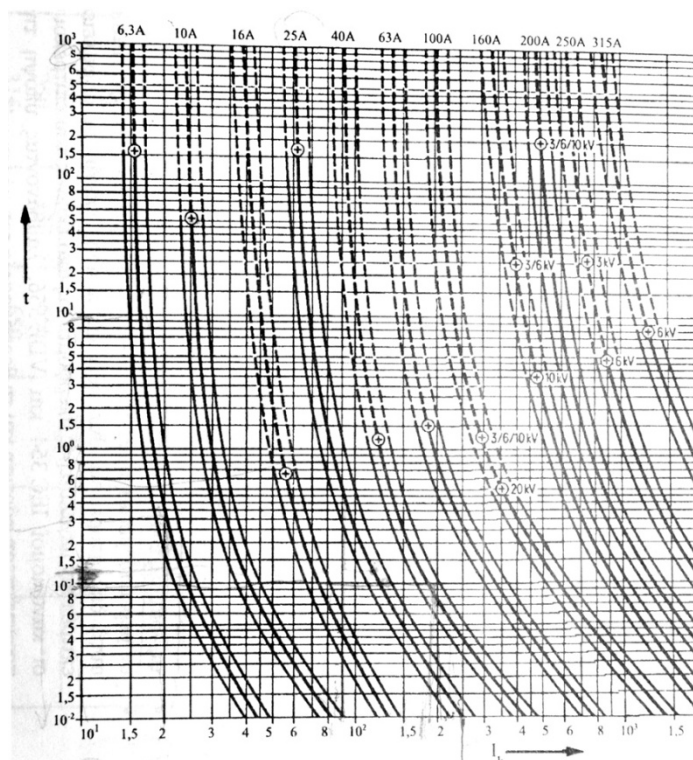
$$I_{n\pi} = 500 / \sqrt{3} \cdot 20 \text{ A} = 14.4 \text{ A}$$

$$I_z = 12 \times 14.4 \text{ A} = 173 \text{ A}, \text{ όπου } I_z \text{ είναι το ρεύμα ζεύξης.}$$

Από το σχήμα προκύπτει ότι η μικρότερη ασφάλεια YT που δεν τήκεται για ρεύμα $I_z = 173 \text{ A}$ σε χρόνο $t \leq 0.1 \text{ sec}$ είναι η ασφάλεια ονομαστικής έντασης 63 A . Η

ασφάλεια δηλαδή ονομαστικής έντασης 63 A τήκεται σε χρόνο μεγαλύτερο από 0.1sec όταν διαρρέεται από ρεύμα $I_z = 173A$.

Οι ασφάλειες μικρότερης ονομαστικής έντασης δεν επιλέγονται επειδή για το ίδιο ρεύμα δηλ $I_z = 173A$ τήκονται σε χρόνο μικρότερο των 0.1sec. Δεν αντέχουν δηλ το ρεύμα I_z για χρόνο τουλάχιστον 0.1sec.



Σχέδιο 48. Χαρακτηριστικές ασφαλειών MT

6.4.4 Προστασία έναντι ρευμάτων βραχυκύκλωσης

Τάση βραχυκύκλωσης U_k ενός ΜΣ είναι η τάση εκείνη, η οποία όταν ενεργεί στην μια πλευρά του ΜΣ προκαλεί ροή του ονομαστικού ρεύματος για τριπολικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της άλλης πλευράς.

Τάση βραχυκύκλωσης ως ανηγμένη τιμή $u_k = U_k / U_n$.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της τάσης τροφοδότησης.

Όταν εμφανιστεί ένα τριπολικό βραχυκύκλωμα κατά την λειτουργία του ΜΣ με την ονομαστική του τάση U_n το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k θα είναι:

$$I_k = \frac{U_n}{U_k} I_n = \frac{1}{\frac{U_k}{U_n}} I_n = \frac{1}{u_k} I_n$$

Έτσι για τριφασικό ΜΣ ονομαστικής ισχύος 500 kVA , ονομαστικών τάσεων 20/0.4 και τάσεως βραχυκύκλωσης $u_k = 4\% = 0.04$ η ένταση βραχυκύκλωσης είναι :

$$I_k = (1 / 0.04) I_n = 25 I_n .$$

Όταν το βραχυκύκλωμα δεν εμφανίζεται ακριβώς στους ακροδέκτες του ΜΣ αλλά σε κάποια απόσταση το ρεύμα βραχυκυκλώσεως ελαττώνεται λόγω της παρεμβολής των αντιστάσεων γραμμών ή άλλων στοιχείων μεταξύ του σημείου σφάλματος και του ΜΣ.

6.5 Μελέτη προστασίας εγκατάστασης ΧΤ και ΜΣ ανύψωσης.

Λόγω του μεγέθους της εγκατάστασης η σύνδεση θα γίνει στο δίκτυο ΜΤ. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιήσουμε ΜΣ ανύψωσης τάσης. Παρακάτω παραθέτουμε τα συμπεράσματα μας για την προστασία του ΜΣ και της υπόλοιπης εγκατάστασης. Οι διατάξεις προστασίας και οι ρυθμίσεις τους έχουν να κάνουν με το θέμα της προστασίας έναντι υπερεντάσεων εξαιτίας σφαλμάτων που μπορούν να συμβούν σε μια περιοχή από το πρωτεύον τύλιγμα του ΜΣ μέχρι και τις εξόδους των μετατροπέων. Η διάταξη των προστασιών μπορεί να προστατέψει τα στοιχεία της εγκατάστασης από υπερεντάσεις τόσο ρευμάτων βραχυκύκλωσης όσο και ρευμάτων υπερφόρτισης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην προστασία του ΜΣ.

Να σημειώσουμε επίσης ότι η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο δίκτυο και στις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης είναι πρακτικά ανεξάρτητη από την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου μέσης τάσης και εξαρτάται από την ισχύ και την τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή μέσης προς χαμηλής τάσης ή χαμηλής προς μέσης τάσης. Το σφάλμα στους υπολογισμούς με αυτήν τη προσέγγιση είναι σχετικά μικρό. Οι υπολογισμοί που ακολουθούν έγιναν με βάση την παραπάνω προσέγγιση.

6.5.1 Στοιχεία ΜΣ

- Ονομαστική ισχύς $S_n = 500 \text{ kVA}$
 - Ονομαστική τάση πρωτεύοντος (MT) $V_{n\pi} = 20 \text{ kV}$
 - Ονομαστική τάση δευτερεύοντος (XT) $V_{n\delta} = 0.4 \text{ kV}$
 - Τάση βραχυκύκλωσης $u_k = 4\% = 0.04$
 - Ονομαστική ένταση πρωτεύοντος $I_{n\pi} = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_{n\pi}} = \frac{500kVA}{\sqrt{3}20kV} = 14.4A$
 - Ονομαστική ένταση δευτερεύοντος $I_{n\delta} = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_{n\delta}} = \frac{500kVA}{\sqrt{3}0.4kV} = 721.6A$
 - Ένταση βραχυκύκλωσης
- ο Πλευρά 20 kV $I_{k\pi} = \frac{1}{u_k} I_{n\pi} = \frac{1}{0.04} 14.4A = 360A$
- ο Πλευρά 0.4 kV $I_{k\delta} = \frac{1}{u_k} I_{n\delta} = \frac{1}{0.04} 721A = 18025A = 18kA$

6.5.2 Ασφάλειες XT

Στην πλευρά εξόδου δηλαδή στην ac πλευρά του κάθε μετατροπέα του έχουμε:

Ονομαστικό ρεύμα: $I_{inv} = 87A$

$$I_{inv} = \frac{P}{V\sqrt{3}} = \frac{60kW}{400\sqrt{3}V} = 87A$$

Για κάθε μετατροπέα χρησιμοποιούμε ασφάλειες XT ονομαστικής έντασης $I_n=100 \text{ A}$. Οι ασφάλειες αυτές επιτρέπουν τη ροή του ονομαστικού ρεύματος, $I_{inv} = 87A$, από τον μετατροπέα προς τους ζυγούς XT χωρίς να καταπονούνται αφού η ονομαστική τους ένταση είναι 100 A και μπορούν να αποτρέψουν τη ροή πιθανών υπερεντάσεων ($I_n > 100 \text{ A}$)

6.5.3 Αυτόματος Διακόπτης Ισχύος (ΔΙ) XT

Έχουμε συνολικά 7 ίδιους μετατροπείς από τους οποίους αναχωρούν καλώδια για τους ζυγούς XT. Άρα από τους ζυγούς XT αναχωρεί συνολικό ονομαστικό ρεύμα έντασης $I_{o\lambda}=7 \times 87 \text{ A} = 609 \text{ A}$.

Μετά τους ζυγούς XT αναχωρεί γραμμή που καταλήγει στο ΜΣ. Το συνολικό συνεπώς ρεύμα επί της γραμμής που τροφοδοτεί τον ΜΣ είναι $I_{o\lambda}=7 \times 87 \text{ A} = 609 \text{ A}$.

Για την προστασία του ΜΣ χρησιμοποιούμε αυτόματο διακόπτη με στοιχείο έναντι υπερφόρτισης (θερμικό) και στιγμιαίο στοιχείο έναντι ρεύματος βραχυκύκλωσης (ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο).

Άρα ο διακόπτης ισχύος πρέπει να έχει ονομαστικό ρεύμα κοντά στα $I_n = 609 \text{ A}$. Επιλέγουμε τον αμέσως επόμενο διακόπτη πχ $I_n = 630 \text{ A}$ (Schneider), ώστε να εξασφαλίζεται η τροφοδότηση του ΜΣ με το συνολικό ονομαστικό ρεύμα των μετατροπέων.

Το θερμικό στοιχείο ρυθμίζεται στα $I_n=630 \text{ A}$ ώστε να επιτρέπεται η ροή του ονομαστικού ρεύματος από τις εξόδους των μετατροπέων προς το ΜΣ. Το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο ρυθμίζεται στα $6 \times I_n=6 \times 630 \text{ A}=3780 \text{ A}$. Οποιοδήποτε μεγαλύτερο ρεύμα λόγω πιθανού βραχυκυκλώματος προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη.

Για να υπάρχει όμως επιλογική προστασία του ηλεκτρομαγνητικού στοιχείου του ΔΙ (διακόπτη ισχύος) με τις ασφάλειες XT χρειάζεται να ρυθμιστεί το στοιχείο με μια χρονική καθυστέρηση. Αν δηλαδή συμβεί βραχυκύκλωμα στο τμήμα του δικτύου που προστατεύεται από τις ασφάλειες XT τότε θα πρέπει πρώτα να τηχθούν αυτές αντί να μπει σε λειτουργία το ηλεκτρομαγνητικό στοιχείο του ΔΙ. Η απόσταση μεταξύ της καμπύλης της ασφάλειας 100 A και της καμπύλης του ηλεκτρομαγνητικού στοιχείου θα πρέπει να είναι $B \geq 100 \text{ ms}$. Με βάση το σκεπτικό αυτό ρυθμίζεται η καθυστέρηση του ηλεκτρομαγνητικού στοιχείου.

6.5.4 Ασφάλειες YT

Στην πλευρά MT του ΜΣ εγκαθίστανται ασφάλειες YT 63 A οι οποίες να μπορούν να προστατεύσουν έναντι μεγάλων εντάσεων για μια περιοχή σχετικά κοντά στην τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης του δευτερεύοντος του ΜΣ. ($I_{k\delta} = 18 \text{ kA}$).

Για να συμβεί κάτι τέτοιο, αν χρειαστεί, θα πρέπει η χαρακτηριστική των ασφαλειών YT να τέμνει την χαρακτηριστική του Δ.Ι. λίγο πριν την ονομαστική ικανότητα διακοπής του διακόπτη. Η ονομαστική ικανότητα διακοπής ή αλλιώς το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα απόξευξης του ΔΙ θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης του δευτερεύοντος του ΜΣ. ($I_k = 18 \text{ kA}$).

Για την επιλογή της ονομαστικής έντασης 63 A των ασφαλειών MT αρχικά εξετάζουμε την αντοχή τους στο ρεύμα ζεύξης του ΜΣ. Οι ασφάλειες YT δεν πρέπει να τήκονται από το ρεύμα ζεύξεως. Επειδή το ρεύμα ζεύξεως δεν είναι γνωστό η επιλογή των ασφαλειών καθορίζεται από την απαίτηση του χρόνου τήξεως $t \leq 0.1 \text{ sec}$ για ένταση $I = 12 I_n$.

Για ΜΣ ισχύος 500kVA , 0.4/20 kV έχουμε για την πλευρά της MT (20kV)

$$I_{n\pi} = \frac{S_n}{\sqrt{3}V_n}$$

$$I_{n\pi} = 500 / \sqrt{3} \cdot 20 \text{ A} = 14.4 \text{ A}$$

$$I_z = 12 \times 14.4 \text{ A} = 173 \text{ A}$$

Από το σχετικό σχήμα προκύπτει ότι η μικρότερη ασφάλεια YT που δεν τήκεται για ρεύμα $I_z = 173 \text{ A}$ σε χρόνο $t \leq 0.1 \text{ sec}$ είναι η ασφάλεια ονομαστικής έντασης 63 A . Η ασφάλεια δηλαδή ονομαστικής έντασης 63 A τήκεται σε χρόνο μεγαλύτερο από 0.1sec όταν διαρρέεται από ρεύμα $I_z = A$.

Θα μπορούσε να επιλεγθεί και ασφάλεια μικρότερης ονομαστικής έντασης πχ 40 A, αλλά για το συγκεκριμένο ρεύμα ζεύξης η κατάσταση είναι οριακή.

Οι ασφάλειες μικρότερης ονομαστικής έντασης πχ 25 A απορρίπτονται επειδή για το ίδιο ρεύμα δηλ $I_z = 173 \text{ A}$ τήκονται σε χρόνο πολύ μικρότερο των 0.1sec. Δεν αντέχουν δηλ το ρεύμα I_z για χρόνο τουλάχιστον 0.1sec.

Επίσης για οι ασφάλειες YT πρέπει να πληρούν και την ακόλουθη προϋπόθεση:

Να μπορούν να τακούν σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στη πλευρά XT. Δηλαδή η ελάχιστη ένταση διακοπής της ασφάλειας να είναι μικρότερη από την ένταση βραχυκύκλωσης. Έτσι προστατεύεται ο ΜΣ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος

πριν από το γενικό μέσο προστασίας XT(ΔΙ) καθώς επίσης και όταν το μέσο αυτό δεν λειτουργήσει. Θεωρείται ότι για να πληρείται η παραπάνω προϋπόθεση αρκεί:

$$1,25 \times I_{amin} \leq I_{κτ}.$$

Για τις ασφάλειες YT με $I_n = 63 \text{ A}$ είναι $I_{amin} = 189 \text{ A}$, άρα

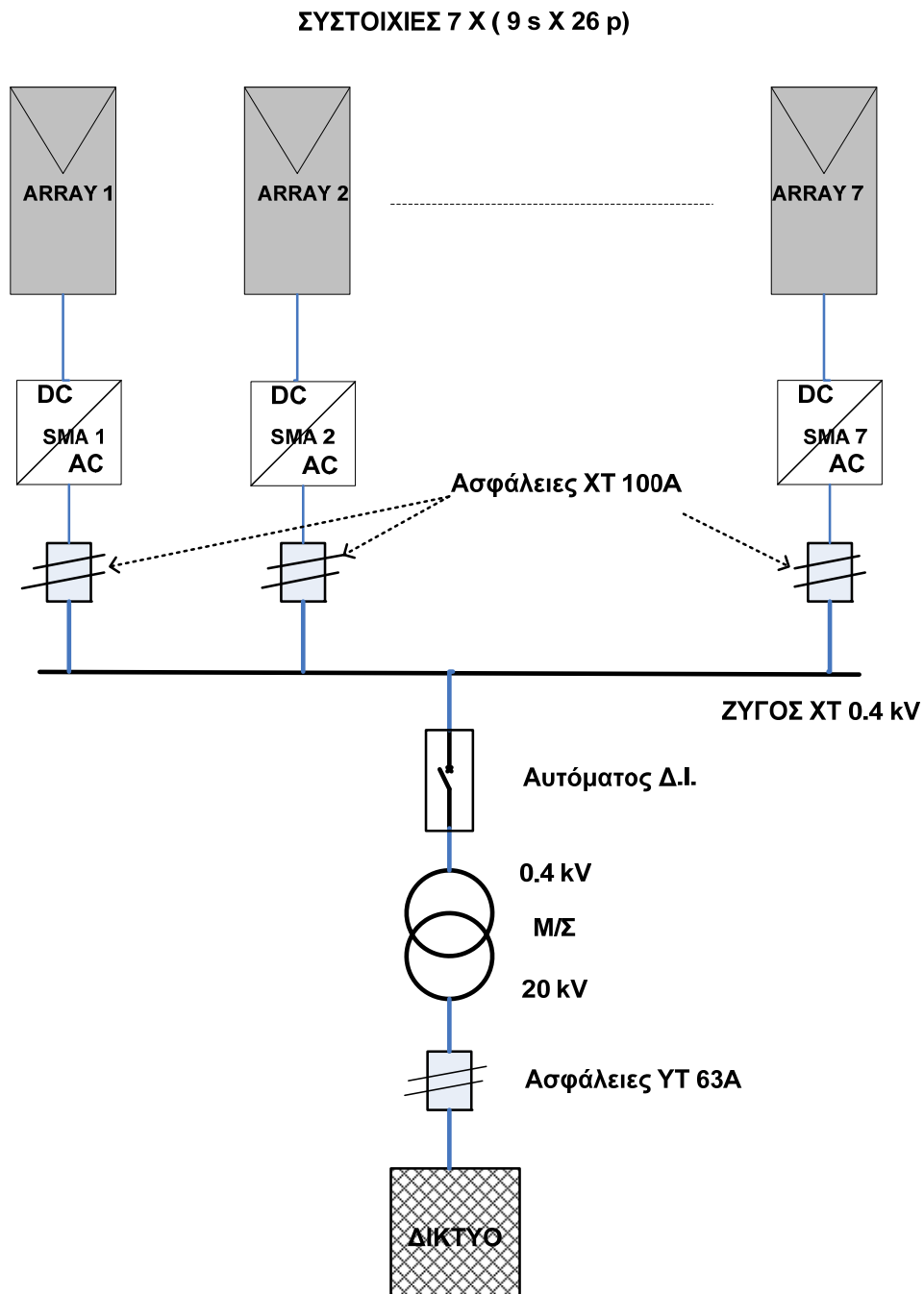
$$1,25 \times I_{amin} = 1,25 \times 189 \text{ A} = 236 \text{ A}, \text{ άρα}$$

$$1,25 \times I_{amin} = 236 \text{ A} < 360 \text{ A} = I_{κτ}.$$

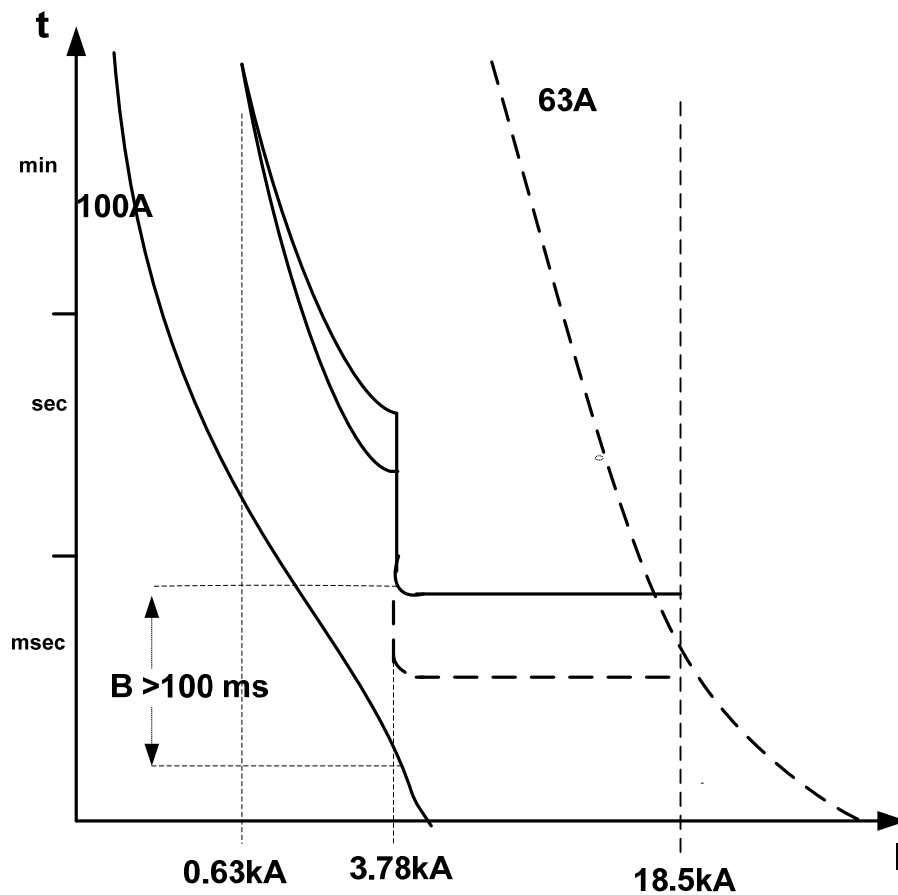
Συνεπώς πληρείται και αυτή η προϋπόθεση για τις ασφάλειες YT με $I_n = 63 \text{ A}$.

Να πούμε ακόμα πως ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει τις ασφάλειες YT είναι και η ισχύς διακοπής S_a . Η ικανότητα διακοπής ή ένταση διακοπής δίνεται από τη σχέση $I_a = S_a / V_n \sqrt{3}$. Για τις ασφάλειες YT 63 A που χρησιμοποιήσαμε $S_a = 1400 \text{ MVA}$ για τάση 20 kV. Άρα $I_a = 1400 \text{ MVA} / 20 \text{ kV} \sqrt{3} = 40.4 \text{ kA}$. Οι ασφάλειες δηλαδή μπορούν να διακόψουν ρεύματα βραχυκύκλωσης που φτάνουν μέχρι και τα 40.4 kA.

Συνοψίζοντας, να πούμε ότι το σύνολο των διατάξεων προστασίας που χρησιμοποιήσαμε δηλαδή ασφάλειες XT, ΔΙ και ασφάλειες YT είναι σε θέση να προστατέψουν όλα τα στοιχεία της εγκατάστασης (ΜΣ, ΦΒ γεννήτριες, καλωδιώσεις) από πιθανές υπερεντάσεις λόγω ανωμαλιών που εμφανίζονται στο εσωτερικό της εγκατάστασης συμπεριλαμβανομένης και της πλευράς MT του ΜΣ ανύψωσης. Ταυτόχρονα πληρείται και η προϋπόθεση της επιλογικής συνεργασίας των συγκεκριμένων μέσων.



Σχέδιο 49. Διατάξεις προστασίας της εγκατάστασης έναντι υπερεντάσεων.



Σχέδιο 50. Χαρακτηριστικές καμπύλες των μέσων προστασίας της εγκατάστασης. Φαίνεται η χρονική καθυστέρηση του ηλεκτρομαγνητικού στοιχείου του ΔΙ προκειμένου να υπάρξει επιλογική συνεργασία με τις ασφάλειες ταχείας τήξης 100Α. Παρατηρούμε επίσης ότι η ασφάλεια YT τέμνει την χαρακτηριστική του ηλεκτρομαγνητικού στοιχείου του ΔΙ λίγο πριν την ονομαστική ικανότητα διακοπής του. Η κλίμακα θεωρείται λογαριθμική.

Κεφάλαιο 7

Θέματα σύνδεσης με το Δίκτυο

7.1 Ορισμοί και βασικές έννοιες

7.1.1 Σημείο σύνδεσης στο δίκτυο – ΣΣΔ

Είναι το σημείο του δικτύου ΜΤ όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις του παραγωγού και βρίσκεται πάντα στην έξοδο των εγκαταστάσεων αυτών. Στο ΣΣΔ εγκαθίσταται η διάταξη μέτρησης της ενέργειας τη οποία απορροφούν οι εγκαταστάσεις του παραγωγού από το δίκτυο. Η ενέργεια που αποδίδει ο παραγωγός στο δίκτυο και αυτή που απορροφά από το δίκτυο για τις ιδιοκαταναλώσεις του υποσταθμού του μεταφέρονται πάντα μέσω της ίδιας παροχής. Το ΣΣΔ αποτελεί το φυσικό όριο διαχωρισμού αρμοδιοτήτων και ευθύνης μεταξύ ΔΕΗ και παραγωγού. Για τη ΜΤ είναι το οι ακροδέκτες του ΜΣ έντασης της μέτρησης προς την πλευρά του παραγωγού.

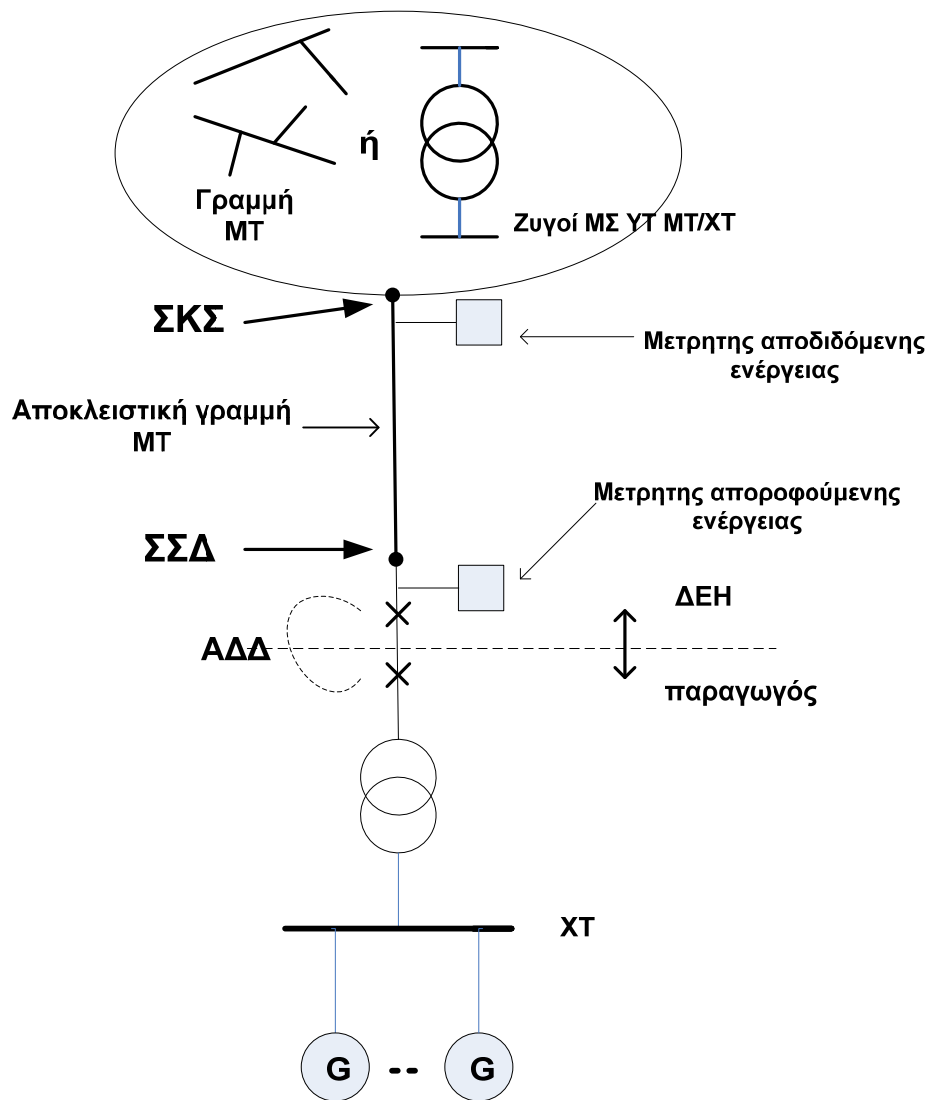
7.1.2 Σημείο κοινής σύνδεσης – ΣΚΣ

Είναι το πλησιέστερο προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού σημείο σύνδεσης του δικτύου, στο οποίο συνδέεται (ή μπορεί να συνδεθεί μελλοντικά) άλλος χρήστης (καταναλωτής ή παραγωγός). Είναι δηλαδή το σημείο στο οποίο το διασυνδεδετικό

δίκτυο του παραγωγού συναντά το κοινόχρηστο δίκτυο. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς για τον προσδιορισμό των προκαλούμενων επιπτώσεων στη λειτουργία του δικτύου από την εγκατάσταση παραγωγής. Γενικά το ΣΚΣ και το ΣΣΔ μπορεί να συμπίπτουν αλλά μπορεί να είναι και διαφορετικά. Για παράδειγμα στην περίπτωση παραγωγών που συνδέονται στη ΜΤ μέσω αποκλειστικής γραμμής το ΣΣΔ και το ΣΚΣ είναι διαφορετικά. Το ΣΣΔ λαμβάνεται στο πλησιέστερο προς τον παραγωγό άκρο της γραμμής ενώ το ΣΚΣ λαμβάνεται στο άλλο άκρο της γραμμής.

7.1.3 Αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης - ΑΔΔ

Είναι το στοιχείο εκείνο που επιτρέπει τη ζεύξη ή απομόνωση των εγκαταστάσεων παραγωγής από το δίκτυο. Ο ΑΔΔ ελέγχεται μέσω κατάλληλου εξοπλισμού (πχ ηλεκτρονόμων προστασίας). Να πούμε εδώ ότι ο ΑΔΔ μπορεί να εμπίπτει είτε στην αρμοδιότητα της ΔΕΗ με έξοδα του παραγωγού, κάτι που συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις, είτε στην αρμοδιότητα του παραγωγού με τις ρυθμίσεις που απαιτεί η ΔΕΗ.



Σχέδιο 51. Στο σχήμα αποσαφηνίζονται οι έννοιες του ΣΣΔ και του ΣΚΣ σε περίπτωση διαμόρφωσης σύνδεσης με αποκλειστική γραμμή. Φαίνονται επίσης τα όρια ευθύνης παραγωγού και ΔΕΗ.

7.1.4 Εγκατάσταση παραγωγής

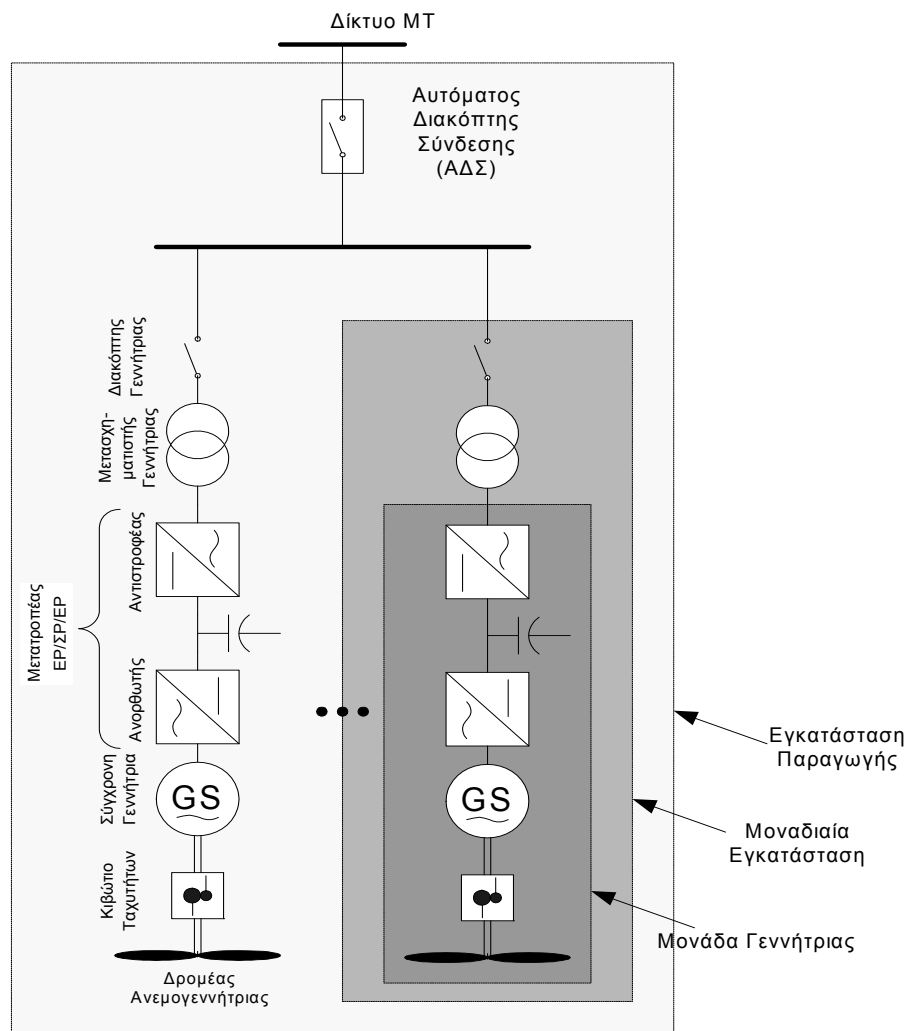
Είναι το τμήμα της εγκατάστασης στο οποίο υπάρχουν μια ή περισσότερες μονάδες γεννητριών για παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Μια εγκατάσταση χρήστη του δικτύου μπορεί να αποτελείται αποκλειστικά από την εγκατάσταση παραγωγής ή να περιλαμβάνει και άλλα φορτία.

7.1.5 Μοναδιαία εγκατάσταση

Το τμήμα της εγκατάστασης παραγωγής που περιλαμβάνει μια μονάδα γεννήτριας συμπεριλαμβανομένων και όλων των απαιτούμενων για τη λειτουργία της ηλεκτρικών διατάξεων και συσκευών. Όρια της μοναδιαίας εγκατάστασης είναι το σημείο στο οποίο είναι συνδεδεμένη με άλλη μοναδιαία εγκατάσταση ή με την υπόλοιπη εγκατάσταση του χρήστη ή με το δίκτυο. Η εγκατάσταση παραγωγής είναι δυνατόν να αποτελείται αποκλειστικά από μια μοναδιαία εγκατάσταση.

7.1.6 Μονάδα γεννήτριας

Το τμήμα της μοναδιαίας εγκατάστασης το οποίο παράγει ενέργεια συμπεριλαμβανομένου και του μετατροπέα ισχύος.



Σχέδιο 52. Στο σχήμα φαίνεται μια εγκατάσταση ανεμογεννήτριας που συνδέεται με το δίκτυο MT.

7.2 Γενικές προϋποθέσεις για τη σύνδεση

Σε γενικές γραμμές σε ό,τι αφορά κατασκευαστικά ζητήματα αλλά και σε ζητήματα διαμόρφωσης της σύνδεσης των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής, εφαρμόζονται κανόνες ανάλογοι εκείνων που ισχύουν στη σύνδεση καταναλωτών αντίστοιχου ισχύος.

7.2.1 Τρόπος σύνδεσης

Βασική αρχή για την επιλογή του τρόπου σύνδεσης μιας εγκατάστασης διανεμημένης παραγωγής είναι ότι αυτή θα πρέπει να γίνεται με τον οικονομικότερο τρόπο χωρίς όμως να παραβιάζονται τα όρια διαταραχών όπως αυτά καθορίζονται από τους αντίστοιχους κανονισμούς της ΔΕΗ όπως αντίστοιχα ισχύει και για τις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Γενικά για τις εγκαταστάσεις ΔΠ ενδείκνυται να συνδέονται κατά το δυνατόν πιο κοντά προς τις καταναλώσεις, ώστε να περιορίζονται οι ροές επί των γραμμών και των ΜΣ του δικτύου, χωρίς βέβαια να δημιουργούνται καταστάσεις εκτός των επιτρεπόμενων ορίων αλλά αντίθετα να υπάρχει βελτίωση των τάσεων και ελαχιστοποίηση των απωλειών.

Βασικό κριτήριο την επάρκεια του δικτύου και του τρόπου σύνδεσης αποτελεί το μέγεθος της εγκατάστασης καθώς και οι υφιστάμενες συνθήκες της περιοχής όπως πχ κατοικημένη ή όχι περιοχή, προοπτική σύνδεσης και άλλων εγκαταστάσεων στο προσεχές μέλλον κλπ. Έτσι για ισχύς μεγαλύτερες των 100 kW ως 20 kW η εγκατάσταση θα πρέπει να συνδέεται στο δίκτυο ΜΤ. Η εξέταση για τον προσδιορισμό του ΣΚΣ πρέπει να αρχίζει από το πιο κοντινό στην εγκατάσταση σημείο του δικτύου και βαθμιαία να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε σημεία πλησιέστερα προς τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, δηλαδή σε σημεία με υψηλότερη στάθμη βραχυκύκλωσης. Τέτοιου είδους μελέτη είναι εκτός των ορίων της παρούσας διπλωματικής.

Για μικρές σχετικά ισχείς πχ μέχρι 5MW θα πρέπει να εξετάζεται η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενη γραμμή. Εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύς πχ μέχρι 8MW μπορεί να συνδέονται με αποκλειστική γραμμή στους ζυγούς ΜΤ του πλησιέστερου υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ.

Για εγκαταστάσεις μεγαλύτερης ισχύος μέχρι 20MW πρέπει αρχικά να εξετάζεται από τη ΔΕΗ η δυνατότητα σύνδεσης σε υφιστάμενο ή νέο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ μέσω αποκλειστικού δικτύου. Η εγκατάσταση ιδιαίτερου Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ (σε υφιστάμενο ή νέο Υ/Σ ΥΤ/ΜΤ) θα επιδιώκεται για ισχείς άνω των 10 MW.

7.2.2 Γενικά περί διατάξεων ζεύξης και προστασίας

Οι βασικές αρχές για τον καθορισμό και επιλογή των διατάξεων ζεύξης και προστασίας είναι οι ακόλουθες.

Το προσωπικό της ΔΕΗ θα πρέπει να έχει δυνατότητα εύκολης πρόσβασης και να μπορεί να πραγματοποιείται η εξασφαλισμένη απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής και απρόσκοπτη εκτέλεση των εργασιών σε αυτό.

Τα εγκαθιστάμενα μέσα προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση ανωμαλιών στο δίκτυο ώστε αφενός να αποφεύγονται βλάβες του εξοπλισμού της εγκατάστασης αφετέρου να εξασφαλίζεται ότι δε θα δημιουργηθούν επικίνδυνες καταστάσεις για τους λοιπούς χρήστες του δικτύου. Για το σκοπό αυτό θα πρέπει να εξετάζονται οι λειτουργίες των προστασιών στις συνηθέστερες περιπτώσεις ανωμαλιών όπως βραχυκυκλώματα στο εσωτερικό της εγκατάστασης και στο δίκτυο, η απομονωμένη λειτουργία της εγκατάστασης κλπ. Τα συγκεκριμένα θα αναλυθούν παρακάτω πιο εμπεριστατωμένα.

7.3 Διατάξεις ζεύξης και προστασίας

7.3.1 Προϋποθέσεις για τις διατάξεις ζεύξης και προστασίας

Γενικά οι διατάξεις ζεύξης και προστασίας πρέπει να εξασφαλίζουν τα ακόλουθα:

Α. Τη δυνατότητα χειροκίνητης ζεύξης απόζευξης ολόκληρης της εγκατάστασης από το δίκτυο ή επιμέρους τμημάτων αυτής. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού αρκεί η διάταξη ζεύξης να διαθέτει κατάλληλο στοιχείο ζεύξης δηλαδή τουλάχιστον διακόπτη φορτίου.

B. Την αυτόματη απομόνωση από το δίκτυο ολόκληρης της εγκατάστασης ή τμημάτων αυτής, σε περίπτωση σφάλματος στοιχείων του δικτύου ή της εγκατάστασης. Για το σκοπό αυτό πρέπει να υπάρχει αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης ο οποίος να είναι εφοδιασμένος με κατάλληλες διατάξεις ελέγχου και προστασίας. Αυτές πρέπει ρυθμίζονται έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να συνεργάζονται επιλογικά με προηγούμενα μέσα προστασίας του δικτύου. Πρέπει για παράδειγμα να υπάρχει επιλογική προστασία με τα διακοπτικά στοιχεία της ΔΕΗ στη αναχώρηση της γραμμής MT. Η ΔΕΗ προτείνει για το σκοπό αυτό τον εφοδιασμό των αυτόματων διακοπών με κατάλληλους ηλεκτρονόμους υπερέντασης. Κατά κανόνα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά του δικτύου είναι αρκετά μεγάλο ώστε το άνοιγμα των αντίστοιχων διακοπών να είναι εξασφαλισμένο. Αντίθετα το ρεύμα σφάλματος από τη μεριά της εγκατάστασης είναι συχνά ανεπαρκές για να εξασφαλίσει το άνοιγμα των διακοπών. Για το λόγο αυτό η απόξευξή της εγκατάστασης για σφάλματα του Δικτύου επιτυγχάνεται συνήθως μέσω των προστασιών που σχετίζονται με τις απαιτήσεις C, D, E. Αυτό έχει να κάνει και με προστασία έναντι ασύμμετρων σφαλμάτων.

C. Την πρόληψη ανώμαλων λειτουργικών καταστάσεων και βλαβών στοιχείων της εγκατάστασης σε περίπτωση διαταραχών του δικτύου (πχ βυθίσεις και επαναφορά της τάσης). Η επίτευξη του C εξασφαλίζεται συνήθως με την προστασία κάθε μονάδας.

D. Την αποφυγή απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης και τμήματος του δικτύου απομονωμένου από το υπόλοιπο Σύστημα (αποφυγή δηλαδή νησιδοποιημένης λειτουργίας) ή και μόνης της εγκατάστασης εφόσον δεν προβλέπεται από το σχεδιασμό της. Για το σκοπό αυτό απαιτείται τουλάχιστον η εγκατάσταση ηλεκτρονόμων ορίων τάσης και συχνότητας στον διακόπτη διασύνδεσης. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων τάσης συμβάλλουν και στην απομόνωση της εγκατάστασης από το δίκτυο σε περιπτώσεις σφαλμάτων στη μεριά του δικτύου αφού τότε παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις των τάσεων από τις ονομαστικές τους τιμές. Οι ηλεκτρονόμοι ορίων συχνότητας-σε συνδυασμό με την επιτήρηση των ορίων τάσης-αφορούν κυρίως την ανίχνευση της νησιδοποίησης αφού μετά την αποσύνδεση παρουσιάζονται έντονες μεταβολές της συχνότητας. Σε ειδικές

περιπτώσεις ιδίως μεγάλων εγκαταστάσεων αν κριθεί αναγκαίο μπορεί να είναι σκόπιμη και η εγκατάσταση προστασιών που να εξασφαλίζουν πληρέστερα την απομόνωση της εγκατάστασης σε περίπτωση μόνιμου σφάλματος στο δίκτυο, έστω και σε σχετικά μεγάλους χρόνους. Κάτι τέτοιο αποφασίζεται σε συνεργασία του παραγωγού κα της ΔΕΗ.

Ε. Τον κατά το δυνατόν περιορισμό της άσκοπης αποσύνδεσης της εγκατάστασης από το δίκτυο, η οποία αποσύνδεση, εκτός από οικονομικές επιπτώσεις στον παραγωγό, μπορεί να δημιουργεί και προβλήματα ευστάθειας στο Σύστημα. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η κατάλληλη ρύθμιση ορίων και χρόνων διέγερσης όλων των παραπάνω προστασιών για να υπάρχει η ορθή επιλογική συνεργασία με προηγούμενα μέσα προστασίας του Δικτύου.

7.3.2 Ρυθμίσεις προστασιών

Οι παρακάτω ρυθμίσεις αφορούν στο μέσο προστασίας που επιφορτίζεται με τον ρόλο του ΑΔΔ και καθορίζονται από τη ΔΕΗ με κριτήριο την προστασία του Δικτύου από ανώμαλες λειτουργικές καταστάσεις. Οι επιλογές και ρυθμίσεις των μέσων που αφορούν την προστασίας της εγκατάστασης του ΔΠ καθορίζονται από τον ίδιο τον παραγωγό.

1. Το σύστημα προστασίας του ΑΔΔ πρέπει να περιλαμβάνει και προστασίες ορίων τάσεως και συχνότητας, δηλαδή προστασίες έναντι υπότασης/υπέρτασης και υποσυχνότητας/υπερσυχνότητας. Η επιτήρηση τάσης πρέπει να γίνεται και στις 3 φάσεις ώστε να ανιχνεύονται ακόμα και μονοφασικές διαταραχές. Η επιτήρηση της συχνότητας αρκεί να γίνεται σε μια μόνο φάση. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται ενδεικτικά περιοχές ρύθμισης των H/N ορίων τάσης και συχνότητας καθώς και τυπικές ρυθμίσεις αυτών. Οι ρυθμίσεις μπορούν να τροποποιούνται με βάση εκάστοτε ειδικές συνθήκες.

Προστασίες της διασύνδεσης με το δίκτυο της ΜΤ					
Τύπος ηλεκτρονόμου	Περιοχή ρύθμισης τιμής διέγερσης	Συνιστώμενη ρύθμιση			
		Τύπου Α		Τύπου Β	
		Τιμή Διέγερσης	Χρονική Καθυστέρηση	Τιμή Διέγερσης	Χρονική Καθυστέρηση
Υπότασης	$0.70 \cdot U_n \div 1.00 \cdot U_n$	$0.85 \cdot U_n$	0.8 s	$0.80 \cdot U_n$	1.2s
Υπέρτασης	$1.00 \cdot U_n \div 1.15 \cdot U_n$	$1.10 \cdot U_n$	0.8 s	$1.15 \cdot U_n$	1.2 s
Υποσυχνότητας	47 ÷ 50 Hz	49.5 Hz	0.8 s	47.5 Hz	1.2 s
Υπερσυχνότητας	50 ÷ 52 Hz	50.5 Hz	0.8 s	51.5 Hz	1.2 s

2. Για τον καθορισμό επιλογής του ΑΔΔ και τον καθορισμό και ρύθμιση των προστασιών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η απόκριση τους στις παρακάτω περιπτώσεις:

Ο Για σφάλματα εντός της εγκατάστασης ο ΑΔΔ θα πρέπει να ανοίγει πριν από την οριστική θέση εκτός λειτουργίας του προηγούμενου μέσου του δικτύου. Πχ ο ΑΔΔ πρέπει να ανοίξει πριν από το διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής αν υπάρξει σφάλμα στην εγκατάσταση παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση της χρονικής καθυστέρησης του στοιχείου ελέγχου του ΑΔΔ για προστασία έναντι υπερέντασης βραχυκύκλωσης.

Ο Για σφάλματα επί της γραμμής σύνδεσης της εγκατάστασης παραγωγής τα οποία πρέπει να απομονώνονται και από την πλευρά της εγκατάστασης με το άνοιγμα του ΑΔΔ. (αναφέρεται κυρίως σε αποκλειστικές γραμμές σύνδεσης)

Ο Για σφάλματα σε άλλα σημεία του δικτύου οπότε θα πρέπει να εξετάζεται το ενδεχόμενο ανεπιθύμητων λειτουργιών των προστασιών.

3. Για εγκαταστάσεις των οποίων η ισχύς δεν είναι αρκετά μεγάλη, και γενικά συνδέονται σε γραμμές MT που τροφοδοτούν και καταναλωτές, η σύνδεση της εγκατάστασης παραγωγής δεν επιβάλλει την τροποποίηση των υφιστάμενων ρυθμίσεων των προστασιών του Δικτύου, αν και πάντα πρέπει να γίνεται σχετικός έλεγχος.

Σε περιπτώσεις αποκλειστικών γραμμών σύνδεσης η προστασίες επιλέγονται προφανώς με βάση την προστασία της γραμμής σύνδεσης και της εγκατάστασης παραγωγής.

Στην Ελλάδα, τουλάχιστον προς το παρόν, το ποσοστό της συνολικής ισχύος της διανεμημένης παραγωγής είναι σχετικά μικρό. Έτσι η απόξευση της διανεμημένης παραγωγής, λόγω κάποιου σφάλματος ή άλλης διαταραχής της συχνότητας ή της τάσης του Δικτύου, δεν έχει ουσιαστική επίπτωση στο Δίκτυο. Ωστόσο η συχνή θέση εκτός λειτουργίας των εγκαταστάσεων διανεμημένης παραγωγής εκτός των δυσμενών οικονομικών επιπτώσεων για τον παραγωγό συνεπάγεται αυξημένες καταπονήσεις των μονάδων αλλά και αύξηση του εύρους των διαταραχών στο Δίκτυο. Μπορούμε έτσι να διακρίνουμε τις 2 ακόλουθες περιπτώσεις:

- Εγκαταστάσεις ΔΠ μικρής ισχύος, μέχρι 5MW, που συνδέονται συνήθως σε υφιστάμενες γραμμές μπορούν να επιλέγονται οι ρυθμίσεις του τύπου Α του πίνακα για τις προστασίες του ΑΔΔ.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της προστασίας έναντι υπερέντασης του διακόπτη ισχύος (ΔΙ) MT στην αναχώρηση της γραμμής από τον ΥΣ YT/MT, θα επιδιώκεται να μην τροποποιούνται. Πρέπει όμως να εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία του ΑΔΔ με τον ΔΙ. Αυτό γίνεται με την εξασφάλιση της συνεργασίας των H/N υπερέντασης του ΑΔΔ και των HN Χρονικής Καθυστέρησης (ΧΚ) του ΔΙ της γραμμής ή οποιουδήποτε άλλου μέσου παρεμβάλλεται.

Ειδικότερα για την καθυστέρηση ορίων τάσης και συχνότητας η τιμή 0.8 sec προτείνεται για να μην υπάρχει άνοιγμα του ΑΔΔ ακόμα και σε περίπτωση παροδικών σφαλμάτων που εκκαθαρίζονται με την πρώτη ταχύτατη επαναφορά του ΔΙ. Τροποποιήσεις των ρυθμίσεων μπορούν να γίνουν μετά από αίτημα των παραγωγών. Επίσης τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των προστασιών της γραμμής θα πρέπει να τίθενται υπόψη του παραγωγού.

- Εγκαταστάσεις μεγάλης σχετικά μεγαλύτερης ισχύος ($>5\text{MW}$): Συνδέονται με αποκλειστικές γραμμές MT ή και μέσω ιδιαίτερου Μ/Σ ΥΤ/MT. Οι προστασίες του ΑΔΣ μπορεί να ρυθμίζονται σε ευρύτερα όρια, όπως τα Τύπου Β στον Πίνακα. Έτσι περιορίζεται η πιθανότητα αποζεύξεως της εγκατάστασής λόγω διαταραχών στο Σύστημα ή σε άλλες γραμμές του δικτύου του Υ/Σ.

Στις περιπτώσεις αυτές μπορεί (και γενικά ενδείκνυται) να τίθενται εκτός, ή να ρυθμίζονται σε πολύ υψηλές τιμές, οι ηλεκτρονόμοι στιγμιαίας λειτουργίας του Δ/Ι στην αναχώρηση της γραμμής MT στην οποία συνδέεται η εγκατάσταση παραγωγής. Οποσδήποτε όμως θα εξασφαλίζεται η επιλογική συνεργασία των Η/Ν υπερεντάσεως του ΑΔΔ με τους Η/Ν ΧΚ του Δ/Ι στην αναχώρηση της Γραμμής.

Με τα παραπάνω επιτυγχάνεται μείωση της συχνότητας των άνευ λόγου αποζεύξεων του ΑΔΔ ή και η μη διακοπή της παραγωγής, εφόσον και οι μηχανές που εγκαθιστά ο παραγωγός έχουν τη δυνατότητα να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια ανάλογων διαταραχών (και βεβαίως έχουν επιλεγεί αντίστοιχα διευρυμένα όρια και χρόνοι διέγερσης για τις ίδιες προστασίες των γεννητριών).

4. Για την ανίχνευση της απομονωμένης λειτουργίας της εγκατάστασης μπορεί να χρησιμοποιούνται σε ορισμένες περιπτώσεις ειδικοί ηλεκτρονόμοι, οι οποίοι π.χ. ελέγχουν τον ρυθμό μεταβολής του ανύσματος της τάσης, του φορτίου, της συχνότητας κλπ. Τα μέσα αυτά είναι αποδεκτά κατόπιν εγκρίσεως από τις αρμόδιες υπηρεσίες της ΔΕΗ, αλλά δεν μπορούν να υποκαταστήσουν τις βασικές λειτουργίες που παρουσιάζονται στον πίνακα παραπάνω για την προστασία της διασύνδεσης, χωρίς ειδική εξέταση. Επίσης, σε ειδικές περιπτώσεις εγκαταστάσεων παραγωγής μεγάλου μεγέθους, μπορεί να εφαρμοστεί η αλληλένδεση (transfer trip) του ΑΔΔ της εγκατάστασης με τον διακόπτη στην αναχώρηση της γραμμής MT. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται η άμεση απόζευξη της εγκατάστασης για οποιαδήποτε διαταραχή προκαλεί το άνοιγμα του διακόπτη της γραμμής και αποκλείεται η ασύγχρονη επανάζευξή του.

5. Μετά από λειτουργία απόζευξης του ΑΔΔ, η ζεύξη του μπορεί να γίνεται είτε μετά από συνεννόηση με τη ΔΕΗ, αν υπάρχουν ειδικοί λόγοι, ή συνηθέστερα αυτόματα. Σε κάθε περίπτωση η επανάζευξη πρέπει να καθυστερεί μέχρι να επανέλθει η τάση και η συχνότητα του δικτύου εντός της προβλεπόμενης ζώνης

κανονικής λειτουργίας, ή και άλλους λόγους. Για την προστασία της εγκατάστασης παραγωγής, συνιστάται να προβλέπεται χρονική καθυστέρηση της τάξης των λεπτών της ώρας μεταξύ της επανόδου του δικτύου σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και της ζεύξης της εγκατάστασης, ώστε να έχουν ολοκληρωθεί ενδεχόμενοι χειρισμοί στο δίκτυο. Για εγκαταστάσεις με δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας, η ζεύξη αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται από αυτόματο σύστημα συγχρονισμού ακριβείας.

7.3.3 Διαμόρφωση της σύνδεσης στη MT

Ο τρόπος και το σημείο του δικτύου στο οποίο θα γίνει η σύνδεση καθώς και το είδος των εγκαταστάσεων ζεύξης και μέτρησης καθορίζονται από τη ΔΕΗ ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου, τη θέση και το μέγεθος της προς σύνδεση εγκατάστασης.

Σε κάθε περίπτωση ο εξοπλισμός ζεύξης πρέπει να περιλαμβάνει μέσο με ικανότητα διακοπής ρεύματος φορτίου, να εξασφαλίζει την απόζευξη κατά τρόπο που να επιτρέπει την ασφαλή εκτέλεση εργασιών και να είναι προσιτή στο προσωπικό της ΔΕΗ.

Κατασκευαστικά η όλη διάταξη της σύνδεσης πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή των καταναλωτών MT. Όριο διαχωρισμού ευθύνης ΔΕΗ και παραγωγού αποτελεί το ακροκιβώτιο του καλωδίου σύνδεσης προς τη μεριά του δικτύου.

Στην οδηγία αυτή για κάθε μονάδα γεννήτριας υπάρχει ένας αυτόματος διακόπτης γεννήτριας για την προστασία της και τον έλεγχο της, ο οποίος κατά κανόνα είναι και της ίδιας τάσης με τη γεννήτρια.

Συχνά όταν υπάρχουν περισσότερες από μια μονάδες σε απόσταση μεταξύ τους είναι αναγκαία η εγκατάσταση ενός γενικού αυτόματου διακόπτη ο οποίος παίζει και το ρόλο του ΑΔΔ. Είναι δηλαδή εκείνο το στοιχείο που επιτρέπει τη ζεύξη ή απομόνωση της εγκατάστασης παραγωγής από το δίκτυο.

Η θέση εγκατάστασης του ΑΔΔ (δηλαδή στην πλευρά XT ή MT), ο τύπος των μέσων προστασίας και ελέγχου (πιο συχνά ρελε) εξαρτάται από όλη την εγκατάσταση και το ρόλο που καλείται να παίζει η κάθε συσκευή.

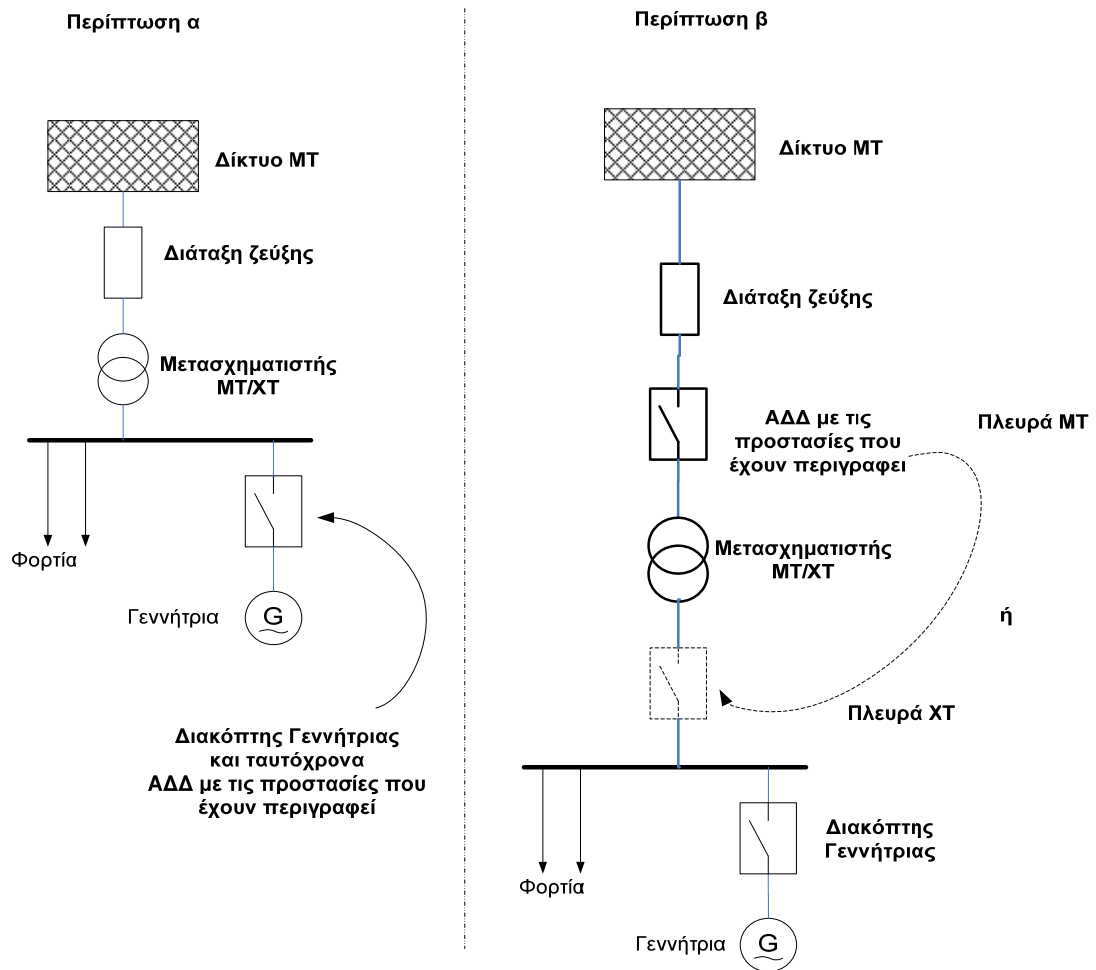
Σημειώνεται ότι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η προστασία των μονάδων και η πρόβλεψη απομονωμένης ή όχι λειτουργίας επιλέγεται από τον παραγωγό ανάλογα με τον τύπο, το πλήθος και την ισχύ των μονάδων καθώς και οποιασδήποτε άλλης ιδιαιτερότητας και εγκρίνεται από τη ΔΕΗ σε ό,τι αφορά την επίπτωση των επιλογών στο δίκτυο.

Για μικρές εγκαταστάσεις μέχρι 500 kVA προσφέρεται η διαμόρφωσης της περίπτωσης β του σχήματος που ακολουθεί, όπου στη διάταξη ζεύξης θα πρέπει να εξασφαλίζεται και η προστασία του δικτύου μέχρι και τους ζυγούς χαμηλής τάσης του ΜΣ. Σε αυτή την περίπτωση ο ΑΔΓ (πρακτικά συμπίπτει με τον ΑΔΔ) πρέπει να ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις που ισχύουν για τον ΑΔΔ.

Ο ΜΣ και συνολικά ο ΥΣ ΜΤ/ΧΤ μπορεί να ανήκει στον παραγωγό ή στη ΔΕΗ αλλά να κατασκευάζεται με έξοδα του παραγωγού. Αυτό πάντως εξαρτάται από τη μεταξύ τους συμφωνία.

Στην περίπτωση που ο ΑΔΓ δεν εξασφαλίζει τις απαιτήσεις που τίθενται για τον ΑΔΔ ή που είναι επιθυμητή η απομονωμένη λειτουργία της όλης εγκατάστασης προσφέρεται η εφαρμογή της διαμόρφωσης της περίπτωσης του β του σχήματος που ακολουθεί, δηλαδή ξεχωριστό στοιχείο που έχει το ρόλο του ΑΔΔ. Ο ΑΔΔ μπορεί να εγκαθίσταται στην πλευρά ΧΤ ή ΜΤ.

Στο σχήμα που ακολουθεί περιγράφονται 2 βασικές διαμορφώσεις συνδέσεων εγκαταστάσεων ΔΠ που προσφέρονται για εγκαταστάσεις μικρής ισχύος. (17) (18)

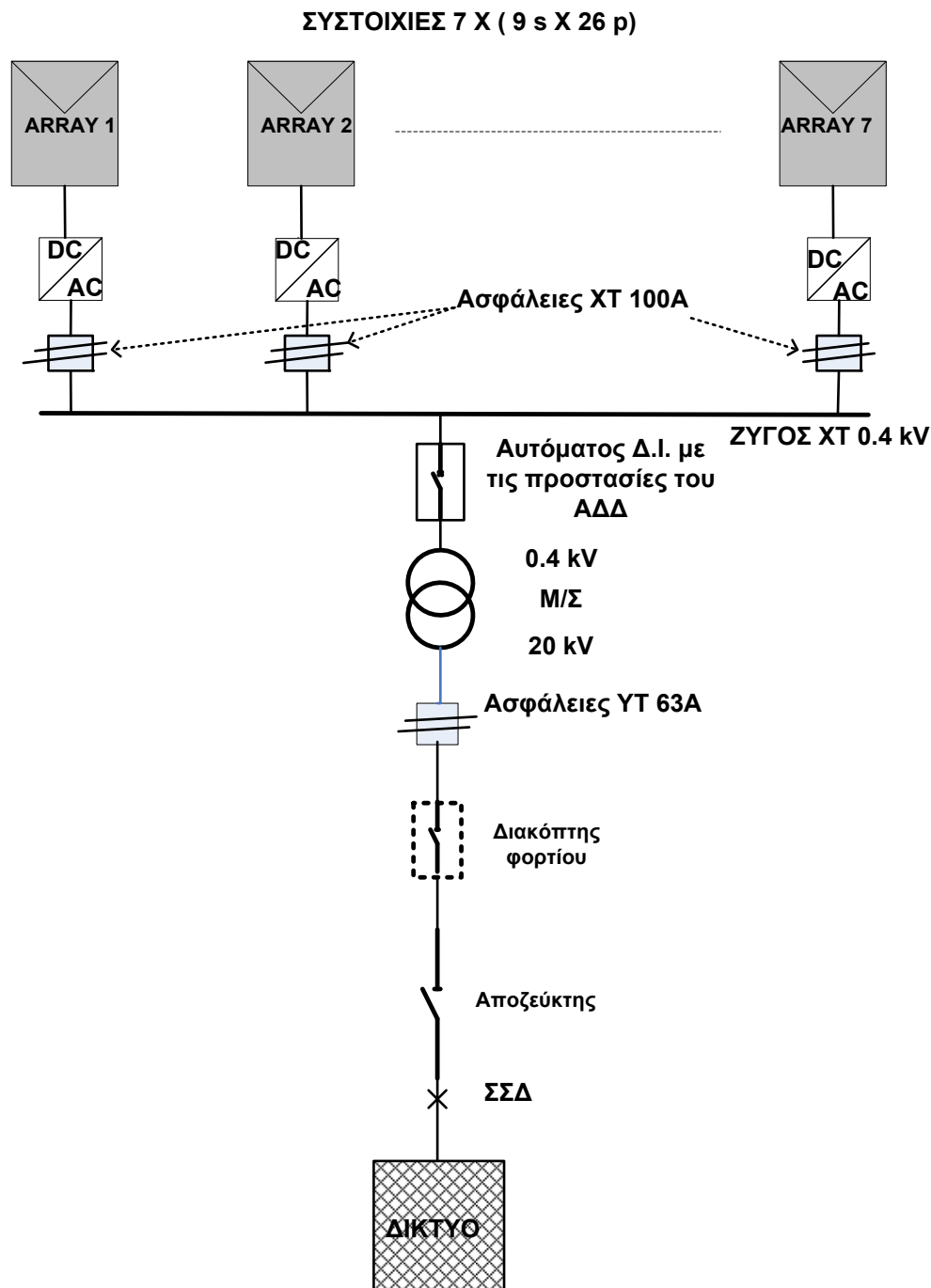


Σχέδιο 53. 2 τυπικές προτεινόμενες διαμορφώσεις συνδέσεων για διανεμημένους παραγωγούς μικρής ισχύος

7.3.4 Συνολική επισκόπηση των μέσων προστασίας και ζεύξης μέχρι το ΣΚΣ

Στην παρούσα εργασία έχουμε ήδη παρουσιάσει σχετική μελέτη προστασίας της εγκατάστασης παραγωγής έναντι υπερεντάσεων (εξαιτίας πιθανών υπερφορτίσεων και βραχυκυκλωμάτων) που μπορεί να παρουσιαστούν στο εσωτερικό της εγκατάστασης(XT) αλλά και στις 2 πλευρές του ΜΣ ανύψωσης. Η εκτίμηση των διατάξεων προστασίας και των ρυθμίσεων τους αφορούν πρωτίστως στην εξασφάλιση των στοιχείων της εγκατάστασης απέναντι σε υπερεντάσεις του παραπάνω τύπου. Με βάση το παρόν κεφάλαιο στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζουμε

το σύνολο των διατάξεων ζεύξης και προστασίας μέχρι και το σημείο κοινής σύνδεσης της εγκατάστασης με το δίκτυο της ΔΕΗ.



Σχέδιο 54. Διατάξεις προστασίας και ζεύξης. Στην περίπτωση που ο ΔΙ της εγκατάστασης πληρεί τις απαιτήσεις που περιγράφονται προηγουμένως για τον ΑΔΔ τότε μπορεί να επιφορτιστεί και με το ρόλο του ΑΔΔ.

Κεφάλαιο 8

Βραχυκυκλώματα

8.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία έχουμε ασχοληθεί κυρίως με προστασία έναντι βραχυκυκλωμάτων που μπορεί να εμφανιστούν στην πλευρά XT της εγκατάστασης. Εδώ παραθέτουμε μερικά βασικά στοιχεία που αφορούν κυρίως σε βραχυκυκλώματα που μπορεί να εμφανιστούν στο δίκτυο MT στο οποίο και συνδέεται η υπό μελέτη εγκατάσταση. Τα σφάλματα αυτά μπορεί να οφείλονται σε ρύπανση μονωτήρων, σε βλάβες καλωδίων κλπ. Στατιστικά να πούμε ότι στα δίκτυα MT και XT συμβαίνουν περίπου 15 σφάλματα ανά 100km δικτύου ανά έτος.

Το τριπολικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς επαφή γης συνοδεύεται με την εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων βραχυκύκλωσης και είναι μια από τις σημαντικότερες περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων. Να πούμε ότι το τριπολικό βραχυκύκλωμα είναι ένα συμμετρικό σφάλμα και τα ρεύματα που εμφανίζονται δεν επηρεάζονται από την ενδεχόμενη επαφή προς τη γη. Άλλες σημαντικές κατηγορίες είναι το διπολικό ή μονοπολικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς επαφή γης.

Τα στοιχεία του δικτύου πρέπει να αντέχουν στις δυναμικές (μηχανικές) καταπονήσεις που προκαλούνται από τις ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις οι οποίες

αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των ρευμάτων βραχυκύκλωσης. Επίσης πρέπει να αντέχουν στις θερμικές καταπονήσεις που προκαλούνται από την ανύψωση της θερμοκρασίας και οφείλονται στις μεγάλες ωμικές απώλειες κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων.

Η τιμή του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης χρειάζεται για τον υπολογισμό της αντοχής διαφόρων στοιχείων του δικτύου ή για την επιλογή των κατάλληλων στοιχείων από σειρές τυποποιημένων υλικών.

Η τιμή του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης χρειάζεται για τη ρύθμιση του συστήματος προστασίας, το οποίο πρέπει να λειτουργεί και όταν οι τιμές των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως είναι μικρές.

8.2 Βασικοί ορισμοί

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε 2 περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων: α) μακριά από γεννήτριες και β) κοντά σε γεννήτριες. Οι χρονικές συναρτήσεις των βραχυκυκλωμάτων καθορίζονται από ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα στις γεννήτριες και στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων. Και στις 2 περιπτώσεις το ρεύμα αποτελείται από 2 συνιστώσες: μια εναλλασσόμενη συνιστώσα με τη συχνότητα του δικτύου και μια συνεχή συνιστώσα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το σφάλμα εμφανίζεται όταν η τάση έχει μηδενική μέση τιμή.

Για σφάλμα κοντά στις γεννήτριες η ενδεικνυόμενη τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας ελαττώνεται από την αρχική τιμή I_k'' σε μια τελική τιμή I_k (μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης). Για σφάλμα μακριά από τις γεννήτριες είναι $I_k'' = I_k' = I_k$.

Σχέδιο 55. Χρονικές συναρτήσεις του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Εμφάνιση του σφάλματος όταν η τάση έχει μηδενική στιγμιαία τιμή. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα του χρόνου.

α) Βραχυκύκλωμα κοντά σε γεννήτριες και β) Βραχυκύκλωμα μακριά από γεννήτριες.

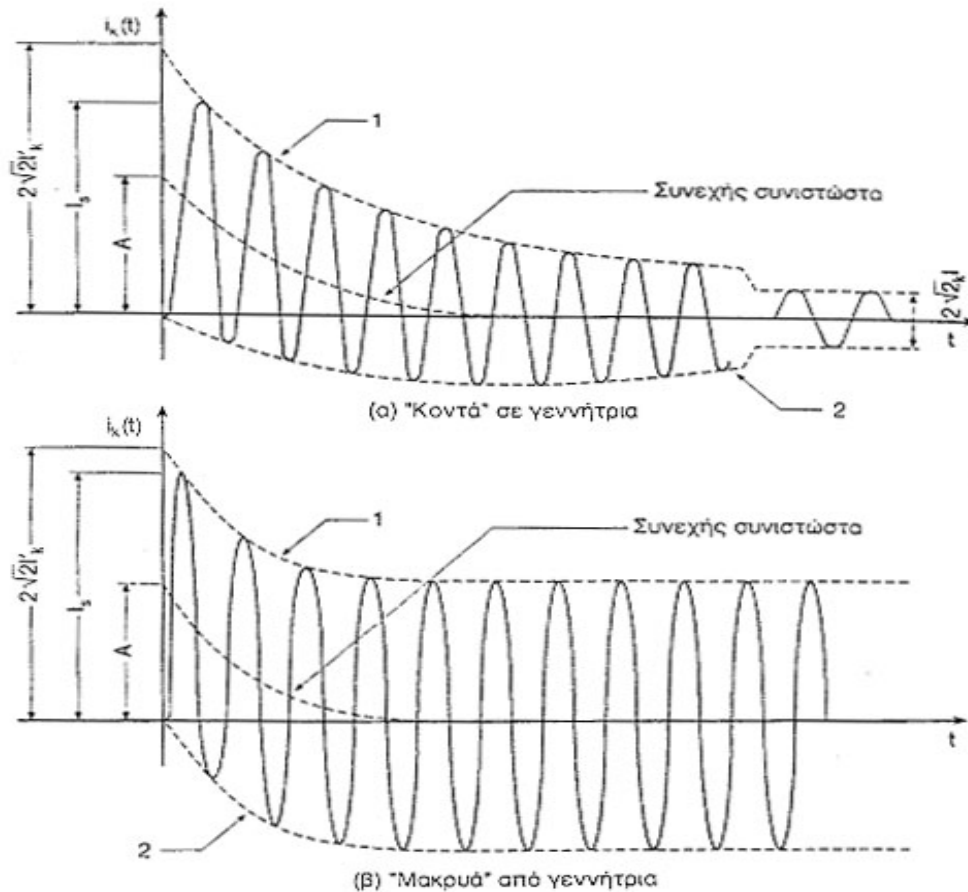
I_k'' : Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης.

I_s : Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης.

I_k : Μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

A: αρχική τιμή της συνεχούς συνιστώσας.

1 άνω περιβάλλουσα και 2 κάτω περιβάλλουσα



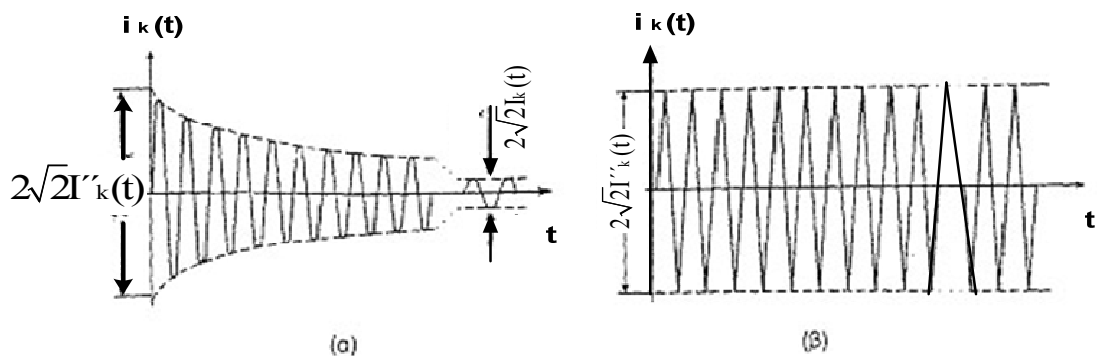
Συνεχής συνιστώσα στο ρεύμα μιας φάσης εμφανίζεται τη στιγμή που η στιγμιαία τιμή τάσης τροφοδότησης $e(t)$ δεν είναι μέγιστη ή ελάχιστη δηλαδή όταν ισχύει $\partial e(t) / \partial t \neq 0$.

Η συνεχής συνιστώσα αποκτά τη μέγιστη τιμή A όταν το βραχυκύκλωμα εμφανίζεται τη στιγμή που η αντίστοιχη τάση τροφοδότησης έχει μηδενική στιγμιαία τιμή. Σε αυτή την περίπτωση είναι $A = I_k'' \times \sqrt{2}$.

Όταν όμως κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος η τάση έχει τη μέγιστη ή ελάχιστη στιγμιαία τιμή της, δηλαδή όταν είναι $\partial e(t) / \partial t = 0$ τότε είναι $A=0$. Το ρεύμα είναι συμμετρικό ως προς τον άξονα t .

Σχέδιο 56. Χρονικές συναρτήσεις του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Εμφάνιση του σφάλματος όταν η τάση έχει τη μέγιστη ή ελάχιστη στιγμιαία τιμή.

α) Βραχυκύκλωμα κοντά σε γεννήτριες και β) Βραχυκύκλωμα μακριά από γεννήτριες.



Βασικοί ορισμοί σύμφωνα με τους κανονισμούς VDE0102:

1. Ρεύμα βραχυκύκλωσης $i_k(t)$ είναι το ρεύμα που ρέει κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος στη θέση του σφάλματος.
2. Εναλλασσόμενη συνιστώσα $i_{k\sim}(t)$ είναι η συνιστώσα του $i_k(t)$ με τη συχνότητα του δικτύου. $I_{k\sim}$ είναι η ενδεικνυμένη τιμή του $i_{k\sim}(t)$.
3. Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k'' είναι η ενδεικνυμένη τιμή του $i_{k\sim}(t)$ κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος.
4. Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_s είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης $i_k(t)$. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αποκτά τη μέγιστη τιμή του όταν η συνεχής συνιστώσα αποκτά τη μέγιστη τιμή της.
5. Μόνιμο Ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k είναι η ενδεικνυμένη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης που παραμένει μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.
6. Ρεύμα διέλευσης I_D ασφαλειών ή άλλων διατάξεων προστασίας είναι η μέγιστη στιγμιαία τιμή μέχρι τη διακοπή του σφάλματος.
7. Ρεύμα διακοπής I_a ενός διακόπτη είναι η ενδεικνυμένη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά τη στιγμή της διακοπής του πρώτου πόλου του διακόπτη.
8. Αρχική τάση ή υπομεταβατική τάση E'' : μιας ασύγχρονης μηχανής είναι η ενδεικνυμένη τιμή της εσωτερικής φασικής τάσης (φάση-ουδέτερος) που επενεργεί κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος.

9. Αρχική ή υπομεταβατική αντίδραση X_d'' : μιας σύγχρονης μηχανής είναι η επαγωγική αντίδραση της μηχανής κατά τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος.

Καθορίζεται από την ονομαστική τάση V_n και το αρχικό ρεύμα για το τριπολικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας υπό ονομαστικό αριθμό στροφών και ονομαστική διέγερση κενής λειτουργίας. Χρησιμοποιείται για των υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Ονομαστική αντίσταση της μηχανής:

$$Z_n = \frac{\frac{V_n}{\sqrt{3}}}{I_n} = \frac{V_n}{I_n \sqrt{3}} \frac{V_n}{V_n} = \frac{V_n^2}{S_n}$$

Συνήθως το μέγεθος X_d'' διαιρείται με την ονομαστική αντίσταση της μηχανής Z_n και δίνεται ως ανηγμένο μέγεθος σε μονάδες pu ή %:

$$X_d'' = \frac{X_d''}{Z_n} = \frac{X_d'' S_n}{V_n^2}$$

10. Τάση ισοδύναμης πηγής: $E_i = c V_n / \sqrt{3}$ είναι η τάση της ιδανικής πηγής τάσης που εισάγεται ως μόνη πηγή τάσης στο σημείο του σφάλματος.

V_n : η ονομαστική πολική τάση του δικτύου και

c : συντελεστής που δίνεται από αντίστοιχους πίνακες.

11. Αρχική ισχύς βραχυκύκλωσης S_k'' είναι το μέγεθος: $S_k'' = I_{k3p}' V_n \sqrt{3}$.

I_{k3p}' : αρχικό ρεύμα κατά το τριπολικό βραχυκύκλωμα.

V_n : η ονομαστική πολική τάση του δικτύου.

12. Ισχύς διακοπής S_a είναι το μέγεθος: $S_a = I_{a3p} V_n \sqrt{3}$.

I_{a3p} : το ρεύμα διακοπής κατά το τριπολικό βραχυκύκλωμα.

Τα μεγέθη S_k'' και S_a χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της αντοχής στοιχείων του δικτύου στις καταπονήσεις βραχυκυκλώσεως. Τα μεγαλύτερα ρεύματα και οι μεγαλύτερες θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις προκαλούνται συνήθως από το τριπολικό βραχυκύκλωμα, για αυτό και τα μεγέθη S_k'' και S_a ορίζονται μόνο για το βραχυκύκλωμα αυτό.

8.3 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης

8.3.1 Μέθοδος IEC 909

Η πλέον καθιερωμένη μέθοδος για των υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης είναι η μέθοδος της ισοδύναμης πηγής τάσης σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 909. Με βάση τη μέθοδο αυτή το αρχικό κύκλωμα στο οποίο συμβαίνει το βραχυκύκλωμα αντικαθίσταται από ένα ισοδύναμο κύκλωμα πάνω στο οποίο γίνονται απλοποιήσεις και τελικά υπολογίζονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης που χρειάζονται για τους υπολογισμούς.

Βάση του κανονισμού IEC 909 οι απλοποιήσεις είναι:

- Όλες οι πηγές τάσης βραχυκυκλώνονται
- Η μόνη τάσης επενεργεί στο σημείο του σφάλματος και η τιμή της είναι $E_i = cV_n / 3$.
- Τα ρεύματα λειτουργίας δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Οι χωρητικότητες των γραμμών δε λαμβάνονται υπόψη με εξαίρεση το ομοπολικό σύστημα δικτύων με αγείωτους ουδέτερους ή γειωμένους μέσω πηνίων Petersen.
- Οι μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού θεωρούνται ότι λειτουργούν στην ονομαστική τους λήψη.
- Επειδή ο συντελεστής c παραμένει αμετάβλητος για σφάλματα μακριά από γεννήτριες και κοντά σε γεννήτριες απαιτούνται διορθώσεις των εσωτερικών αντιστάσεων των γεννητριών και των μετασχηματιστών τους με τους συντελεστές K_G και K_T , που παρέχονται από αντίστοιχους πίνακες.
- Οι παθητικοί καταναλωτές δε λαμβάνονται υπόψη.

8.3.2 Σύνθετες αντιστάσεις

Για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης όλες οι αντιστάσεις ανάγονται σε μια τάση V_a η οποία συνήθως είναι η πολική τάση του τμήματος του δικτύου, στο οποίο εμφανίζεται το σφάλμα.

Αν η αντίσταση του δικτύου είναι Z_1 για την τάση V_1 τότε η αντίσταση του για την τάση V_a θα είναι:

$$Z_a = Z_1 \left(\frac{V_a}{V_1} \right)^2$$

Το ίδιο ισχύει και για την αναγωγή των αντιστάσεων των ΜΣ, έτσι αν έχουμε:

V_2 : τάση δευτερεύοντος

V_1 : τάση πρωτεύοντος

Z_1 : αντίσταση πρωτεύοντος

Τότε η Z_1 ανηγμένη στην τάση του δευτερεύοντος είναι:

$$Z_2 = Z_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

Ενεργά στοιχεία του δικτύου (στοιχεία με εσωτερικές τάσεις που συμβάλλουν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης) είναι: η σύγχρονη γεννήτρια, ο σύγχρονος κινητήρας, η τροφοδότηση από γειτονικά δίκτυα, και ο ασύγχρονος κινητήρας.

Παθητικά στοιχεία του δικτύου είναι: οι ΜΣ, οι εναέριες και υπόγειες γραμμές και τα πηνία περιορισμού ρεύματος. Παρίστανται γενικά με μία αντίσταση και αυτεπαγωγή σε σειρά. Οι χωρητικότητες γενικά παραλείπονται.

Βάση του κανονισμού IEC 909 για τα διάφορα στοιχεία του δικτύου δίνονται :η συμβολική αναπαράσταση, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα και ο τρόπος καθορισμού των σύνθετων αντιστάσεων. Εδώ θα παραθέσουμε μερικά βασικά παραδείγματα.

Τροφοδότηση από δίκτυο Q:

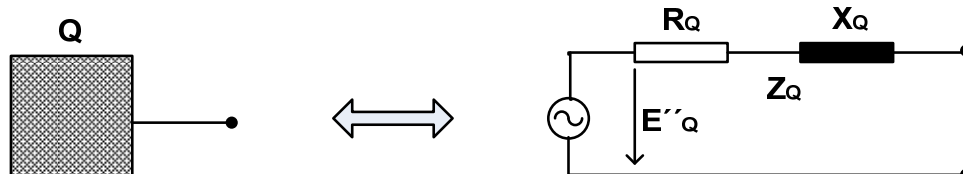
$$Z_Q = 1.1 \frac{V_{nQ}}{S_{kQ}} "$$

για δίκτυα με $V_n > 1$ kV

V_{nQ} ονομαστική πολική τάση για δίκτυα Q

S_{kQ}'' ισχύς βραχυκύκλωσης δικτύου Q

$R_Q/X_Q = 0.1$ και $X_Q = 0.995 Z_Q$



Εναέριες και υπόγειες γραμμές

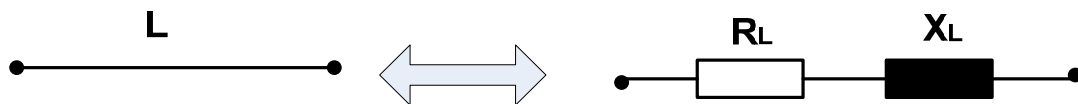
$$R_L = R'_L \times l$$

$$X_L = X'_L \times l$$

R'_L : ωμική αντίσταση ανά μονάδα μήκους

X'_L : επαγωγική αντίδραση ανά μονάδα μήκους

l : μήκος γραμμής



Μετασχηματιστής T

$$Z_{T(2)} = u_k \frac{V_{n(2)}^2}{S_n}$$

$$R_{T(2)} = u_r \frac{V_{n(2)}^2}{S_n} = \frac{P_{knT}}{S_n} \frac{V_{n(2)}^2}{S_n}$$

$$X_{T(2)} = \sqrt{Z_{T(2)}^2 - R_{T(2)}^2}$$

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2}$$

S_n ονομαστική ισχύς

V_n ονομαστική πολική τάση

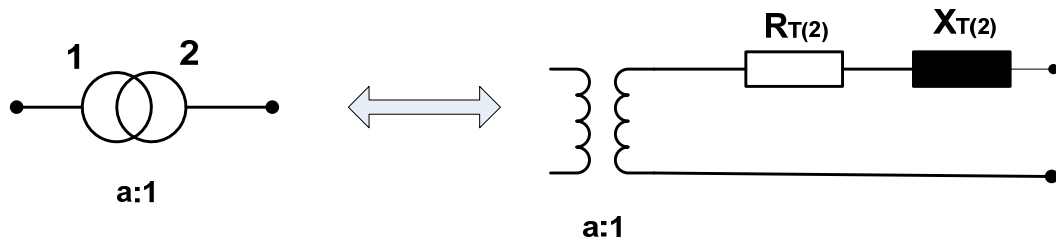
I_n ονομαστική ένταση

P_{knT} απώλειες χαλκού για φόρτιση με το ονομαστικό ρεύμα

u_k τάση βραχυκύκλωσης

u_r ωμική συνιστώσα του u_k

u_x επαγωγική συνιστώσα του u_k



Σύγχρονη γεννήτρια – σύγχρονος κινητήρας:

$$X_d'' = x_d'' \frac{V_n}{S_n}$$

V_n ονομαστική πολική τάση

S_n	ονομαστική φαινόμενη ισχύς	$R/X_d''=0.05$ για $S_n \geq 100$ MVA
x_d''	ανηγμένη αρχική αντίδραση	$R/X_d''=0.07$ για $S_n \leq 100$ MVA
X_d''	αρχική (υπομεταβατική) αντίδραση	$R/X_d''=0.15$ για μηχανές XT (<1kV)

8.3.3 Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k''

Η ένταση του τριπολικού βραχυκυκλώματος και ειδικότερα η υπομεταβατική συνιστώσα I_k'' (και ειδικότερα η αρχική της τιμή) αποτελεί τη βάση αναφοράς για τον υπολογισμό των λοιπών και υπολογίζεται πρώτη.

Ο υπολογισμός του I_k'' , σύμφωνα και με τις παραδοχές που αναφέρονται στην αρχή της παραγράφου αυτής, γίνεται θεωρώντας το κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα του όλου συστήματος ως προς τη θέση του σφάλματος με εσωτερική ΗΕΔ $E_i = 1.1V_n / \sqrt{3}$ και αντίσταση Z_l ίση με την ισοδύναμη αντίσταση που προκύπτει αν όλες οι πηγές βραχυκυκλωθούν. Έτσι μπορούμε να πάρουμε:

$$\text{Αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης : } I_{k3p}'' = E_i / Z_l$$

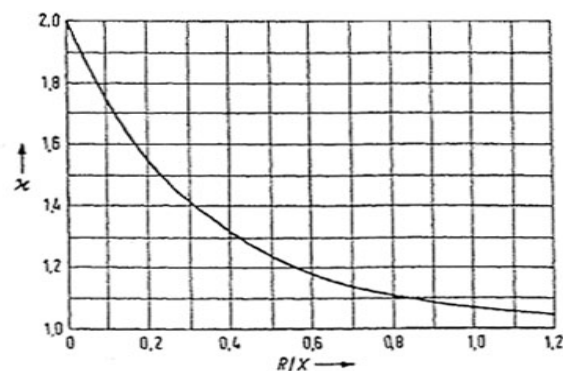
$$\text{Ισχύς βραχυκύκλωσης : } S_k'' = V_n I_{k3p}'' \sqrt{3}.$$

Με γνωστό πλέον το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης και με χρήση συντελεστών και τυποποιημένων πινάκων που παρατίθενται σε κανονισμούς μπορούμε να υπολογίσουμε το κρουστικό ρεύμα, το ρεύμα διακοπής και το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

8.3.4 Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_s

Το κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης(μέγιστη στιγμιαία τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης) υπολογίζεται με βάση το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k'' . Για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα είναι $I_s = \kappa I_k'' \sqrt{2}$.

Ο συντελεστής κ λαμβάνεται από το σχήμα:



Σχέδιο 57. Ο συντελεστής κ εξαρτάται από το λόγο R/X (ωμικής προς επαγωγικής συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης που διαρρέεται από το ρεύμα βραχυκυκλώσεως)

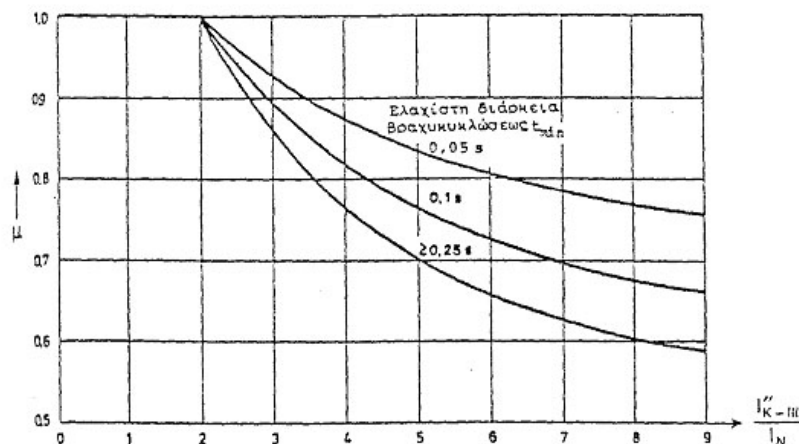
Ο συντελεστής κ μπορεί επίσης να υπολογίζεται κατά προσέγγιση και από την σχέση: $\kappa = 1.02 + 0.98e^{-3R/X}$. Το κρουστικό ρεύμα I_s χρησιμεύει στον υπολογισμό των μέγιστων μηχανικών καταπονήσεων τις οποίες υφίστανται τα στοιχεία του δικτύου κατά τη διάρκεια των βραχυκυκλωμάτων (π.χ. ζυγοί, στηρίγματα μονωτήρων, μέσα ζεύξεως κλπ).

8.3.5 Υπολογισμός ρεύματος διακοπής I_a

Κατά τη στιγμή της διακοπής οι διακόπτες καταπονούνται από το ρεύμα διακοπής I_a . Το I_a σε ορισμένες περιπτώσεις, δηλαδή σε σφάλματα κοντά σε σύγχρονες μηχανές ή κοντά σε μεγάλους ασύγχρονους κινητήρες, μπορεί να είναι μικρότερο από το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k'' . Αρκεί λοιπόν οι διακόπτες να είναι ικανοί να διακόψουν το «ρεύμα διακοπής» $I_a \leq I_k''$. Το I_a μπορεί να υπολογίζεται κατά τους κανονισμούς ως εξής:

Σύγχρονες γεννήτριες:

Ισχύει ότι : $I_a = \mu I_k''$, όπου μ είναι συντελεστής που λαμβάνεται από το σχήμα που ακολουθεί.



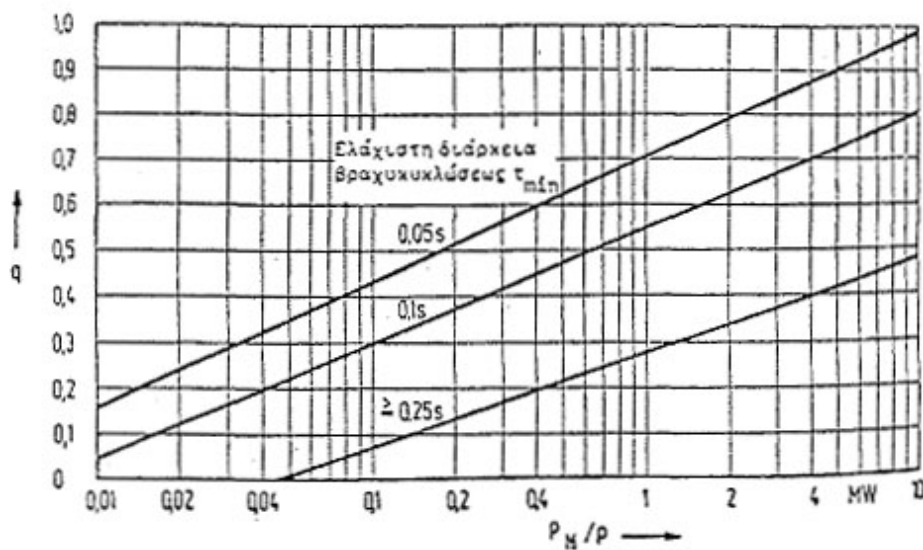
Σχέδιο 58. Το σχήμα δείχνει το συντελεστή μ ως συνάρτηση του αρχικού ρεύματος της γεννήτριας ανηγμένο στο ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας I_N .

Ο χρόνος $t_{\min}$ είναι ο ελάχιστος χρόνος από τη στιγμή εμφάνισης του βραχυκυκλώματος μέχρι τη διακοπή του πρώτου πόλου του διακόπτη, είναι δηλαδή το άθροισμα του χρόνου λειτουργίας των H/N και του χρόνου λειτουργίας του διακόπτη (ελάχιστος χρόνος εκκαθαρίσεως του σφάλματος). Χρονικές καθυστερήσεις ρυθμιζόμενες δεν λαμβάνονται υπόψη.

Ασύγχρονες μηχανές:

Το ρεύμα διακοπής υπολογίζεται από τη σχέση: $I_a = \mu q I_K''$, όπου ο συντελεστής μ λαμβάνεται από το προηγούμενο σχήμα και ο συντελεστής q λαμβάνεται από το επόμενο. Ο q είναι συνάρτηση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα, P_M , διαιρεμένης δια του αριθμού των ζευγών των πόλων p . Παράμετρος του σχήματος είναι πάλι ο χρόνος ελάχιστης διάρκειας βραχυκυκλώματος $t_{\min}$.

Να σημειώσουμε επίσης ότι για τις ασύγχρονες μηχανές το ρεύμα $I_K = 0$.



Συντελεστής q για τον υπολογισμό του ρεύματος διακοπής ασύγχρονων κινητήρων. P_M η ονομαστική ισχύς και p ο αριθμός ζευγών πόλων της μηχανής.

8.3.6 Υπολογισμός μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης I_k

Το μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k δεν μπορεί να προσδιοριστεί με την ακρίβεια που υπολογίζεται το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης I_k'' επειδή εξαρτάται από τη διέγερση των γεννητριών, τον μαγνητικό κορεσμό και την αλλαγή της δομής του δικτύου με το άνοιγμα των διακοπτικών στοιχείων κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

Μπορούμε όμως να εκτιμήσουμε τη μέγιστη οριακή τιμή I_{kmax} και ελάχιστη οριακή τιμή I_{kmin} του μόνιμου ρεύματος βραχυκύκλωσης βάσει συντελεστών, οι οποίοι λαμβάνονται από υπάρχοντες πίνακες και διαγράμματα που παρατίθενται σε κανονισμούς.

Το μέγιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση $I_{k,max} = \lambda_{max} I_n$. Ο συντελεστής λ_{max} διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της γεννήτριας. Έτσι έχουμε διαφορετικό συντελεστή για γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα και για γεννήτριες με έκτυπους πόλους. Ο συντελεστής λ_{max} εξαρτάται από τα ακόλουθα μεγέθη:

I_{k3p}'' : το αρχικό (ή υπομεταβατικό) ρεύμα του τριπολικού βραχυκυκλώματος.

I_n : το ονομαστικό ρεύμα της γεννήτριας.

x_d : παράμετρος.

$E_{\delta max}$: μέγιστη τάση διέγερσης γεννήτριας.

Ως παράμετρος λαμβάνεται το x_d που είναι η ανηγμένη τιμή της κορεσμένης μόνιμης σύγχρονης αντίδρασης. Η τιμή αυτή είναι ο αντίστροφος λόγος βραχυκυκλώσεως. Λόγος βραχυκυκλώσεως είναι ο λόγος του ρεύματος διεγέρσεως κενής λειτουργίας για ονομαστική τάση προς το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης ώστε το μόνιμο ρεύμα τριπολικού βραχυκυκλώματος των ακροδεκτών της γεννήτριας να είναι ίσο με το ονομαστικό της ρεύμα.

Οι τιμές λ_{max} ισχύουν για βραχυκυκλώματα μετά από προγενέστερη φόρτιση με ονομαστική ισχύ και ονομαστικό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες λ_{max} εξαρτώνται από τη μέγιστη τάση διέγερσης $E_{\delta max}$.

Το ελάχιστο μόνιμο ρεύμα βραχυκύκλωσης δίνεται από τη σχέση : $I_{kmin} = \lambda_{min} I_n$. Ο συντελεστής λ_{min} είναι διαφορετικός αντίστοιχα για γεννήτριες με κυλινδρικό δρομέα και γεννήτριες με έκτυπους πόλους και λαμβάνεται από αντίστοιχους πίνακες.

8.4 Υπολογισμός ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε δίκτυα XT

Η μέθοδος που προτείνεται για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης από τον κανονισμό IEC909 βρίσκει εφαρμογή και στα δίκτυα XT. Ωστόσο αν στους υπολογισμούς των ρευμάτων βραχυκύκλωσης δεν λάβουμε υπόψη την εσωτερική αντίσταση του δικτύου MT ή YT, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης, το σφάλμα που εισάγεται είναι μικρό και βρισκόμαστε στην ασφαλή πλευρά για τους υπολογισμούς μας. Παραλείπουμε δηλαδή από τους υπολογισμούς την αντίσταση $Z_Q = 1.1 \frac{V_{nQ}}{S_{kQ}}$.

Για παράδειγμα για να υπολογίσουμε το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δευτερεύον ενός ΜΣ, πλευρά XT δηλαδή 0.4kV, χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$I_{k3p}'' = \frac{E''}{\sqrt{X_T^2 + R_T^2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0.4kV}{\sqrt{X_T^2 + R_T^2} \cdot \sqrt{3}}$$

Στην παραπάνω σχέση έχουμε λάβει την τάση της ισοδύναμης πηγής $E_i = V_n / \sqrt{3}$, με $V_n = 0.4 \text{ kV}$.

X_T και R_T είναι η επαγωγική και ωμική αντίσταση του ΜΣ.

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{P_{CU}}{S_n} & R_T &= u_r \frac{V_n^2}{S_n} \\ u_x &= \sqrt{u_k^2 - u_r^2} & X_T &= u_x \frac{V_n^2}{S_n} \end{aligned}$$

Από τους παραπάνω τύπους μπορούμε να υπολογίσουμε τα R_T και X_T αν έχουμε τα μεγέθη u_k και PCU που συνήθως δίνονται από τους κατασκευαστές των ΜΣ. Έτσι για δίκτυο ονομαστικής πολικής τάσης $V_n=0.4\text{kV}$ και για ΜΣ ονομαστικής ισχύος $S_n=500\text{KVA}$ με $u_k=4\%=0.04$ και $PCU=7100\text{W}$ προκύπτουν τα εξής: $u_r=1,42\%=0,0142$, $u_x=3,75\%=0,0375$, $X_T=0,012\Omega=12\text{m}\Omega$ και $R_T=0,004\Omega=4\text{m}\Omega$. Συνεπώς με τις κατάλληλες αντικαταστάσεις μπορούμε να υπολογίσουμε το αρχικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στο δευτερεύον του ΜΣ:

$$I_{k3p}'' = \frac{E''}{\sqrt{X_T^2 + R_T^2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0.4\text{kV}}{\sqrt{12^2 + 4^2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{0.4}{\sqrt{12^2 + 4^2} \cdot \sqrt{3}} \text{kA} = 18\text{kA}$$

Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε και με τη χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$I_{k\delta} = \frac{1}{u_k} I_{n\delta} = \frac{1}{0.04} 721\text{A} = 18025\text{A} = 18\text{kA} \quad , \quad \text{η οποία χρησιμοποιήθηκε σε}$$

προηγούμενο κομμάτι της εργασίας για την εκτίμηση των προστασιών X_T της εγκατάστασης. Και με αυτόν τον τρόπο υπολογισμού πρακτικά δεν λαμβάνουμε υπόψη την ισχύ βραχυκύκλωσης και την εσωτερική αντίσταση του δικτύου του δικτύου μέσης τάσης. Θεωρούμε ότι η τιμή του αρχικού ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται από την ισχύ και την τάση βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή μέσης προς χαμηλής τάσης ή χαμηλής προς μέσης τάσης.

Να σημειώσουμε ακόμα ότι η μέθοδος του κανονισμού IEC909 μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε περίπτωση ακτινικού δικτύου X_T . Σε αυτή την περίπτωση αρκεί να λάβουμε υπόψη την εμπέδηση της γραμμής του δικτύου X_T για τον υπολογισμό του αρχικού ρεύματος βραχυκύκλωσης. (19)

Βιβλιογραφία

1. 03ΕΔ-400-METPO 8.3.1.
2. **W.A.Beckman, J.A.Duffie &.** *Solar engineering of thermal processes.* s.l. : Wiley, 1991.
3. **PVSYST.** *Documentation.* 2003.
4. **Ι.Ε.ΦΡΑΓΚΙΑΔΑΚΗΣ.** *ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.* 2006.
5. **Κ.Γκαγκαράκης.** *Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.* 1992.
6. **Θωμάς, Ζαχαρίας.** *ΗΠΙΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 2.* 2005.
7. ABB Switzerland Ltd. CMC Low Voltage Products.ABB.
8. **2003, PVSYST-ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.** *PVSYST-ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ* 2003.
9. **M.ROPP.** *EVALUATION OF ISLANDING DETECTION METHODS FOR PHOTOVOLTAIC UTILITY-INTRACTIVE SYSTEMS.* s.l. : IEA, 2002.
10. *REVIEW OF ANTI-ISLANDING TECHNIQUES.* **NAXAKIS-LAZAROY.** s.l. : MEDPOWER.
11. **Γ.Β.Γιαννακόπουλος&Ν.Α.Βοβός.** *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.* Πατρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2005.
12. **Wilsun Xu, Konrad Mauch,Sylvain Martel,.** *An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection.* s.l. : CETC, 2004.
13. **Roon, Van.** April 2006.
14. **support, SMA technical.**

15. **Δ.Κ.Τσανάκας.** *Ειδικά κεφάλαια ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και δικτύων.* Πάτρα : s.n., 2004.
16. **Π.Ντοκόπουλος.** *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών.* 2005.
17. **ΔΗΜΟΣΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ.** ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ. ΜΑΡΤΗΣ 2004.
18. **Σ.Α.ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ.** ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ. s.l. : ΕΜΠ, 2003.
19. **Δ.Κ.Τσανάκας.** *ΕΙΔΙΚΑ ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.* ΠΑΤΡΑ : ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, 2003.