



**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**«ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ**  
**ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ»**



**Επιβλέπων Καθηγητής:** ΚΑΜΙΝΑΡΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ,  
**Σπουδαστής:** ΠΑΠΠΑΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

**Επίκουρος Καθηγητής**  
**ΑΜ:** 33292

Αιγάλεω, Μάρτιος 2014

Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

*Θερμές ευχαριστίες στους καθηγητές του Τ.Ε.Ι και στους Προϊσταμένους της Υπηρεσίας μου, που, ο καθένας με τον τρόπο του, με βοήθησε σημαντικά, κατανοώντας την δύσκολη προσπάθειά μου να συνδυάσω την φοίτησή μου στο Ίδρυμα με την εργασία μου σε Δημόσια Υπηρεσία.*

*Ευχαριστώ τον Καθηγητή του Ιδρύματος κ. ΣΤΑΥΡΟ ΚΑΜΙΝΑΡΗ, που μου εμπιστεύτηκε την παρούσα Πτυχιακή Εργασία, την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς και τα εύλογα χρονικά περιθώρια.*

*Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ιδίως τον **πατέρα μου**, τον οποίο έχασα πρόσφατα, για την μεγάλη ενθάρρυνση και την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφερε προκειμένου να συνεχίσω και να μην παρατήσω τη Σχολή και γι' αυτό του αφιερώνω όλη μου αυτή την προσπάθεια καθώς και το Πτυχίο μου.*

**Σας Ευχαριστώ θερμά όλους σας!!!**

**ΠΑΠΠΑΣ Ι. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	<b>4</b>
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>6</b>
<b>1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Εισαγωγή στα ηλεκτρολογικά κυκλώματα</b> .....	<b>7</b>
1.1. Βασικά ηλεκτρικά μεγέθη .....	7
1.1.1. Ηλεκτρικό φορτίο.....	7
1.1.2. Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.....	7
1.1.3. Ηλεκτρική τάση.....	8
1.1.4. Ηλεκτρική ισχύς.....	8
1.1.5. Ηλεκτρική ενέργεια.....	8
1.1.6. Μαγνητική ροή.....	9
1.1.7. Ορισμοί – Φορές αναφοράς .....	9
1.1.8. Κλάδος κυκλώματος – Συμβάσεις αναφοράς .....	9
1.1.9. Κόμβος – Βρόχος κυκλώματος .....	10
1.1.10. Συγκεντρωμένα κυκλώματα .....	10
1.1.11. Κατανομημένα κυκλώματα .....	12
1.1.12. Πολικότητα ή Φορά αναφοράς βρόχου.....	12
1.2. Είδη ρευμάτων .....	13
1.3 Ηλεκτρικά στοιχεία και συμπεριφορές .....	14
1.3.1. Ανεξάρτητες πηγές τάσης και ρεύματος .....	15
1.3.2. Αντιστάτης .....	17
1.3.3. Πυκνωτής .....	20
1.3.4. Πηνίο .....	23
1.3.5. Στοιχείο αλληλεπαγωγής.....	27
1.4. Μέθοδοι υπολογισμού ηλεκτρικών κυκλωμάτων .....	31
1.4.1. Πραγματική πηγή τάσης.....	31
1.4.2. Πραγματική πηγή ρεύματος .....	32
1.4.3. Ισοδυναμία πραγματικής πηγής τάσης και πραγματικής πηγής ρεύματος .....	33
1.4.4. Ο πρώτος νόμος ή ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff.....	34
1.4.5. Ο νόμος των τάσεων ή ο νόμος των βρόχων του Kirchhoff .....	35
1.4.6. Το θεώρημα του Tellegen .....	37
1.4.7. Ισοδυναμία κυκλωμάτων .....	37
1.4.8. Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά .....	38
1.4.9. Σύνδεση πηνίων σε σειρά.....	39
1.4.10. Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά.....	40
1.4.11. Σύνδεση ανεξάρτητων πηγών τάσης σε σειρά .....	41
1.4.12. Σύνδεση ανεξάρτητων πηγών ρεύματος σε σειρά .....	41
1.4.13. Σύνδεση στοιχείων δύο ακροδεκτών παράλληλα .....	42
1.4.14. Παράλληλη συνδεσμολογία αντιστάσεων .....	42
1.4.15. Παράλληλη συνδεσμολογία πηνίων.....	43
1.4.16. Παράλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών.....	44
1.4.17. Παράλληλη συνδεσμολογία ανεξάρτητων πηγών τάσης .....	45
1.4.18. Παράλληλη συνδεσμολογία ανεξάρτητων πηγών ρεύματος.....	46
1.4.19. Μικτή συνδεσμολογία στοιχείων δύο ακροδεκτών .....	46

1.4.20. Διαιρέτης τάσης και διαιρέτης ρεύματος .....	50
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Σχεδιασμός Φ/Β συστημάτων .....</b>	<b>53</b>
2.1. Επιλογή Φ/Β πλαισίου.....	54
2.1.1. Είδη Φ/Β πλαισίων .....	55
2.1.2. Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.....	55
2.1.3. Μέγιστο σημείο λειτουργίας .....	56
2.1.4. Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος, τάσης και ισχύος .....	56
2.1.5. Επίδραση της ακτινοβολίας στο βαθμό απόδοσης του Φ/Β πλαισίου .....	58
2.1.6. Απώλειες σε φωτοβολταϊκά συστήματα .....	59
2.2. Επιλογή μετατροπέα (inverter).....	63
2.3. Διαστασιολόγηση Φ/Β συστήματος.....	66
<b>3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Ηλεκτρικός πίνακας Φ/Β συστήματος .....</b>	<b>72</b>
3.1. Πίνακας συνεχούς ρεύματος (DC) .....	74
3.2. Πίνακας εναλλασσόμενου ρεύματος (AC).....	75
3.3. Μονογραμμικό σχέδιο Φ/Β εγκατάστασης .....	77
<b>4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Καλώδια συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος (DC/AC) 79</b>	
4.1. Κριτήρια επιλογής καλωδίων συνεχούς ρεύματος.....	80
4.2. Κριτήρια επιλογής καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος .....	81
<b>5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Γειώσεις σε Φ/Β συστήματα.....</b>	<b>83</b>
5.1. Διατάξεις γείωσης .....	85
5.1.1. Γείωση λειτουργίας .....	85
5.1.2. Γείωση προστασίας .....	85
5.1.3. Γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (Σ.Α.Π) .....	87
5.2. Είδη ηλεκτροδίων γείωσης.....	89
5.3. Η τεχνική της θεμελιακής γείωσης .....	95
5.4. Αντίσταση γείωσης .....	95
<b>6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: Αντικεραυνική προστασία .....</b>	<b>98</b>
6.1. Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας.....	98
6.2. Χαρακτηριστικά κεραυνικού ρεύματος .....	99
6.3. Σχεδιασμός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας .....	102
6.3.1. Μη συμβατικές διατάξεις σύλληψης του κεραυνού.....	103
6.3.2. Αποτίμηση κινδύνου από πλήγμα κεραυνού.....	105
6.3.3. Στάθμες προστασίας.....	106
6.3.4. Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή .....	106
6.3.5. Υπολογισμός της μέσης ετήσιας πυκνότητας πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος .....	107
6.3.6. Αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή.....	108
6.4. Μετάδοση κρουστικών υπερτάσεων .....	109
6.5. Απαγωγί κρουστικών υπερτάσεων.....	111
6.5.1. Είδη απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων.....	114
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>116</b>

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σκοπό την μελέτη των ηλεκτρολογικών κυκλωμάτων των Φωτοβολταϊκών Συστημάτων.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στα ηλεκτρολογικά κυκλώματα, η οποία περιέχει τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη, τα είδη των ρευμάτων, περιγράφει τα ηλεκτρικά στοιχεία και τις συμπεριφορές τους και παρουσιάζει τις μεθόδους υπολογισμού των ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται ο σχεδιασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ο σχεδιασμός συνεπάγεται την επιλογή των φωτοβολταϊκών πλαισίων, την επιλογή του μετατροπέα (inverter) και την διαστασιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στο κεφάλαιο 3 παρατίθεται μία περιγραφή του ηλεκτρικού πίνακα του Φ/Β συστήματος, ο οποίος περιλαμβάνει τον πίνακα συνεχούς ρεύματος (DC) και τον πίνακα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Επιπλέον παρουσιάζεται και το μονογραμμικό σχέδιο μιας Φ/Β εγκατάστασης ισχύος 10 KW και 100 KW. Δηλαδή το μονογραμμικό σχέδιο μιας Φ/Β εγκατάστασης σε οικία και σε πάρκο αντίστοιχα.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μνεία για τα καλώδια που χρησιμοποιούνται και συγκεκριμένα για τα καλώδια συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και τα κριτήρια βάσει των οποίων επιλέγονται.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται οι γειώσεις των Φ/Β συστημάτων. Συγκεκριμένα αναφέρονται οι διατάξεις γείωσης, τα είδη των ηλεκτροδίων γείωσης και περιγράφεται η τεχνική της Θεμελιακής Γείωσης και η αντίσταση γείωσης.

Τέλος στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η αντικεραυνική προστασία ενός Φ/Β συστήματος. Εδώ περιγράφονται τα πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας, αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του κεραυνικού ρεύματος, ο σχεδιασμός του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και αναλύεται η μετάδοση των κρουστικών υπερτάσεων καθώς και οι απαγωγοί των κρουστικών υπερτάσεων.

# 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

## «Εισαγωγή στα ηλεκτρολογικά κυκλώματα»

### 1.1. Βασικά ηλεκτρικά μεγέθη

Τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη, οι τιμές των οποίων αναζητούνται ή ενδιαφέρουν στην ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων, είναι στη γενική περίπτωση συναρτήσεις του χρόνου και είναι το ηλεκτρικό φορτίο, η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος, η ηλεκτρική τάση ή διαφορά δυναμικού, η ηλεκτρική ισχύς, η ηλεκτρική ενέργεια και η μαγνητική ροή.

#### (1.1.1) Ηλεκτρικό φορτίο (electric charge)

Η έννοια του ηλεκτρικού φορτίου,  $Q$  ή  $q$ , εισήχθη για να επεξηγηθεί η ύπαρξη διαφόρων ηλεκτρικών φαινομένων. Η ύπαρξη ηλεκτρικού φορτίου προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών (H/M) πεδίων. Η εισαγωγή τώρα άλλων ηλεκτρικών φορτίων μέσα σε H/M πεδία, έχει ως αποτέλεσμα, την άσκηση δυνάμεων ελκτικών ή απωστικών πάνω στα φορτία, οι οποίες ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις.

Μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου είναι το Coulomb (Cb) και ορίζεται ως το φορτίο που μεταφέρεται σε χρόνο 1 (s) από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 1 (A). Η μικρότερη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-9}$ (Cb), ενώ το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου είναι,  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-9}$ (Cb). Όλα τα ηλεκτρικά φορτία που παρατηρούνται στη φύση είναι πολλαπλάσια του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου του ηλεκτρονίου.

#### (1.1.2) Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (electric current)

Ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων μέσα από ένα μέσο (π.χ. αγωγό). Το ηλεκτρικό ρεύμα ορίζεται από τη διεύθυνση και τη φορά κίνησης των ηλεκτρικών φορτίων, καθώς και από την ποσότητά τους. Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα μέσο ορίζεται ως το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο που περνά μέσα από μια διατομή του μέσου στη μονάδα του χρόνου. Εάν μέσα από τη διατομή του μέσου κίνησης των φορτίων περάσουν  $dq$  φορτία σε χρονικό διάστημα  $dt$ , η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από το μέσο με κατεύθυνση αυτή της κίνησης των φορτίων είναι:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

Η αιτία που προκαλεί τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από ένα μέσο είναι η ηλεκτρική τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του μέσου. Εάν η ηλεκτρική τάση έχει σταθερή τιμή με το χρόνο, τότε και η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος έχει σταθερή τιμή με το χρόνο και ονομάζεται συνεχές ρεύμα (direct current, dc). Αντιθέτως, εάν η στιγμιαία τιμή της ηλεκτρικής τάσης μεταβάλλεται με το χρόνο, τότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι γενικά μεταβαλλόμενη. Στην ειδική περίπτωση που η ηλεκτρική τάση προέρχεται από το δημόσιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΗ), η ηλεκτρική τάση μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και το ηλεκτρικό ρεύμα που προκύπτει μεταβάλλεται και αυτό ημιτονοειδώς και ονομάζεται εναλλασσόμενο

ρεύμα (alternating current, ac). Το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, διότι τα ρεύματα που συναντώνται στα συστήματα παραγωγής-μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ημιτονοειδή μορφή.

### (1.1.3) Ηλεκτρική τάση (electric voltage)

Ηλεκτρική τάση ή διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B,  $V_{AB}$ , εντός ενός ηλεκτροστατικού πεδίου ορίζεται ως το απαιτούμενο έργο που καταναλώνεται ή παράγεται  $dW$  κατά τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου  $dq$  από το σημείο A στο σημείο B εντός του πεδίου.

$$V_{AB} = \frac{dW}{dq} \quad (1.2)$$

Η ηλεκτρική τάση μεταξύ δύο σημείων είναι ανεξάρτητη από την τροχιά που θα ακολουθήσει το φορτίο κατά την μετακίνησή του από το ένα σημείο του ηλεκτρικού πεδίου στο άλλο και εξαρτάται μόνο από τη θέση των δύο αυτών σημείων (αστρόβιλο πεδίο).

Σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η διαφορά δυναμικού ή ηλεκτρική τάση στα άκρα ενός στοιχείου του κυκλώματος εκφράζει την ενέργεια (ή το έργο) που απαιτείται για την μετακίνηση ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου από το ένα άκρο του στοιχείου στο άλλο, δηλαδή την ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία ορισμένης έντασης ηλεκτρικού ρεύματος.

Μονάδα της ηλεκτρικής τάσης είναι το Volt,  $1(V) = 1(J)/1(Cb)$ .

### (1.1.4) Ηλεκτρική ισχύς (electric power)

Η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνεται ή παράγεται από ένα στοιχείο κυκλώματος  $p(t)$  είναι το γινόμενο της ηλεκτρικής τάσης στα άκρα του στοιχείου  $v(t)$  επί την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος  $i(t)$  που διαρρέει το στοιχείο

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1.3)$$

Μονάδα της ηλεκτρικής ισχύος είναι το Watt,  $1(W) = 1(V) \cdot 1(A)$ .

### (1.1.5) Ηλεκτρική ενέργεια (electric energy)

Εάν είναι γνωστή η χρονική εξάρτηση της ισχύος  $p(t)$  ενός στοιχείου κυκλώματος, τότε η ηλεκτρική ενέργεια  $W$  που καταναλώνεται στο στοιχείο ή παράγεται από αυτό εντός του χρονικού διαστήματος  $[t_1, t_2]$ , είναι:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1.4)$$

Μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το Joule,  $1(J) = 1(V) \cdot 1(Cb)$ .



### (1.1.6) Μαγνητική ροή (magnetic flux)

Η μαγνητική ροή  $\Phi$  ( $V \cdot s$ ) που διαπερνά μια επιφάνεια  $S$  ( $m^2$ ), η οποία τοποθετείται εντός μαγνητικού πεδίου με πυκνότητα μαγνητικής ροής (μαγνητική επαγωγή)  $B$  ( $V \cdot s/m^2$ ) ισούται με:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.5)$$

Εάν το μαγνητικό πεδίο είναι ομοιόμορφο (ομογενές) με σταθερό μέτρο μαγνητικής επαγωγής ( $|\mathbf{B}| = \text{σταθ.}$ ) σε όλα τα σημεία της επίπεδης επιφάνειας  $S$ , τότε η μαγνητική ροή που διαπερνά την επιφάνεια είναι:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta \quad (1.6)$$

Όπου:  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της μαγνητικής επαγωγής  $B$  και της καθέτου προς την επιφάνεια.

Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber,  $1(Wb) = 1(V) \cdot 1(s)$ .

### (1.1.7) Ορισμοί – Φορές αναφοράς

Τα ηλεκτρικά κυκλώματα αποτελούνται από ηλεκτρικά στοιχεία, τα οποία μπορεί να είναι στοιχεία δύο ακροδεκτών (αντίσταση, πυκνωτής, πηνίο) ή στοιχεία με περισσότερους ακροδέκτες (μετασχηματιστής, τρανζίστορ, θυρίστορ, τελεστικός ενισχυτής κλπ.) και τα οποία συνδέονται από τους ακροδέκτες τους με διάφορους τρόπους. Κάθε ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από κλάδους, οι οποίοι διαμορφώνουν τους βρόχους του κυκλώματος.

### (1.1.8) Κλάδος (branch) κυκλώματος – Συμβάσεις αναφοράς

Κάθε στοιχείο δύο ακροδεκτών ή οποιαδήποτε ομάδα συνδεδεμένων στοιχείων που σχηματίζουν ένα σύνολο δύο ακροδεκτών ονομάζεται *κλάδος* του κυκλώματος (Σχήμα 1.1α). Σε κάθε κλάδο κυκλώματος ορίζεται το *ρεύμα κλάδου* και η *τάση κλάδου*, δηλαδή η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο άκρα του στοιχείου, καθώς και οι λεγόμενες *φορές αναφοράς*, οι οποίες συσχετίζουν τη φορά του ρεύματος κλάδου με τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του.

Η *φορά αναφοράς του ρεύματος κλάδου* σημειώνεται με ένα βέλος και είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να οδηγείται από τον ακροδέκτη με το υψηλότερο δυναμικό (+) προς τον ακροδέκτη με το χαμηλότερο δυναμικό (-). Η *φορά αναφοράς της τάσης κλάδου* σημειώνεται με τα σημεία (+) και (-) ή με ένα βέλος που κατευθύνεται από το άκρο με το σημείο (-) προς το άκρο με το σημείο (+) (Σχήμα 1.1α). Οι φορές αναφοράς μπορούν να οριστούν αυθαίρετα, ωστόσο οι παραπάνω έχουν καθιερωθεί και καλούνται *συζευγμένες φορές αναφοράς* (associated reference direction).

Οι συζευγμένες φορές αναφοράς ρεύματος και τάσης κάθε κλάδου ενός κυκλώματος επιλέγονται πριν από την ανάλυση του κυκλώματος. Εάν το πραγματικό ρεύμα που θα προκύψει μετά την ανάλυση είναι θετικό, τότε η φορά του ρεύματος είναι αυτή που επιλέχθηκε αρχικά. Εάν το πραγματικό ρεύμα προκύψει αρνητικό, τότε η φορά του ρεύματος είναι αντίθετη από αυτή που επιλέχθηκε αρχικά. Το ίδιο ισχύει και για την τάση.

Αναφερόμενοι στο Σχήμα 1.1(α), η τάση στα άκρα του στοιχείου είναι  $V_{AB}(t) > 0$ , όταν το δυναμικό στον ακροδέκτη A είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό στον

ακροδέκτη Β. Επίσης, το ρεύμα μέσα από το στοιχείο είναι  $i(t) > 0$ , όταν κάθε χρονική στιγμή το ρεύμα εισέρχεται στο στοιχείο από τον ακροδέκτη Α και εξέρχεται από τον ακροδέκτη Β. Λαμβάνοντας υπόψη τις συζευγμένες φορές αναφοράς κλάδου Ι κυκλώματος, τότε εάν ισχύει

$$p_i(t) = v_i(t) * i_i(t) > 0 \quad (1.7)$$

σημαίνει ότι η στιγμιαία ισχύς ρέει προς τον θεωρούμενο κλάδο  $i$ , ενώ εάν ισχύει

$$p_i(t) = v_i(t) * i_i(t) < 0 \quad (1.8)$$

σημαίνει ότι η στιγμιαία ισχύς ρέει έξω από τον κλάδο  $i$ .

### (1.1.9) Κόμβος (node) – Βρόχος (loop) κυκλώματος

Τα κυκλώματα αποτελούνται από ένα πλήθος ηλεκτρικών στοιχείων, τα οποία διασυνδέονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους. Τα κοινά σημεία διασύνδεσης των στοιχείων ονομάζονται *κόμβοι*. Κόμβος είναι ο κοινός ακροδέκτης δύο ή περισσότερων κλάδων. Διακρίνονται σε *απλούς* (Σχήμα 1.1β) και *σύνθετους* (Σχήμα 1.1γ) κόμβους.

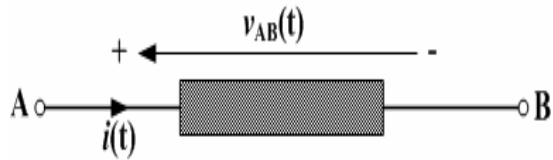
Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από το *ηλεκτρικό δυναμικό* που κατέχει. Τα ηλεκτρικά δυναμικά των κόμβων μετρούνται ως προς έναν κοινό κόμβο, ο οποίος ονομάζεται *κόμβος αναφοράς*, Ως κόμβος αναφοράς μπορεί να επιλεγεί ο οποιοσδήποτε κόμβος του κυκλώματος, συνήθως όμως επιλέγεται ο κόμβος στον οποίο συνδέονται οι περισσότεροι κλάδοι του κυκλώματος.

*Βρόχος* είναι οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή κλάδων. Εάν ο βρόχος δεν έχει στο εσωτερικό του άλλους κλάδους ονομάζεται *απλός βρόχος* (mesh). Ο βρόχος που περιλαμβάνει και άλλους κλάδους στο εσωτερικό του ονομάζεται *σύνθετος βρόχος* (loop). Στο Σχήμα 1.1(δ) ο βρόχος 1-3-4 είναι απλός και ο βρόχος 1-5-2 είναι σύνθετος.

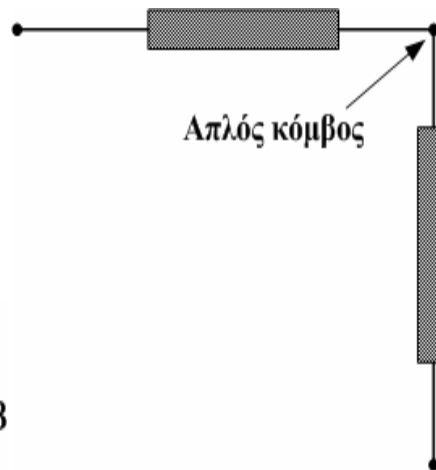
### (1.1.10) Συγκεντρωμένα κυκλώματα

Όταν οι διαστάσεις των ηλεκτρικών στοιχείων είναι πολύ μικρές σε σχέση με το μήκος κύματος του ρεύματος που τα διαρρέει (ρεύματα χαμηλών συχνοτήτων), τότε τα στοιχεία αυτά ονομάζονται *συγκεντρωμένα ηλεκτρικά στοιχεία*. Ηλεκτρικά κυκλώματα που αποτελούνται από συγκεντρωμένα ηλεκτρικά στοιχεία ονομάζονται *συγκεντρωμένα ηλεκτρικά κυκλώματα* (lumped circuits). Τα συγκεντρωμένα κυκλώματα υπακούουν στους νόμους του Kirchhoff. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα που εισέρχεται από τον έναν ακροδέκτη ενός ηλεκτρικού στοιχείου (π.χ τον Α στο Σχήμα 1.1α) είναι κάθε χρονική στιγμή ίσο με το ρεύμα που εξέρχεται από τον άλλο ακροδέκτη (Β) του στοιχείου και ακόμη η τάση στα άκρα του ηλεκτρικού στοιχείου  $V_{AB}$  προσδιορίζεται απόλυτα με μετρήσεις. Τα κυκλώματα που εξετάζονται στη συνέχεια αφορούν μόνο σε συγκεντρωμένα κυκλώματα.

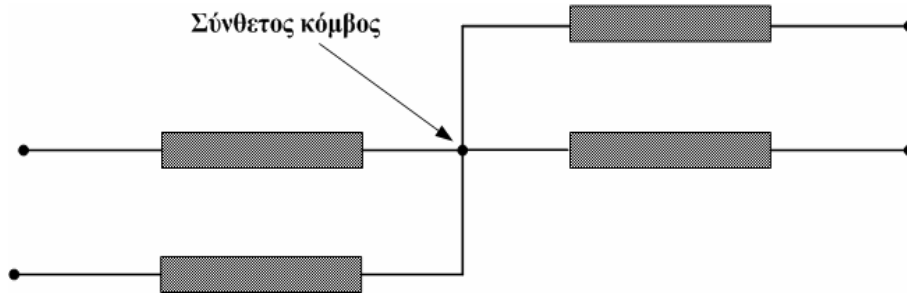
(α)



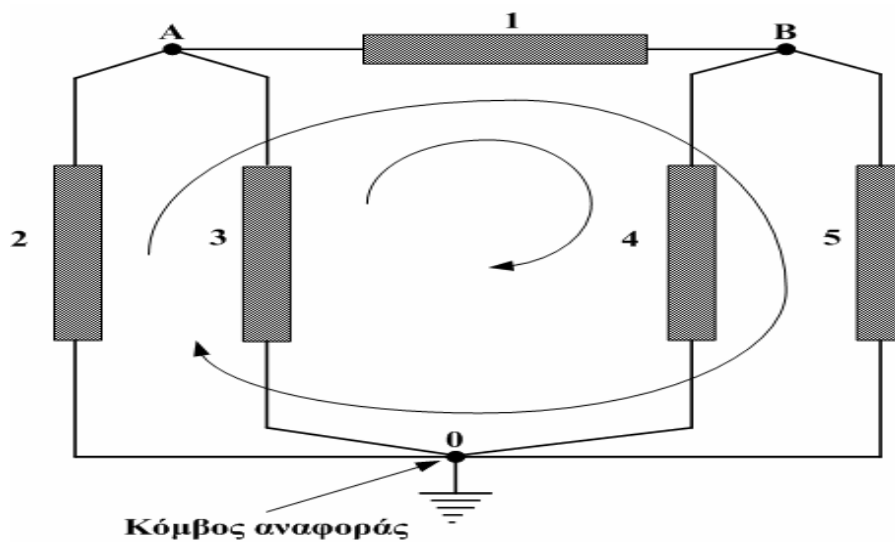
(β)



(γ)



(δ)



Σχήμα 1.1. (α) Φορές αναφοράς ρεύματος και τάσης κλάδου. (β) Απλός κόμβος. (γ) Σύνθετος κόμβος. (δ) Απλός βρόχος (1-3-4) και σύνθετος βρόχος (1-5-2).

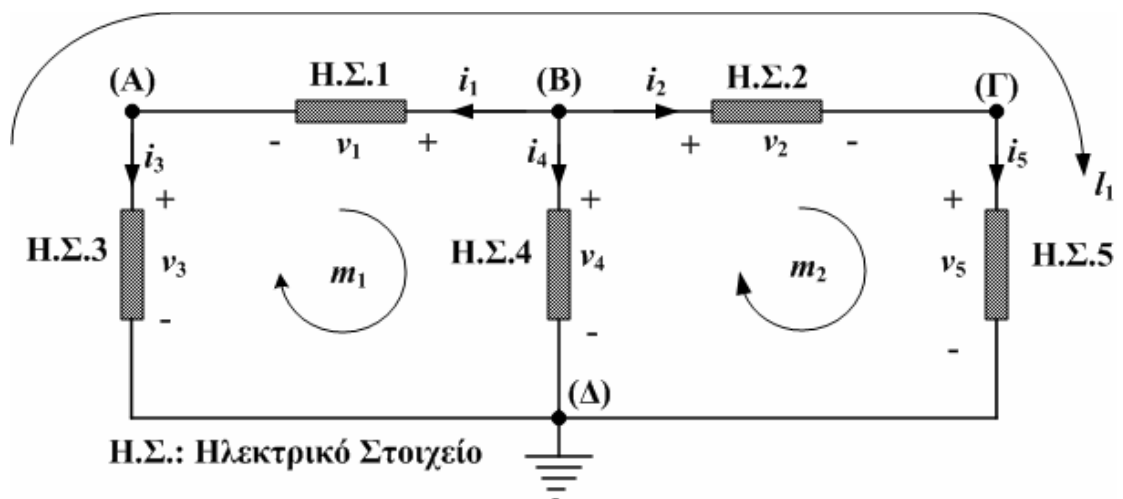
### (1.1.11) Κατανεμημένα κυκλώματα

Τα στοιχεία των κατανεμημένων κυκλωμάτων έχουν μέγεθος συγκρίσιμο με το μήκος κύματος του ρεύματος που τα διαρρέει. Τα στοιχεία αυτά δεν υπακούουν στους νόμους του Kirchhoff και το χαρακτηριστικό τους είναι ότι ακτινοβολούν ηλεκτρική ενέργεια. Αποτέλεσμα αυτής της ιδιότητας είναι το ρεύμα εξόδου από το στοιχείο να είναι κάθε χρονική στιγμή διαφορετικό από το ρεύμα εισόδου. Για παράδειγμα, μια κεραία είναι ένα κατανεμημένο ηλεκτρικό κύκλωμα.

### (1.1.12) Πολικότητα ή φορά αναφοράς βρόχου

Πριν από την επίλυση ενός ηλεκτρικού κυκλώματος πρέπει να οριστεί η *φορά αναφοράς* ή η *πολικότητα* των βρόχων του κυκλώματος. Αυτό είναι απαραίτητο για τη διαμόρφωση των εξισώσεων του κυκλώματος, οι οποίες προκύπτουν, για παράδειγμα, από την εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff. Η φορά αναφοράς εκλέγεται αυθαίρετα και μπορεί να είναι ή η φορά κίνησης των δεικτών του ρολογιού ή η αντίθετη, όμως πρέπει να διατηρείται σταθερή μέχρι την ολοκλήρωση της επίλυσης του κυκλώματος.

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κυκλώματος, όπου φαίνονται οι κόμβοι, οι φορές αναφοράς των βρόχων και οι συζευγμένες φορές αναφοράς των ρευμάτων και τάσεων των κλάδων του κυκλώματος. Οι βρόχοι  $m_1$  και  $m_2$  είναι απλοί και περιλαμβάνουν τα ηλεκτρικά στοιχεία (1-3-4) και (2-4-5) αντίστοιχα. Ο βρόχος  $I_1$  είναι σύνθετος και διαμορφώνεται από τα ηλεκτρικά στοιχεία (1-3-5-2). Τα σημεία (Α), (Β), (Γ) και (Δ) είναι οι κόμβοι του κυκλώματος και ο κόμβος (Δ) λαμβάνεται ως κόμβος αναφοράς. Η φορά του ρεύματος και η πολικότητα της τάσης σε κάθε κλάδο του κυκλώματος συμφωνούν με τις συζευγμένες φορές αναφοράς (παρ. 1.2.1).



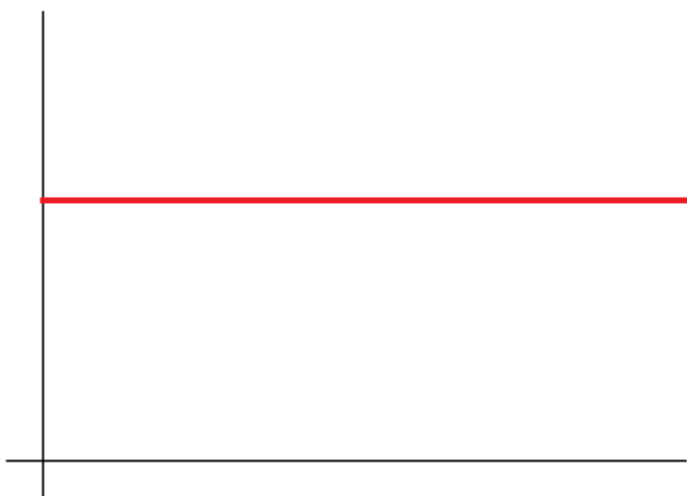
Σχήμα 1.2. Φορές αναφοράς βρόχων και συζευγμένες φορές κλάδων κυκλώματος.

## 1.2. Είδη ρευμάτων

Ανάλογα με την εξάρτηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος με το χρόνο διακρίνουμε το ηλεκτρικό ρεύμα σε διάφορα είδη. Υπάρχουν δύο κύρια είδη ηλεκτρικού ρεύματος:

### ***Συνεχές ρεύμα***

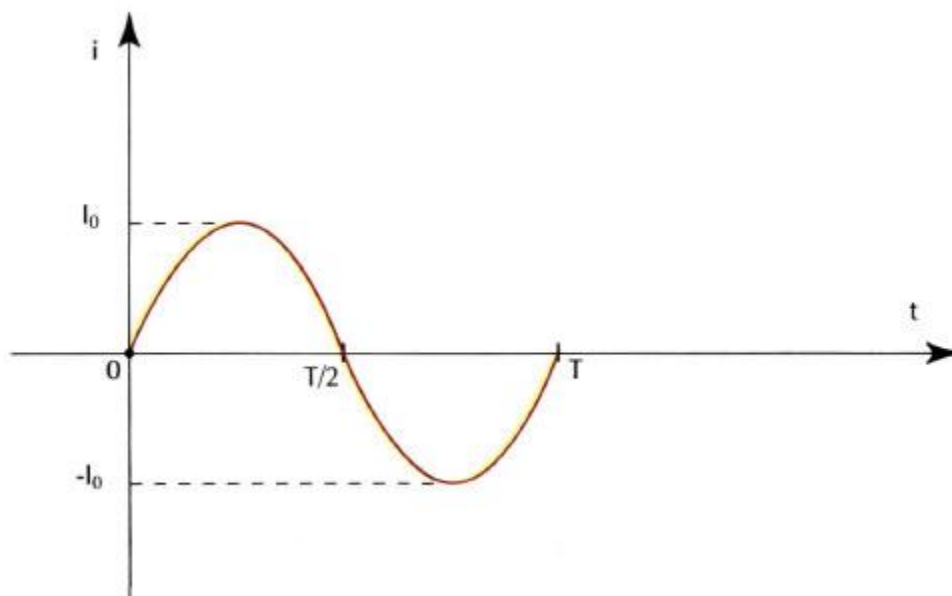
Συνεχές ρεύμα είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που έχει μία συγκεκριμένη φορά. Συνήθως το συνεχές ρεύμα έχει σταθερό μέτρο έντασης, με το οποίο λειτουργούν τα περισσότερα κυκλώματα και το οποίο παράγουν οι μπαταρίες. Αυτά τα κυκλώματα είναι μικρά ηλεκτρικά κυκλώματα ή ηλεκτρονικά κυκλώματα. Επειδή έχει σταθερή ένταση, υποχρεωτικά παράγεται από σταθερή τάση, δεδομένου ότι το κύκλωμα δεν αλλάζει σημαντικά με την πάροδο του χρόνου.



### ***Εναλλασσόμενο ρεύμα***

Εναλλασσόμενο ρεύμα είναι το ρεύμα στο οποίο εναλλάσσεται η φορά, δηλαδή η φορά αλλάζει περιοδικά με το χρόνο.

Συνήθως αυτή η μεταβολή είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου, οπότε έχει περίοδο και φάση, και με το οποίο λειτουργούν μεγάλα δίκτυα ηλεκτροδότησης. Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι μεταβλητή σε σχέση με το χρόνο και κατά (αριθμητικό) μέσον όρο είναι μηδέν. Όμως το μέτρο της έντασης είναι κατά (αριθμητικό) μέσον όρο διάφορο του μηδενός και μπορεί να χαρακτηρίσει μονόμετρα το ηλεκτρικό ρεύμα, αυτός ο μέσος όρος ονομάζεται **ενεργός ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος**. Δεδομένου ότι το κύκλωμα δεν αλλάζει σημαντικά, η τάση μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο, για αυτό περιγράφεται από την **ενεργό τάση**.



### 1.3. Ηλεκτρικά στοιχεία και συμπεριφορές

Κάθε ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών χαρακτηρίζεται από το ρεύμα που το διαρρέει (ρεύμα κλάδου) και από τη διαφορά δυναμικού στα άκρα του (τάση κλάδου). Στη γενική περίπτωση το ρεύμα και η τάση ενός στοιχείου είναι συναρτήσεις του χρόνου. Η σχέση της τάσης και του ρεύματος ενός στοιχείου δύο ακροδεκτών, σχέση  $v - i$ , ονομάζεται χαρακτηριστική  $v - i$  του στοιχείου. Εάν το ρεύμα ενός στοιχείου εξαρτάται από την τάση στα άκρα του, τότε πρόκειται για στοιχείο δύο ακροδεκτών ελεγχόμενο από τάση. Από μαθηματική σκοπιά, η χαρακτηριστική στοιχείου δύο ακροδεκτών ελεγχόμενο από τάση είναι μια συνάρτηση

$$i(t) = f(v) \quad (1.9)$$

όπου το ρεύμα κλάδου  $i(t)$  είναι εξαρτημένη μεταβλητή και η τάση κλάδου  $v(t)$  είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή. Εάν πρόκειται για ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών ελεγχόμενο από ρεύμα, τότε το ρεύμα κλάδου είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και η τάση του στοιχείου η εξαρτημένη μεταβλητή και η χαρακτηριστική του στοιχείου δίνεται από την αντίστροφη συνάρτηση της εξ.(1.9)

$$v(t) = f^{-1}(i) \quad (1.10)$$

Ανάλογα με τη μορφή της χαρακτηριστικής ρεύματος-τάσης, τα ηλεκτρικά στοιχεία διακρίνονται σε γραμμικά και μη γραμμικά στοιχεία. Σύμφωνα με τον ορισμό της γραμμικότητας, ένα ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών είναι γραμμικό, όταν η χαρακτηριστική του είναι ευθεία γραμμή που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Στην αντίθετη περίπτωση πρόκειται για μη γραμμικό στοιχείο.

Από μαθηματικής πλευράς, μια συνάρτηση  $f(v)$  είναι γραμμική όταν ισχύουν η αρχή της ομογένειας και η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή ισχύει:

$$f(k_1v_1 + k_2v_2) = k_1f(v_1) + k_2f(v_2)$$

Όπου:  $k_1, k_2$  σταθερές.

Τα ηλεκτρικά στοιχεία ενός κυκλώματος διακρίνονται σε δύο κατηγορίες από ενεργειακής άποψης: (α) στα ενεργά (active) στοιχεία και (β) στα παθητικά (passive) στοιχεία. Τα ενεργά στοιχεία παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα και είναι οι πηγές ηλεκτρικής τάσης και οι πηγές ηλεκτρικού ρεύματος. Τα παθητικά στοιχεία διακρίνονται σε αυτά που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια (αντιστάτης) και σε αυτά που αποθηκεύουν ενέργεια, την οποία μπορούν στη συνέχεια να αποδώσουν (δυναμικά στοιχεία, όπως πυκνωτής, πηνίο).

### (1.3.1).Ανεξάρτητες πηγές τάσης και ρεύματος (Independent voltage and current sources)

Οι πηγές τάσης και ρεύματος είναι στοιχεία δύο ακροδεκτών που παρέχουν ηλεκτρική ισχύ στο κύκλωμα ή διαφορετικά είναι τα στοιχεία που προκαλούν τις διεγέρσεις των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

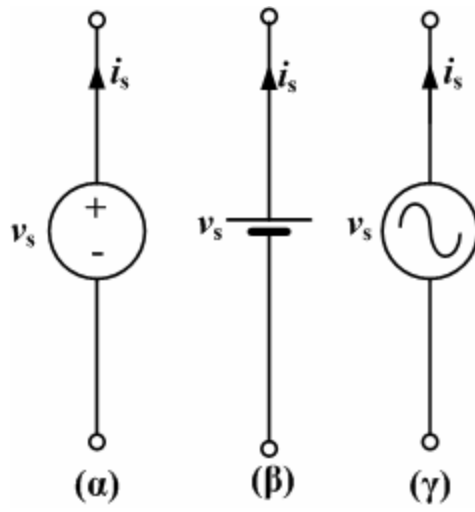
Μία ανεξάρτητη πηγή τάσης είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών, στο οποίο η διαφορά δυναμικού στα άκρα του (τάση κλάδου) είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο. Μια ανεξάρτητη πηγή τάσης έχει σταθερή ηλεκτρική τάση (διαφορά δυναμικού) στα άκρα της και θα μπορούσε να δώσει στο κύκλωμα άπειρο ποσό ενέργειας, κάτι που βεβαίως είναι αδύνατο να υπάρξει στη φύση. Για το λόγο αυτό, η ανεξάρτητη πηγή τάσης ονομάζεται και ιδανική πηγή τάσης.

Στο Σχήμα 1.4(α),(β),(γ) παρουσιάζονται τα σύμβολα μιας ανεξάρτητης πηγής τάσης. Η τάση αυτή μπορεί να είναι: γενικώς χρονικά μεταβαλλόμενη(Σχήμα 1.4α), σταθερής τιμής (πηγή συνεχούς ρεύματος, ΣΡ)(Σχήμα 1.4β) ή ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενη (πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ΕΡ)(Σχήμα 1.4γ). Το σύμβολο (α) έχει γενική χρήση και καλύπτει τις άλλες δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της πηγής ΕΡ, η σταθερή τιμή της τάσης Σχήμα 1.4(δ) αντιπροσωπεύει την ενεργό (ενδεικνυμένη ή RMS) τιμή της τάσης της πηγής ΕΡ.

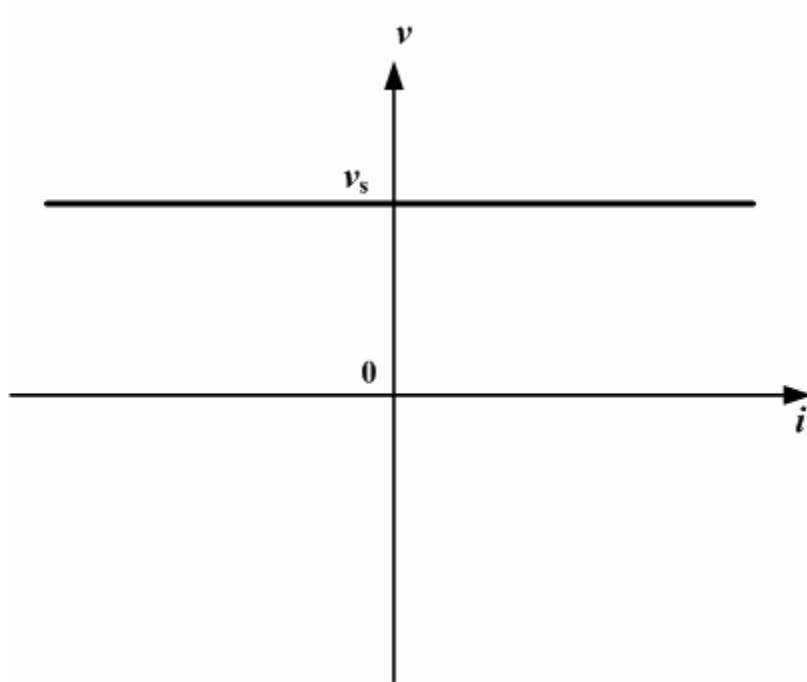
Σε μια πηγή τάσης θα πρέπει το γινόμενο  $v(t) i(t) < 0$  (εξ. 1.8), ώστε η πηγή τάσης να προσφέρει ηλεκτρική ισχύ (ενέργεια) στο κύκλωμα. Για να ικανοποιείται αυτή η συνθήκη πρέπει η φορά αναφοράς του ρεύματος της πηγής να είναι αντίθετη της συζευγμένης φοράς αναφοράς.

Μία ανεξάρτητη πηγή ρεύματος είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών, στο οποίο το ρεύμα του στοιχείου είναι σταθερό και ανεξάρτητο από την τάση του στοιχείου. Το σύμβολο και η χαρακτηριστική της ανεξάρτητης πηγής ρεύματος δίνονται στα Σχήματα 1.3(ε) και (στ) αντίστοιχα. Η ανεξάρτητη πηγή ρεύματος είναι και αυτή ένα ιδανικό στοιχείο και ονομάζεται ιδανική πηγή ρεύματος.

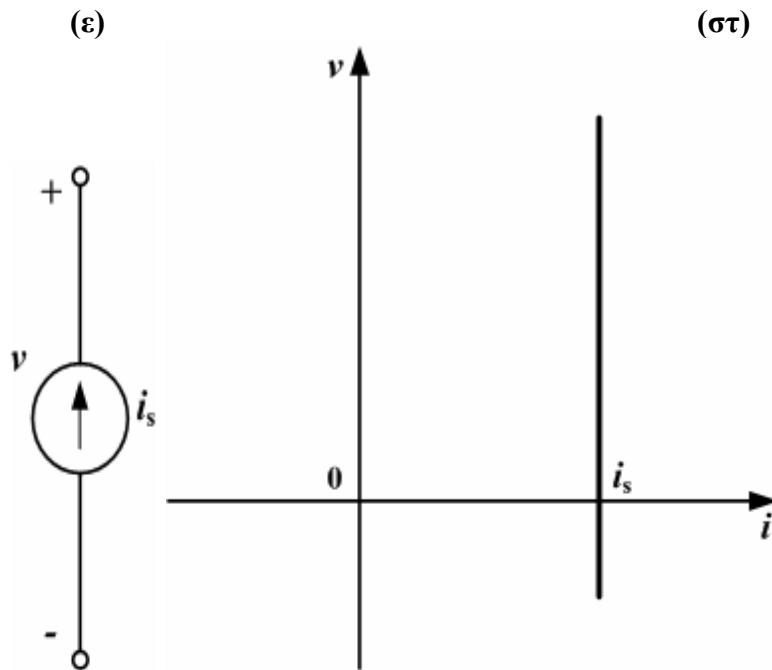
( $\alpha$ ), ( $\beta$ ), ( $\gamma$ )



( $\delta$ )







Σχήμα 1.4. (α), (β), (γ) Συμβολισμοί ανεξάρτητης πηγής τάσης. (δ) Χαρακτηριστική  $v$ - $i$  ανεξάρτητης πηγής τάσης. (ε) Σύμβολο ανεξάρτητης πηγής ρεύματος. (στ) Χαρακτηριστική  $v$ - $i$  ανεξάρτητης πηγής ρεύματος.

### (1.3.2) Αντιστάτης (Resistor)

Ο αντιστάτης είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο δύο ακροδεκτών, το οποίο όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα προκαλείται μία πτώση τάσης (διαφορά δυναμικού) στα άκρα του αντιστάτη, η ενέργεια δε του ηλεκτρικού ρεύματος μετατρέπεται εξ' ολοκλήρου σε θερμότητα (φαινόμενο Joule) πάνω στον αντιστάτη.

Παραδείγματα συσκευών που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα μέσω αντιστατών είναι οι θερμάστρες, οι ηλεκτρικές κουζίνες, τα ηλεκτρικά σίδερα, οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες κλπ. Στη γενική περίπτωση, η πτώση τάσης στον αντιστάτη είναι μία αλγεβρική έκφραση της μορφής

$$v(t) = \alpha_0 + \alpha_1 i(t) + \alpha_2 i^2(t) + \alpha_3 i^3(t) + \dots \quad (1.12)$$

Όπου:  $\alpha_i = 0, 1, 2, 3, \dots$ , σταθεροί συντελεστές.

Η απλούστερη μορφή αντιστάτη είναι ο γνωστός ωμικός αντιστάτης, που ονομάζεται και αντίσταση. Η αντίσταση είναι ένα γραμμικό στοιχείο, χρονικά αμετάβλητο και η χαρακτηριστική του  $v$ - $i$  εκφράζεται από τη σχέση

$$v(t) = R_i(t) \quad (1.13)$$

Δηλαδή, όλοι οι συντελεστές της εξ.(1.12) είναι μηδενικοί, εκτός από τον  $\alpha_1=R$ , όπου  $R$  είναι η ωμική αντίσταση (resistance) του αντιστάτη. Για σταθερή θερμοκρασία, η αντίσταση  $R$  έχει σταθερή τιμή και είναι ανεξάρτητη από την τάση και το ρεύμα του αντιστάτη. Η εξ.(1.13) εκφράζει το νόμο του Ohm, σύμφωνα με τον

οποίο η τάση στα άκρα ενός γραμμικού αντιστάτη είναι ανάλογη του ρεύματος που τον διαρρέει. Μονάδα μέτρησης της αντίστασης είναι το Ohm,  $1(\Omega) = 1(V)/1(A)$ .

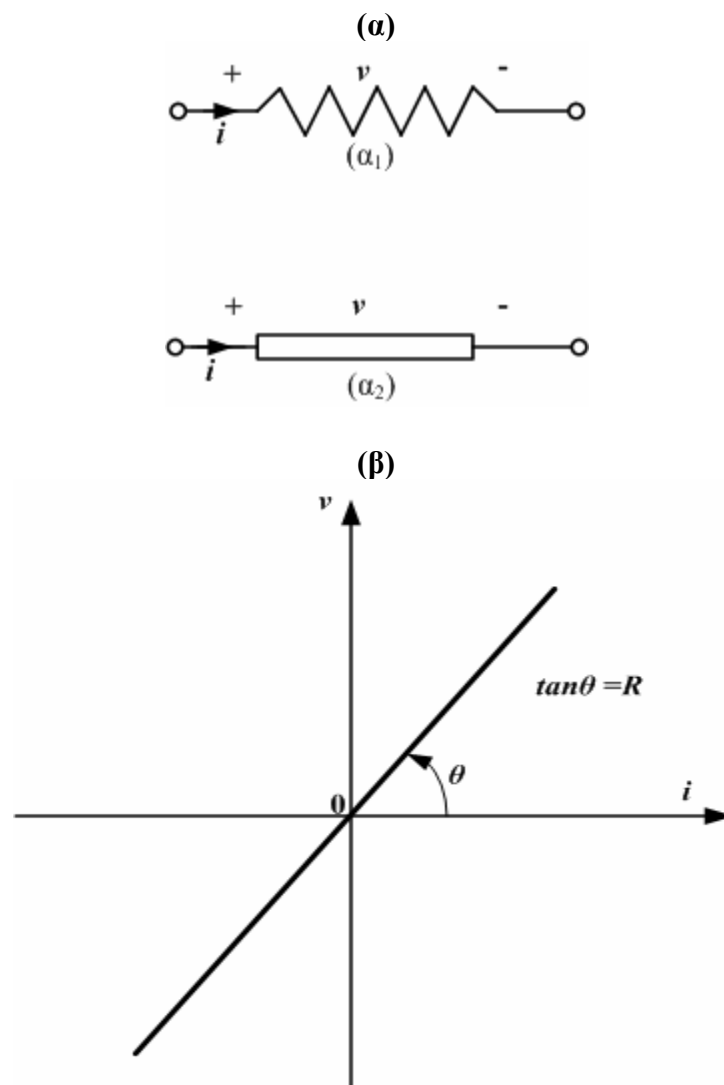
Η αντίστροφη χαρακτηριστική  $i - v$  είναι

$$i(t) = Gv(t) \quad (1.14)$$

Όπου  $G$  είναι το αντίστροφο της αντιστάσεως και ονομάζεται αγωγιμότητα. Μονάδα της αγωγιμότητας είναι το mho ή Siemens,  $1(S) = 1(A)/1(V) = (\Omega)^{-1}$

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.15)$$

Η χαρακτηριστική  $v - i$  της αντίστασης είναι ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, η κλίση της δε είναι σταθερή και ίση με  $R$ .



Σχήμα 1.5. (α) Εναλλακτικοί συμβολισμοί ωμικού αντιστάτη. (β) Χαρακτηριστική  $v - i$  αντιστάτη.

Η ηλεκτρική ισχύς  $p(t)$  που καταναλώνεται σε έναν ωμικό αντιστάτη αντίστασης  $R$ , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα  $i(t)$  και η τάση στα άκρα του είναι  $v(t)$ , είναι

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = R \cdot i^2(t) = v^2(t) / R \quad (1.16)$$

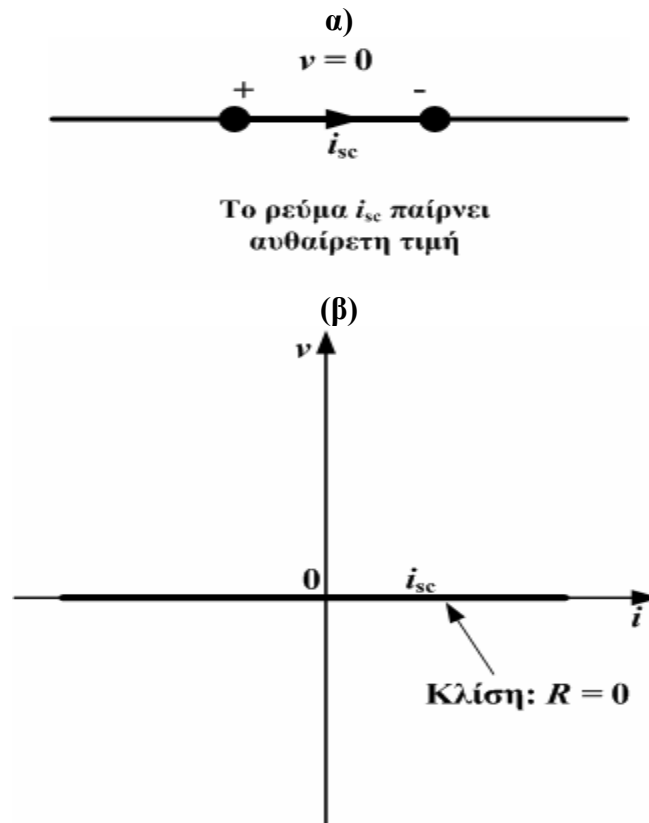
Εάν ο αντιστάτης διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα για χρονικό διάστημα  $\Delta t = t_2 - t_1$ , η ηλεκτρική ενέργεια  $w(t)$  που μετατρέπεται σε θερμότητα επάνω στον ωμικό αντιστάτη είναι

$$w(t) = \int_{t_1}^{t_2} v(t) \cdot i(t) \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} R \cdot i^2(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{v^2(t)}{R} \cdot dt \quad (1.17)$$

### **Βραχυκύκλωμα (short circuit) – Ανοικτό κύκλωμα (open circuit)**

Δύο ειδικές περιπτώσεις αντιστατών, που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ανάλυση κυκλωμάτων, είναι το βραχυκύκλωμα και το ανοικτό κύκλωμα.

Το βραχυκύκλωμα είναι ένας αντιστάτης με μηδενική αντίσταση ( $R = 0$ ) και άπειρη αγωγιμότητα ( $G \rightarrow \infty$ ) και επομένως με μηδενική διαφορά δυναμικού στα άκρα του. Το βραχυκύκλωμα παρίσταται συμβολικά στο Σχήμα 1.6(α) και η χαρακτηριστική  $v - i$  συμπίπτει με τον άξονα του ρεύματος (Σχήμα 1.6β), δηλαδή η κλίση της χαρακτηριστικής είναι μηδέν. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος (short-circuit current)  $i_{sc}$  έχει αυθαίρετη τιμή, που σημαίνει ότι η τιμή του καθορίζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία και τη δομή του κυκλώματος.



Σχήμα 1.6. (α) Σύμβολο αναπαράστασης βραχυκυκλώματος. (β) Χαρακτηριστική  $v - i$  βραχυκυκλώματος.

Το ανοικτό κύκλωμα είναι ένας αντιστάτης με άπειρη αντίσταση ( $R \rightarrow \infty$ ) και μηδενική αγωγιμότητα ( $G = 0$ ), μέσα από τον οποίο δε διέρχεται ρεύμα ανεξάρτητα από το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα του. Η τάση στα άκρα του αντιστάτη έχει αυθαίρετη τιμή, δηλαδή καθορίζεται από τα υπόλοιπα στοιχεία και τη δομή του κυκλώματος. Το σύμβολο και η χαρακτηριστική του αντιστάτη ανοικτού κυκλώματος δίνονται στα Σχήματα 1.7(α) και (β) αντίστοιχα.

Τα στοιχεία δύο ακροδεκτών ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος δεν παράγουν ούτε καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ, αφού το γινόμενο ( $v_i$ ) είναι πάντα ίσο με μηδέν.

### **Ηλεκτρική αντίσταση αγωγών ρεύματος.**

Για τη μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα και τις εσωτερικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις κτιρίων χρησιμοποιούνται πολυπολικά καλώδια, τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερους μονωμένους αγωγούς. Οι αγωγοί είναι συνήθως από χαλκό ή αλουμίνιο και έχουν κυκλική διατομή. Η ωμική αντίσταση των αγωγών εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και υπολογίζεται από τη σχέση

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q} \quad (1.18)$$

Όπου:  $R$  είναι η ωμική αντίσταση του αγωγού σε ( $\Omega$ ),  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού σε ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ),  $l$  είναι το μήκος του αγωγού σε (m) και  $q$  είναι η διατομή του αγωγού σε  $\text{mm}^2$ . Η ειδική αντίσταση του χαλκού και του αλουμινίου στους  $20^\circ\text{C}$  είναι: 0,0172 και 0,0282( $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$ ) αντίστοιχα. Αν και η μονάδα μέτρησης επιφάνειας στο σύστημα SI είναι το  $\text{m}^2$ , εντούτοις στην εξ.(1.18) χρησιμοποιείται το  $\text{mm}^2$ , διότι οι διατομές των αγωγών που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι πολύ μικρότερες από το  $\text{m}^2$ .

### **(1.3.3) Πυκνωτής (Capacitor)**

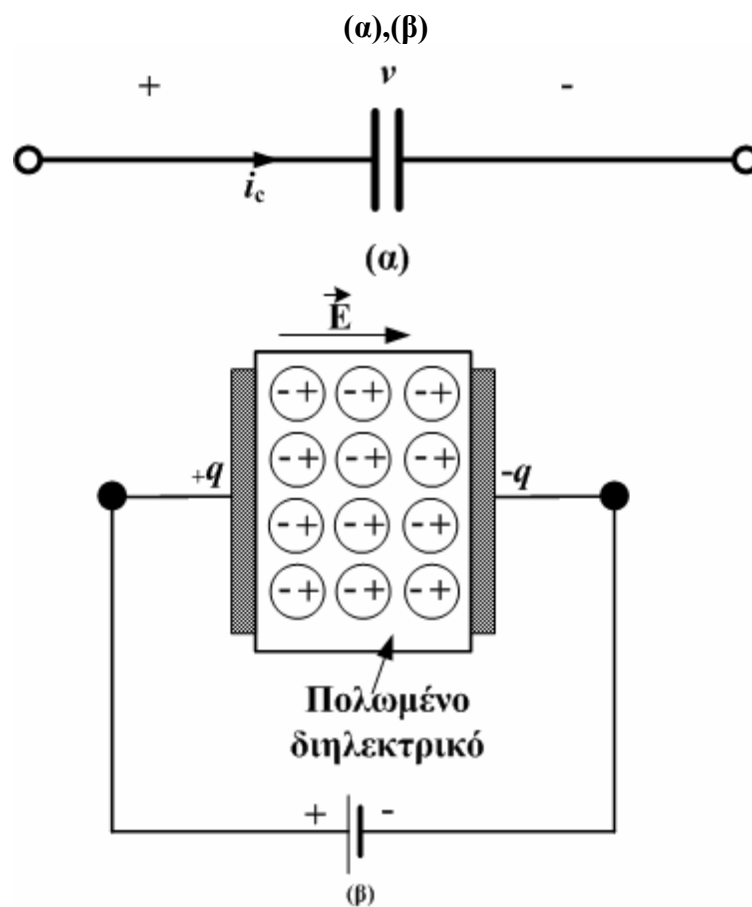
Ένας πυκνωτής, στην πιο απλή μορφή του, αποτελείται από δύο αγωγίμες επιφάνειες που βρίσκονται κοντά η μία με την άλλη και ονομάζονται οπλισμοί. Οι δύο οπλισμοί χωρίζονται μεταξύ τους από ένα μη αγωγίμο υλικό, το οποίο ονομάζεται διηλεκτρικό (dielectric). Ως διηλεκτρικό μπορεί να είναι και ο αέρας, οπότε ο πυκνωτής ονομάζεται πυκνωτής αέρος. Στους οπλισμούς προσαρμόζονται ακροδέκτες και το όλο σύστημα συνιστά ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών.

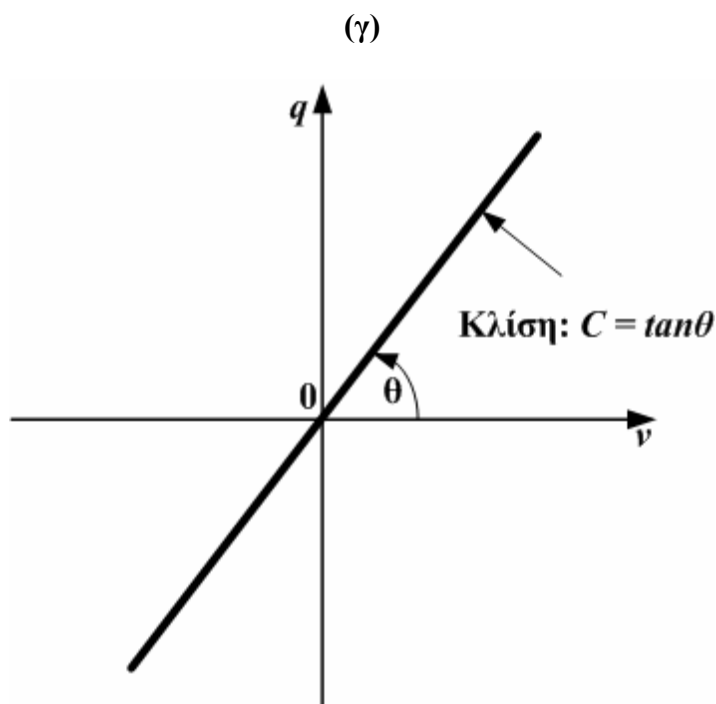
Κύριο χαρακτηριστικό ενός πυκνωτή είναι η αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς του. Εάν οι οπλισμοί ενός πυκνωτή συνδεθούν προς μια πηγή τάσης, τότε η πηγή μεταφέρει στους οπλισμούς ίσα και αντίθετα φορτία,  $+q$  και  $-q$ . Τα φορτία αυτά έλκονται μεταξύ τους και συγκρατούνται στις επιφάνειες των οπλισμών, προς τα μέσα του πυκνωτή (Σχήμα 1.8α), αφού το διηλεκτρικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών είναι μονωτικό και εμποδίζει την αγωγή σύνδεση των δύο οπλισμών. Εάν διακοπεί η σύνδεση του πυκνωτή με την πηγή, τα φορτία παραμένουν στους οπλισμούς και ο πυκνωτής εμφανίζεται φορτισμένος.

Η ύπαρξη ηλεκτρικών φορτίων  $+q$  και  $-q$  στους οπλισμούς ενός πυκνωτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου εντός του διηλεκτρικού, πεδιακής έντασης  $E$ . Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα μόρια του διηλεκτρικού

πολώνονται (αρνητικά προς το θετικό οπλισμό και θετικά προς τον αρνητικό οπλισμό) (Σχήμα 1.8β), με αποτέλεσμα να αυξάνεται το φορτίο που μπορεί να συγκρατείται στους οπλισμούς του πυκνωτή και αυτό συμβαίνει λόγω της έλξης των ετερόνυμων φορτίων του διηλεκτρικού, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με τους οπλισμούς του πυκνωτή. Αυτό σημαίνει ότι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή αυξάνεται περαιτέρω με την εισαγωγή διηλεκτρικού υλικού μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή.

Η αρχική ενέργεια που απαιτήθηκε για τη συγκέντρωση των φορτίων στους οπλισμούς του πυκνωτή μετατράπηκε τώρα, με την ολοκλήρωση της φόρτισης του πυκνωτή, σε ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου εντός του διηλεκτρικού. Δηλαδή, ο πυκνωτής είναι ένα παθητικό στοιχείο (δεν παράγει ενέργεια) με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας.





Σχήμα 1.8. (α) Κυκλωματικό σύμβολο, (β) Φόρτιση πυκνωτή, (γ) Χαρακτηριστική  $v - q$  ανοικτού κυκλώματος.

Το φορτίο  $q(t)$  που αποθηκεύεται στους οπλισμούς ενός πυκνωτή είναι ανάλογο της τάσης  $v(t)$  που εφαρμόζεται στα άκρα του.

$$q(t) = Cv(t) \quad (1.19)$$

Όπου  $C$  είναι σταθερά και ονομάζεται χωρητικότητα (capacitance) του πυκνωτή. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Farad,  $1(F) = 1(Cb)/1(V)$ . Επειδή το Farad είναι πολύ μεγάλη μονάδα, χρησιμοποιούνται συνήθως τα υποπολλαπλάσια της μονάδας αυτής:  $1(mF) = 10^{-3} (F)$ ,  $1(\mu F) = 10^{-6} (F)$ ,  $1(nF) = 10^{-9} (F)$ ,  $1(pF) = 10^{-12} (F)$ .

Όταν η χωρητικότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τα μεγέθη  $q(t)$ ,  $v(t)$  και το χρόνο  $t$ , τότε πρόκειται για γραμμικό πυκνωτή με χαρακτηριστική  $v - q$  αυτή του Σχήματος (1.8γ). Στην αντίθετη περίπτωση, πρόκειται για μη γραμμικό πυκνωτή. Εδώ εξετάζονται μόνο οι γραμμικοί πυκνωτές. Η χωρητικότητα εκφράζει την ποσότητα φορτίων που είναι δυνατόν να αποθηκευτούν στους οπλισμούς ενός πυκνωτή για συγκεκριμένη διαφορά δυναμικού στα άκρα του, δηλαδή την ικανότητα του πυκνωτή να αποθηκεύει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρικού πεδίου. Για γραμμικό πυκνωτή, η χωρητικότητα  $C$  εξαρτάται από το διηλεκτρικό υλικό και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυκνωτή

$$C = \epsilon \frac{S}{d} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{d} \quad (1.20)$$

Όπου:  $\epsilon$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού σε (F/m),  $\epsilon_r$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού,  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού (και κατά προσέγγιση του αέρα) σε (C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>), S είναι το εμβαδόν της επιφάνειας των οπλισμών σε (m) και d είναι η απόσταση μεταξύ των οπλισμών σε (m).

Λαμβάνοντας υπόψη τις εξ.(1.1) και (1.19), το ρεύμα  $i_c$  του πυκνωτή είναι

$$i_c(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.21)$$

Από την εξ.(1.21), η οποία είναι μια διαφορική (δυναμική) και όχι αλγεβρική (στατική) σχέση, παρατηρούμε ότι το ρεύμα του πυκνωτή εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από το ρυθμό μεταβολής της τάσης στα άκρα του. Εάν ο πυκνωτής συνδέεται σε μία πηγή ΣΡ σταθερής τάσης είναι  $\frac{dv(t)}{dt} = 0$  και επομένως το ρεύμα του πυκνωτή είναι μηδέν. Ο πυκνωτής συμπεριφέρεται στο ΣΡ ως ανοικτός διακόπτης. Αντιθέτως, στο ημιτονοειδές ΕΡ ο πυκνωτής επιτρέπει τη ροή του ρεύματος, διότι και στις δύο ημιπεριόδους του ρεύματος είναι  $\frac{dv(t)}{dt} \neq 0$ .

Από την εξ.(1.21) προκύπτει η τάση στα άκρα του πυκνωτή στο χρονικό διάστημα  $[t_0, t]$ .

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_c(t) dt + v(t_0) \quad (1.22)$$

Όπου:  $v(t_0)$  είναι η τιμή της τάσης του πυκνωτή τη χρονική στιγμή  $t_0$ .

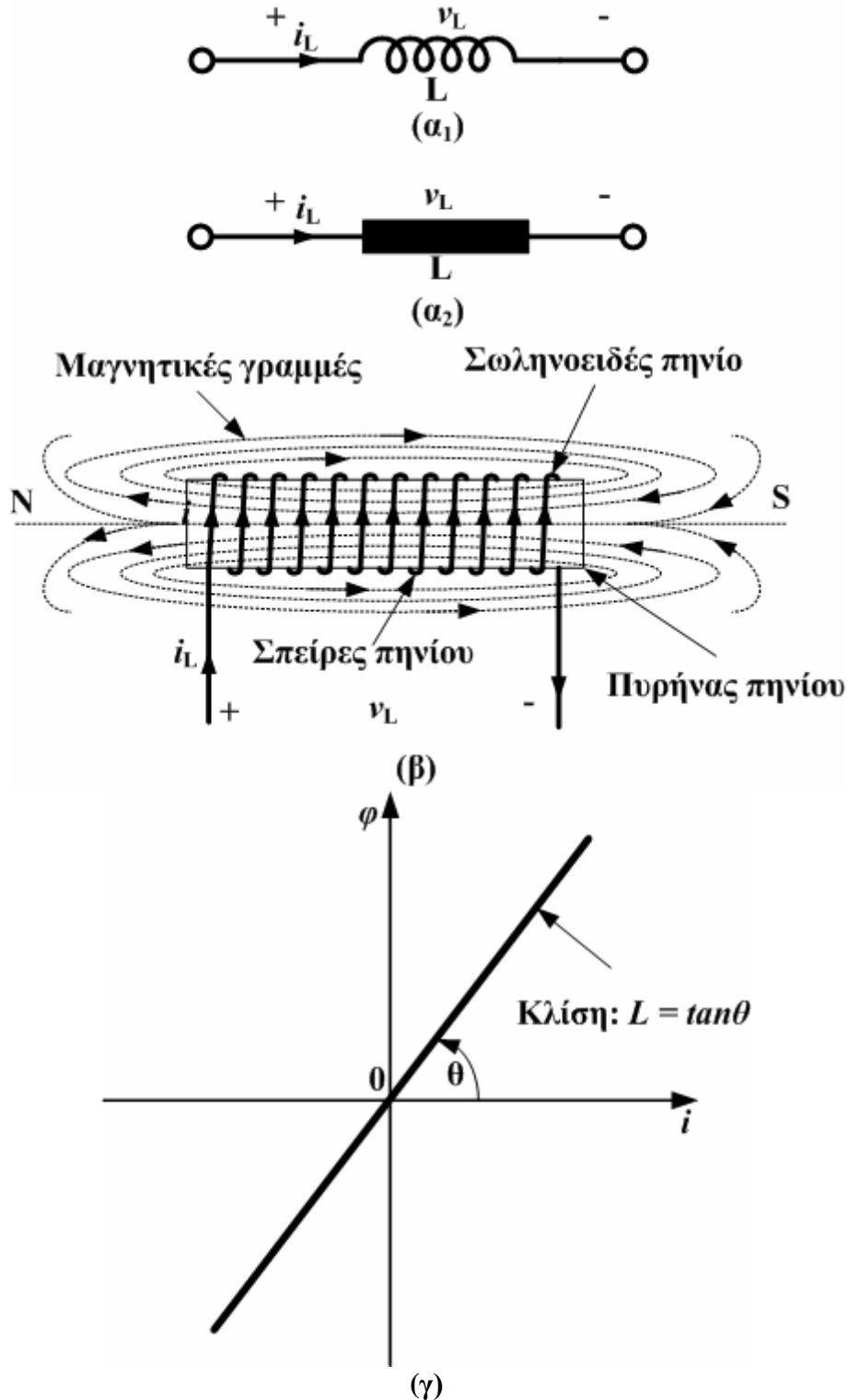
Η εναποθηκευμένη ενέργεια  $W_c(t)$  σε ένα γραμμικό πυκνωτή χωρητικότητας C και τάσης  $v(t)$  στα άκρα του, για το χρονικό διάστημα  $[t_0, t]$  και λαμβάνοντας υπόψη την εξ.(1.19), είναι

$$W_c(t) = \int_{t_0}^t v(t) i(t) dt = \int_{q(t_0)}^{q(t)} V(q_1)(t) dq_1 = \frac{1}{C} \int_0^{q(t)} q_1 dq_1 = \frac{1}{2} \frac{q^2(t)}{C} = \frac{1}{2} C v^2(t) \quad (1.23)$$

Το φορτίο του πυκνωτή τη χρονική στιγμή  $t_0$  είναι  $q(t_0) = 0$ .

#### (1.3.4) Πηνίο (Inductor)

Το πηνίο είναι ένα στοιχείο δύο ακροδεκτών και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου, όταν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η συνηθέστερη μορφή πηνίου είναι το σωληνοειδές πηνίο, το οποίο αποτελείται από έναν αριθμό ομοαξονικών σπειρών που τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη. Σπείρα ονομάζεται η κυκλική μορφή που παίρνει ένας μονωμένος αγωγός όταν τυλιχθεί γύρω από έναν κύλινδρο. Στα Σχήματα 1.9(α) και (β) δίνονται το κυκλωματικό σύμβολο πηνίου και το μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου αντίστοιχα.



Σχήμα 1.9. (α<sub>1</sub>), (α<sub>2</sub>) Εναλλακτικά κυκλωματικά σύμβολα πηνίου. (β) Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς πηνίου. (γ) Χαρακτηριστική  $i - \varphi$  γραμμικού πηνίου.

Το μαγνητικό πεδίο του πηνίου είναι χρονικά σταθερό όταν διαρρέεται από ΣΡ, ενώ είναι χρονικά μεταβαλλόμενο όταν διαρρέεται από χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (π.χ. ημιτονοειδές ΕΡ). Η ποσότητα του μαγνητικού πεδίου που διέρχεται από κάθε σπείρα του πηνίου εκφράζεται από τη μαγνητική ροή,  $\varphi(t)$ , ενώ η συνολική μαγνητική ροή που διέρχεται από πηνίο  $N$  σπειρών εκφράζεται από την



πεπλεγμένη μαγνητική ροή,  $\Psi(t) = N \varphi(t)$ . Επειδή, η μαγνητική ροή του πηνίου είναι ανάλογη του ρεύματος που το διαρρέει, κατά συνέπεια και η πεπλεγμένη ροή είναι ανάλογη του ρεύματος

$$\Psi(t) = N \varphi(t) = L_i(t) \quad (1.24)$$

Ο συντελεστής αναλογίας,  $L$ , στην εξ.(1.24) ονομάζεται αυτεπαγωγή (ή συντελεστής αυτεπαγωγής) με μονάδα μέτρησης το Henry (H),  $1(H) = 1(Wb)/1(A)$ . Για ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο πηνίο ο συντελεστής αυτεπαγωγής είναι σταθερός και εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πηνίου

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (1.25)$$

Όπου:  $L$  είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου σε (H), μείναι η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού του πυρήνα του πηνίου,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$  (H/m) είναι η θεμελιώδης μαγνητική σταθερά,  $N$  είναι ο αριθμός σπειρών του πηνίου,  $S$  είναι το εμβαδόν μιας κάθετης διατομής του πηνίου σε ( $m^2$ ) και  $l$  είναι το μήκος του πηνίου σε (m).

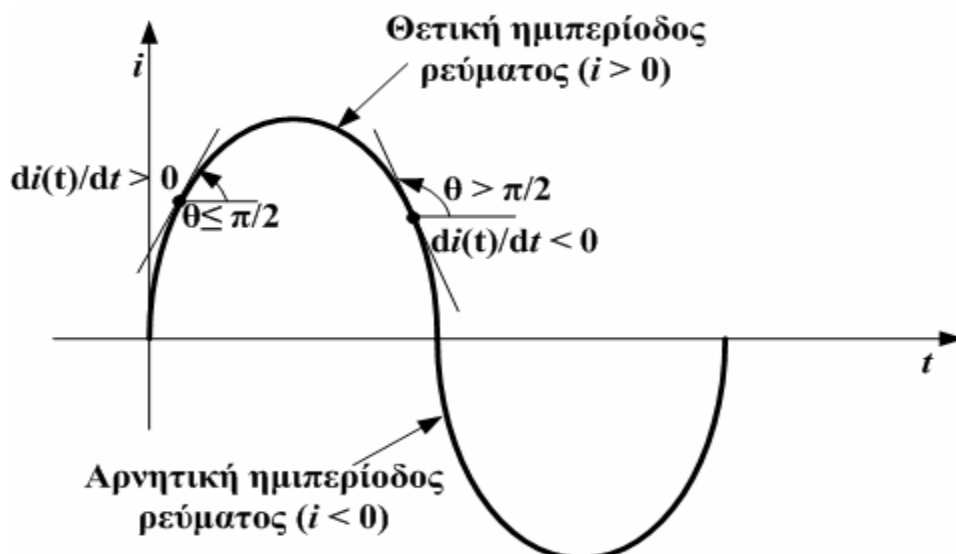
Η χαρακτηριστική  $i - \varphi$  ενός γραμμικού πηνίου δίνεται στο Σχήμα 1.9(γ).

Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η τάση στα άκρα ενός πηνίου είναι κάθε στιγμή ίση με τη χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης ροής

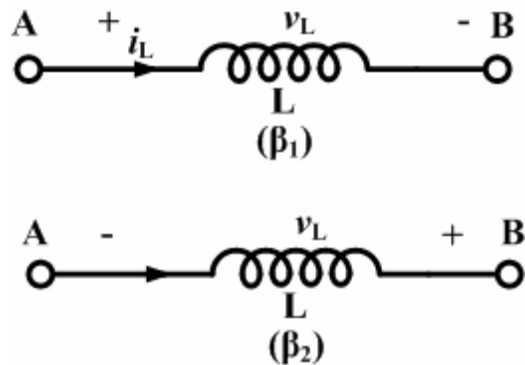
$$V_L(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = N \frac{d\varphi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt} \quad (1.26)$$

Από την εξ.(1.26), παρατηρούμε ότι η τάση που επάγεται στα άκρα ενός πηνίου είναι ανάλογη της χρονικής μεταβολής του ρεύματος που διαρρέει το πηνίο. Η επαγόμενη αυτή τάση ( $v_L$ ) οφείλεται ακριβώς στη χρονική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, μεταβολή την οποία υφίσταται το ίδιο το πηνίο. Εάν πρόκειται για ΣΡ, τότε  $\frac{di(t)}{dt} = 0$  και  $v_L(t) = 0$ . Δηλαδή, το πηνίο συμπεριφέρεται στο ΣΡ ως βραχυκύκλωμα.

(α)



(β<sub>1</sub>), (β<sub>2</sub>)



Σχήμα 1.10. (α) Ημιτονοειδής κυματομορφή ΕΡ. (β<sub>1</sub>), (β<sub>2</sub>) Πολικότητα της τάσης του πηνίου  $v_L(t)$  κατά την αύξηση και μείωση του ρεύματος αντίστοιχα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λειτουργική συμπεριφορά του πηνίου σε κυκλώματα ΕΡ με ημιτονοειδή διέγερση. Στα κυκλώματα αυτά και με την προϋπόθεση ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι γραμμικά, τα ρεύματα στους κλάδους του κυκλώματος είναι εναλλασσόμενα ρεύματα ημιτονοειδούς μορφής (Σχήμα 1.10α).

Η πολικότητα της επαγόμενης τάσης σε ένα πηνίο καθορίζεται από τον κανόνα του Lenz, σύμφωνα με τον οποίο η τάση που επάγεται κάθε χρονική στιγμή στο πηνίο έχει φορά τέτοια, ώστε να εμποδίζει τη μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής του πηνίου. Όταν το πηνίο διαρρέεται από ΕΡ, τότε κατά την αύξηση του ρεύματος [ $di(t)/dt > 0$ ], η πεπλεγμένη ροή αυξάνεται [ $d\Psi(t)/dt > 0$ ], η επαγόμενη τάση (εξ.1.26) αυξάνεται [ $v(t) > 0$ ] και επομένως το δυναμικό του ακροδέκτη εισόδου Α είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό του ακροδέκτη εξόδου Β του πηνίου. Η πολικότητα της τάσης του πηνίου είναι αυτή του Σχήματος 1.10(β<sub>1</sub>).

Μετά τη μέγιστη τιμή του το ρεύμα αρχίζει και μειώνεται [ $di(t)/dt < 0$ ], η πεπλεγμένη μαγνητική ροή μειώνεται [ $d\Psi(t)/dt < 0$ ], η επαγόμενη τάση μειώνεται [ $v(t) < 0$ ] και επομένως, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, το δυναμικό του ακροδέκτη εισόδου Α γίνεται μικρότερο από το δυναμικό του ακροδέκτη εξόδου Β του πηνίου. Η πολικότητα της τάσης του πηνίου είναι τώρα αυτή του Σχήματος 1.10(β<sub>2</sub>). Τα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως για τον καθορισμό της πολικότητας της επαγόμενης τάσης στο πηνίο, όταν διαρρέεται από ΕΡ ισχύουν και για τις δύο ημιπεριόδους ρεύματος (Σχήμα 1.10α).

Για τον υπολογισμό του ρεύματος του πηνίου συναρτήσει της επαγόμενης τάσης στα άκρα του απαιτείται η ολοκλήρωση της εξ.(1.26) στο χρονικό διάστημα [ $t_0, t$ ].

$$i(t) = \frac{1}{L} \int v_L(t) dt + i(t_0) \quad (1.27)$$

Όπου  $i(t_0)$  είναι η τιμή του ρεύματος στο πηνίο κατά τη χρονική στιγμή  $t_0$  (αρχική συνθήκη).

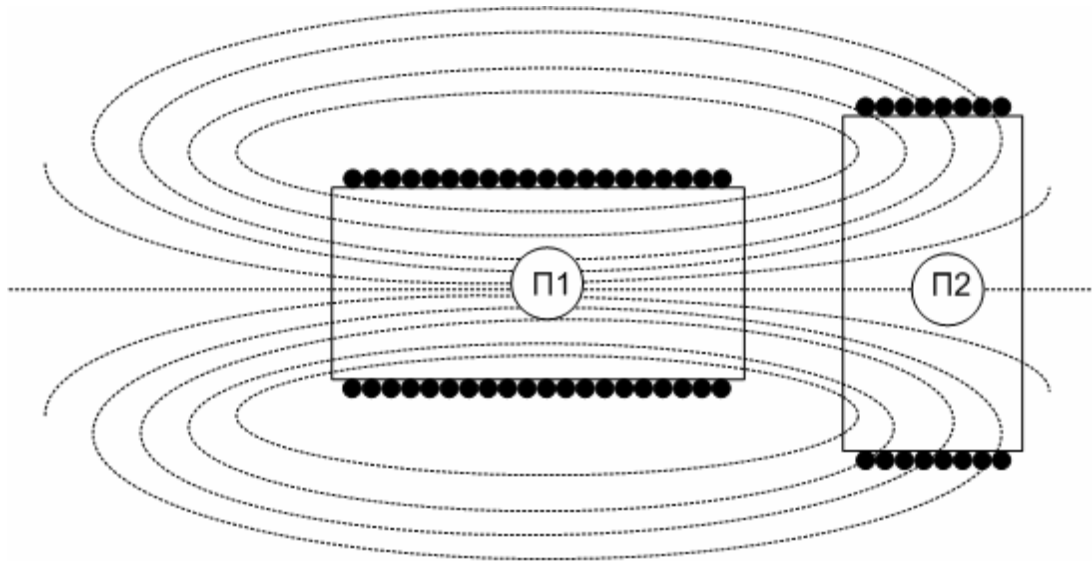
Η ηλεκτρική ενέργεια του ρεύματος μετατρέπεται σε μαγνητική ενέργεια και αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Το πηνίο είναι ένα παθητικό στοιχείο (δεν παράγει ενέργεια) με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας. Η εναποθηκευμένη ενέργεια  $W_L(t)$  σε ένα γραμμικό πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής  $L$  και τάσης  $v_L(t)$

στα άκρα του, για το χρονικό διάστημα  $[t_0, t]$  και λαμβάνοντας υπόψη την εξ.(1.24), είναι

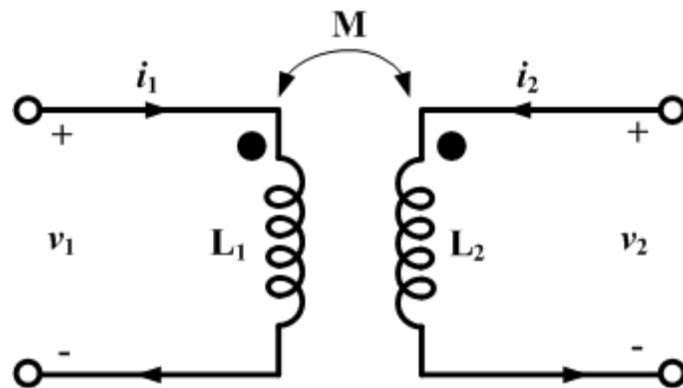
$$W_L(t) = \int_{t_0}^t v_L(t)i(t)dt = \int_{\Psi(t_0)}^{\Psi(t)} I(\Psi)d\Psi = \frac{1}{L} \int_0^{\Psi(t)} \Psi_1 d\Psi_1 = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2(t)}{L} = \frac{1}{2} Li^2(t) \quad (1.28)$$

Η πεπλεγμένη ροή τη στιγμή  $t_0$  είναι  $\Psi(t_0) = 0$

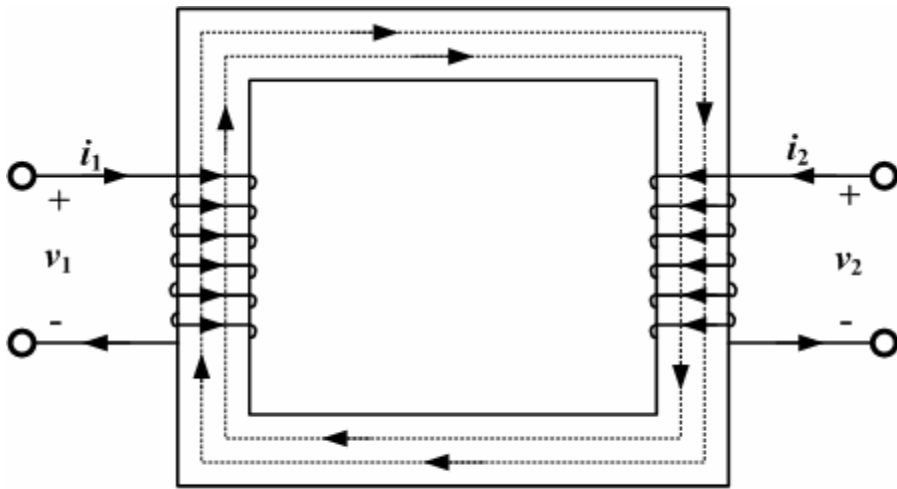
**(1.3.5) Στοιχείο αλληλεπαγωγής**



Π1, Π2: Πηνία 1 και 2 αντίστοιχα

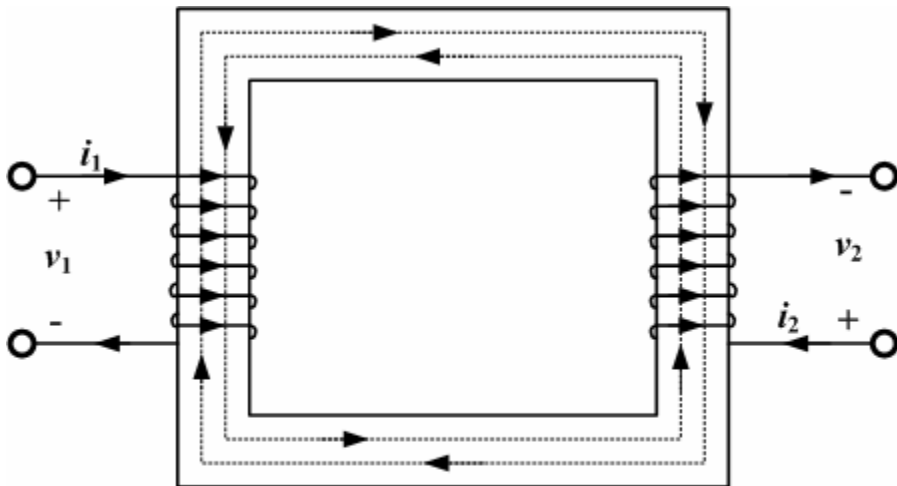


a)

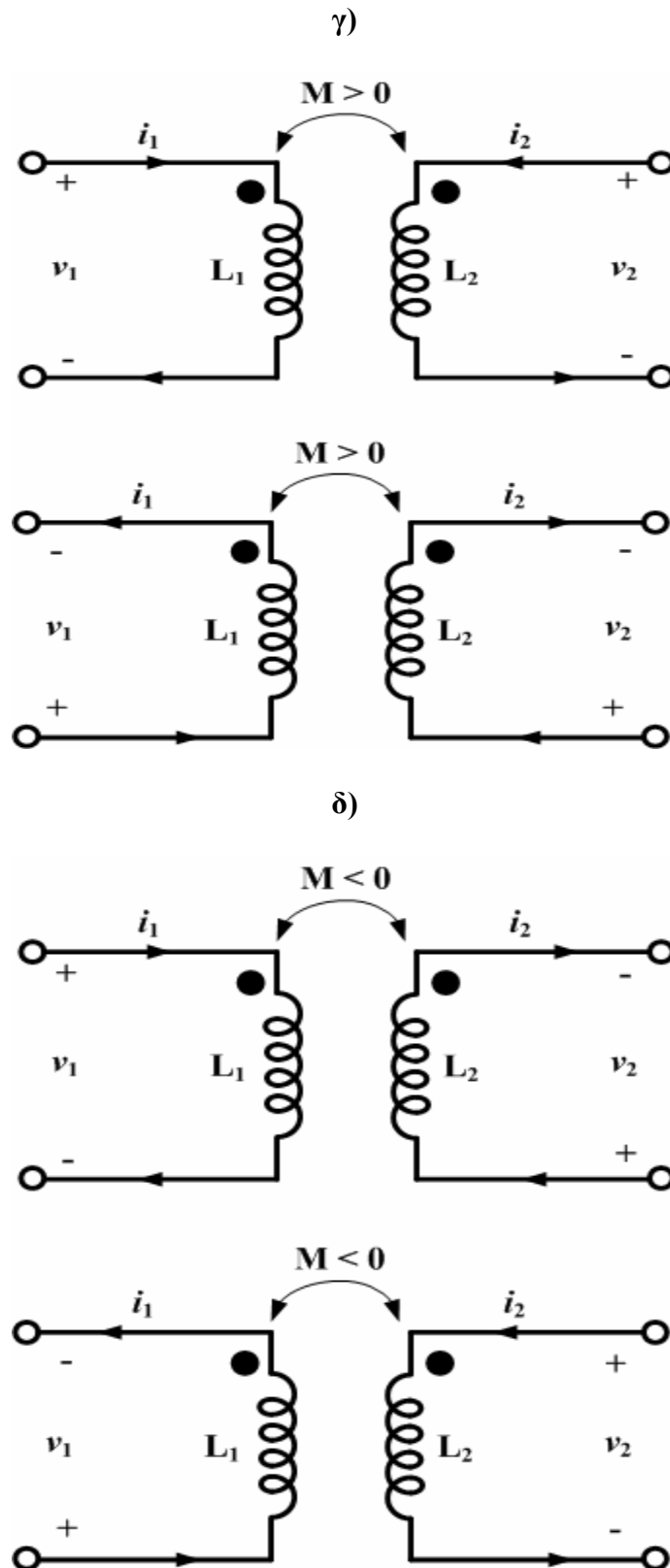


$M > 0$

β)



$M < 0$



Σχήμα 1.11. (α) Μαγνητικώς συζευγμένα πηνία με τροφοδότηση μόνο του ενός από τα δύο πηνία. (β) Μαγνητικώς συζευγμένα πηνία με ροή ρεύματος και στα δύο πηνία. (γ) Οι μαγνητικές ροές των δύο πηνίων αθροίζονται,  $M > 0$ . (δ) Οι μαγνητικές ροές των δύο πηνίων αφαιρούνται,  $M < 0$ . (ε), (στ) Εφαρμογή του κανόνα των τελειών για τον προσδιορισμό του πρόσημου του συντελεστή  $M$ .

Το φαινόμενο της αλληλεπαγωγής ή αμοιβαίας επαγωγής παρατηρείται σε μαγνητικώς συζευγμένα κυκλώματα. Δύο πηνία είναι μαγνητικώς συζευγμένα όταν η μαγνητική ροή που παράγεται από το ρεύμα του ενός πηνίου εμπλέκει τις σπείρες του άλλου πηνίου (Σχήμα 1.11α). Δηλαδή, επάγεται ηλεκτρική τάση στο δεύτερο πηνίο, λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής που παράγεται από το ρεύμα του πρώτου πηνίου (λειτουργία μετασχηματιστή).

Αναφερόμενοι στο Σχήμα 1.11(α), η μαγνητική ροή που παράγεται από το πηνίο 1 και εμπλέκει τις σπείρες του πηνίου 2 ονομάζεται ροή αλληλενδόσεως. Συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής,  $M$  (mutual inductance), μεταξύ των πηνίων 1 και 2 ορίζεται

$$M = \frac{N_2 \Phi_2}{i_1} \quad (1.29)$$

όταν τροφοδοτείται μόνο το πηνίο 1 (Π1) και

$$M = \frac{N_1 \Phi_1}{i_2} \quad (1.30)$$

όταν τροφοδοτείται μόνο το πηνίο 2 (Π2). Μονάδα μέτρησης του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής είναι το Henry (H).

Στη γενική περίπτωση που και τα δύο συζευγμένα πηνία διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα (Σχήμα 1.11β), η πεπλεγμένη ροή κάθε πηνίου είναι

$$\Psi_1 = N_1 (\varphi_1 + \varphi_{21}) = L_1 i_1 + M i_2 \quad (1.31)$$

$$\Psi_2 = N_2 (\varphi_2 + \varphi_{12}) = L_2 i_2 + M i_1 \quad (1.32)$$

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα κάθε πηνίου διαμορφώνεται από δύο μέρη: (α) από την τάση που οφείλεται στην αυτεπαγωγή του πηνίου και (β) από την τάση που οφείλεται στην αμοιβαία επαγωγή με το άλλο πηνίο

$$v_1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (1.33)$$

$$v_2(t) = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (1.34)$$

Ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής,  $M$ , είναι θετικός εάν οι μαγνητικές ροές  $\varphi_1, \varphi_{21}$  (ή  $\varphi_2, \varphi_{12}$ ) προστίθενται (Σχήμα 1.11γ) και αρνητικός εάν οι μαγνητικές ροές  $\varphi_1, \varphi_{21}$  (ή  $\varphi_2, \varphi_{12}$ ) αφαιρούνται (Σχήμα 1.11δ). Το πρόσημο της σταθεράς  $M$  προσδιορίζεται στα ηλεκτρικά κυκλώματα με τον «κανόνα των τελειών» (dot convention). Σύμφωνα με τον κανόνα των τελειών, όταν οι φορές των τάσεων και των ρευμάτων στα πηνία είναι συζευγμένες και τα ρεύματα μπαίνουν ή βγαίνουν από τους ακροδέκτες των πηνίων που σημειώνονται με τελεία, τότε ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής είναι θετικός (Σχήμα 1.11ε). Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής είναι αρνητικός (Σχήμα 1.11στ).

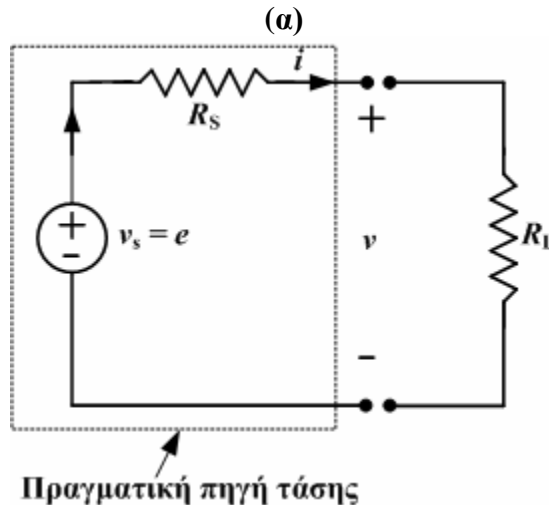
## 1.4 Μέθοδοι υπολογισμών ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Το κύριο αντικείμενο κατά τους υπολογισμούς των ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι ο προσδιορισμός των εντάσεων των ρευμάτων που διαρρέουν τους διάφορους κλάδους του κυκλώματος και των διαφορών δυναμικού (τάσεων) μεταξύ των κόμβων του κυκλώματος, δεδομένων των παθητικών και ενεργών στοιχείων του κυκλώματος.

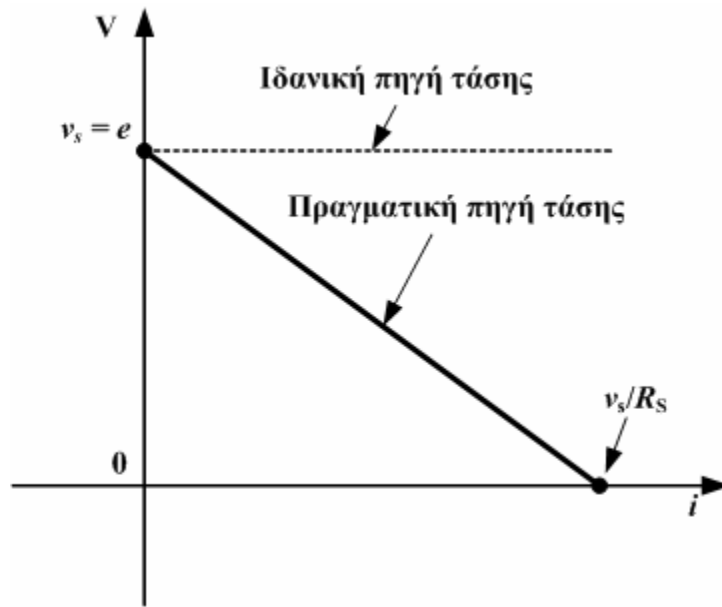
Στην πράξη οι πηγές τάσης και ρεύματος είναι *πραγματικές* και όχι ιδανικές. Δηλαδή, οι πηγές τάσης και ρεύματος προσφέρουν *πεπερασμένη και όχι άπειρη ενέργεια* στο κύκλωμα και χαρακτηρίζονται από κάποια *εσωτερική αντίσταση*.

### (1.4.1) Πραγματική πηγή τάσης

Μια ανεξάρτητη (ιδανική) πηγή τάσης θεωρείται ότι προσφέρει σταθερή τάση, ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα (παρ.1.3.1). Στην πραγματικότητα, όμως, η τάση στους ακροδέκτες της πηγής μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος που παρέχει στο κύκλωμα και αυτό οφείλεται στην πτώση τάσης στην εσωτερική αντίσταση (internal resistance) της πηγής. Η *πραγματική πηγή τάσης* είναι ο εν σειρά συνδυασμός μιας ιδανικής πηγής τάσης  $E$  ( $V_s$ ) και μιας αντίστασης  $R_s$  (Σχήμα 1.12α). Η ιδανική πηγή ονομάζεται *ηλεκτρεγερτική δύναμη* ( $HEΔ$ ,  $E$ ) και η τάση στους ακροδέκτες της πηγής, όταν αυτή διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, ονομάζεται *πολική τάση* ( $V$ ). Είναι,  $E \geq V$  κατά το ποσό της πτώσης τάσης στην εσωτερική αντίσταση  $R_s$ . Η *χαρακτηριστική  $i - v$*  μιας πραγματικής πηγής τάσης δίνεται στο Σχήμα 1.12(β) και εκφράζει τη μεταβολή της πολικής τάσης της πηγής συναρτήσει του ρεύματος.



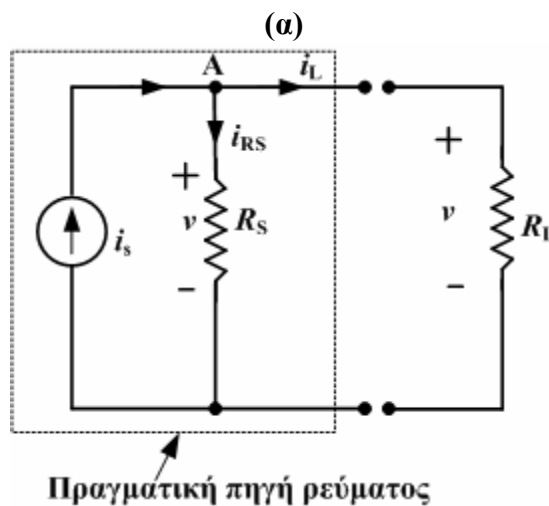
(β)



Σχήμα 1.12. (α) Πραγματική πηγή τάσης. (β) Χαρακτηριστική  $i - v$  πραγματικής πηγής τάσης.

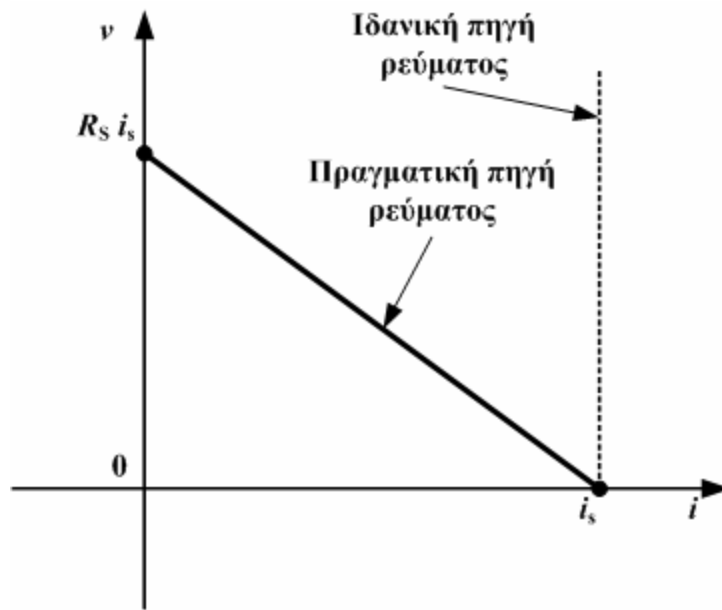
#### (1.4.2) Πραγματική πηγή ρεύματος

Σε αντίθεση με την ιδανική πηγή ρεύματος, η οποία θεωρείται ότι προσφέρει σταθερό ρεύμα, το ρεύμα μιας πραγματικής πηγής ρεύματος δεν είναι σταθερό, αλλά είναι συνάρτηση της τάσης στα άκρα της πηγής. Η πραγματική πηγή ρεύματος είναι ο παράλληλος συνδυασμός μιας ιδανικής πηγής ρεύματος  $i_s$  και μιας εσωτερικής αντίστασης  $R_s$  (Σχήμα 1.13α).





(β)



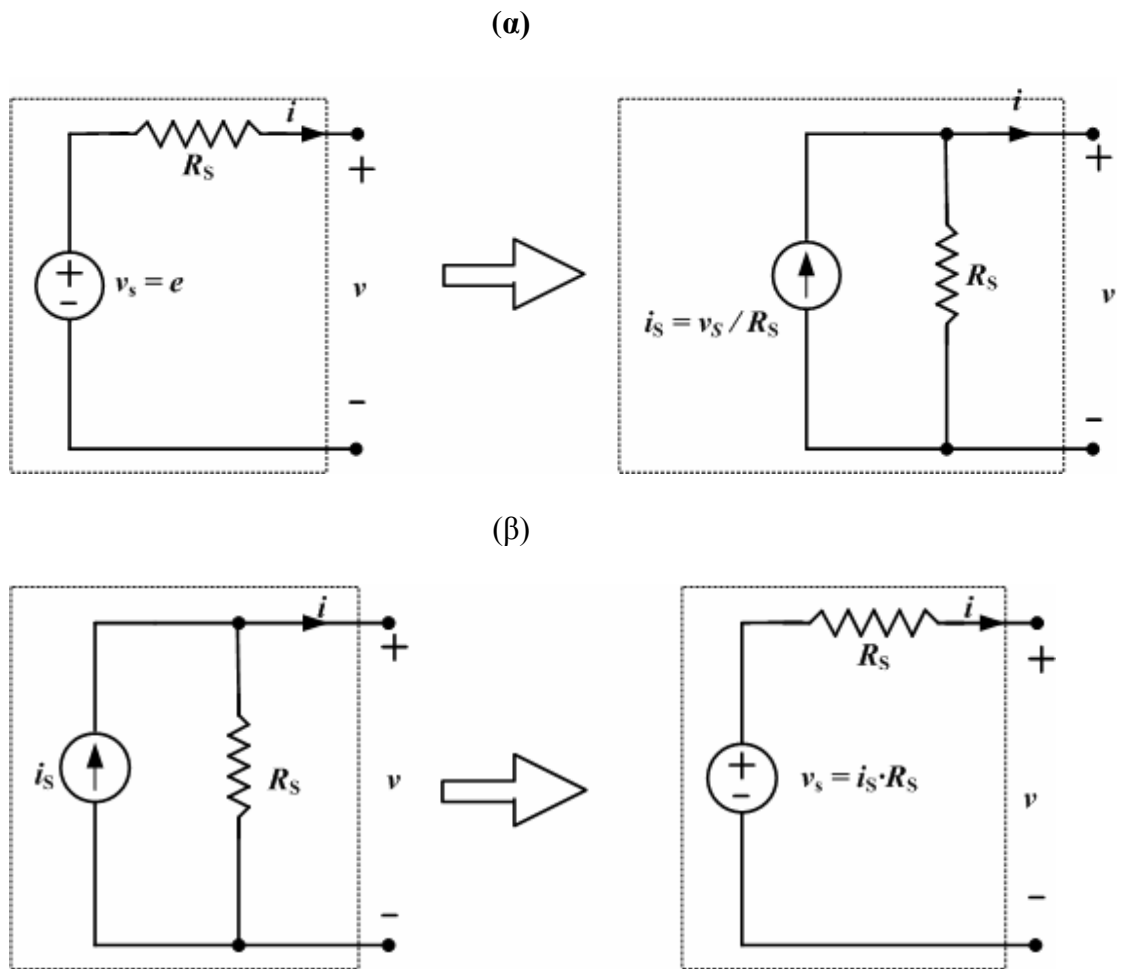
Σχήμα 1.13. (α) Πραγματική πηγή ρεύματος. (β) Χαρακτηριστική  $i - v$  πραγματικής πηγής ρεύματος.

(1.4.3) Ισοδυναμία πραγματικής πηγής τάσης και πραγματικής πηγής ρεύματος.

Συγκρίνοντας τις χαρακτηριστικές των πραγματικών πηγών τάσης και ρεύματος, οι οποίες δίνονται στα Σχήματα 1.12(β) και 1.13(β) αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι έχουν την ίδια μορφή και επομένως πρόκειται για *ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία δύο ακροδεκτών* που δε διαφέρουν εξωτερικά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατή η *μετατροπή μιας πραγματικής πηγής τάσης σε μια πραγματική πηγή ρεύματος και αντιστρόφως*. Η *σχέση ισοδυναμίας μεταξύ των δύο πηγών* προκύπτει από την εξίσωση των τιμών των αντίστοιχων σημείων επί την αρχή των δύο χαρακτηριστικών, δηλαδή ισχύει

$$v_s(t) = R_s i_s(t) \quad (1.35)$$

Μία πραγματική πηγή τάσης  $v_s(t)$  και εσωτερικής αντίστασης  $R_s$  μετατρέπεται σε μία πραγματική πηγή ρεύματος  $i_s(t) = v_s(t)/R_s$  και εσωτερικής αντίστασης  $R_s$  (Σχήμα 1.14α). Κατά τον ίδιο τρόπο, μια πραγματική πηγή ρεύματος  $i_s(t)$  και εσωτερικής αντίστασης  $R_s$  μετατρέπεται σε μια πραγματική πηγή τάσης  $v_s(t) = i_s(t) R_s$  και εσωτερικής αντίστασης  $R_s$ . Η δυνατότητα μετατροπής μιας πηγής τάσης σε πηγή ρεύματος και αντιστρόφως αξιοποιείται στην απλοποίηση σύνθετων ηλεκτρικών κυκλωμάτων.



Σχήμα 1.14. (α) Μετατροπή πραγματικής πηγής τάσης σε πραγματική πηγή ρεύματος.  
 (β) Μετατροπή πραγματικής πηγής ρεύματος σε πραγματική πηγή τάσης.

Για τους υπολογισμούς των ηλεκτρικών κυκλωμάτων χρησιμοποιούνται ορισμένες βασικές εξισώσεις, οι οποίες προκύπτουν από τους νόμους του Kirchhoff. Οι υπολογισμοί όμως μπορούν να απλουστευθούν εφαρμόζοντας ορισμένα θεωρήματα, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Οι νόμοι και τα θεωρήματα εφαρμόζονται τόσο στο συνεχές όσο και στο εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι νόμοι του Kirchhoff είναι γενικοί, ισχύουν για κάθε συγκεντρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα και εξαρτώνται μόνο από την *τοπολογία* (γεωμετρική μορφή, δομή) του κυκλώματος και όχι από τη φύση των ηλεκτρικών στοιχείων που συνθέτουν το κύκλωμα. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff σε δύο κυκλώματα με την ίδια ακριβώς τοπολογία, αλλά με διαφορετικά ηλεκτρικά στοιχεία θα οδηγήσει στις ίδιες ακριβώς εξισώσεις (περιορισμούς) για τα ρεύματα και τις τάσεις των κλάδων των εξεταζόμενων κυκλωμάτων. Το θεώρημα του Tellegen είναι άμεση συνέπεια των νόμων του Kirchhoff.

#### (1.4.4) Ο πρώτος νόμος ή ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff

Ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff εκφράζει την *αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου*, σύμφωνα με την οποία *το ηλεκτρικό φορτίο ούτε καταστρέφεται,*

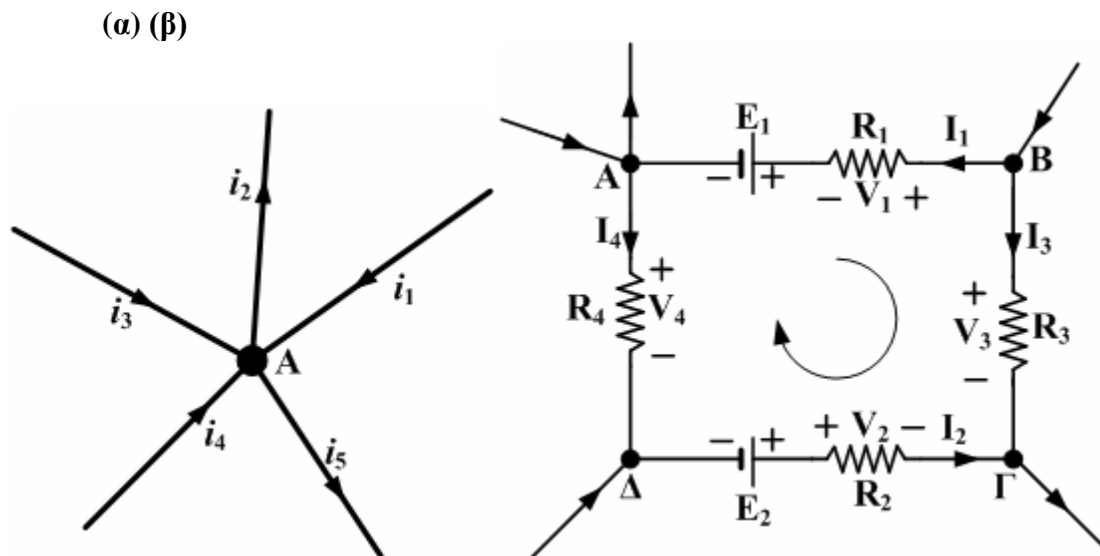
ούτε δημιουργείται εκ του μηδενός, αλλά διατηρείται σταθερό σε κάθε κλειστό σύστημα. Συνέπεια της αρχής αυτής είναι η αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου σε έναν κόμβο. Με βάση τα προηγούμενα, ο πρώτος νόμος του Kirchhoff διατυπώνεται ως εξής: **Το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων όλων των κλάδων, που εισέρχονται ή εξέρχονται από κάθε κόμβο συγκεντρωμένου ηλεκτρικού κυκλώματος είναι κάθε χρονική στιγμή ίσο με μηδέν.** Η μαθηματική διατύπωση του νόμου αυτού είναι

$$\sum_{k=1}^N i_k(t) = 0, \quad \forall t \quad (1.36)$$

Όπου:  $i_k(t)$  τα ρεύματα των κλάδων, συμπεριλαμβανομένων και των ρευμάτων των πηγών ρεύματος, που συνδέονται στον κόμβο  $k$  του κυκλώματος.

Για τη διατύπωση της αλγεβρικής εξίσωσης (1.36) σε κάθε κόμβο κυκλώματος, πρέπει προηγουμένως να οριστούν οι φορές αναφοράς των ρευμάτων σε κάθε κλάδο του κυκλώματος. Θεωρείται η σύμβαση ότι τα ρεύματα που εισέρχονται σε έναν κόμβο λαμβάνονται ως θετικά και τα ρεύματα που εξέρχονται από τον κόμβο ως αρνητικά. Για παράδειγμα, στον κόμβο  $A$  του Σχήματος 1.15(α) ισχύει:  $i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0$ .

Με εφαρμογή της εξ.(1.36) σε κάθε κόμβο κυκλώματος, το οποίο έχει  $N_n$  κόμβους, προκύπτει ένα σύστημα  $N_n - 1$  γραμμικών ανεξάρτητων εξισώσεων με αγνώστους τα ρεύματα των κλάδων.



Σχήμα 1.15. (α) Κόμβος κυκλώματος. (β) Βρόχος κυκλώματος.

#### (1.4.5) Ο νόμος των τάσεων ή νόμος των βρόχων του Kirchhoff

Ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff διατυπώνεται ως εξής: **Το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων των κλάδων σε κάθε βρόχο συγκεντρωμένου ηλεκτρικού κυκλώματος είναι κάθε χρονική στιγμή ίσο με μηδέν.**

Μαθηματικά, ο νόμος των τάσεων του Kirchhoff διατυπώνεται με τη σχέση

$$\sum_{k=1}^N v_k(t) = 0, \quad \forall t \quad (1.37)$$

Όπου  $v_k(t)$  είναι οι τάσεις των κλάδων που διαμορφώνουν το βρόχο.

Για την εφαρμογή του νόμου των τάσεων (εξ.1.37) πρέπει σε κάθε βρόχο του κυκλώματος να οριστούν η *φορά αναφοράς του βρόχου* και οι *πολικότητες των τάσεων των κλάδων των βρόχων*. Η φορά αναφοράς των βρόχων και οι πολικότητες των τάσεων των κλάδων ορίζονται *αυθαίρετα* από την αρχή και τηρούνται σταθερά μέχρι την οριστική επίλυση του προβλήματος. Οι σωστές φορές των ρευμάτων στους κλάδους δεν μπορούν, κατά κανόνα, να προβλεφθούν από την αρχή, αφού για τη δημιουργία του ρεύματος σε έναν κλάδο συνεργάζονται όλες οι πηγές του κυκλώματος.

Η *διόρθωση της φοράς του ρεύματος* στους κλάδους, εάν χρειαστεί, γίνεται μετά την επίλυση του προβλήματος. Εάν από την ανάλυση του κυκλώματος προκύψει ότι το ρεύμα σε έναν κλάδο είναι θετικός αριθμός, αυτό σημαίνει ότι η αρχικά εκλεγείσα φορά του ρεύματος είναι η πραγματική φορά. Στην αντίθετη περίπτωση η πραγματική φορά του ρεύματος είναι αντίθετη από αυτή που αρχικά επιλέχθηκε.

Στη γενική περίπτωση, οι βρόχοι των κυκλωμάτων περιέχουν *ενεργά και παθητικά στοιχεία*. Ο βρόχος του Σχήματος 1.15(β) περιλαμβάνει τις πηγές τάσης (ενεργά στοιχεία) ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων  $E_1$  και  $E_2$  και τις αντιστάσεις (παθητικά στοιχεία) των κλάδων  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  και  $R_4$ .

Για τη διαμόρφωση των εξισώσεων των βρόχων ενός κυκλώματος *θεωρούμε θετικές τις τάσεις των κλάδων, των οποίων οι συζευγμένες φορές αναφοράς της τάσης συμπίπτουν με τη φορά αναφοράς του βρόχου και αρνητικές στην αντίθετη περίπτωση*. Αυτό σημαίνει ότι, η τάση στα άκρα ενός παθητικού στοιχείου λαμβάνεται θετική όταν, ακολουθώντας την πορεία που καθορίζει η φορά αναφοράς του βρόχου, συναντάει κανείς πρώτα τον ακροδέκτη του στοιχείου με το χαμηλότερο δυναμικό (-), ενώ στην αντίθετη περίπτωση λαμβάνεται αρνητική. Κατά τον ίδιο τρόπο, η τάση (ΗΕΔ) μιας πηγής τάσης θεωρείται θετική όταν, ακολουθώντας την πορεία που καθορίζει η φορά αναφοράς του βρόχου, συναντάει κανείς πρώτα τον αρνητικό ακροδέκτη της πηγής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση θεωρείται αρνητική. Με βάση τα προηγούμενα, η εξίσωση των τάσεων του βρόχου του Σχήματος 1.15(β) είναι

$$E_1 - E_2 + V_1 - V_3 + V_2 + V_4 = 0$$

και λαμβάνοντας υπόψη το νόμο του Ohm (εξ.1.13), η προηγούμενη εξίσωση γίνεται

$$E_1 - E_2 + I_1 R_1 - I_3 R_3 + I_2 R_2 + I_4 R_4 = 0$$

Γενικώς, σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα δίνονται οι ηλεκτρικές πηγές και τα ηλεκτρικά στοιχεία και ζητείται να υπολογιστούν τα ρεύματα και οι τάσεις στους κλάδους του κυκλώματος. Με εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στους απλούς και σύνθετους βρόχους ενός κυκλώματος προκύπτει ένα *σύστημα γραμμικών εξαρτημένων εξισώσεων με αγνώστους τις τάσεις των κλάδων των βρόχων*. Από τις εξισώσεις αυτές, εάν  $N_b$  και  $N_n$  είναι ο αριθμός των κλάδων και των κόμβων του κυκλώματος αντίστοιχα, μόνο οι  $N_b - N_n + 1$  είναι οι *γραμμικά ανεξάρτητες εξισώσεις* και είναι αυτές που χρειάζονται για τον υπολογισμό των τάσεων των κλάδων. Πρακτικά, για τη διαμόρφωση των ανεξάρτητων εξισώσεων τάσεων στους βρόχους ενός κυκλώματος, αγνοούνται οι εξισώσεις τάσεων των σύνθετων βρόχων και λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εξισώσεις τάσεων των απλών βρόχων.

Η επίλυση οποιουδήποτε κυκλώματος επιτυγχάνεται με εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff και του νόμου του Ohm. Θεωρώντας ως αγνώστους τα ρεύματα στους κλάδους ενός κυκλώματος, ο συνολικός αριθμός των ανεξάρτητων εξισώσεων που απαιτούνται για την επίλυση του κυκλώματος είναι  $N_b - N_n + I + N_n - I = N_b$ , δηλαδή ισάριθμες προς τα ρεύματα των κλάδων.

#### (1.4.6) Το θεώρημα του Tellegen

Το θεώρημα του Tellegen είναι άμεση συνέπεια των νόμων του Kirchhoff. Σύμφωνα με το θεώρημα Tellegen, *σε κάθε συγκεντρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα το άθροισμα των γινομένων της τάσης επί του ρεύματος κάθε κλάδου είναι κάθε χρονική στιγμή ίσο με μηδέν*. Μαθηματικά το θεώρημα Tellegen διατυπώνεται με τη σχέση

$$\sum_{k=1}^{N_b} v_k(t) i_k(t) = 0, \quad \forall t \quad (1.38)$$

Όπου  $N_b$  είναι το πλήθος των κλάδων του κυκλώματος.

Επειδή  $p_k(t) = v_k(t) i_k(t)$  είναι η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς που προσφέρεται από το υπόλοιπο κύκλωμα στον κλάδο  $k$  (όπου καταναλώνεται ή αποθηκεύεται) ή παρέχεται από τον κλάδο  $k$  στο υπόλοιπο ηλεκτρικό κύκλωμα, αυτό σημαίνει, σύμφωνα με το θεώρημα του Tellegen, ότι η ηλεκτρική ισχύς παραμένει εντός του συγκεντρωμένου κυκλώματος ή διαφορετικά η ηλεκτρική ισχύς ρέει μόνον διαμέσου των κλάδων του κυκλώματος και δεν ακτινοβολείται.

Ακόμη, επειδή η ισχύς κάθε κλάδου  $p_k(t)$  συνδέεται με την ενέργεια του κλάδου  $w_k(t)$  με τη σχέση

$$P_k(t) = \frac{dw_k(t)}{dt} \quad (1.39)$$

με αντικατάσταση της εξ.(1.39) στην εξ.(1.38) προκύπτει

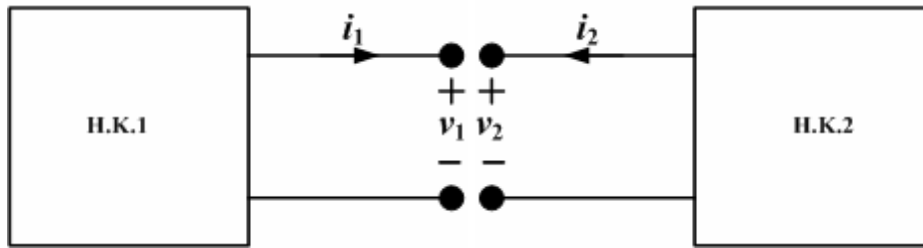
$$\sum_{k=1}^{N_b} \frac{dw_k(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{k=1}^{N_b} w_k(t) = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^{N_b} dw_k(t) = c, \quad \forall t \quad (1.40)$$

Όπου  $c$  είναι σταθερά. Από την εξ.(1.40) συνάγεται ότι η ηλεκτρική ενέργεια των κλάδων σε ένα συγκεντρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα (ολική ενέργεια κυκλώματος) είναι κάθε χρονική στιγμή σταθερή ή διαφορετικά το συγκεντρωμένο κύκλωμα δεν ανταλλάσει ηλεκτρική ενέργεια με το περιβάλλον του (δεν ακτινοβολεί ενέργεια).

#### (1.4.7) Ισοδυναμία κυκλωμάτων

Όταν ενδιαφέρει μόνο η εξωτερική περιγραφή ενός κυκλώματος και όχι η εσωτερική δομή του, τότε το κύκλωμα απεικονίζεται ως ένα κλειστό κουτί με δύο ακροδέκτες εξόδου. Δύο ή περισσότερα κυκλώματα δύο ακροδεκτών ονομάζονται ισοδύναμα, όταν οι τάσεις και τα ρεύματα των ακροδεκτών τους είναι κάθε χρονική στιγμή ίσα μεταξύ τους, δηλαδή παρουσιάζουν την ίδια εξωτερική συμπεριφορά. Για

παράδειγμα, τα ηλεκτρικά κυκλώματα Η.Κ.1 και Η.Κ.2 στο Σχήμα 1.18, είναι ισοδύναμα εάν ισχύει κάθε χρονική στιγμή:  $v_1(t) = v_2(t)$  και  $i_1(t) = i_2(t)$ .



Σχήμα 1.18. Ισοδυναμία κυκλωμάτων Η.Κ.1 και Η.Κ.2.

Με βάση την ισοδυναμία κυκλωμάτων είναι δυνατή η απλοποίηση σύνθετων κυκλωμάτων ομοειδών στοιχείων δύο ακροδεκτών (αντιστάτες, πηνία, πυκνωτές) και η αντικατάστασή τους από ένα ισοδύναμο κύκλωμα ενός ίδιου στοιχείου δύο ακροδεκτών.

Δύο ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία δύο ακροδεκτών είναι συνδεδεμένα σε σειρά (series connected elements), όταν το τέλος του ενός στοιχείου συνδέεται με την αρχή του επόμενου κοκ., χωρίς να υπάρχει σημείο λήψης ανάμεσά τους. Τα συνδεδεμένα σε σειρά ηλεκτρικά στοιχεία διαρρέονται όλα από το ίδιο ρεύμα.

#### (1.4.8) Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά (Series-connected resistances)

Στο Σχήμα 1.19(α) παρουσιάζεται κύκλωμα δύο αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά. Με εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος προκύπτει

$$v - v_1 - v_2 = 0 \Leftrightarrow v = v_1 + v_2 \quad (1.41)$$

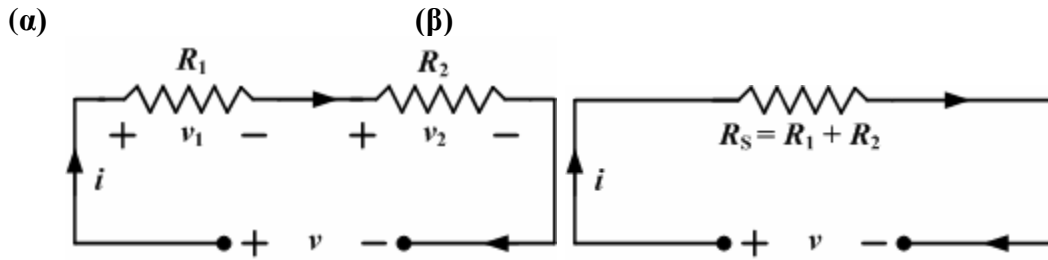
Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, οι τάσεις  $v_1 = R_1 i$  και  $v_2 = R_2 i$  και

$$v = iR_1 + iR_2 = i(R_1 + R_2) = iR_s \quad (1.42)$$

Όπου  $R_s$  είναι η ισοδύναμη αντίσταση των δύο εν σειρά συνδεδεμένων αντιστάσεων (Σχήμα 1.19β). Από την εξ.(1.42) συνάγεται ότι τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.19(α) και (β) παρουσιάζουν την ίδια εξωτερική συμπεριφορά (έχουν την ίδια τάση και το ίδιο ρεύμα στους ακροδέκτες τους) και επομένως είναι δυνατή η αντικατάσταση των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ , χωρίς να επηρεάζεται η έξοδος του κυκλώματος, με την αντίσταση  $R_s$

$$R_s = R_1 + R_2 \quad (1.43)$$

Γενικεύοντας την εξ.(1.43) για  $N$  αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά



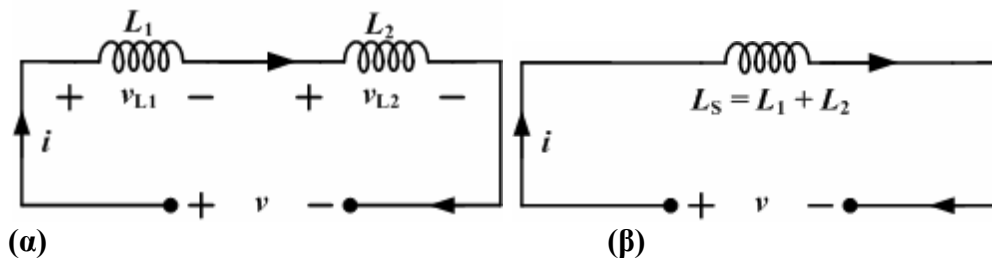
Σχήμα 1.19. (α) Κύκλωμα δύο αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

$$R_S = \sum_{k=1}^N R_k \quad (1.44)$$

**(1.4.9) Σύνδεση πηνίων σε σειρά (Series-connected inductors)**

Στο Σχήμα 1.20(α) παρουσιάζεται κύκλωμα δύο πηνίων με συντελεστές αυτεπαγωγής  $L_1$  και  $L_2$  συνδεδεμένων σε σειρά. Με εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος προκύπτει

$$v - v_{L1} - v_{L2} = 0 \Rightarrow v = v_{L1} + v_{L2} = L_1 \frac{di(t)}{dt} + L_2 \frac{di(t)}{dt} = (L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} = L_s \frac{di(t)}{dt} \quad (1.45)$$



Σχήμα 1.20. (α) Κύκλωμα δύο πηνίων συνδεδεμένων σε σειρά. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Όπου  $L_s$  είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του ισοδύναμου πηνίου των δύο σε σειρά συνδεδεμένων πηνίων (Σχήμα 1.20β). Από την εξ.(1.45) συνάγεται ότι τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.20(α) και (β) παρουσιάζουν την ίδια εξωτερική συμπεριφορά (έχουν την ίδια τάση και το ίδιο ρεύμα στους ακροδέκτες τους) και επομένως είναι δυνατή η αντικατάσταση των πηνίων  $L_1$  και  $L_2$ , χωρίς να επηρεάζεται η έξοδος του κυκλώματος, με το ισοδύναμο πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής  $L_s$ .

$$L_s = L_1 + L_2 \quad (1.46)$$

με την προϋπόθεση βέβαια ότι τα αρχικά ρεύματα των πηνίων  $L_1$  και  $L_2$  είναι ίδια, ώστε να ισχύει ο νόμος των ρευμάτων του Kirchhoff.

Γενικεύοντας την εξ.(1.46) για  $N$  πηνία συνδεδεμένα σε σειρά

$$L_s = \sum_{k=1}^N L_k \quad (1.47)$$

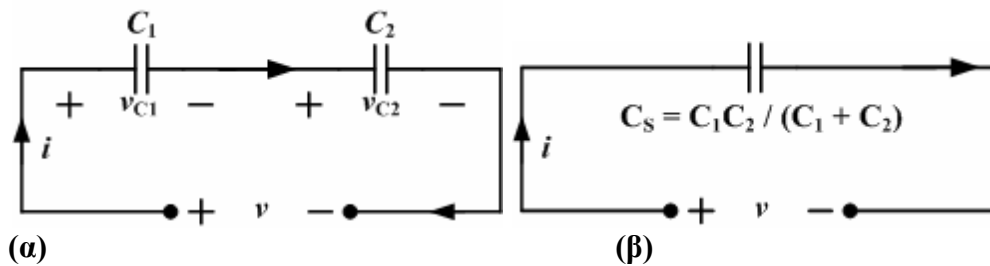
**(1.4.10) Σύνδεση πυκνωτών σε σειρά (Series-connected capacitors)**

Στο Σχήμα 1.21(α) παρουσιάζεται κύκλωμα δύο πυκνωτών με χωρητικότητες  $C_1$  και  $C_2$  συνδεδεμένων σε σειρά. Με εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος και λαμβάνοντας υπόψη την τάση στα άκρα ενός πυκνωτή (εξ.1.22), προκύπτει

$$v - v_{C_1} - v_{C_2} = 0 \Rightarrow v = v_{C_1} + v_{C_2} = \left[ \frac{1}{C_1} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_1(t_0) \right] + \left[ \frac{1}{C_2} \int_{t_0}^t i(t) dt + v_2(t_0) \right]$$

$$v = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \int_{t_0}^t i(t) dt + v(t_0) = \frac{1}{C_s} \int_{t_0}^t i(t) dt + v(t_0) \quad (1.48)$$

Όπου  $v(t_0) = v_1(t_0) + v_2(t_0)$  είναι το άθροισμα των αρχικών τιμών τάσης των δύο πυκνωτών.



Σχήμα 1.21. (α) Κύκλωμα δύο πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Όπου  $C_s$  είναι η χωρητικότητα του ισοδύναμου πυκνωτή των δύο σε σειρά συνδεδεμένων πυκνωτών (Σχήμα 1.21β). Από την εξ.(1.48) συνάγεται ότι τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.21(α) και (β) παρουσιάζουν την ίδια εξωτερική συμπεριφορά (έχουν την ίδια τάση και το ίδιο ρεύμα στους ακροδέκτες τους) και επομένως είναι δυνατή η αντικατάσταση των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$ , χωρίς να επηρεάζεται η έξοδος του κυκλώματος, με τον ισοδύναμο πυκνωτή χωρητικότητας  $C_s$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (1.49)$$

Γενικεύοντας την εξ.(1.49) για  $N$  πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά

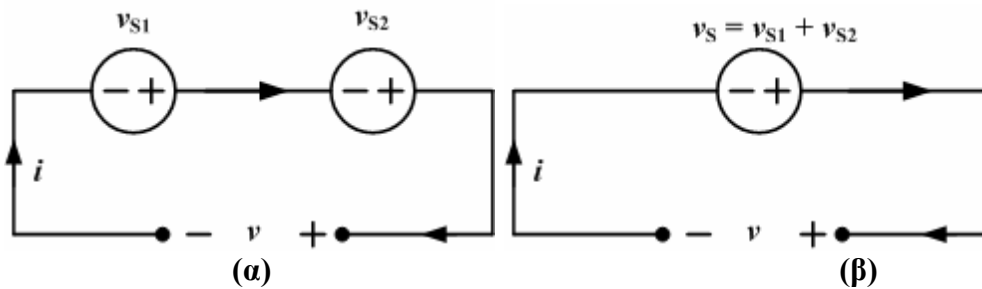
$$\frac{1}{C_s} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{C_k} \quad (1.50)$$



(1.4.11) Σύνδεση ανεξάρτητων πηγών τάσης σε σειρά (Series-connected independent voltage sources)

Δύο ή περισσότερες πηγές τάσης συνδέονται σε σειρά όταν ο αρνητικός πόλος της μιας πηγής συνδέεται με το θετικό πόλο της επόμενης κοκ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος να είναι ο θετικός πόλος της πρώτης πηγής και ο αρνητικός πόλος της τελευταίας (Σχήμα 1.22α). Με εφαρμογή του νόμου των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος προκύπτει

$$v - v_{S1} - v_{S2} = 0 \Rightarrow v = v_{S1} + v_{S2} \quad (1.51)$$



Σχήμα 1.22. (α) Κύκλωμα δύο πηγών τάσης συνδεδεμένων σε σειρά. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Το ισοδύναμο του κυκλώματος του Σχήματος 1.22(α) είναι το κύκλωμα του Σχήματος 1.22(β), όπου οι δύο πηγές τάσης έχουν αντικατασταθεί από μια τρίτη πηγή με τιμή

$$v_s = v_{S1} + v_{S2} \quad (1.52)$$

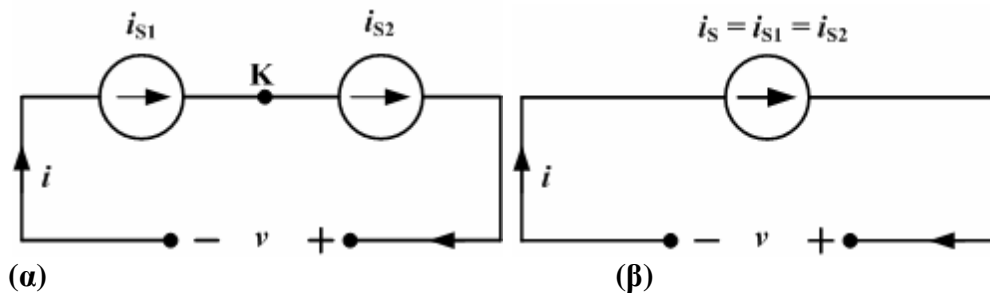
χωρίς να επηρεάζεται η τάση εξόδου  $v$  και το ρεύμα εξόδου  $i$  του κυκλώματος του Σχήματος 1.22(α). Γενικεύοντας την εξ.(1.49) για  $N$  πηγές τάσης συνδεδεμένες σε σειρά, η τιμή της ισοδύναμης πηγής τάσης είναι

$$v_s = \sum_{k=1}^N v_{sk} \quad (1.53)$$

(1.4.12) Σύνδεση ανεξάρτητων πηγών ρεύματος σε σειρά (Series-connected independent current sources)

Δύο ή περισσότερες πηγές ρεύματος μπορούν να συνδεθούν σε σειρά μόνο όταν όλες οι πηγές παρέχουν την ίδια ένταση ρεύματος. Σε αντίθετη περίπτωση, θα υπήρχε συσσώρευση ηλεκτρικού φορτίου στον κόμβο K (Σχήμα 1.23α) μεταξύ των πηγών, αφού θα ίσχυε:  $i_{s1} - i_{s2} \neq 0$ . Αυτό όμως αντιβαίνει στο νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff και συνεπώς πρέπει να ισχύει

$$i_{s1} = i_{s2} \quad (1.54)$$



Σχήμα 1.23. (α) Κύκλωμα δύο πηγών ρεύματος συνδεδεμένων σε σειρά. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Επομένως, το ισοδύναμο κύκλωμα δύο πηγών ρεύματος συνδεδεμένων σε σειρά (Σχήμα 1.23α) είναι μια πηγή ρεύματος ίσης έντασης με αυτή που προσφέρει η κάθε πηγή (Σχήμα 1.23β).

**(1.4.13) Σύνδεση στοιχείων δύο ακροδεκτών παράλληλα**

Δύο ή περισσότερα στοιχεία δύο ακροδεκτών είναι συνδεδεμένα παράλληλα (*parallel-connected elements*) όταν τα άκρα τους συνδέονται μεταξύ δυο ακροδεκτών, δηλαδή έχουν κοινά άκρα. Αποτέλεσμα της συνδεσμολογίας αυτής είναι όλα τα στοιχεία να δέχονται στα άκρα τους την ίδια τάση.

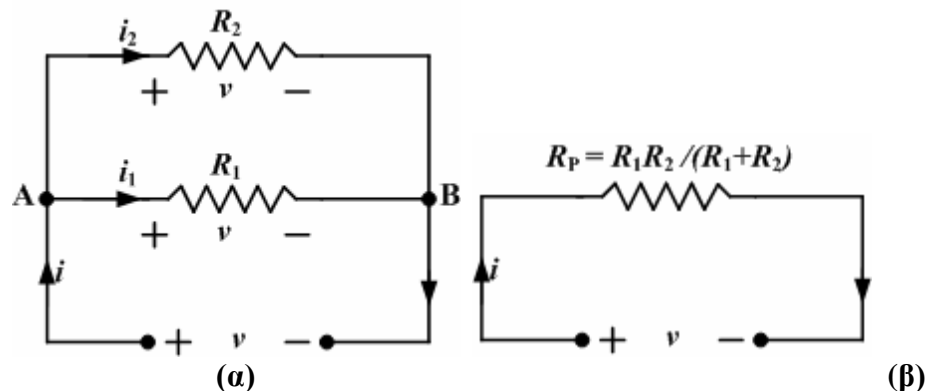
**(1.4.14) Παράλληλη συνδεσμολογία αντιστάσεων (parallel-connected resistances)**

Στο Σχήμα 1.24(α) παρουσιάζονται δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η ίδια τάση της πηγής  $v$ . Με εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων του Kirchhoff σε έναν από τους δύο κόμβους (έστω στον κόμβο Α) του κυκλώματος του Σχήματος 1.24(α) προκύπτει

$$i - i_1 - i_2 = 0 \Leftrightarrow i = i_1 + i_2 \quad (1.55)$$

και αντικαθιστώντας τα ρεύματα  $i_1$  και  $i_2$  από το νόμο του Ohm

$$i = \frac{v}{R_1} + \frac{v}{R_2} = v \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = v \frac{1}{R_p} \quad (1.56)$$



Σχήμα 1.24. (α) Κύκλωμα δύο αντιστάσεων συνδεδεμένων παράλληλα. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Η εξ.(1.56) συνδέει την τάση  $v$  και το ρεύμα  $i$  στους ακροδέκτες εισόδου του κυκλώματος και σύμφωνα με τα όσα ισχύουν για ισοδύναμα κυκλώματα (παρ.1.6), ο παράλληλος συνδυασμός των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  είναι δυνατόν να αντικατασταθεί από μια τρίτη ισοδύναμη αντίσταση  $R_p$  (Σχήμα 1.24β), τέτοια ώστε

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Leftrightarrow R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.57)$$

Τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.24(α) και (β) είναι ισοδύναμα, αφού έχουν την ίδια τάση και ένταση στους εξωτερικούς ακροδέκτες τους. Γενικεύοντας την εξ.(1.57) για  $N$  αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα, η ισοδύναμη αντίσταση  $R_p$  είναι

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_k} \quad (1.58)$$

#### (1.4.15) Παράλληλη συνδεσμολογία πηνίων (parallel-connected inductors)

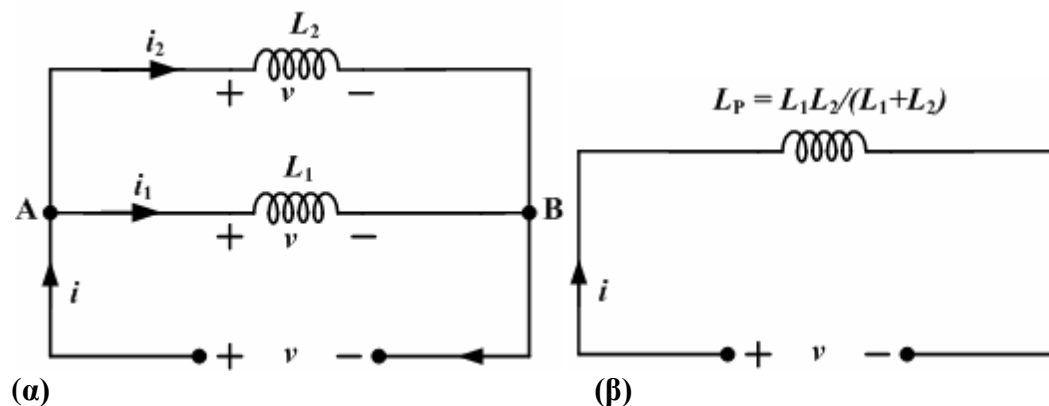
Στο Σχήμα 1.25(α) παρουσιάζονται δύο πηνία με συντελεστές αυτεπαγωγής  $L_1, L_2$  συνδεδεμένα παράλληλα στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η ίδια τάση της πηγής  $v$ . Με εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων του Kirchhoff σε έναν από τους δύο κόμβους (έστω στον κόμβο Α) του κυκλώματος του Σχήματος 1.25(α) προκύπτει

$$i - i_1 - i_2 = 0 \Leftrightarrow i = i_1 + i_2 \quad (1.59)$$

και αντικαθιστώντας τα ρεύματα των πηνίων  $i_1$  και  $i_2$  συναρτήσει της επαγόμενης τάσης στα άκρα των πηνίων  $v$  (εξ.1.27)

$$\begin{aligned} i &= i_1 + i_2 = \left[ \frac{1}{L_1} \int_{t_0}^t v(t) dt + i_1(t_0) \right] + \left[ \frac{1}{L_2} \int_{t_0}^t v(t) dt + i_2(t_0) \right] \\ I &= \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \right) \int_{t_0}^t v(t) dt + [i_1(t_0) + i_2(t_0)] = \frac{1}{L_p} \int_{t_0}^t v(t) dt + i(t_0) \end{aligned} \quad (1.60)$$

Όπου  $i(t_0)$  είναι το άθροισμα των αρχικών τιμών των ρευμάτων των δύο πηνίων.



Σχήμα 1.25. (α) Κύκλωμα δύο πηνίων συνδεδεμένων παράλληλα. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Η εξ.(1.60) συνδέει την τάση  $v$  και το ρεύμα  $i$  στους ακροδέκτες εισόδου του κυκλώματος και σύμφωνα με τα όσα ισχύουν για ισοδύναμα κυκλώματα, ο παράλληλος συνδυασμός των πηνίων  $L_1$  και  $L_2$  είναι δυνατόν να αντικατασταθεί από ένα τρίτο ισοδύναμο πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής  $L_p$  (Σχήμα 1.25β), τέτοιο ώστε

$$\frac{1}{L_p} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \Rightarrow L_p = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (1.61)$$

Τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.25(α) και (β) είναι ισοδύναμα, αφού έχουν την ίδια τάση και ένταση στους εξωτερικούς ακροδέκτες τους. Γενικεύοντας την εξ.(1.61) για  $N$  πηνία συνδεδεμένα παράλληλα, ο συντελεστής αυτεπαγωγής  $L_p$  του ισοδύναμου πηνίου είναι

$$\frac{1}{L_p} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{L_k} \quad (1.62)$$

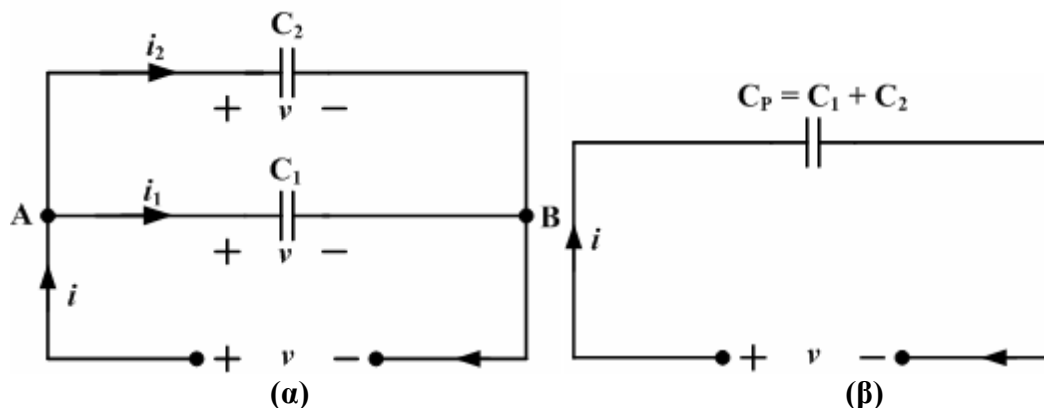
#### (1.4.16) Παράλληλη συνδεσμολογία πυκνωτών (parallel-connected capacitors)

Στο Σχήμα 1.26(α) παρουσιάζονται δύο πυκνωτές χωρητικότητας  $C_1$  και  $C_2$  συνδεδεμένοι παράλληλα στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η ίδια τάση της πηγής  $v$ . Με εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων του Kirchhoff σε έναν από τους δύο κόμβους (έστω στον κόμβο Α) του κυκλώματος του Σχήματος 1.26(α) προκύπτει

$$i - i_1 - i_2 = 0 \Rightarrow i = i_1 + i_2 \quad (1.63)$$

και αντικαθιστώντας τα ρεύματα των πυκνωτών  $i_1$  και  $i_2$  (εξ.1.21)

$$i = i_1 + i_2 = C_1 \frac{dv(t)}{dt} + C_2 \frac{dv(t)}{dt} = (C_1 + C_2) \frac{dv(t)}{dt} = C_p \frac{dv(t)}{dt} \quad (1.64)$$



Σχήμα 1.26. (α) Κύκλωμα δύο πυκνωτών συνδεδεμένων παράλληλα. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Η εξ.(1.64) συνδέει την τάση  $v$  και το ρεύμα  $i$  στους ακροδέκτες εισόδου του κυκλώματος και σύμφωνα με τα όσα ισχύουν για ισοδύναμα κυκλώματα, ο παράλληλος συνδυασμός των πυκνωτών  $C_1$  και  $C_2$  είναι δυνατόν να αντικατασταθεί από έναν τρίτο ισοδύναμο πυκνωτή χωρητικότητας  $C_p$  (Σχήμα 1.26β), τέτοια ώστε

$$C_p = C_1 + C_2 \quad (1.65)$$

Τα κυκλώματα των Σχημάτων 1.26(α) και (β) είναι ισοδύναμα, αφού έχουν την ίδια τάση και ένταση στους εξωτερικούς ακροδέκτες τους. Γενικεύοντας την εξ.(1.65) για  $N$  πυκνωτές συνδεδεμένους παράλληλα, η χωρητικότητα  $C_p$  του ισοδύναμου πυκνωτή είναι

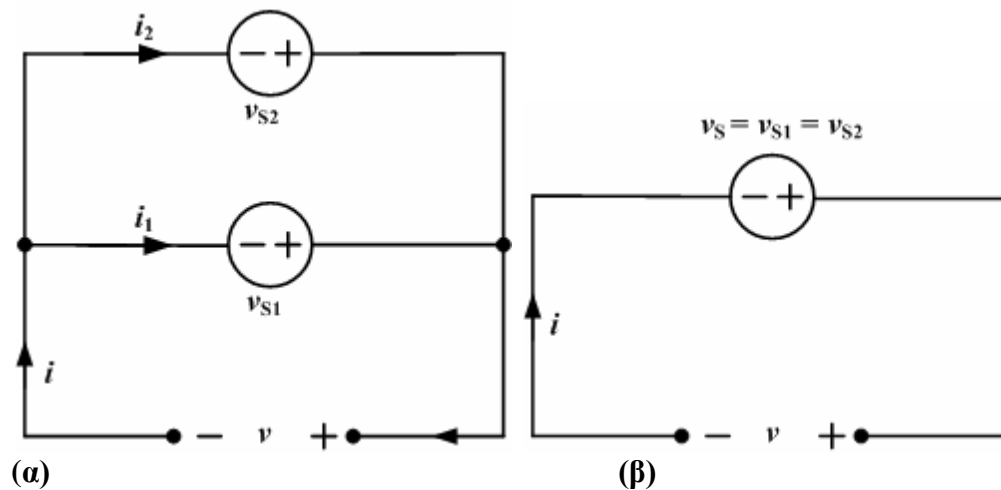
$$C_p = \sum_{k=1}^N C_k \quad (1.66)$$

**(1.4.17) Παράλληλη συνδεσμολογία ανεξάρτητων πηγών τάσης (parallel-connected independent voltage sources)**

Δύο ή περισσότερες πηγές τάσης συνδέονται παράλληλα όταν όλοι οι θετικοί πόλοι συνδέονται σε έναν κοινό κόμβο και όλοι οι αρνητικοί πόλοι συνδέονται σε έναν άλλο κοινό κόμβο. Οι δύο αυτοί κόμβοι αποτελούν τους ακροδέκτες του εξωτερικού κυκλώματος. Προϋπόθεση για την παράλληλη σύνδεση πηγών τάσης είναι όλες οι πηγές να έχουν την ίδια τάση ακροδεκτών. Στο Σχήμα 1.27(α) παρουσιάζονται δύο πηγές τάσης συνδεδεμένες παράλληλα, για τις οποίες πρέπει να ισχύει

$$v_{s1} = v_{s2} \quad (1.67)$$

Επομένως, το ισοδύναμο κύκλωμα δύο ή περισσότερων πηγών τάσης συνδεδεμένων παράλληλα είναι ένα κύκλωμα με μία πηγή, η τάση της οποίας είναι ίση με την κοινή τάση των παράλληλα συνδεδεμένων πηγών (Σχήμα 1.27β).

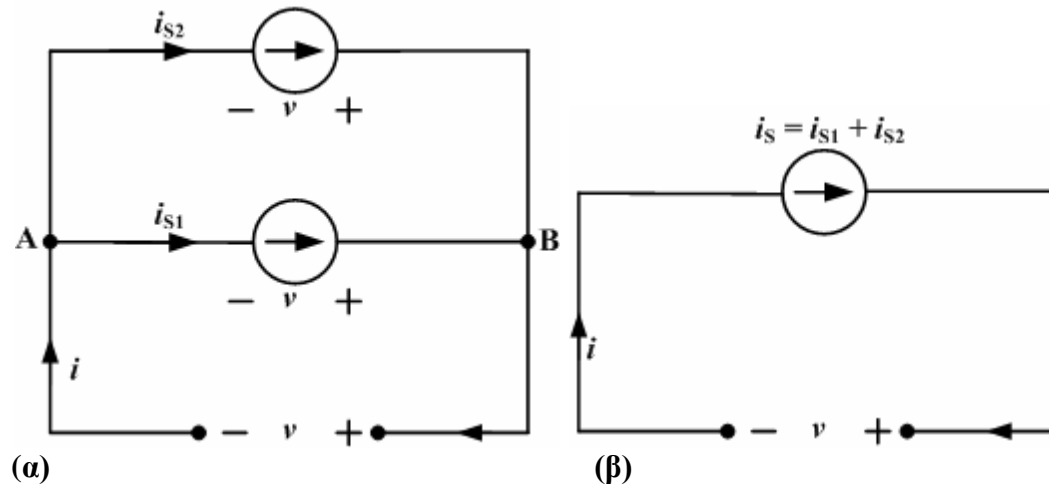


Σχήμα 1.27. (α) Κύκλωμα δύο πηγών τάσης συνδεδεμένων παράλληλα. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

(1.4.18) Παράλληλη συνδεσμολογία ανεξάρτητων πηγών ρεύματος (parallel-connected independent current sources)

Στο Σχήμα 1.28(α) παρουσιάζονται δύο πηγές ρεύματος συνδεδεμένες παράλληλα. Με εφαρμογή του νόμου των ρευμάτων του Kirchhoff στον κόμβο A προκύπτει

$$i - i_{s1} - i_{s2} = 0 \Leftrightarrow i = i_{s1} + i_{s2} \quad (1.68)$$



Σχήμα 1.28. (α) Κύκλωμα δύο πηγών ρεύματος συνδεδεμένες παράλληλα. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α).

Σε αντίθεση με τις πηγές τάσης, στην παράλληλη σύνδεση των πηγών ρεύματος δεν τίθεται κανένας περιορισμός και οι πηγές μπορούν να παρέχουν διαφορετικά ρεύματα στο κύκλωμα.

Επομένως, το ισοδύναμο κύκλωμα δύο ή περισσότερων πηγών ρεύματος συνδεδεμένων παράλληλα είναι ένα κύκλωμα με μία πηγή, το ρεύμα της οποίας είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων των δύο πηγών (Σχήμα 1.28β). Γενικεύοντας την εξ.(1.68) για  $N$  πηγές ρεύματος συνδεδεμένες παράλληλα, το ρεύμα της ισοδύναμης πηγής  $i_s$  είναι

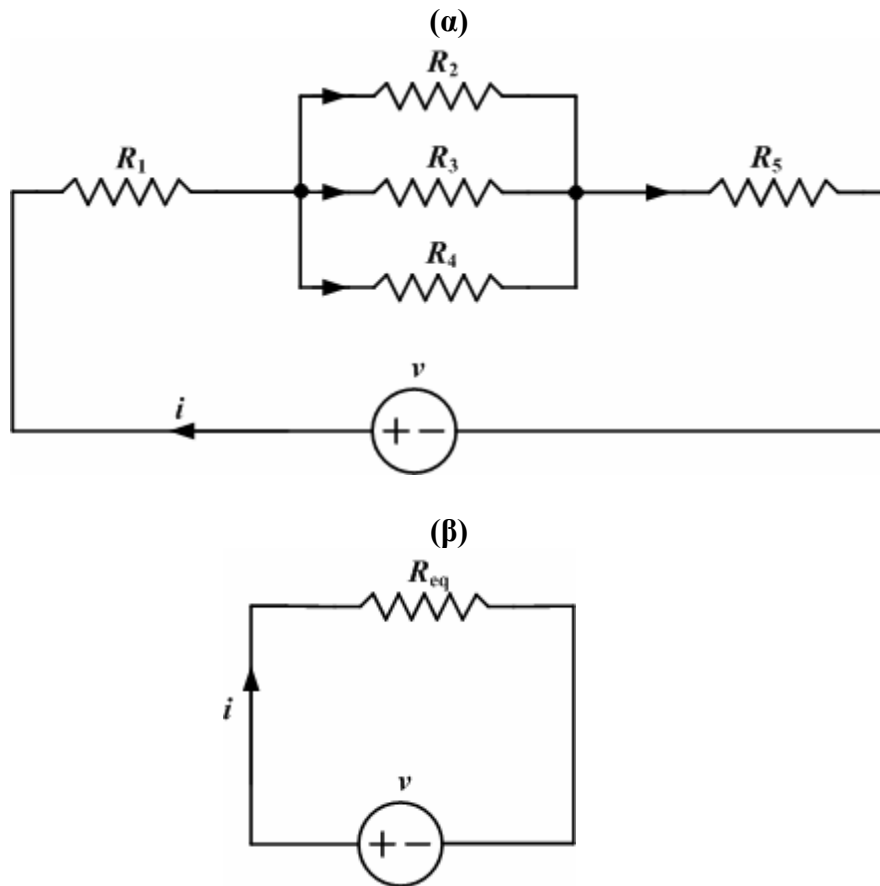
$$i_s = \sum_{k=1}^N i_{sk} \quad (1.69)$$

(1.4.19) Μικτή συνδεσμολογία στοιχείων δύο ακροδεκτών

Τα ηλεκτρικά στοιχεία ενός κυκλώματος μπορούν να διασυνδέονται κατά διάφορους τρόπους μεταξύ τους, οι οποίοι είναι συνδυασμοί της εν σειρά και παράλληλης συνδεσμολογίας. Ο τρόπος αυτός σύνδεσης των ηλεκτρικών στοιχείων ονομάζεται *μικτή συνδεσμολογία*. Εφαρμόζοντας διαδοχικά τις σχέσεις παράλληλης και εν σειρά συνδεσμολογίας στα ηλεκτρικά στοιχεία του κυκλώματος είναι δυνατή η *απλοποίηση* της μικτής συνδεσμολογίας στην απλούστερη δυνατή μορφή και επομένως η εύρεση του ισοδύναμου κυκλώματος της αρχικής μικτής συνδεσμολογίας.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 1.29(α) παρουσιάζεται ηλεκτρικό κύκλωμα με μικτή συνδεσμολογία αντιστάσεων. Οι αντιστάσεις  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  είναι συνδεδεμένες

παράλληλα και η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{234}$ , των παράλληλων αντιστάσεων  $R_2, R_3, R_4$ , είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_5$ .



Σχήμα 1.29. (α) Μικτή συνδεσμολογία αντιστατών. (β) Ισοδύναμο κύκλωμα.

Για την απλοποίηση της μικτής συνδεσμολογίας του κυκλώματος του Σχήματος 1.29(α), υπολογίζουμε πρώτα την ισοδύναμη αντίσταση των αντιστάσεων  $R_2, R_3, R_4$  (εξ. 1.57)

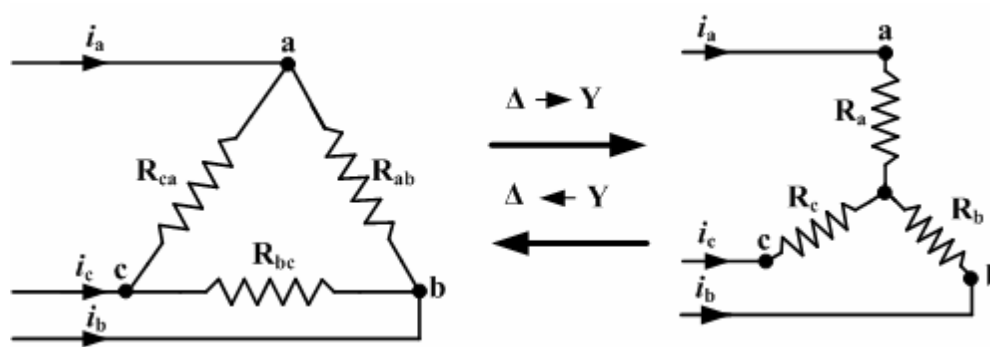
$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (1.70)$$

και η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{eq}$  (εξ. 1.44) της μικτής συνδεσμολογίας θα είναι:

$$R_{eq} = R_1 + R_{234} + R_5 \quad (1.71)$$

Στην ανάλυση ηλεκτρικών κυκλωμάτων εμφανίζεται συχνά η ανάγκη της μετατροπής μιας συνδεσμολογίας στοιχείων από διάταξη τριγώνου ( $\Delta$ ) σε διάταξη αστέρου ( $Y$ ) και αντιστρόφως. Στη συνέχεια δίνονται οι αναγκαίες σχέσεις για τις μετατροπές συνδεσμολογιών ηλεκτρικών στοιχείων από  $\Delta$  σε  $Y$  και από  $Y$  σε  $\Delta$ .

**Μετατροπή τριγώνου αντιστάσεων σε αστέρα και αντίστροφα**



Σχήμα 1.30. Μετατροπή αντιστάσεων από τρίγωνο σε αστέρα και αντίστροφα.

Μετατροπή από  $\Delta \rightarrow Y$

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \quad (1.72)$$

$$R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

Μετατροπή από  $Y \rightarrow \Delta$

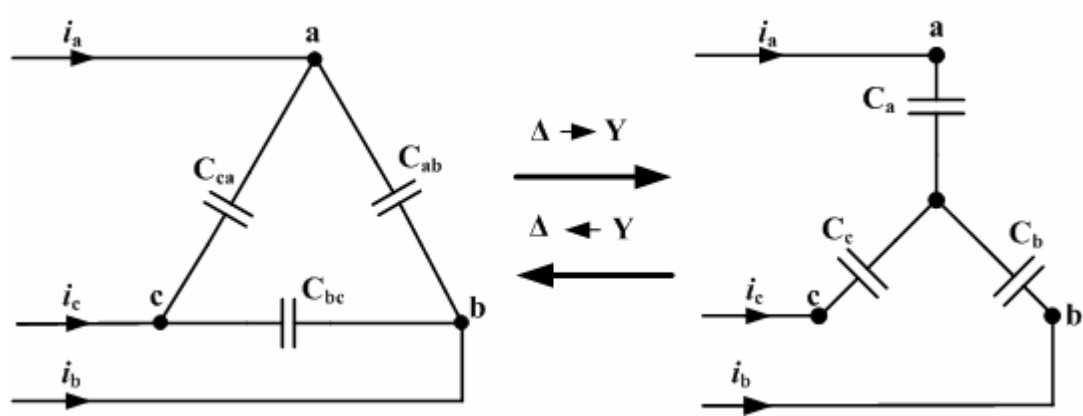
$$R_{ab} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_c}$$

$$R_{bc} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a} \quad (1.73)$$

$$R_{ca} = \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_b}$$



*Μετατροπή τριγώνου πυκνωτών σε αστέρα και αντίστροφα*



*Σχήμα 1.31. Μετατροπή πυκνωτών από τρίγωνου σε αστέρα και αντίστροφα.*

Μετατροπή από  $\Delta \rightarrow Y$

$$C_a = \frac{C_{ab}C_{bc} + C_{bc}C_{ca} + C_{ca}C_{ab}}{C_{bc}}$$

$$C_b = \frac{C_{ab}C_{bc} + C_{bc}C_{ca} + C_{ca}C_{ab}}{C_{ca}} \quad (1.74)$$

$$C_c = \frac{C_{ab}C_{bc} + C_{bc}C_{ca} + C_{ca}C_{ab}}{C_{ab}}$$

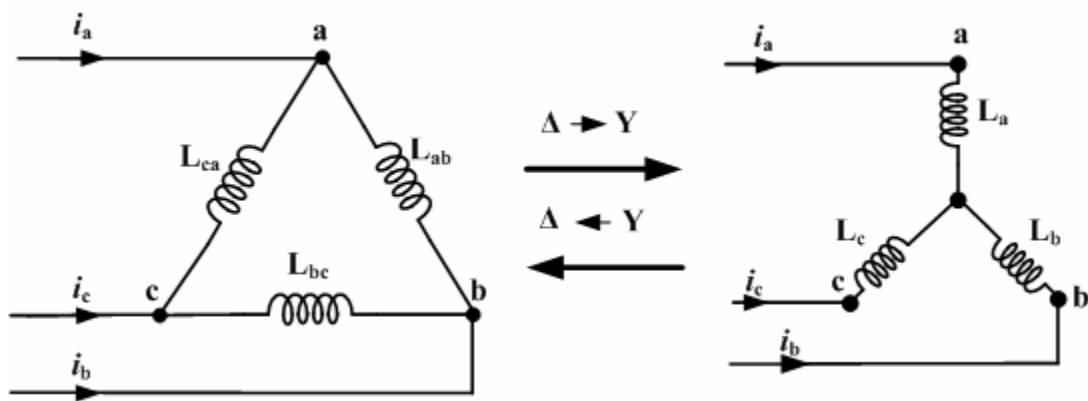
Μετατροπή από  $Y \rightarrow \Delta$

$$C_{ab} = \frac{C_a C_b}{C_a + C_b + C_c}$$

$$C_{bc} = \frac{C_b C_c}{C_a + C_b + C_c} \quad (1.75)$$

$$C_{ca} = \frac{C_c C_a}{C_a + C_b + C_c}$$

### Μετατροπή τριγώνου πηνίων σε αστέρα και αντίστροφα



Σχήμα 1.32. Μετατροπή πηνίων από τρίγωνο σε αστέρα και αντίστροφα.

#### Μετατροπή από $\Delta \rightarrow Y$

$$L_a = \frac{L_{ab} L_{ca}}{L_{ab} + L_{bc} + L_{ca}}$$

$$L_b = \frac{L_{ab} L_{bc}}{L_{ab} + L_{bc} + L_{ca}} \quad (1.76)$$

$$L_c = \frac{L_{bc} L_{ca}}{L_{ab} + L_{bc} + L_{ca}}$$

#### Μετατροπή από $Y \rightarrow \Delta$

$$L_{ab} = \frac{L_a L_b + L_b L_c + L_c L_a}{L_c}$$

$$L_{bc} = \frac{L_a L_b + L_b L_c + L_c L_a}{L_a} \quad (1.77)$$

$$L_{ca} = \frac{L_a L_b + L_b L_c + L_c L_a}{L_b}$$

#### (1.4.20) Διαίρετης τάσης και διαίρετης ρεύματος

Σε πολλές ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές απαιτείται ο καταμερισμός της τάσης μιας πηγής σε δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά. Στο Σχήμα 1.33(α) παρουσιάζονται δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά, οι οποίες τροφοδοτούνται με ρεύμα από μία πηγή τάσης. Για να υπολογίσουμε την τάση στα άκρα της αντίστασης  $R_1$  εφαρμόζουμε το νόμο των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο του κυκλώματος του Σχήματος 1.33(α), οπότε προκύπτει

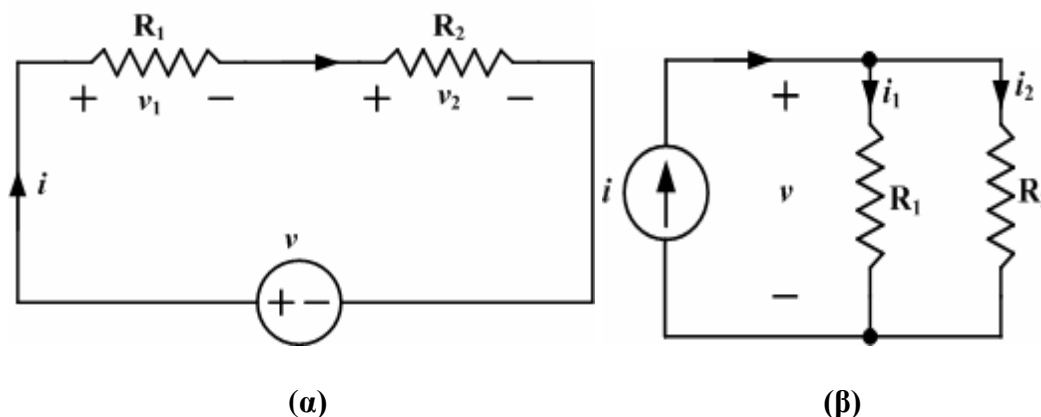
$$v - v_1 - v_2 = 0 \Rightarrow v_1 = v - v_2 \quad (1.78)$$

Με εφαρμογή του νόμου του Ohm στην αντίσταση  $R_2$

$$v_2 = iR_2 \quad (1.79)$$

λαμβάνοντας υπόψη την ισοδύναμη αντίσταση των συνδεδεμένων σε σειρά αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$

$$v = i(R_1 + R_2) \Rightarrow i = \frac{v}{R_1 + R_2} \quad (1.80)$$



Σχήμα 1.33. (α) Κύκλωμα διαιρέτη τάσης. (β) Κύκλωμα διαιρέτη ρεύματος.

και συνδυάζοντας τις εξ.(1.78), (1.79) και (1.80) προκύπτει

$$v_1 = v - \frac{v}{R_1 + R_2} R_2 \Rightarrow v_1 = v \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.81)$$

Η εξ.(1.81) εκφράζει τον κανόνα του διαιρέτη τάσης (voltage divider), σύμφωνα με τον οποίο: η τάση στα άκρα μιας αντίστασης ισούται με την τάση της πηγής πολλαπλασιασμένη με ένα κλάσμα του οποίου ο αριθμητής είναι η τιμή της αντίστασης και παρονομαστής είναι το άθροισμα των εν σειρά συνδεδεμένων αντιστάσεων. Με εφαρμογή του κανόνα του διαιρέτη τάσης, η τάση στα άκρα της αντίστασης  $R_2$  θα είναι

$$v_2 = v \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.82)$$

Σε άλλες ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές απαιτείται ο καταμερισμός του ρεύματος μιας πηγής μεταξύ δύο αντιστάσεων ενός κυκλώματος. Στο Σχήμα 1.33(β) παρουσιάζονται δύο αντιστάσεις συνδεδεμένες παράλληλα, οι οποίες τροφοδοτούνται από μια πηγή ρεύματος, στα άκρα των οποίων εφαρμόζεται η ίδια τάση. Επομένως, με εφαρμογή του νόμου του Ohm και λαμβάνοντας υπόψη την ισοδύναμη αντίσταση των δύο παράλληλων αντιστάσεων (εξ.1.57) είναι

$$v = i_1 R_1 = i_2 R_2 \quad (1.83)$$

και

$$v = i \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.84)$$

Συνδυάζοντας τις εξ.(1.83) και (1.84) προκύπτει

$$i_1 R_1 = i \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow i_1 = i \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.85)$$

Η εξ.(1.85) εκφράζει τον κανόνα του διαιρέτη ρεύματος (current divider), σύμφωνα με τον οποίο: το ρεύμα μέσα από μια αντίσταση ισούται με το ρεύμα της πηγής πολλαπλασιασμένο με ένα κλάσμα του οποίου ο αριθμητής είναι η τιμή της αντίστασης του άλλου κλάδου και παρονομαστής είναι το άθροισμα των δύο παράλληλων αντιστάσεων. Με εφαρμογή του κανόνα του διαιρέτη ρεύματος, το ρεύμα μέσα από την αντίσταση  $R_2$  θα είναι

$$i_2 = i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.86)$$

## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### «Σχεδιασμός Φ/Β συστημάτων»

Η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται σε μεγάλη έκταση απ' ευθείας για την θέρμανση χώρων, με κατάλληλο σχεδιασμό των κτηρίων, καθώς και για την θέρμανση νερού με τους Ηλιακούς θερμοσίφωνες. Ευρύτερη όμως μπορεί να είναι η αξιοποίησή της όταν χρησιμοποιείται για την παραγωγή απ' ευθείας ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτυγχάνεται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά μέσω των Φωτοβολταϊκών - Φ/Β συστημάτων, τα οποία και εξετάζονται στο παρόν Κεφάλαιο.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, στηριζόμενα στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο λαμβάνοντας την ηλιακή ακτινοβολία παράγουν στην έξοδό τους ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή συνεχούς ισχύος. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εκφράζει τον μηχανισμό της απ' ευθείας μετατροπής του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα, χρησιμοποιώντας τη μεταφορά της ενέργειας των προσπιπτόντων φωτονίων στα υπάρχοντα ηλεκτρόνια μέσα σ' ένα ημιαγωγό υλικό. Η βάση της φωτοβολταϊκής μετατροπής επομένως είναι η απορρόφηση φωτονίων κατάλληλης ενέργειας από το αντίστοιχο υλικό. Γι' αυτό θεωρείται σημαντικό να προηγείται η μελέτη του ηλιακού φάσματος, η οποία δείχνει την κατανομή των φωτονίων στα διάφορα μήκη κύματος, με όλες τις ιδιαιτερότητες του.

Η πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού (ΦΒ) φαινομένου έγινε το 1839, από τον πειραματικό Φυσικό Edmund Becquerel, σε ηλεκτρολυτικά υγρά. Πέρασαν περισσότερο από εκατό χρόνια παρατηρήσεων και πειραματικών προσπαθειών για την ανάδειξη της σημασίας και του ρόλου του φαινομένου αυτού και την αξιοποίησή του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 1954, παρασκευάστηκε η πρώτη ΦΒ κυψελίδα κρυσταλλικού Πυριτίου, με επαφή ημιαγωγών, με απόδοση 4,5% και μετά από μερικούς μήνες 6%, από τους D.M. Chapin, C.S. Fuller και G.L. Pearson. Έκτοτε εντατικοποιήθηκαν οι προσπάθειες για δημιουργία ΦΒ στοιχείων υψηλής και σταθερής απόδοσης. Σήμερα, η τεχνολογία των ΦΒ στοιχείων έχει φτάσει σε υψηλά επίπεδα ωριμότητας, που προδιαγράφουν με σιγουριά την ευρεία διείσδυσή τους, μέσα στην τρέχουσα δεκαετία, στο ενεργειακό δυναμικό κάθε χώρας. Ως πηγές ενέργειας έχουν ως κύρια χαρακτηριστικά την αέναη, αποδοτική και εξαιρετικά ήπια και φιλική προς το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, στις περισσότερες χώρες της Ευρώπης και ειδικά σε αυτές που παρουσιάζουν μεγάλη ηλιοφάνεια, τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν επιδεχθεί μεγάλη βελτίωση και σε αυτά παρατηρείται ραγδαία και συνεχής ανάπτυξη.

Τα κύρια μέρη ενός Φ/Β συστήματος, που μπορεί και να αναφέρεται και ως Φ/Β σταθμός παραγωγής, είναι (α) η Φ/Β γεννήτρια (ή Φ/Β συλλέκτης) και (β) οι Διατάξεις προσαρμογής μέσω των οποίων η Φ/Β γεννήτρια συνδέεται είτε με το ηλεκτρικό Δίκτυο Διανομής, είτε με τις καταναλώσεις και τις διατάξεις αποθήκευσης όταν πρόκειται για αυτόνομη εγκατάσταση.

## 2.1. Επιλογή Φ/Β πλαισίου



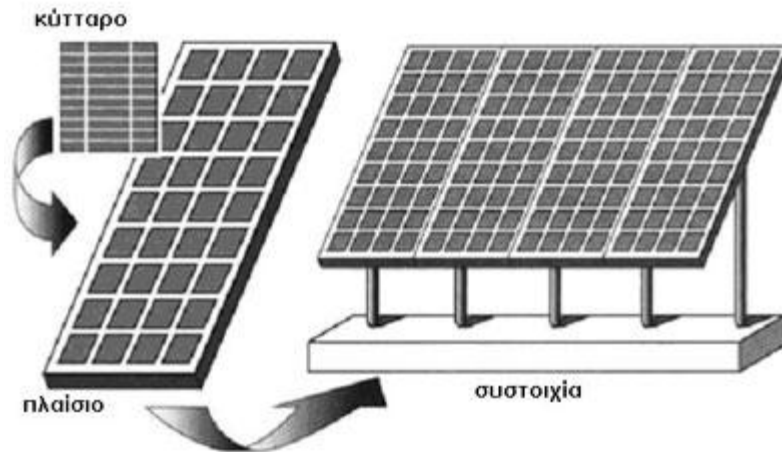
(α)

(β)

Σχήμα 2.1. Τυπική μορφή φωτοβολταϊκού στοιχείου (α) και φωτοβολταϊκού πλαισίου (β)



Υπάρχουν διάφορα είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων και τα είδη αυτά παρουσιάζουν σαφής και διαφορετική συμπεριφορά. Η διαφορετικότητα των πλαισίων εστιάζεται κυρίως στο είδος του ημιαγωγού (πυριτίου) και η διαφορετικότητα της συμπεριφοράς τους αναφέρεται κυρίως στις συνθήκες λειτουργίας.



### 2.1.1. Είδη φωτοβολταϊκών πλαισίων

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

#### α) Φωτοβολταϊκά Κρυσταλλικού πυρίτιου

- Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο: Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι το υψηλό κόστος κατασκευής, η υψηλή απόδοση κυψέλης (16-18%) και συνεπώς υψηλός βαθμός απόδοσης πλαισίου (12-14%).
- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο: Έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής σε σύγκριση με το μονοκρυσταλλικό, αλλά επίσης χαμηλότερος είναι και ο βαθμός απόδοσης του πλαισίου.

#### β) Φωτοβολταϊκά λεπτών μεμβρανών

- Άμορφο πυρίτιο: Έχει πολύ χαμηλότερο κόστος κατασκευής, και ανάλογα χαμηλότερη είναι και η απόδοση σε σχέση με το κρυσταλλικό. Ο βαθμός απόδοσης του είναι περίπου ο μισός σε σχέση με το κρυσταλλικό (8-9% ανά κυψέλη).
- Χαλκοπυρίτης: Η ονομαστική απόδοση πλαισίου από χαλκοπυρίτη κυμαίνεται από 7% μέχρι 11%.

### 2.1.2 Ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Η ισχύς των φωτοβολταϊκών πλαισίων καθώς και ο βαθμός απόδοσης, δίνεται σαν μέγιστη ισχύς από τους κατασκευαστές σε κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες οι οποίες ονομάζονται «τυποποιημένες συνθήκες έλεγχου» (standard testing conditions, STC).

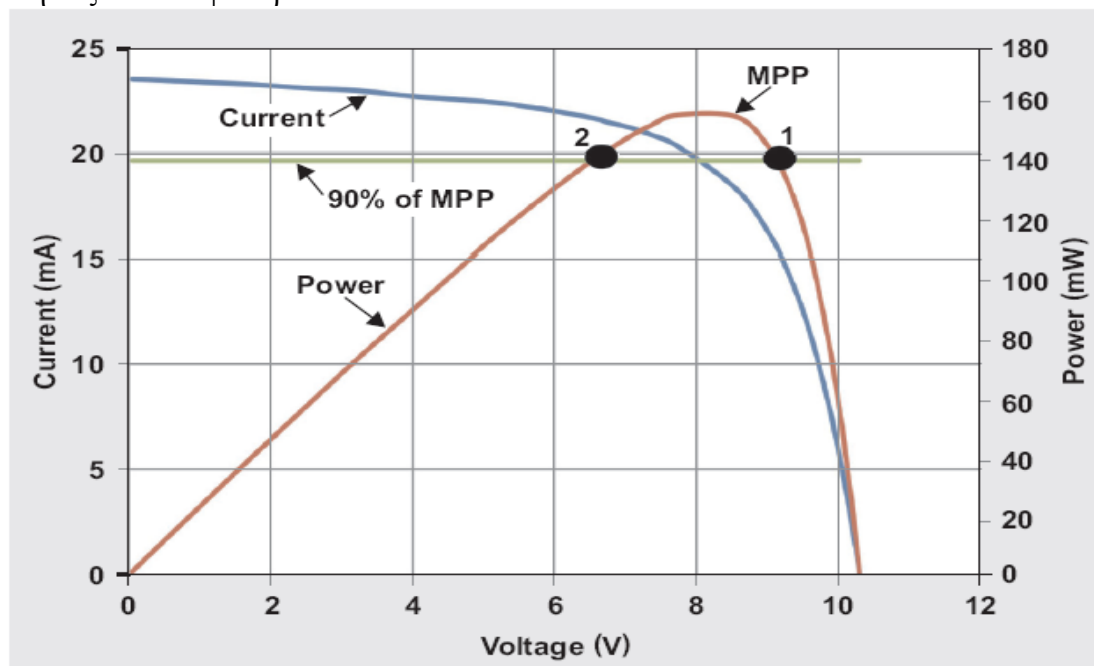
Οι προκαθορισμένες αυτές συνθήκες έλεγχου είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία κυψέλης: 25 °C.
- Ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο του πλαισίου: 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Μάζα αέρα (airmass) : 1.5. Αυτή αντιστοιχεί σε φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας όταν ο ήλιος είναι 45 °C πάνω από τον ορίζοντα. Όταν ο ήλιος είναι στο μέγιστο σημείο του τότε έχουμε AM:1.

Τυχόν αποκλίσεις της θερμοκρασίας, της ακτινοβολίας και της μάζας αέρα από τις τυποποιημένες τιμές τους, θα έχουν επίδραση στη συμπεριφορά του πλαισίου και ασφαλώς στην απόδοσή του.

### 2.1.3 Μέγιστο σημείο λειτουργίας (MPP)

Για να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αυτό θα πρέπει να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας της χαρακτηριστικής καμπύλης I/V, κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες. Το σημείο αυτό που ονομάζεται και σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP), εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση του πλαισίου και συνεπώς την μέγιστη δυνατή ισχύ στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου.



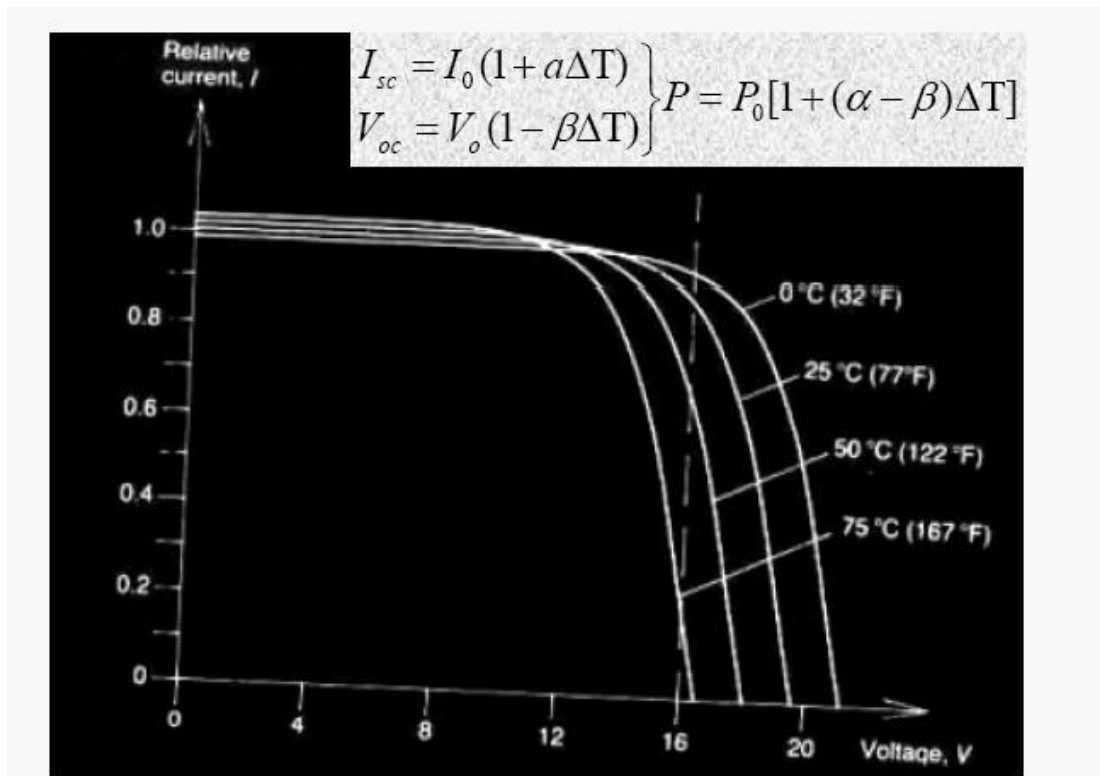
Σχήμα 2.2. Χαρακτηριστική I/V φωτοβολταϊκού πλαισίου και σημείο μέγιστης απόδοσης (MPP).

Ο συνδυασμός τάσης και ρεύματος στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, γίνεται βέλτιστος όταν το πλαίσιο διαρρέεται από ρεύμα με τιμή ίση με  $I_{mp}$  και εμφανίζει διαφορά δυναμικού ίση με  $V_{mp}$ . Ο βέλτιστος λοιπόν αυτός συνδυασμός ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ), θα διασφαλίσει τη μέγιστη απόδοση του πλαισίου και φυσικά τη μέγιστη δυνατή ισχύ ( $P_{mp}$ ) στην έξοδο.

### 2.1.4 Θερμοκρασιακός συντελεστής ρεύματος (I), τάσης (V) και ισχύος (P)

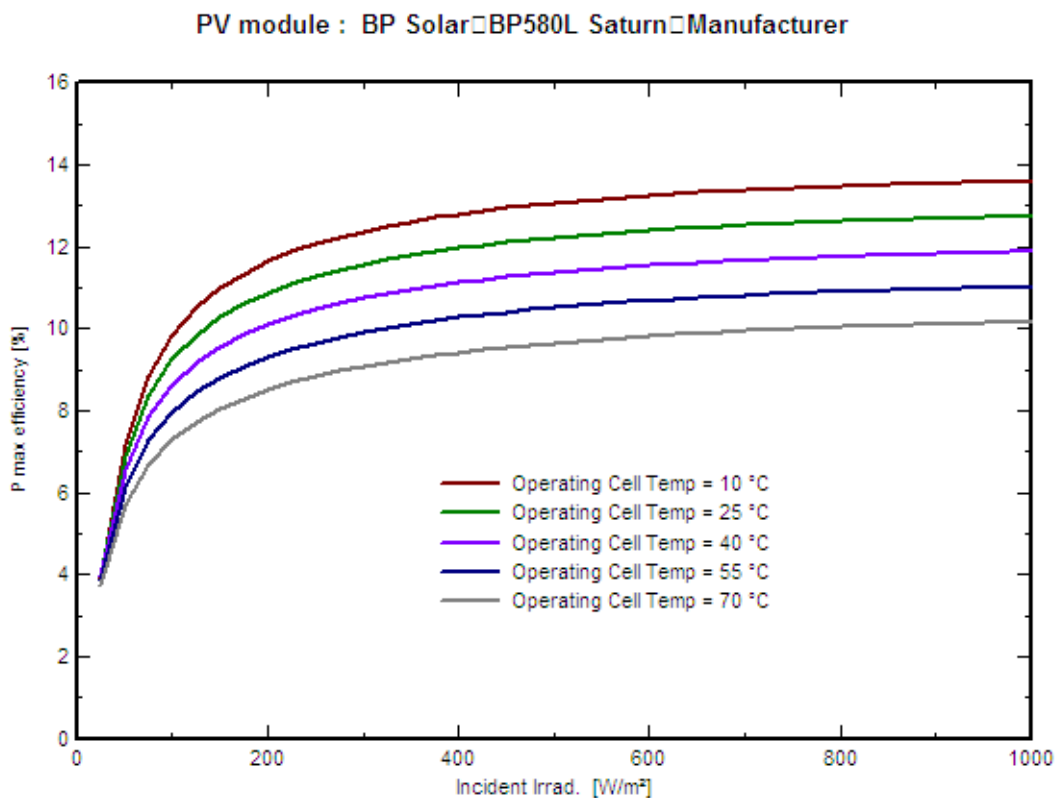
Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ονομαστική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων αναφέρεται σε θερμοκρασία κυψέλης  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Οποιαδήποτε λοιπόν απόκλιση από την ονομαστική θερμοκρασία των  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , επηρεάζει ανάλογα ή δυσανάλογα την απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, δηλαδή επιφέρει μείωση ή αύξηση της ισχύος στην έξοδο του πλαισίου.





Σχήμα 2.3. Επίδραση της θερμοκρασίας της κυψέλης στη χαρακτηριστική  $I/V$  του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Από το σχήμα 2.3, φαίνεται ότι αν η θερμοκρασία μειωθεί από 50°C σε 25°C, το ρεύμα από τη μια μειώνεται, ενώ η τάση αυξάνεται αλλά σε μεγαλύτερο ποσοστό απ' ό,τι μειώνεται το ρεύμα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι, η μείωση της θερμοκρασίας συνεπάγει και τη λειτουργία του πλαισίου σε μεγαλύτερη τάση και μικρότερο ρεύμα. Καθώς λοιπόν η αύξηση της τάσης σε ποσοστό είναι μεγαλύτερη από τη μείωση του ρεύματος, η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού πάνελ θα είναι μεγαλύτερη στους 25°C απ' ό,τι στους 50°C.

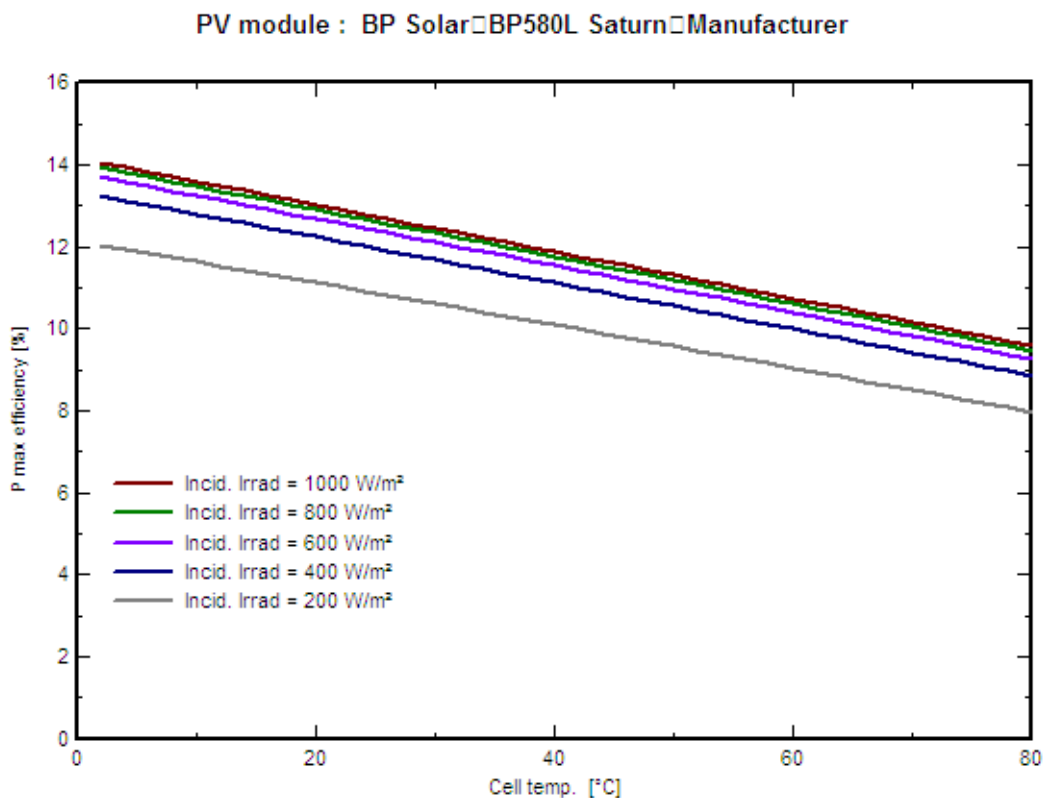


Σχήμα 2.4. Επίδραση της θερμοκρασίας κυψέλης στην ισχύ εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου για δεδομένη ακτινοβολία.

Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται και από το σχήμα 2.4. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται ότι όσο η θερμοκρασία κυψέλης μειώνεται, η απόδοση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου μετατοπίζεται προς τα πάνω, δηλαδή αυξάνεται. Τυπικές τιμές του θερμοκρασιακού συντελεστή είναι για το ρεύμα 0.03%/K, για την τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$ -0.37%/K και για την ισχύ -0.5%/K.

#### 2.1.5. Επίδραση της ακτινοβολίας στο βαθμό απόδοσης του Φ/Β πλαισίου

Ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου εξαρτάται και μάλιστα σε μεγάλο βαθμό από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιακή ενέργεια) είναι και ο πιο καθοριστικός για την εμφάνιση και την διατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, που όπως έχει ήδη αναφερθεί χωρίς αυτό δεν θα ήταν δυνατή η κατασκευή και η ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



*Σχήμα 2.5. Επίδραση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην ισχύ εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου για δεδομένη θερμοκρασία*

Από το σχήμα 2.5 καθώς επίσης και από το σχήμα 2.4, παρατηρείται ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου συνδέονται γραμμικά. Από το σχήμα 2.5 φαίνεται ότι αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται και αύξηση της απόδοσης του πλαισίου, ενώ αντιθέτως μειωμένη προσπίπτουσα ακτινοβολία θα έχει σαν αποτέλεσμα μειωμένη απόδοση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Από το σχήμα 2.4 και για δεδομένη θερμοκρασία (π.χ 25°C), παρατηρείται ότι η αύξηση της ακτινοβολίας επιφέρει και αυξημένη απόδοση στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Αν συγκριθεί η ακτινοβολία με τιμή 200 W/m<sup>2</sup>, με την ακτινοβολία με τιμή 1000 W/m<sup>2</sup> παρατηρείται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) μεταβάλλεται σε μια νέα τιμή όπου τόσο το ρεύμα (I<sub>mpp</sub>) όσο και η τάση (V<sub>mpp</sub>) μέγιστης λειτουργίας, αυξάνονται. Αυξημένη λοιπόν ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, σημαίνει και αυξημένη ισχύς στην έξοδο του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

#### 2.1.6. Απώλειες σε φωτοβολταϊκά συστήματα

Όπως κάθε ηλεκτρικό σύστημα, έτσι και τα φωτοβολταϊκά συστήματα δεν παρουσιάζουν στην έξοδό τους την ίδια ποσότητα ενέργειας με αυτήν που υπάρχει στην είσοδό τους. Οι σημαντικότερες απώλειες λοιπόν που παρουσιάζει κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα κατά τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας δια μέσω αυτού, είναι οι εξής:

- Θερμικές απώλειες (Thermal losses).
- Απώλειες ποιότητας πλαισίου (Modul equality losses).

- Απώλειες ανομοιομορφίας πάνελ (Array mismatch losses).
- Απώλειες γωνίας πρόσπτωσης (Incidence Angle Modifier).

### **Θερμικές απώλειες (Thermal losses)**

Οι απώλειες αυτές οφείλονται στη διαφορετική θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας (θερμοκρασία κυψέλης) με την θερμοκρασία των 25°C . Η θερμική λοιπόν συμπεριφορά του πλαισίου που επηρεάζει έντονα την ηλεκτρική απόδοση του πλαισίου, καθορίζεται από μια θερμική ισορροπία μεταξύ της θερμοκρασίας των 25°C και της εσωτερικής θερμοκρασίας του πλαισίου. Στα λογισμικά για τον υπολογισμό των απωλειών αυτών χρησιμοποιείται ο συντελεστής  $k$ , ο οποίος αντιπροσωπεύει την μετάδοση θερμότητας από την εξωτερική επιφάνεια του πλαισίου προς την εσωτερική. Αποτελείται από ένα σταθερό όρο  $k_c$  και ένα μεταβλητό  $k_v$  ο οποίος είναι ανάλογος της ταχύτητας του αέρα.

$$K = K_c + K_v * v \quad (2.1)$$

Οι παράγοντες αυτοί εξαρτώνται από τον τρόπο τοποθέτησης των πλαισίων. Όταν στα πλαίσια παρουσιάζεται ελεύθερη κυκλοφορία αέρα, αυτοί οι συντελεστές αναφέρονται και στις 2 πλευρές του πλαισίου. Εάν το πίσω μέρος των πλαισίων είναι λίγο πολύ θερμικά απομονωμένο, τότε αυτό θα πρέπει τουλάχιστον θεωρητικά να μειωθεί μέχρι το μισό (δηλαδή η πίσω πλευρά δεν θα συμμετέχει καθόλου στην μεταφορά θερμότητας). Αρχικά στα λογισμικά λήφθηκε ότι  $K_c=20W/m^2$  και  $K_v=6W/m^2$ . Αυτές οι τιμές αφορούσαν διάφορες εγκαταστάσεις που περιλάμβαναν πλαίσια που τοποθετήθηκαν χωρίς πίσω κάλυψη με ελεύθερη κυκλοφορία αέρα. Παρόλο που οι τιμές αυτές ήταν λογικές, εντούτοις τελικά απορρίφθηκαν γιατί καθορίστηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα αέρα (δηλαδή ταχύτητα αέρα) πολύ χαμηλότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται στα λογισμικά. Για δεδομένα αέρα που ανταποκρίνονται στα λογισμικά, τελικά καθορίστηκε ότι  $K_c=25W/m^2$  και  $K_v=1.2W/m^2$ . Όταν δεν είναι γνωστή η ταχύτητα του αέρα, τότε λαμβάνεται ίση με μια μέση τιμή της τάξεως του 1.5 m/s και πολλαπλασιάζεται με τον άλλωστε σταθερό όρο  $k_c$ , ενώ ο μεταβλητός όρος  $K_v$  λαμβάνεται ίσος με 0 (δηλαδή  $K = k_c * v = 26 * 1.5 = 29W/m^2$ ).

Αξίζει να αναφερθεί εδώ ότι αν η θερμοκρασία κυψέλης είναι κάτω από την «ονομαστική», δηλαδή αν είναι μικρότερη από 25°C, τότε οι άλλοτε θερμικές απώλειες μετατρέπονται σε κέρδος ενέργειας. Αν δηλαδή  $T_{κυψέλης} < 25°C$ , τότε κατά τον υπολογισμό τους οι θερμικές απώλειες προκύπτουν αρνητικές, γεγονός το οποίο υποδηλώνει κέρδος ενέργειας. Εναλλακτικά στα λογισμικά, μπορεί να εισαχτεί από τον χρήστη η θερμοκρασία που επιτυγχάνεται από τα πλαίσια χωρίς πίσω κάλυψη, γνωστή και ως NOCT ( Nominal Operating Collector Temperature ) η οποία ορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας οι οποίες είναι οι εξής:

- Ακτινοβολία πρόσπτωσης: 800W/m<sup>2</sup>.
- Εσωτερική θερμοκρασία: 20°C.
- Ταχύτητα του αέρα: 1m/s.
- Οι τιμές αυτές αφορούν ανοικτό κύκλωμα, όπου δηλαδή το πάνελ δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- Τα λογισμικά υπολογίζουν αμέσως την αντιστοιχία στους παράγοντες  $K_c$  και  $K_v$ .

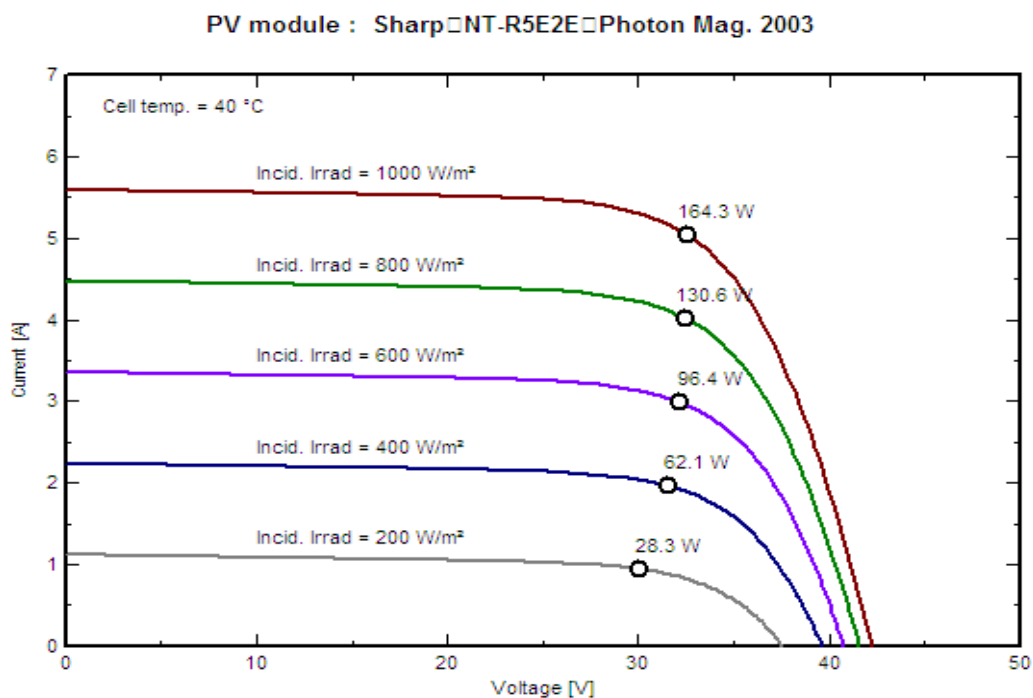
### Απώλειες ποιότητας πλαισίου (Module quality losses)

Συνήθως τα πλαίσια που διατίθενται στην αγορά, δεν υπακούουν πιστά στις ακριβείς ονομαστικές προδιαγραφές τους, όπως αυτές δίνονται από τους κατασκευαστές των. Λόγω λοιπόν του γεγονότος της ανομοιότητας των ονομαστικών τιμών των πλαισίων και της μικρής αλλά υπαρκτής απόκλισης από τις ακριβείς ονομαστικές τιμές, κατά τη σύνδεσή τους τα πλαίσια, παρουσιάζουν περαιτέρω απώλειες. Δεδομένου ότι τα πλαίσια σήμερα πωλούνται με δεδομένη και μικρή ανοχή από τις ονομαστικές προδιαγραφές, οι απώλειες λόγω κακής ποιότητας πλαισίου έχουν ελαχιστοποιηθεί και έτσι τυπική τιμή των απωλειών αυτών στα λογισμικά, είναι  $\pm 1\%$ .

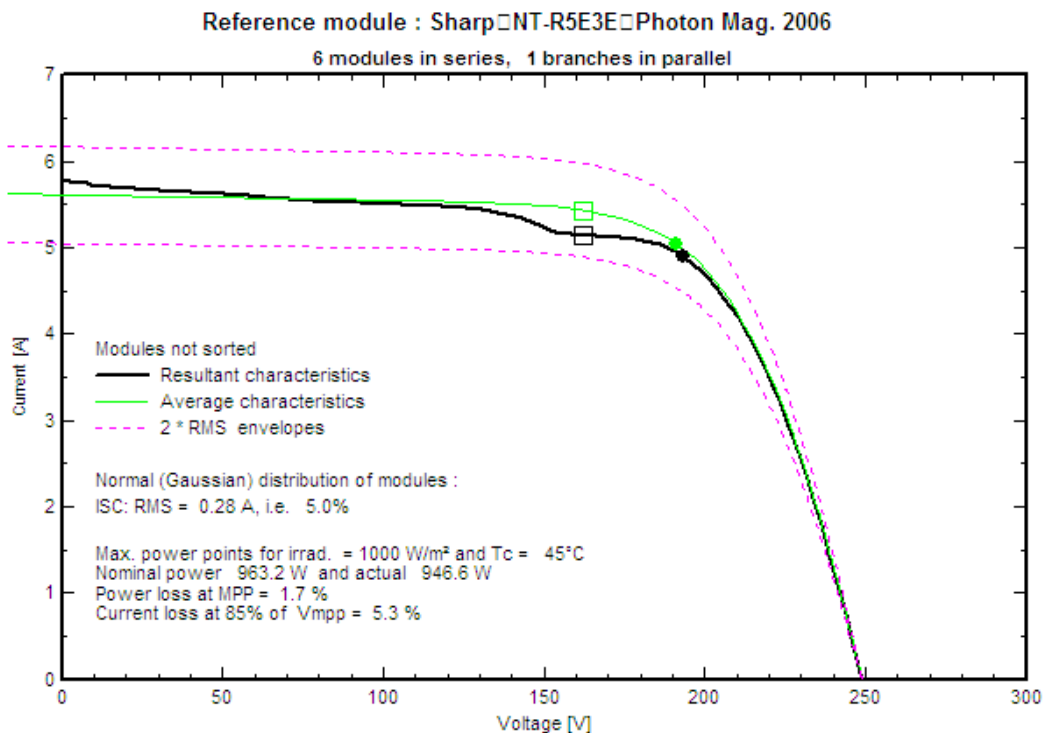
### Απώλειες ανομοιομορφίας πάνελ (Array mismatch losses)

Η σύνδεση των φωτοβολταϊκών κυττάρων για να διαμορφώσει μια σειρά μπορεί να προκαλέσει τα προβλήματα όταν δεν αντιστοιχίζονται τα χαρακτηριστικά των κυττάρων. Αυτό το πρόβλημα, γνωστό ως κακός συνδυασμός, μπορεί να μειώσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της σειράς και να οδηγήσει σε μειωμένη από την αναμενόμενη ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο του πάνελ. Οι απώλειες λοιπόν αυτές σχετίζονται με το γεγονός ότι σε κάθε πάνελ, το κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο από το οποίο απαρτίζεται το πάνελ, δεν υπακούει πιστά στην ίδια χαρακτηριστική ρεύματος τάσης I/V. Ως εκ τούτου, παρουσιάζονται πρόσθετες απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι οποίες και ονομάζονται απώλειες λόγω ανομοιομορφίας πάνελ.

Ενδεικτικά παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα 3.3.1 και 3.3.2, στα οποία φαίνονται η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς για ένα πάνελ και η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς για τη συστοιχία που αποτελείται από 6 πάνελ όμοια με αυτό του διαγράμματος 3.3.1 συνδεδεμένα σε σειρά, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.6. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (MPP) για ένα πάνελ.



Σχήμα 2.7. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς συστοιχίας που αποτελείται από 6 όμοια πάνελ συνδεδεμένα σε σειρά.

### Απώλειες γωνίας πρόσπτωσης (*Incidence Angle Modifier*)

Σε γενικές γραμμές το είδος αυτό των απωλειών, σχετίζεται με τη μετάδοση και ανάκλαση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκό πάνελ, μέρος από αυτή ανακλάται και επιστρέφει πίσω στην ατμόσφαιρα, ενώ κάποιο άλλο μέρος διαθλάται και εισχωρεί στο φωτοβολταϊκό πάνελ. Η επίδραση λοιπόν του φαινομένου της ανάκλασης και διάθλασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, σημαίνει πρόσθετες απώλειες για το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτού του είδους οι απώλειες δίνονται από την παρακάτω σχέση.

$$IAM_{\text{losses}} = 1 - b_0(1/\cos i - 1) \quad (2.2)$$

όπου

$i$ : η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

$b_0$ : συντελεστής- τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης.

Η διαφορά μεταξύ της ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια με τα ηλιακά κύτταρα εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης. Αυτή ακριβώς την τροποποίηση της γωνίας της εξωτερικής ακτινοβολίας στα ηλιακά κύτταρα εκφράζει ο συντελεστής  $b_0$ . Για θερμικούς ηλιακούς συσσωρευτές από επιφάνεια από γυαλί ο συντελεστής  $b_0$  λαμβάνεται ίσος με 0.1, ενώ για φωτοβολταϊκά πλαίσια, ο συντελεστής  $b_0$  λαμβάνεται ίσος με 0.05. Για γωνία πρόσπτωσης πάνω από  $85^\circ$  και για  $b_0=0.01$  οι συγκεκριμένες απώλειες γίνονται αρνητικές κάτι το οποίο φυσικά είναι μη ρεαλιστικό. Αν η γωνία πρόσπτωσης είναι  $90^\circ$  τότε οι απώλειες γίνονται μηδενικές.

## 2.2. Επιλογή μετατροπέα (inverter)

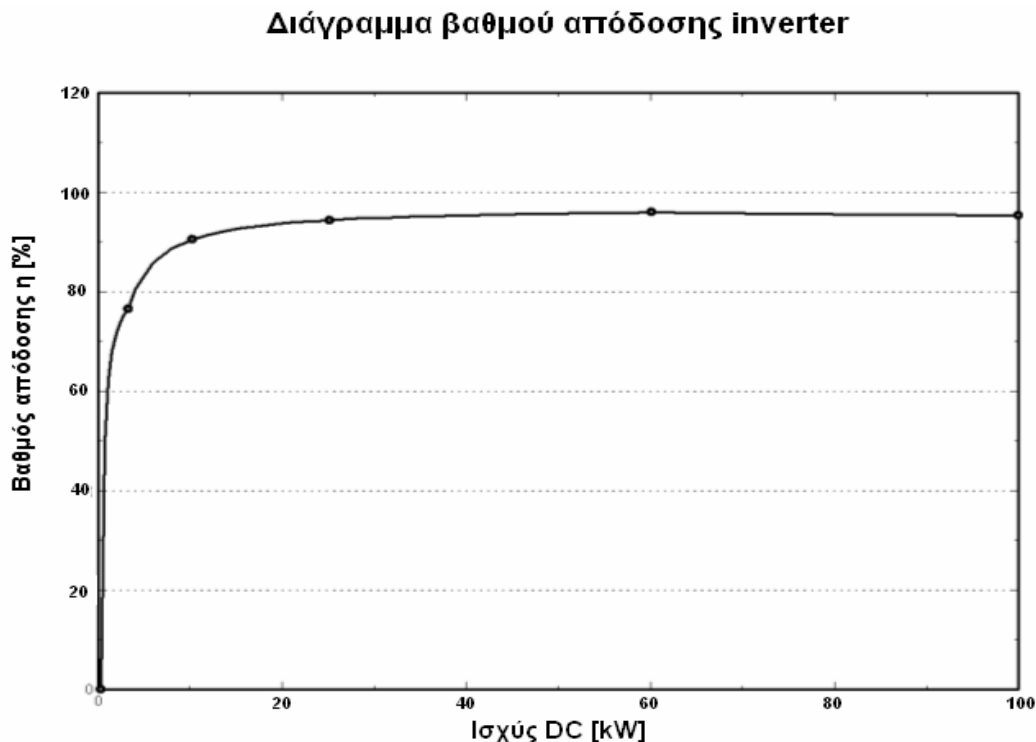
Μια φωτοβολταϊκή διάταξη, όπως έχει αναφερθεί, παράγει συνεχές ρεύμα. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ένα συνεχές (DC) φορτίο άμεσα ή με την χρήση κάποιου συσσωρευτή (μπαταρίας). Στην περίπτωση όμως που απαιτείται να τροφοδοτηθεί φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ή η διασύνδεση της εγκατάστασης στο δίκτυο διανομής ρεύματος τότε είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ο οποίος θα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η μετατροπή αυτή πρέπει να γίνεται πάντα με τις μικρότερες δυνατές απώλειες και είναι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό ενός τέτοιου μετατροπέα.

Έτσι λοιπόν ορίζεται ο βαθμός απόδοσης  $\eta$  για τους μετατροπείς αυτούς και εκφράζει τις απώλειες που εμφανίζονται κατά την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Τέτοιες είναι κυρίως οι απώλειες των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα καθώς επίσης και η εσωτερική κατανάλωση του ελεγκτή, οι απώλειες που προκαλούνται από την εγγραφή δεδομένων λειτουργίας και οι απώλειες μετασχηματιστή εφόσον αυτός ενυπάρχει στον μετατροπέα.

Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{\text{Ισχύς Εξόδου AC } P_{AC}}{\text{Ισχύς Εισόδου DC } P_{DC}} \quad (2.3)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται μια τυπική καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός inverter με ισχύ εισόδου 100kW.



Σχήμα 2.8. Καμπύλη βαθμού απόδοσης inverter

Αξίζει να σημειώσουμε πως ένα ακόμα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των μετατροπέων αυτών, είναι η δυνατότητα να μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες. Οι πρώτοι μετατροπείς που είχαν κατασκευαστεί παρείχαν την δυνατότητα για τέτοια προσαρμογή σε πολύ περιορισμένο βαθμό. Ένας μετατροπέας DC-AC που χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση διασυνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής ρεύματος πρέπει να εξασφαλίζει την βέλτιστη προσαρμογή στην χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης. Κατά την διάρκεια της ημέρας, οι παράμετροι λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων μεταβάλλονται συνεχώς. Οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας έχουν σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPP) πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη. Προκειμένου να μετατρέπεται πάντα όσο το δυνατό περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ο μετατροπέας πρέπει να εντοπίζει και να προσαρμόζεται στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Αυτή η ικανότητα προσαρμογής στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του μετατροπέα, περιγράφεται από τον βαθμό ανάχνευσης ( $\eta_{TR}$ ) ο οποίος ορίζεται παρακάτω:

$$\eta_{TR} = \frac{\text{Στιγμιαία Ενεργή Ισχύς Εισόδου } P_{DC}}{\text{Μέγιστη Στιγμιαία Παραγόμενη Ισχύς } P_{PV}} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση της διασύνδεσης με το δίκτυο, αξίζει να σημειώσουμε ότι η διακύμανση του σημείου λειτουργίας οφείλεται στην ανεπιθύμητη ζεύξη της συχνότητας της τάσης δικτύου με την DC πλευρά και αυτή πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Αυτό συμβαίνει σε μεγάλο βαθμό ειδικά στην περίπτωση των μετατροπέων που δεν εμπεριέχουν μετασχηματιστή.

Υπάρχει διαφορά στην απόδοση μεταξύ δύο inverter διαφορετικής ισχύος, δεδομένης πάντα της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών. Έτσι, στον ελλαδικό χώρο, σε μια εγκατεστημένη ισχύ 100kW, όπως θα δειχθεί και στην συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας inverter ίσης ισχύος 100kW, ένας inverter ισχύος περίπου στο 70% της εγκατεστημένης ισχύος ή ακόμα και συνδυασμός δύο, τριών ή και περισσότερων μικρότερων inverter που αθροιστικά έχουν ισχύ κοντά στο 70%. Λόγω της ποιότητας της ηλιακής ακτινοβολίας, μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση δεν παράγει ποτέ την ονομαστική της τιμή. Επίσης, υπάρχει σημαντική διαφορά στην μετατροπή της συνεχούς ισχύος σε εναλλασσόμενη εξαιτίας διαφορετικής κατασκευής των μετατροπέων. Για τους δύο προηγούμενους λόγους, ο συνδυασμός μικρότερων inverter των οποίων οι τιμές της ισχύος τους προσεγγίζουν αθροιστικά το 70% της εγκατεστημένης ισχύος είναι πολλές φορές αποδοτικότερος από την χρήση ενός μόνο inverter με ισχύ εισόδου ίση με αυτήν της εγκατάστασης.

Αυτό οφείλεται στην διακύμανση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα. Παρατηρούμε πως ο βαθμός απόδοσης ενός τυπικού μετατροπέα αποκτά ένα εύρος μέγιστων τιμών σε μια περιοχή περίπου στο 50-60% της ισχύος εισόδου του, όπου και εμφανίζεται κάποιο μέγιστο και στην συνέχεια παρουσιάζεται μια μικρή μείωση.

Όσο μικρότερη είναι η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα, τόσο μικρότερη είναι συνήθως η διακύμανση του βαθμού απόδοσης. Τυπικά ένας μικρός μετατροπέας έχει βαθμό απόδοσης με εύρος μέγιστων τιμών του σε μεγαλύτερη περιοχή της ισχύος εισόδου του σε σχέση με έναν μεγαλύτερο μετατροπέα.

Είναι σημαντικό λοιπόν, ο inverter της εγκατάστασης να λειτουργεί σε μεγάλο βαθμό απόδοσης. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, είναι λογική η χρήση μικρών inverter διότι αυτοί θα λειτουργούν πολύ περισσότερο στην κατάσταση ονομαστικής λειτουργίας τους όπου παρατηρείται ένας γενικά υψηλός βαθμός απόδοσης σε σχέση



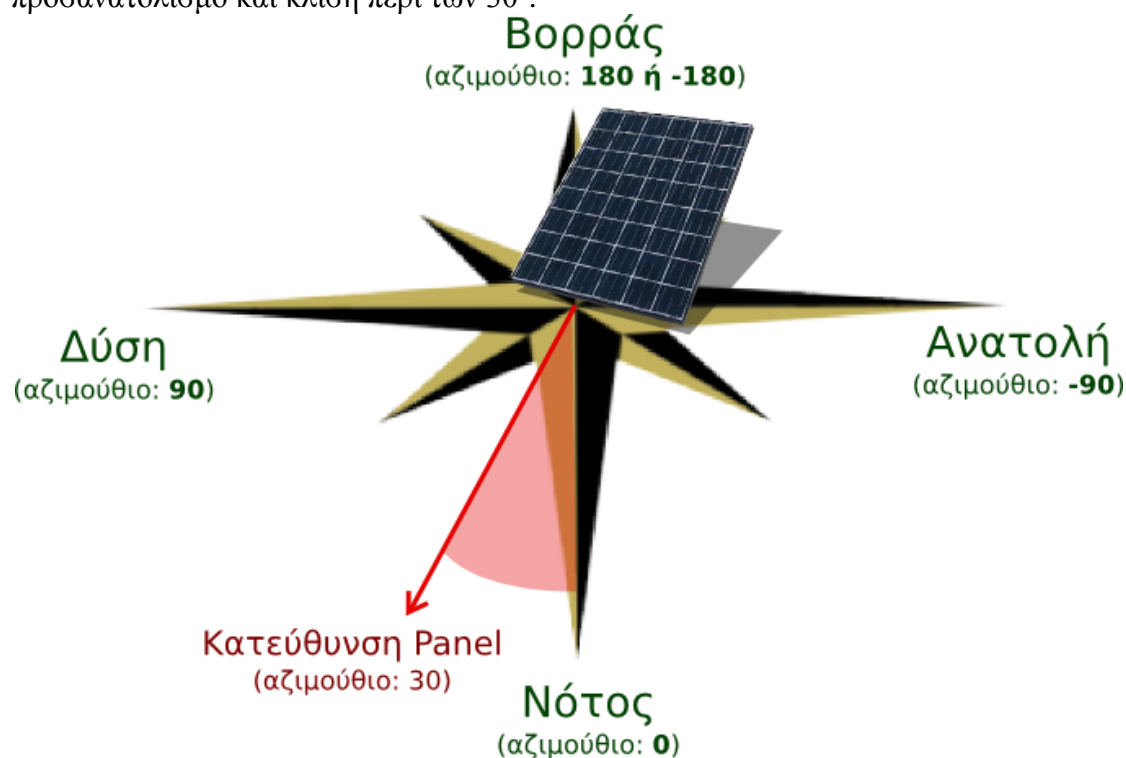
με έναν inverter που έχει ισχύ ίση με αυτή της εγκατάστασης, διότι η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση δεν παράγει ποτέ την ονομαστική της ισχύ ώστε να τροφοδοτήσει με αυτήν τον μετατροπέα.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι η παράλληλη χρήση inverter δίνει την δυνατότητα της διατήρησης της λειτουργίας της εγκατάστασης σε περίπτωση που κάποιος από τους inverter υποστεί βλάβη. Αυτό είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης πολλών και μικρής ισχύος μετατροπέων σε μια εγκατάσταση.

### 2.3. Διαστασιολόγηση Φ/Β συστήματος

Για να είναι εφικτή η μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγικότητας των Φ/Β πλαισίων, θα πρέπει να επιτυγχάνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, εφόσον η πορεία του ήλιου αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με τη μέρα του έτους, τεκμαίρεται πως για να παράγει ένα πλαίσιο τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφεται ώστε να μπορεί να ακολουθεί την τροχιά του ήλιου και να είναι συνεχώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας.

Πρακτικά, η μηχανική πολυπλοκότητα και το κόστος ενός μηχανισμού που θα επέτρεπε την κίνηση των πλαισίων σύμφωνα με τον παραπάνω τρόπο, καθιστά εξαιρετικά δύσκολη και δαπανηρή την εφαρμογή του σε κτηριακά Φ/Β συστήματα. Έτσι στη πλειονότητα των κτηριακών Φ/Β συστημάτων επιλέγεται σταθερός προσανατολισμός των πλαισίων, ώστε να επιτυγχάνεται μέση ετήσια γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας όσο το δυνατό πιο κοντά στις  $90^\circ$ . Η επίτευξη αυτού του στόχου έγκειται στην σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας του πλαισίου. Η κλίση του πλαισίου εκφράζεται με τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο της επιφάνειας του Φ/Β πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο, ενώ η αζιμούθια γωνία σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κεκλιμένης πλευράς του πλαισίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Για το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη κλίση του Φ/Β πλαισίου για τη μέγιστη παραγωγή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους είναι ίση με τη γεωγραφική παράλληλο του τόπου και η αζιμούθια γωνία είναι περίπου  $0^\circ$  (κατεύθυνση προς νότο). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα η μεγιστοποίηση της συνολικής ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε επιφάνεια σταθερής κλίσης, επιτυγχάνεται για Νότιο προσανατολισμό και κλίση περί των  $30^\circ$ .



Σχήμα 2.9. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων

Η επιλογή της θέσης έδρασης της Φ/Β συστοιχίας θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξουν σκιασμοί καθ' όλο το έτος και ειδικά τις ώρες υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας ή μελλοντικοί σκιασμοί. Εάν στην τοποθεσία έδρασης του Φ/Β εξοπλισμού υπάρχουν μόνιμοι ή επαναλαμβανόμενοι σκιασμοί (π.χ. σκίαση από παρακείμενα κτήρια, κολώνες, στηθαίο, κλπ.) για μεγάλο χρονικό διάστημα γύρω από το ηλιακό μεσημέρι (από 09:00 έως 15:00), τότε η θέση εγκατάστασης θεωρείται ακατάλληλη. Μόνιμοι και επαναλαμβανόμενοι τοπικοί σκιασμοί σε ώρες υψηλής ακτινοβολίας δύναται να καταπονήσουν το σκιαζόμενο Φ/Β πλαίσιο, προκαλώντας την πρόωρη γήρανση αυτού.

Η έδραση των Φ/Β πλαισίων επί του κτηρίου μπορεί να υλοποιηθεί είτε πάνω σε πρόσθετη μεταλλική κατασκευή, είτε επί της επιφάνειας του δώματος, ή ακόμα και με την ενσωμάτωση των πλαισίων στο δομικό κέλυφος του κτηρίου. Αν και το βάρος της ίδιας της Φ/Β συστοιχίας και της βάσης στήριξης δεν αναμένεται να επηρεάσει την στατική αντοχή του κτηρίου, καλό είναι όταν η τοποθέτηση των πλαισίων γίνεται σε στέγαστρα ή σκεπές να διενεργείται στατικός έλεγχος (ή ακόμα και ειδική μελέτη όπου απαιτείται) ώστε να διερευνάται η μηχανική καταπόνηση και η ανεμοπίεση της επιφάνειας έδρασης των πλαισίων.



*Σχήμα 2.10. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε μεταλλική κατασκευή*



*Σχήμα 2.11. Τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε σκεπή*

Οι μετατροπείς των εν λόγω ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων τοποθετούνται είτε στο εσωτερικό των κτιρίων που εγκαθίστανται, είτε σε ειδικά διαμορφωμένο κλειστό χώρο ο οποίος μπορεί να βρίσκεται πλησίον του Φ/Β εξοπλισμού. Μάλιστα, στη δεύτερη περίπτωση μειώνεται σημαντικά το μήκος των ηλεκτρικών αγωγών Σ.Ρ. με άμεσο αποτέλεσμα τον περιορισμό των ηλεκτρικών απωλειών, της πτώσης τάσης, αλλά και του κόστους καλωδίωσης.



*Σχήμα 2.12. Inverter (Μετατροπέας) σε οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα*

Κατά τη σχεδίαση του συστήματος απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη συνεργασία μεταξύ της Φ/Β συστοιχίας και του ηλεκτρονικού αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας απαιτεί στην είσοδό του ένα συγκεκριμένο εύρος για την τάση λειτουργίας, έχοντας ένα ανώτατο όριο τάσης εισόδου. Το ανώτατο όριο δεν πρέπει να υπερβαίνεται, ώστε να μην υπάρξει κίνδυνος καταστροφής του αντιστροφέα. Συνεπώς, ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν εν σειρά (στοιχειοσειρά) υπολογίζεται έτσι ώστε να μην υπερβαίνονται τα όρια αυτά, σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

Η τάση ενός Φ/Β πλαισίου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Οι τιμές τάσης, ρεύματος και ισχύος που δίνονται από τον κατασκευαστή, αναφέρονται στις πρότυπες συνθήκες δοκιμών (S.T.C). Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία στην οποία διενεργήθηκαν οι μετρήσεις (του

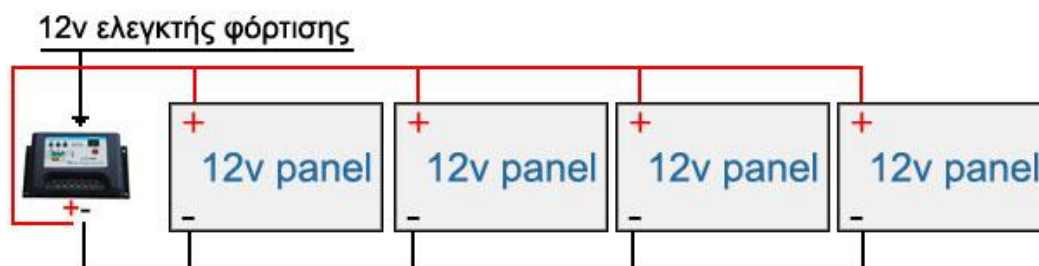
κατασκευαστή) είναι 25<sup>0</sup>C. Κατά συνέπεια τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων πρέπει να διορθωθούν (αναχθούν) στις ακραίες θερμοκρασιακές συνθήκες λειτουργίας του Φ/Β συστήματος. Αναλυτικότερα, από την ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της τάσης των αλυσίδων και από τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων καθορίζεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος των παράλληλων αλυσίδων (κλάδων).

Ο μέγιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων εν σειρά υπολογίζεται έτσι ώστε η συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος της συστοιχίας στη μικρότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, να μην υπερβαίνει το ανώτατο όριο τάσης εισόδου του αντιστροφέα. Για τις πεδινές περιοχές της Ελλάδος ως ελάχιστη θερμοκρασία μπορεί να ληφθεί η τιμή -5<sup>0</sup>C η -10 <sup>0</sup>C (θερμοκρασία λειτουργίας ενεργού υλικού του Φ/Β πλαισίου). Συγχρόνως πρέπει να ελεγχθεί και η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου, η οποία ομοίως πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση ανοικτού κυκλώματος της στοιχειοσειράς στην μικρότερη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, ώστε να μην προκύψει πρόβλημα στη μόνωση του Φ/Β πλαισίου.

Ο ελάχιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων εν σειρά ορίζεται έτσι ώστε η συνολική τάση βέλτιστης λειτουργίας της συστοιχίας στη μέγιστη αναμενόμενη θερμοκρασία λειτουργίας να υπερβαίνει την ελάχιστη τάση του εύρους εισόδου του αντιστροφέα ώστε αυτός να ενεργοποιείται.

Αν ο κατασκευαστής παρέχει μόνο την τιμή του θερμοκρασιακού συντελεστή για την τάση ανοικτού κυκλώματος (V/<sup>0</sup>C), τότε η ίδια τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την τάση στο σημείο μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος του Φ/Β πλαισίου, χωρίς σημαντικό σφάλμα.

## Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ σε σειρά



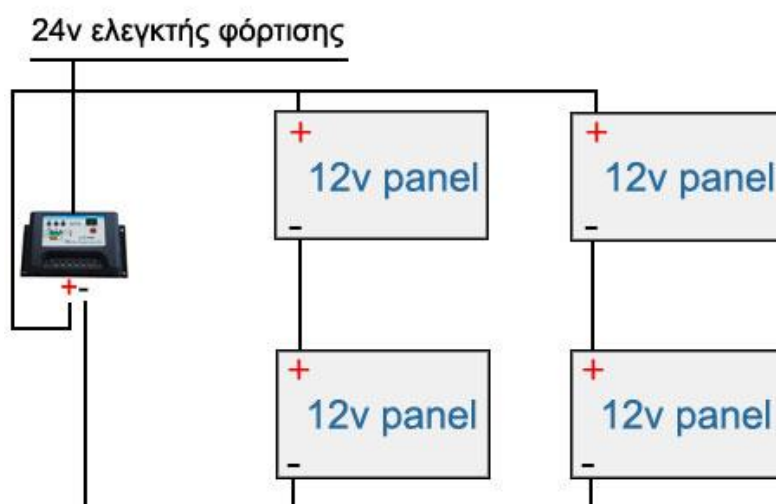
[www.karaferis.gr](http://www.karaferis.gr)

Σχήμα 2.13. Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ σε σειρά.

Αν από την εν σειρά σύνδεση των Φ/Β πλαισίων δεν προκύπτει ισχύς κοντά στην ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα, θα πρέπει να συνδεθούν περισσότεροι παράλληλοι κλάδοι (αποδεκτού αριθμού εν σειρά πλαισίων) ώστε η ισχύς της Φ/Β συστοιχίας να είναι κοντά στην ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα.

Το ρεύμα λειτουργίας των παράλληλων κλάδων θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από το μέγιστο όριο ρεύματος εισόδου του αντιστροφέα. Η συνολική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας μπορεί και να υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ του μετατροπέα. Για τις συνθήκες της Ελλάδας συνιστάται η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας να μην υπερβαίνει το 110% της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα.

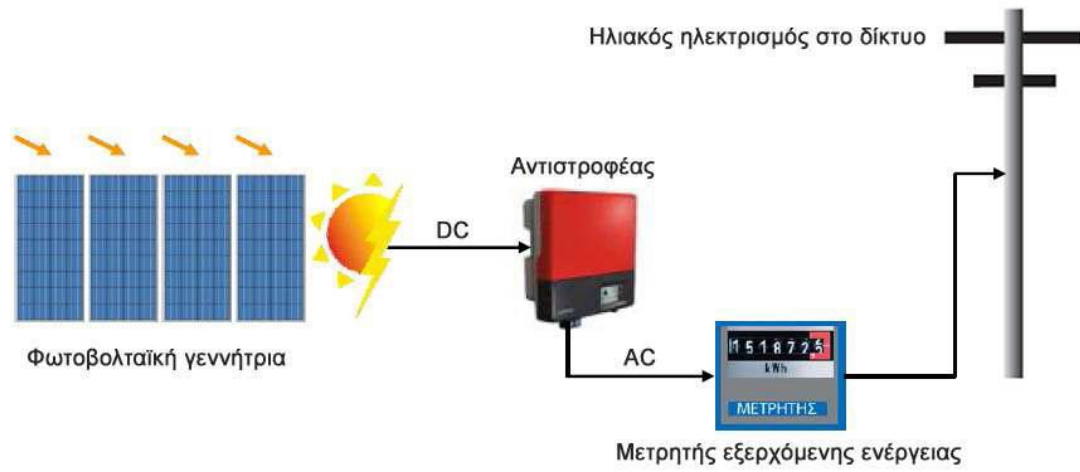
## Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ παράλληλα



[www.karaferis.gr](http://www.karaferis.gr)

Σχήμα 2.14. Συνδεσμολογία φωτοβολταϊκών πάνελ παράλληλα.

Τέλος, ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν είναι η συμβατότητα μεταξύ των τύπων των Φ/Β και του αντιστροφέα που σχετίζεται με την απαίτηση ή όχι για γείωση της συστοιχίας στην πλευρά Σ.Ρ. Πιο συγκεκριμένα, ορισμένοι τύποι Φ/Β πλαισίων απαιτούν σύμφωνα με τις κατασκευαστικές προδιαγραφές γείωση είτε του αρνητικού (Thin-film) είτε του θετικού (Backcontact) πόλου. Η γείωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε απευθείας, είτε μέσω μεγάλης αντίστασης και αποσκοπεί στην αποφυγή λειτουργικών προβλημάτων που εμφανίζουν οι παραπάνω τύποι πλαισίων όταν παραμένουν αγείωτα (προβλήματα διάβρωσης και υποβάθμισης της απόδοσης). Κατά συνέπεια σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να αποφεύγεται χρήση αντιστροφέων χωρίς γαλβανική απομόνωση, λόγω εμφάνισης ρευμάτων διαρροής, εκτός αν πιστοποιείται από τον κατασκευαστή του αντιστροφέα ότι ο επιλεγμένος τύπος αντιστροφέα είναι κατάλληλος για χρήση με τα πλαίσια που έχουμε επιλέξει.



Σχήμα 2.15. Διάγραμμα λειτουργίας φωτοβολταϊκού συστήματος

### 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

#### «Ηλεκτρικός πίνακας Φ/Β συστήματος»

Οι έτοιμοι για εγκατάσταση πίνακες DC/AC, για φωτοβολταϊκά συστήματα σε στέγες και δώματα, εγγυώνται την απρόσκοπτη λειτουργία και απόδοση της επένδυσής σας. Με τη χρήση καταλλήλων ηλεκτρικών διατάξεων, παρέχουν την μέγιστη προστασία έναντι σε υπερτάσεις, στο συνεχές και εναλλασσόμενο κύκλωμα καθώς και από διαρροές ρεύματος.

Οι ηλεκτρολογικοί πίνακες DC,AC που θα τοποθετηθούν θα είναι εξωτερικοί κατάλληλων διαστάσεων και θα περιέχουν όλα τα απαραίτητα όργανα διακοπής, ελέγχου, απαγωγείς και μέτρησης, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απρόσκοπτη τροφοδοσία του δικτύου. Τα πεδία θα εγκατασταθούν εντός ανοξειδωτου κελύφους (INOX), το οποίο προσφέρει βαθμό προστασίας IP65. Στο πάτωμα του κελύφους θα προσαρμοστεί αφαιρούμενη πλακέτα με στυπιοθλίπτες για την εξασφάλιση της στεγανής εισόδου των καλωδίων. Το πεδίο αυτό αναλαμβάνει να συγκεντρώσει τα AC καλώδια που μεταφέρουν την ενέργεια από τους αντιστροφείς και μέσω ενός μικροαυτόματου να τα ομαδοποιήσει σε 3 φάσεις. Εν συνεχεία οι 3 φάσεις οδηγούνται στον γενικό διακόπτη του πίνακα ο οποίος διαστασιολογήθηκε βάσει των προδιαγραφών της ΔΕΗ και στον οποίο θα συνδεθεί το κεντρικό καλώδιο σύνδεσης με τον μετρητή. Πριν τον διακόπτη θα συνδεθεί σύστημα απαγωγής υπερτάσεων Rayvoss Strikesorb40. Το σύστημα αυτό προσφέρει στάθμη προστασίας στα 0.8kV με κρουστικό ρεύμα υπέρτασης μέχρι 140 kA. Το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μετά την απαλοιφή της υπέρτασης.



*Εικόνα 3.1.ηλεκτρικός πίνακας φ/β πάρκου*





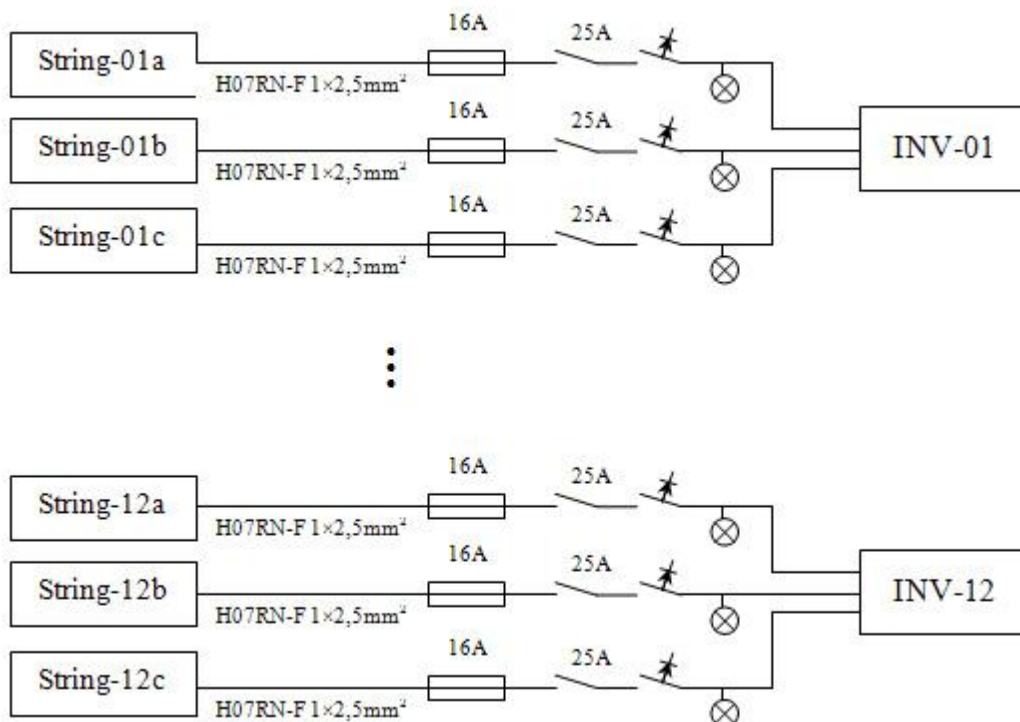
*Εικόνα 3.2. Ηλεκτρικοί πίνακες φωτοβολταϊκής εγκατάστασης*

Η θέση του πίνακα στην εγκατάσταση είναι πολύ σημαντική, καθώς από αυτή εξαρτάται άμεσα το μήκος των καλωδίων που απαιτούνται για την σύνδεση των αντιστροφών. Σύμφωνα με τη τοπογραφική διάταξη της εγκατάστασης το σημείο τοποθεσίας του πίνακα XT, που θα έχει ως αποτέλεσμα το μικρότερο δυνατό μήκος των καλωδίων βρίσκεται στον γεωμετρικό τόπο των σημείων που ορίζει η γραμμή που χωρίζει στη μέση την εγκατάσταση κατά τη διεύθυνση B-N. Η θέση αυτή εξασφαλίζει όχι μόνο συνολικά το μικρότερο μήκος των καλωδίων, αλλά και ξεχωριστά τα καλώδια, που έρχονται από τις εξόδους των αντιστροφών δεν ξεπερνούν στη χειρότερη περίπτωση τα 25m. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει ότι οι απώλειες των καλωδίων θα είναι μικρότερες από 1%. Τέλος οι διαστάσεις του ποικίλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν. Στην περίπτωση μας το ύψος του δεν θα ξεπερνάει τα 1,5m και έτσι δεν θα δημιουργεί κανένα πρόβλημα σκίασης στην εγκατάσταση, καθώς τοποθετείται πίσω από τη βάση στήριξης.

### 3.1. Πίνακας Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Ο ηλεκτρολογικός πίνακας **συνεχούς ρεύματος** προστατεύει τον αντιστροφέα από υπερτάσεις, περιορίζοντας στο μέγιστο βαθμό τις επιδράσεις των κρουστικών ρευμάτων που εμφανίζονται στις φωτοβολταϊκές διατάξεις. Η κάθε διάταξη ασφαλίζεται ξεχωριστά και όλες είναι παράλληλα συνδεδεμένες, με αποτέλεσμα την απομόνωση των κρουστικών εντάσεων.

Η είσοδος κάθε αντιστροφέα προστατεύεται με διάταξη ασφάλεια τήξης σε συνδυασμό με αποζεύκτη (ασφαλειοαποζεύκτης), διακόπτη διαρροής έντασης και ενδεικτική λυχνία. Οι ασφάλειες θα είναι των 16A και οι διακόπτες των 25A, ενώ ο διακόπτης διαφυγής έντασης θα είναι των 30mA. Η διάταξη με την σειρά της προστατεύεται από στεγανό ανοιγόμενο κιτίο.

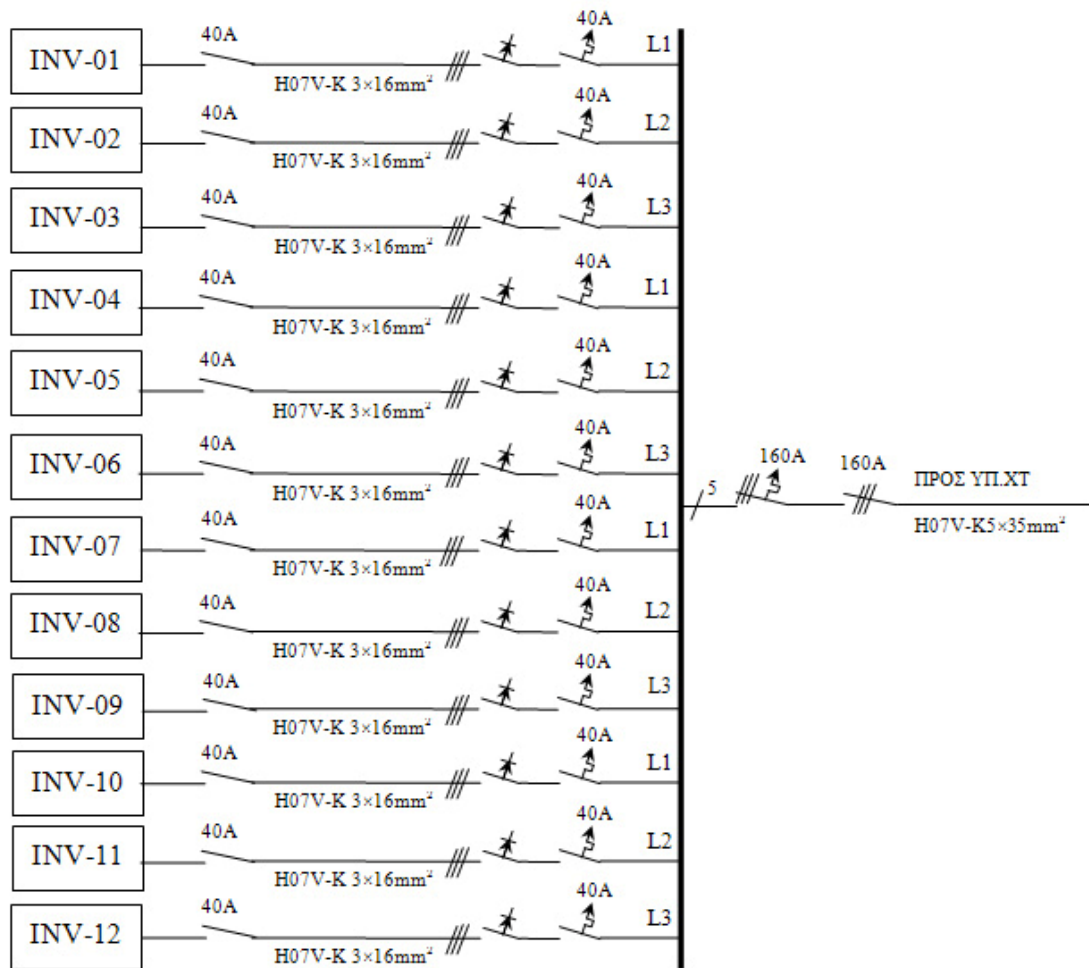


Σχήμα 3.3. Διάγραμμα σύνδεσης στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος.

### 3.2. Πίνακας Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC)

Ο ηλεκτρολογικός πίνακας εναλλασσομένου ρεύματος προστατεύει από υπερτάσεις τον αντιστροφέα, περιορίζοντας στο μέγιστο βαθμό τις επιδράσεις από κρουστικά ρεύματα, που μπορεί να εμφανιστούν στο δίκτυο της ΔΕΗ εξαιτίας έμμεσων διηλεκτρικών εκκενώσεων.

Στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος, στην έξοδο του αντιστροφέα, θα υπάρχει επίσης διακόπτης διαφυγής έντασης και μικροαυτόματος διακόπτης των 40Α. Οι έξοδοι όλων των αντιστροφέων συγκεντρώνονται σε ένα πίνακα χαμηλής τάσης, όπου και ομαδοποιούνται σε τρεις φάσεις και στη συνέχεια αναχωρεί μια τριφασική γραμμή για να συνδεθεί με το δίκτυο. Λόγω της φύσης της εγκατάστασης προτιμήθηκε η χρήση ενός πίνακα Pillar (Σχήμα 6.27). Οι πίνακες εξωτερικού χώρου – Pillar είναι πίνακες διανομής, τροφοδότησης κινητήρων, φωτισμού για υπαίθρια εγκατάσταση, όπου λόγω αντίξοων περιβαλλοντικών συνθηκών απαιτείται μεγάλη στεγανότητα και εύκολη επεκτασιμότητα. Κατασκευάζονται από χαλυβοέλασμα γαλβανιζέ πάχους 2 mm σε διάφορες διαστάσεις, ενώ ο βαθμός προστασίας τους είναι IP40 ή ανάλογα με τις προδιαγραφές μέχρι και IP66. Ανάλογα με τις διαστάσεις και το ηλεκτρολογικό υλικό χωρίζονται σε μονομερή, διμερή, τριμερή και τετραμερή αριθμό διαμερισμάτων, γεγονός που δίνει μεγάλη ευελιξία τοποθέτησης υλικών. Το ηλεκτρολογικό υλικό κουμπώνεται σε ειδική γαλβανιζέ ράγα. Η κατασκευή του είναι τέτοια, ώστε τα διάφορα όργανα να είναι εύκολα προσιτά και τοποθετημένα σε κανονικές αποστάσεις μεταξύ τους και έτσι εξασφαλίζεται η άνετη αφαίρεση, επισκευή και επανατοποθέτηση τους, χωρίς να μεταβάλλεται η κατασκευή των γειτονικών οργάνων.

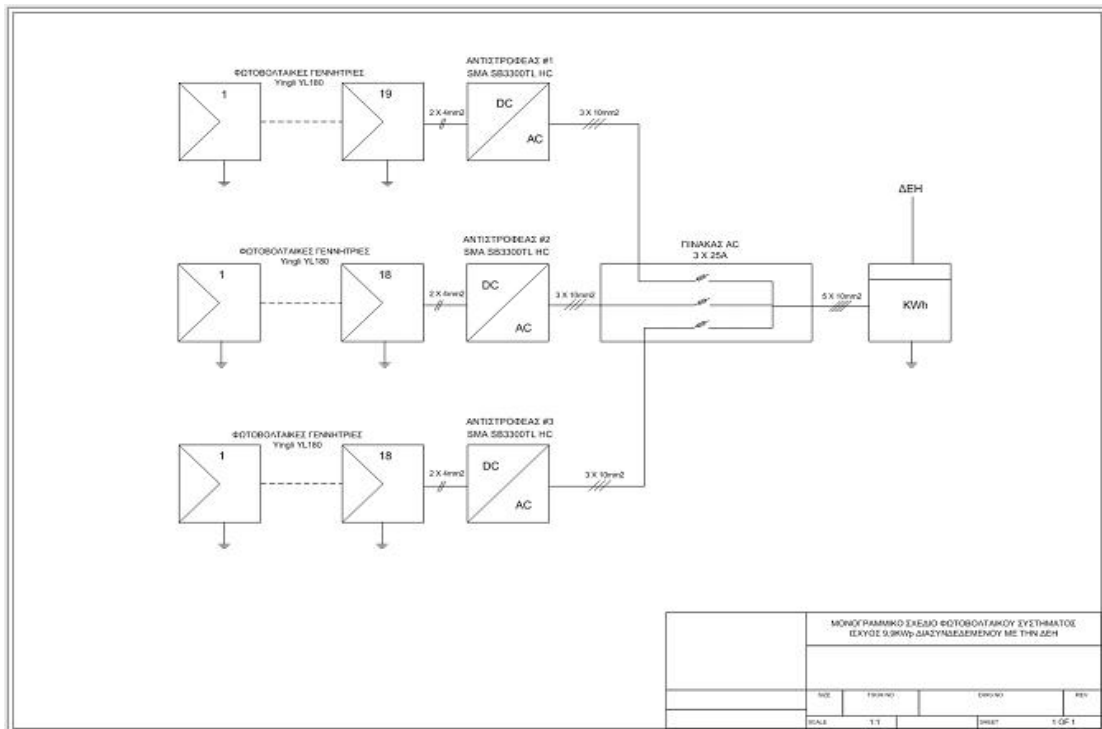


Σχήμα 3.4. Διάγραμμα σύνδεσης στην πλευρά του εναλλασσόμενου ρεύματος.



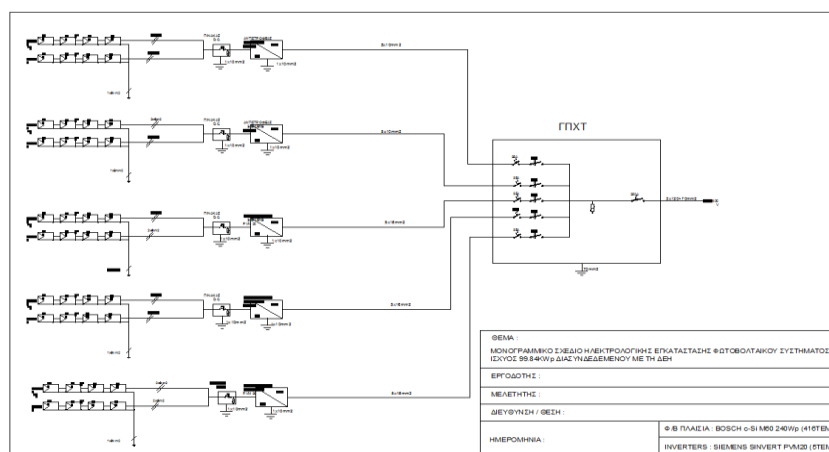
Σχήμα 3.5. Εξωτερικός πίνακας – Pillar

### 3.3. Μονογραμμικό σχέδιο Φ/Β εγκατάστασης



Σχήμα 3.6. Μονογραμμικό σχέδιο διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 10 KWp.

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το μονογραμμικό σχέδιο διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 10 KWp, το οποίο αποτελείται από έξι φωτοβολταϊκές γεννήτριες YingliSolarYL180, τρεις αντιστροφείς DC/AC SMA SB330TLHC και τον πίνακα εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 3.7. Μονογραμμικό σχέδιο διασυνδεδεμένης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης ισχύος 100 KWp.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το μονογραμμικό σχέδιο ενός φωτοβολταϊκού πάρκου ισχύος 100 KWp. Αποτελείται από 416 φωτοβολταϊκές γεννήτριες BOSCHc-siM60 240Wp, 5 INVERTERSSIEMENSSINVERTPVM 20 και τον Γενικό Πίνακα.

## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### «Καλώδια Συνεχούς και Εναλλασσόμενου ρεύματος (DC/AC)»

Η ηλεκτρολογική εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτεί τη χρήση καλωδίων DC και AC. DC καλώδια χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση των πάνελ μεταξύ τους και για τη σύνδεση των κλάδων/στοιχειοσειρών (string) με τις εισόδους του αντιστροφέα ενώ AC καλώδια ισχύος, συμβατικού τύπου, χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των αντιστροφέων σε τριφασικό σύστημα και την τελική σύνδεση με τη ΔΕΗ.

Το συχνά χρησιμοποιούμενο καλώδιο με μόνωση λάστιχο και μανδύα από νεοπρένιο τύπου H07 RN-F, στην τυπική (standard) έκδοση του επιτρέπεται σε θερμοκρασίες έως 60oC και έτσι είναι κατάλληλο για χρήση σε φωτοβολταϊκά συστήματα σε περιορισμένο εύρος. Για το σκοπό αυτό οι κατασκευαστές προχώρησαν στη δημιουργία ειδικών καλωδίων για φωτοβολταϊκές εφαρμογές (solar cables). Τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους είναι ότι είναι ανθεκτικά στις καιρικές συνθήκες και σε υπεριώδη (UV) ακτινοβολία με μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών (της τάξης από -55oC έως 125oC). Επιπλέον κάποιοι κατασκευαστές προσφέρουν καλώδια με μεταλλικό πλέγμα για μεγαλύτερη προστασία από τα τρωκτικά και καλύτερη προστασία από υπερτάσεις.

Επιπλέον, κατά τη φάση κατασκευής του έργου, θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την προσεκτική όδευση των καλωδίων κατά τις συνήθεις πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γεινίαση των καλωδίων, η χρήση σωλήνων και η ανάγκη προστασίας από τα τρωκτικά.

Σε όλα τα κιβώτια σύνδεσης πρέπει να υπάρχει προειδοποιητική σήμανση ότι τα ενεργά τμήματα στο εσωτερικό των κιβωτίων παραμένουν ενεργά και μετά την απομόνωση των Φ/Β πλαισίων από τον μετατροπέα. Οι σημάνσεις θα πρέπει να είναι ανθεκτικές για το περιβάλλον στο οποίο εγκαθίστανται.

Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για τη σωστή διασύνδεση των καλωδίων τόσο μεταξύ των πάνελ (δηλαδή από το (+) ενός πάνελ στο (-) του επόμενου κτλ) όσο και μεταξύ των κλάδων των πάνελ και των εισόδων του αντιστροφέα. Σε περίπτωση χαλαρής σύνδεσης είναι πιθανόν να εμφανιστεί τόξο αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς.





Σχήμα 4.1. Καλώδια σύνδεσης φωτοβολταϊκών

#### 4.1. Κριτήρια επιλογής καλωδίων συνεχούς ρεύματος

Στην πλευρά της Φ/Β συστοιχίας ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της εγκατάστασης καλωδίωσης θα πρέπει να εξασφαλίζει προστασία ισοδύναμη με μόνωση Class II.

Η καλωδίωση περιλαμβάνει τις συνδέσεις μεταξύ των Φ/Β πλαισίων, τις συνδέσεις από τα άκρα κάθε εν σειρά κλάδου μέχρι το κουτί παραλληλισμού, αν χρησιμοποιείται και τις συνδέσεις από τα άκρα της Φ/Β συστοιχίας, π.χ. στο κουτί παραλληλισμού, μέχρι τον αντιστροφέα.

Όλα τα καλώδια τα οποία είναι εκτεθειμένα στην ηλιακή ακτινοβολία θα πρέπει να είναι ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία (αποκλείοντας έτσι τα κοινά καλώδια με μόνωση από PVC).

Τα καλώδια τα οποία χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις των πλαισίων θα πρέπει να έχουν μόνωση ανθεκτική τουλάχιστον έως 70°C ή και περισσότερο αν δεν υπάρχει ελεύθερη κυκλοφορία του αέρα.

Η επιλογή του κατάλληλου είδους καλωδίου είναι σημαντική για την ασφάλεια και τη διάρκεια της εγκατάστασης όπως και την ικανοποίηση της απαίτησης για μόνωσης ισοδύναμης με κλάση II.

Για τις συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων χρησιμοποιούνται συνήθως εύκαμπτα μονοπολικά καλώδια με ενισχυμένη μόνωση, με τις ανωτέρω τουλάχιστον απαιτήσεις. Ο συνδυασμός αυτός των απαιτήσεων είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί από κοινά τυποποιημένα καλώδια και απαιτεί τη χρήση ειδικών μειγμάτων πλαστικών για μόνωση.

Τα καλώδια μπορούν να είναι εναέρια, αλλά πρέπει να παρέχεται στήριξη, ώστε να μην καταπονούνται οι συνδέσεις. Η στήριξη γίνεται με υλικά ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, την υγρασία, την υψηλή θερμοκρασία και τη διάβρωση.

Τα Φ/Β πλαίσια θα πρέπει να διαθέτουν διόδους παράκαμψης (bypassdiodes), για ελάττωση των συνεπειών σκίασης. Για τις συνδέσεις των καλωδίων μεταξύ τους συνιστάται να χρησιμοποιούνται οι κατάλληλοι ειδικοί σύνδεσμοι ταχείας σύνδεσης. Τα προεγκατεστημένα καλώδια των Φ/Β πλαισίων δε θα πρέπει να αφαιρούνται και να αντικαθίστανται από καλώδια άλλης διατομής ή τύπου.

Η όδευση των καλωδίων από το κουτί παραλληλισμού μέχρι τον αντιστροφέα θα πρέπει να εξασφαλίζει προστασία ισοδύναμη με Class II. Τα καλώδια θα πρέπει να είναι μονοπολικά, με διπλή ή ενισχυμένη μόνωση. Σε διαφορετική περίπτωση θα πρέπει να τοποθετούνται σε διαφορετικά κανάλια.



Στα κιβώτια διασύνδεσης πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικές περιοχές με μονωτικό διαχωριστικό για τη σύνδεση των αρνητικών και θετικών αγωγών. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιούνται ξεχωριστά κουτιά σύνδεσης για τους θετικούς και τους αρνητικούς αγωγούς. Τα κιβώτια που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι μονωτικά και να ανοίγουν με ειδικό κλειδί ή εργαλείο.

Η διατομή του καλωδίου καθορίζεται από το μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα σε ένα κλάδο. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη τουλάχιστον η διόρθωση λόγω θερμοκρασίας, η οποία για τα καλώδια πλησίον των Φ/Β πλαισίων μπορεί να φθάσει τους 70°C. Σημειώνεται ότι στους 70°C ο διορθωτικός συντελεστής για καλώδια με μόνωση ανθεκτική ως τους 90°C είναι 0.58. Δηλαδή στην περίπτωση αυτή η διατομή του καλωδίου θα πρέπει να διαστασιολογηθεί με βάση τη τιμή του μέγιστου αναμενόμενου ρεύματος πολλαπλασιασμένη επί 1.72 ( $=1/0.58$ ), για να μην υπερβούν τα όρια αντοχής της μόνωσης.

Ένα άλλο κριτήριο που εξετάζεται για τη διαστασιολόγηση των καλωδίων είναι αυτό της απώλειας ισχύος. Συνήθως θεωρείται ότι η απώλεια ισχύος στο συνολικό μήκος των Σ.Ρ. καλωδίων υπό ονομαστικές τιμές λειτουργίας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% της ονομαστικής ισχύος του Φ/Β συστήματος. Το κριτήριο αυτό συνήθως οδηγεί σε επιλογή μεγαλύτερης διατομής.

Στην πλευρά του συνεχούς ρεύματος θα πρέπει να εγκαθίσταται διακόπτης (όταν αυτός δεν εμπεριέχεται στον αντιστροφέα) ο οποίος θα απομονώνει τον αντιστροφέα από τη Φ/Β συστοιχία. Ο διακόπτης θα πρέπει να έχει την ικανότητα να απομονώνει τον αντιστροφέα υπό φορτίο (συνεπώς οι ταχυσύνδεσμοι δεν καλύπτουν την απαίτηση αυτή σαν μέσο απομόνωσης). Ο διακόπτης πρέπει να είναι σχεδιασμένος για συνεχές ρεύμα και να απομονώνει και τους δύο πόλους (αγείωτο σύστημα).

Οι διατομές των DC καλωδίων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των Φ/Β πάνελ με τους αντιστροφείς κυμαίνονται συνήθως από 4-16mm<sup>2</sup>. Είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθούν και μεγαλύτερες διατομές DC καλωδίων της τάξης των 25-70mm<sup>2</sup>, σε περιπτώσεις που δεν επαρκεί ο αριθμός των εισόδων ενός αντιστροφέα για την απευθείας σύνδεση όλων των επιμέρους DC καλωδίων των κλάδων. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά συνηθισμένη κυρίως σε κεντρικούς αντιστροφείς (της τάξης ονομαστικής ισχύος των 100kW και άνω. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κατάλληλα κιτία τα οποία ομαδοποιούν πολλά ζεύγη καλωδίων κλάδων σε ένα ζεύγος.

## **4.2. Κριτήρια επιλογής καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος**

Στην πλευρά Ε.Ρ. γενικά θα πρέπει να ακολουθούνται οι συνήθειες πρακτικές που απορρέουν από τον HD384. Χρησιμοποιούνται οι συμβατικοί τύπου καλωδίων (π.χ. NYY, NYM, NYCWY) εφαρμόζοντας τις συνήθειες πρακτικές της ηλεκτροτεχνίας αναφορικά με τον υπολογισμό της διατομής τους, τον τρόπο τοποθέτησης και την προστασία τους.

Η έξοδος του αντιστροφέα συνδέεται σε ξεχωριστό ηλεκτρικό πίνακα, όπου εγκαθίστανται τα μέσα προστασίας και χειρισμού. Η τροφοδοσία του ηλεκτρικού πίνακα θα πρέπει να προέρχεται κατευθείαν από την Παροχή που έχει προμηθεύσει ο Διαχειριστής του Δικτύου στο κτίριο.

Οι ηλεκτρονικοί αντιστροφείς θα πρέπει να παρέχουν τη δυνατότητα απομόνωσης της εξόδου τους από το δίκτυο Ε.Ρ.

Η εγκατάσταση ρελαί διαφυγής στην έξοδο του αντιστροφέα (πλευρά ΕΡ) πραγματοποιείται με βάση τις απαιτήσεις του προτύπου HD384. Ειδικότερα, στην

περίπτωση που ο αντιστροφέας δεν εμπεριέχει γαλβανική απομόνωση ή εμπεριέχει υψίσουχο Μ/Σ, θα πρέπει να παρέχεται προστασία μέσω ρελαί διαφυγής τύπου Β (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 364-7-712). Ο επιλεγμένος αντιστροφέας καλό είναι να διαθέτει αυτή τη δυνατότητα χωρίς να είναι απαραίτητη η εγκατάσταση επιπλέον ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Οι αντιστροφείς που υπάγονται σε αυτές τις κατηγορίες μπορεί να φέρουν πιστοποιητικό μετρήσεων για τη μη έγχυση Σ.Ρ, οπότε μπορεί να εγκατασταθεί ρελαί διαφυγής τύπου Α. Για την επιλογή του ρεύματος  $I_{\Delta n}$ , εκτός από τις απαιτήσεις της οδηγίας HD384, λαμβάνεται υπόψη ότι σε Φ/Β εγκαταστάσεις με αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή υπάρχει ρεύμα διαρροής στην κανονική λειτουργία του συστήματος, η τιμή του οποίου δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια (εξαρτάται από τον τύπο των πλαισίων, του αντιστροφέα και τις καιρικές συνθήκες). Στις περιπτώσεις αυτές, η εγκατάσταση ρελαί διαφυγής με ρεύμα διέγερσης 30 mA μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες διακοπές στη λειτουργία του Φ/Β συστήματος. Είναι λοιπόν σκόπιμο, ο μελετητής να ακολουθήσει τις οδηγίες του κατασκευαστή του αντιστροφέα για την επιλογή του κατάλληλου ρελαί διαφυγής.

Τονίζεται ότι η ελαχιστοποίηση των οδεύσεων είναι επιθυμητή, τόσο στην μεριά Σ.Ρ. όσο και στη μεριά Ε.Ρ. προκειμένου να επιτυγχάνεται μείωση των ηλεκτρικών απωλειών.



**eshops.gr**

Σχήμα 4.2. Συνδετήρας (κονέκτορας) καλωδίων φωτοβολταϊκού συστήματος

## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### «Γειώσεις σε Φ/Β συστήματα»

Γενικά, ένα κεραυνικό πλήγμα δημιουργεί έμμεσες επιπτώσεις στη γύρω περιοχή με περίμετρο περίπου το 1km, οι έμμεσες επιπτώσεις είναι ουσιαστικά επαγωγική, χωρητική και γαλβανική ζεύξη. Ένας κεραυνός μπορεί να προκαλέσει κύματα τάσης τόσο στα Φ/Β πλαίσια όσο και στα καλώδια συνεχούς, εναλλασσόμενου ρεύματος και στα καλώδια ασθενών ρευμάτων, που χρησιμοποιούνται για μέτρηση και έλεγχο του Φ/Β συστήματος. Τα επίπεδα της τάσης είναι σαφώς μεγαλύτερα σε Φ/Β πλαίσια με μεταλλικά πλαίσια από ότι σε Φ/Β πλαίσια δίχως μεταλλικά πλαίσια, προκειμένου να μειωθεί το επίπεδο τάσης από ένα κεραυνικό πλήγμα, θα πρέπει τα καλώδια συνεχούς ρεύματος με αντίθετες πολικότητες να οδεύονται όσο το δυνατόν πιο κοντά.

Σκοπός της γείωσης ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι να προστατεύει της φωτοβολταϊκές συστοιχίες από τον κίνδυνο για άμεσο πλήγμα από κεραυνό, διαχέοντας το ρεύμα του αγωγού στο έδαφος μέσω των ηλεκτροδίων γείωσης. Επιπλέον, το σύστημα γείωσης προστατεύει τα ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστήματα (π.χ αναστροφείς, μετατροπείς) από τα αποτελέσματα του κεραυνού, δηλαδή από την εμφάνιση επικίνδυνων υπερτάσεων. Επιπλέον, συνδέει ισοδυναμικά τους αγωγούς καθόδου καθώς και αναχαιτίζει τον κεραυνό σε περίπτωση επιφανειακής διάσπασης του εδάφους.

Για την επιπλέον αντικεραυνική προστασία του Φ/Β συστήματος θα χρησιμοποιηθεί αλεξικέραυνο το οποίο προστατεύει τόσο τα Φ/Β πλαίσια όσο και τις ηλεκτρικές-ηλεκτρονικές συσκευές από ένα κεραυνικό πλήγμα. Το αλεξικέραυνο θα έχει δικό του ανεξάρτητο σύστημα γείωσης από το ήδη υπάρχον στο Φ/Β σύστημα.

Στο φωτοβολταϊκό σταθμό θα εγκατασταθεί κοινό σύστημα γείωσης για όλους τους σκοπούς (λειτουργίας, προστασίας από σφάλματα και αντικεραυνικής προστασίας). Η γείωση του φωτοβολταϊκού σταθμού θα αποτελείται από το σύστημα γείωσης του φωτοβολταϊκού πάρκου (θεμελιακή γείωση) και από το σύστημα γείωσης του γενικού πίνακα. Τα δύο υποσυστήματα συνδέονται με γυμνό αγωγό γείωσης. Οι ακριβείς διαστάσεις των αγωγών γείωσης του φωτοβολταϊκού σταθμού θα προκύψουν μετά από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η αντίσταση γείωσης του Φ/Β πάρκου θα είναι μικρότερης ή ίσης του 1Ω.

Η επιλογή και εγκατάσταση του υλικού των διατάξεων γείωσης πρέπει να εξασφαλίζουν ότι:

- Η τιμή της αντίστασης γείωσης θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις προστασίας και λειτουργίας της εγκατάστασης και θα διατηρεί συνεχώς αυτή την ιδιότητα
- Τα ρεύματα σφάλματος προς τη γη και τα ρεύματα διαρροής προς γη θα μπορούν να κυκλοφορούν χωρίς να δημιουργείται κίνδυνος, ιδιαίτερα από τις θερμικές θερμομηχανικές και ηλεκτρομηχανικές καταπονήσεις
- Είναι επαρκώς στιβαρής κατασκευής ή έχουν κατάλληλη πρόσθετη μηχανική προστασία, ώστε να αντέχουν στις αναμενόμενες εξωτερικές συνθήκες
- Πρέπει να λαμβάνονται προληπτικά μέτρα έναντι των κινδύνων βλαβών άλλων μεταλλικών μερών από ηλεκτρόλυση
- Για τον σχεδιασμό των διατάξεων γείωσης πρέπει να λαμβάνεται η ενδεχόμενη αύξηση της αντίστασης γείωσης εξαιτίας της διάβρωσης

Ένας από τους στόχους του συστήματος γείωσης των φωτοβολταϊκών πάρκων αλλά και όλων των συστημάτων γείωσης, είναι η προστασία του ανθρώπου που βρίσκεται στην περιοχή της γείωσης. Πιθανές καταστάσεις κινδύνου είναι οι παρακάτω:

- Μεγάλο ρεύμα σφάλματος προς γη σε σχέση με το σύστημα γείωσης και την αντίστασή του προς άπειρη γη.
- Τέτοια αντίσταση ειδική εδάφους και κατανομή ρευμάτων σφάλματος ώστε να εμφανίζονται μεγάλες διαφορές δυναμικού στην επιφάνεια.
- Παρουσία ανθρώπου σε τέτοια θέση ώστε το σώμα του να γεφυρώνει σημεία με μεγάλη διαφορά δυναμικού.
- Απουσία ικανής αντίστασης σε επαφή με τον άνθρωπο, που να περιορίζει το ρεύμα που διέρχεται από το σώμα του στις προηγούμενες περιπτώσεις.
- Διάρκεια ροής του ρεύματος σφάλματος μέσα από το σώμα τέτοια ώστε να προκαλεί σωματικές βλάβες ή θάνατο.

## 5.1. Διατάξεις γείωσης

Σκοπός της γείωσης προστασίας είναι να μηδενιστεί η πιθανότητα να τεθεί υπό κατάσταση ηλεκτρικού δυναμικού οποιαδήποτε αγωγή επιφάνεια με την οποία δύναται να έρθει σε επαφή ο άνθρωπος. Δημιουργώντας μια κατασκευή στην οποία όλες οι εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα επιφάνειες είναι συνδεδεμένες έμμεσα ή άμεσα με το σύστημα γείωσης απομακρύνουμε τον κίνδυνο ατυχήματος. Για τον λόγο αυτό όλες οι εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα κατασκευές οι οποίες είναι αγωγίμες θα συνδεθούν με απόληξη γείωσης.

Υπάρχουν **τριών ειδών γειώσεις**, ανάλογα με τη χρήση τους.

- Γείωση λειτουργίας : είναι η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους και γειώνεται ένα ενεργό σημείο του κυκλώματος καθώς και ο ουδέτερος αγωγός (άμεση και έμμεση).
- Γείωση προστασίας : είναι η γείωση ενός μεταλλικού μέρους που δεν είναι στοιχείο ενεργού κυκλώματος π.χ γειώνονται οι μεταλλικές βάσεις στήριξης των φωτοβολταϊκών γεννητριών.
- Γείωση του συστήματος της αντικεραυνικής προστασίας : είναι η ανοιχτή ή συνεχής γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Οι γειώσεις αυτές διοχετεύουν το ρεύμα των κεραυνών προς τη γη. Οι ανοιχτές γειώσεις μειώνουν την ηλεκτροχημική διάβρωση.

### 5.1.1. Γείωση Λειτουργίας

Γείωση λειτουργίας: είναι η γείωση ενός σημείου ενεργού κυκλώματος και πραγματοποιείται για την αποφυγή υπερτάσεων. Αυτή διακρίνεται σε:

**Άμεση**, εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση εκτός της αντίστασης γείωσης.  
**Έμμεση**, όταν εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Η περίπτωση της ανοικτής γείωσης, δε συμπεριλαμβάνεται στις γειώσεις λειτουργίας.

### 5.1.2. Γείωση Προστασίας

Η γείωση προστασίας μπορεί να εφαρμοστεί με τρεις τρόπους:

**Άμεση Γείωση**: όλες οι εκτεθειμένες στην ατμόσφαιρα κατασκευές οι οποίες είναι αγωγίμες συνδέονται μέσω του αγωγού γείωσης (ή αγωγού προστασίας) απευθείας με τη γη (δηλαδή το ηλεκτρόδιο γείωσης). Οι μεταλλικές επιφάνειες της ίδιας σειράς είναι ισοδυναμικά συνδεδεμένες, ενώ όλες οι σειρές διασυνδέονται με αγωγό διατομής 1x50 mm<sup>2</sup> (κιτρινοπράσινο) προκειμένου να διασφαλιστεί η ισοδυναμική γείωση μεταξύ όλων των σειρών του φωτοβολταϊκού. Τα πάνελ θα είναι και αυτά συνδεδεμένα από κατάλληλη οπή και μέσω αγωγού διατομής 1x6mm<sup>2</sup>(κιτρινοπράσινο) με τις μεταλλικές βάσεις. Οι μεταλλικές σχάρες μέσα στις οποίες θα οδεύουν τα καλώδια είναι συνδεδεμένες και αυτές με την ισοδυναμική γείωση των σειρών του πάρκου μέσω αγωγού διατομής 1x6mm<sup>2</sup> (κιτρινοπράσινο). Η μπάρα γείωσης του κεντρικού πίνακα, οι απαγωγείς κρουστικών υπερτάσεων εντός αυτού, καθώς επίσης και η ισοδυναμική γείωση των σειρών του φωτοβολταϊκού θα συνδεθούν με ένα τρίγωνο γείωσης που κατασκευάζεται δίπλα στο κτίριο μέσω αγωγού διατομής 1x50 mm<sup>2</sup>. Στην περίμετρο της κάθε στέγης τοποθετείται

συλλεκτήριο σύστημα συλλογής και καθόδου άμεσων κεραυνικών πληγμάτων αποτελούμενο από χαλύβδινους αγωγούς διατομής Φ10 και αγωγούς καθόδου εγκατεστημένους στο κάθετο τμήμα του κτιρίου και οι οποίοι θα καταλήγουν στο σύστημα γείωσης του φωτοβολταϊκού.

**Ουδετέρωση:** Σύνδεση του αγωγού γείωσης με τον ουδέτερο που γίνεται μέσα στον μετρητή και μόνο από τη ΔΕΗ. Από αυτό το σημείο ξεκινάει ο αγωγός γείωσης που συνδέεται με το ηλεκτρόδιο γείωσης.

**Γείωση με Διακόπτη Διαφυγής Έντασης:** όταν για οποιοδήποτε λόγο προκληθεί διαρροή έντασης προς τη γη προκαλείται διακοπή της γραμμής.

### 5.1.3. Γείωση του Συστήματος Αντικεραυνικής Προστασίας (Σ.Α.Π).



*Εικόνα 5.1. Αλεξικέραυνο*

Σε φωτοβολταϊκού πάρκο θα τοποθετηθεί αλεξικεύρανο ενισχυμένου ιονισμού Tesla-S .Η κεφαλή του αλεξικεύρανο φέρει διμερή ακίδα σύλληψης του κεραυνού από ειδικό κράμα ορείχαλκου, με διάκενο ασφαλείας. Διαθέτει μεταλλικό δίσκο συλλογής (αγωγή προς την ακίδα και προς το περίβλημα της κεφαλής), ο οποίος ζευγνύετε χωρητικά προς το ηλεκτρικό πεδίο κακοκαιρίας και φορτίζεται επαγωγικά με την αύξηση του ανωτέρω πεδίου. Η κεφαλή περιλαμβάνει ειδικό μεταλλάκτη παραγωγής υψηλής τάσης ιονισμού, μέσω της φυσικής αστάθειας τόξου (πλάσματος) και με την βοήθεια μαγνητικού πεδίου, με χαρακτηριστικό γνώρισμα την εν σειρά σύνδεση σπινθηριστική με πηνίο και πυκνωτή.

Στον χώρο γύρω από την ακίδα του αλεξικευράνου , δημιουργείται ισχυρότατος ιονισμός.

Το αλεξικεύρανο Tesla-S λειτουργεί όταν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες κεραυνοφόρου πεδίου, φαινόμενο που διαρκεί μερικά λεπτά της ώρας. Η κεφαλή φέρει διάταξη ασφαλείας για την προστασία των κυκλωμάτων της, κατά τη στιγμή της πτώσης και σύλληψης κεραυνού.

Η κεφαλή Tesla-S θα αποτελείται από :

- **Τον ιστό στήριξης**, (ιστός τηλεσκοπικός , ανακλινόμενος ή μη) από χαλύβδινους σωλήνες βαρέου τύπου με συγκολλήσεις βαθειάς διεισδύσης (MIG-MAG), ακόμα φέρει επίτονα με εντατήρες
- **Αγωγός καθόδου**, γυμνός χάλκινος πολύκλωνος ηλεκτρολυτικός αγωγός διατομής 50mm<sup>2</sup>
- **Ηλεκτρόδια γείωσης**, τύπου χαλύβδινα επιχαλωμένα διαμέτρου 16mm και μήκους 1,6 μέτρων

- Σφικτήρες αγωγού – ηλεκτροδίο
- Λυόμενο σύνδεσμο ελέγχου γείωσης, στον αγωγό καθόδου
- Κάρτα μαγνητικής καταγραφής κεραυνικών ρευμάτων, OBO BETTERMANN



*Εικόνα 5.2. Αλεξικέραυνο τύπου Tesla-S*

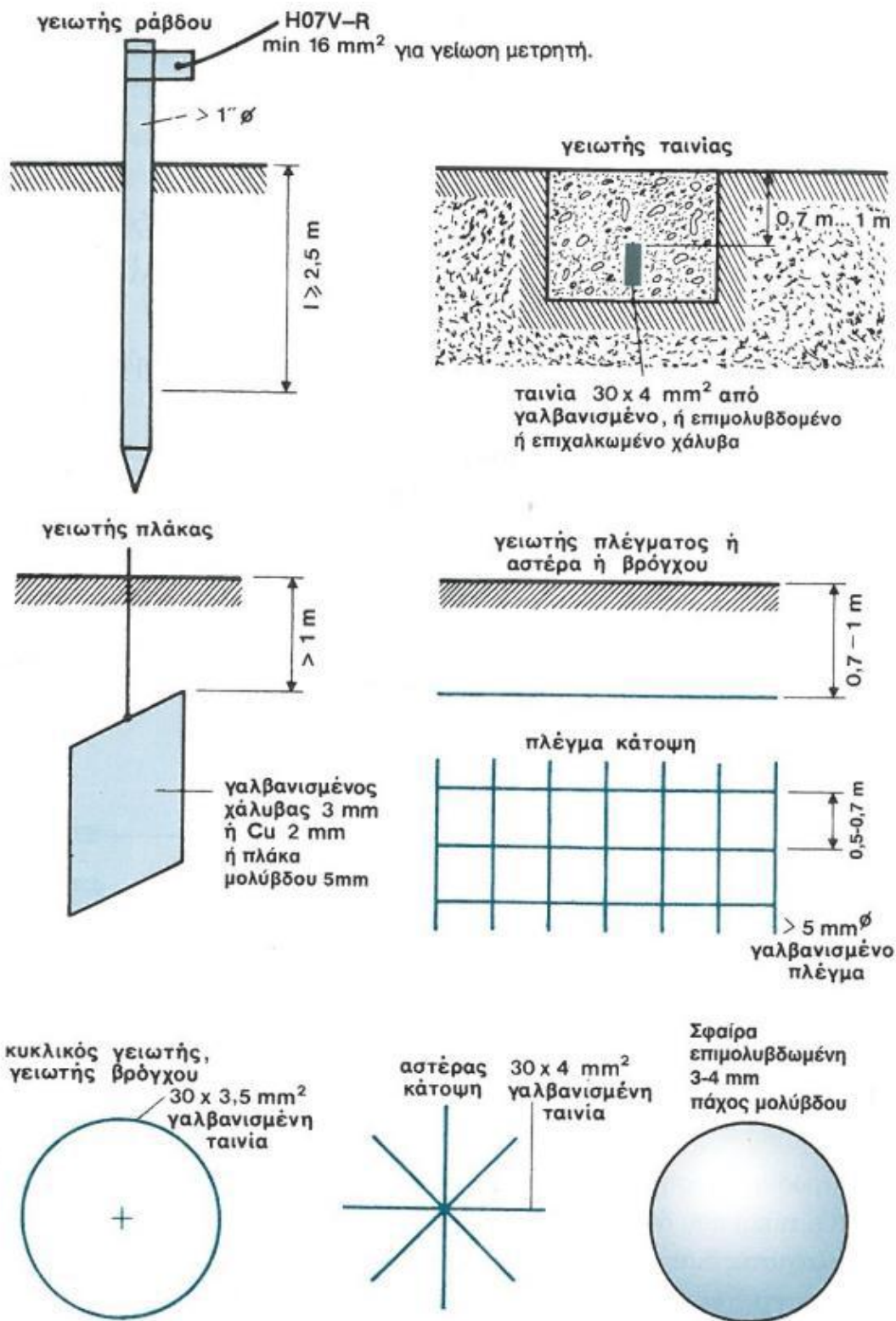
Η γείωση του αλεξικέραυνου θα αποτελείται από ανεξάρτητο τρίγωνο γείωσης από ηλεκτρόδια χαλύβδινα επιχαλκομένα με ορειχάλκινους σφικτήρες αγωγού-ηλεκτροδίου που δεν θα συνδέεται με την θεμελιακή. Θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την επίτευξη χαμηλής ωμικής αντίστασης.

Για την επιλογή του ύψους βασικός παράγοντας είναι η θέση εγκατάστασης του αλεξικέραυνου, βάσει του σχεδίου χωροθέτησης του Φ/Β Σταθμού. Η επιλογή του σημείου γίνεται με γνώμονα μη σκίασης των Φ/Β γεννητριών και την πλήρη προστασία του ΦΒ Σταθμού από κεραυνικό πλήγμα.



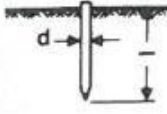
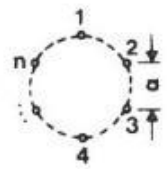
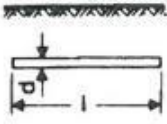
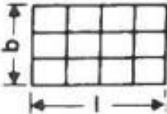
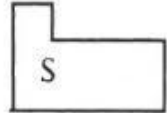

## **5.2. Είδη ηλεκτροδίων γείωσης**

Αρχικά, ως ηλεκτρόδιο γείωσης θεωρείται ένας αγωγός τοποθετημένος στη γη, που χρησιμοποιείται για να συλλέγει ή/και να διαχέει το ηλεκτρικό ρεύμα του σφάλματος στην γη. Τα ηλεκτρόδια γείωσης ή γειωτές έχουν διάφορες μορφές όπως ράβδου, ταινίας πλέγματος, πλάκας κτλ. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται κάποιες από τις μορφές τους.

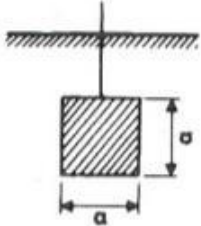
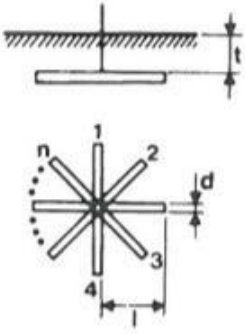
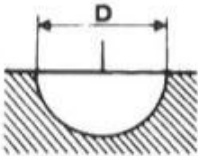
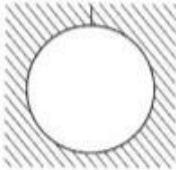


Σχήμα 5.1 μορφές γειωτών

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι τύποι των αντιστάσεων που παρουσιάζουν οι παραπάνω γειωτές σε μορφή πίνακα και ακολουθεί περιγραφή κάποιων γειωτών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός συστήματος γείωσης φωτοβολταϊκού πάρκου.

α/α		Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
1		Πάσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2\pi l_{\text{eff}}} \cdot \ln \frac{4l_{\text{eff}}}{d}$ $l_{\text{eff}} \approx 1-0,5 \text{ m}$	$R_A \approx \frac{\rho}{l_{\text{eff}}}$
2		Πολύγωνο πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \frac{1}{n} R_{A1}$ $a/l=3: n=5: k \approx 1,2$ $R_{A1} =$ αντίσταση ενός πασάλου	μπορεί να τεθεί $k=(1 \dots 1,5)$ , ειδικά για $n=10: k \approx 1,25$
3		Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}$	$R_A \approx \frac{2\rho}{l}$
4		Πλέγμα σε βάθος $0,5-1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{lg}$ $lg =$ συνολικό μήκος αγωγού	$R_A \approx \frac{\rho}{2D}$
5		Θεμελιακή γείωση, $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} S}$	—	$R_A = \frac{2}{\pi} \frac{\rho}{D}$
6		κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R_A = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \cdot \ln \frac{8D}{d} \cdot \left(1 + \frac{\ln(2D)/t}{\ln(8D/d)}\right)$	$R_A = \frac{2\rho}{\pi D}$ 1)

1) Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος  $D=0,33 \cdot U$ , όπου  $U =$  μήκος αγωγού.

7		γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m <sup>2</sup> ]	—	$R = \frac{\rho}{4,5a}$ <sup>2)</sup>
8		n = 5 n = 4 n = 3 n = 2	$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,27td}$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,25td}$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,22td}$ $R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{0,09td}$	— — — —
9		ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi D}$ <sup>3)</sup>	—
10		σφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{2\pi D}$	—

2) Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε:  $a = \sqrt{S}$ , όπου S = επιφάνεια.

3) Για ένα γειωτή όγκου V, ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με  $D = 1,57 \sqrt[3]{V}$ .

Πίνακας 5.1. Αντιστάσεις γειωτών

### Γειωτής ράβδου

Είναι ένας σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος καρφώνεται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20°) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος π.χ. 2.5m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους. Η αντίσταση του γειωτή δεν εξαρτάται ιδιαίτερα από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Σε περίπτωση που το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.

### **Γειωτής ταινίας**

Είναι ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους συνήθως 0.7-1.0m ώστε να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχάλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμο ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση οπότε έχουμε γειωτή βρόγχο. Η αντίσταση είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας, ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δε συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, γιατί διαβρώνεται γρήγορα. Έτσι, πρέπει να αποφεύγονται χάλκινα ή επιχάλκωμένα ηλεκτρόδια ειδικά σε περιοχές που υπάρχουν χαλύβδινοι σωλήνες.

### **Γειωτής πλέγματος**

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 10x20m, τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0.5-1.0m. Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Ανοίγματα μεγαλύτερα από 0.7m έχουν μεγαλύτερες βηματικές τάσεις από τα ανοίγματα των 0.5m.

### **Θεμελιακή γείωση**

Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση γίνεται στη βάση των εξωτερικών τοίχων αποτελώντας ένα κλειστό βρόχο. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων συνήθως είναι υγρό όλο το έτος, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των  $2\Omega$  ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες. Το ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετείται στο περιμετρικό θεμέλιο του κτιρίου. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μόνωση κατά της υγρασίας πρέπει να τοποθετηθεί προς την πλευρά του εδάφους. Για διαστάσεις κτιρίων μεγαλύτερες από 10m, τοποθετούνται και εγκάρσιες συνδέσεις ώστε κανένα σημείο να μην απέχει περισσότερο από 10m από τον περιμετρικό γειωτή.

### **Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης**

Οι διατομές των αγωγών που οδηγούν από τις εγκαταστάσεις στους γειωτές, φέρουν ρεύματα μόνο σε σφάλματα. Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά με 30cm μόνωση μέσα και 30cm έξω από το έδαφος.

### **Επιφανειακοί και βαθείςγειωτές**

Οι γειωτές ανάλογα με το βάθος τους, χωρίζονται σε επιφανειακούς όπως οι γειωτές ταινίας, πλέγματος και οι ακτινικοί και σε βαθείς γειωτές, όπως οι ράβδοι γείωσης. Στους βαθείς γειωτές, η αντίσταση μεταβάλλεται λιγότερο με τον χρόνο σε σχέση με τους επιφανειακούς, γιατί η θερμοκρασία και η υγρασία του εδάφους δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη.

Κάθε στοιχείο του συστήματος γείωσης, συμπεριλαμβανομένων των αγωγών πλέγματος, των συνδέσεων των ηλεκτροδίων κτλ πρέπει να σχεδιαστεί σύμφωνα με τον επιθυμητό χρόνο ζωής της εγκατάστασης. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει είναι τα εξής:

- Επαρκή αγωγιμότητα ώστε να μην συνεισφέρει σε αυξομειώσεις της τάσης.
- Αντοχή στην τήξη και σε μηχανικές καταπονήσεις στη χειρότερη περίπτωση ρεύματος σφάλματος και διάρκειας αυτού.
- Αντοχή σε διάφορες μορφές μηχανικών καταπονήσεων.

- Να διατηρεί τις ιδιότητές του όταν εκτίθεται σε συνθήκες που προκαλούν διάβρωση και να αντέχει σε δυσμενείς φυσικές συνθήκες.

Τα υλικά τα οποία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των αγωγών παρατίθενται παρακάτω:

- Χαλκός: χρησιμοποιείται πολύ συχνά καθώς παρουσιάζει μεγάλη αγωγιμότητα και υψηλή αντοχή σε διάβρωση μέσα στο έδαφος.
- Χάλυβας επιχαλκωμένος: σε συνδυασμό με τον χαλκό, αποτελεί καλή λύση κυρίως για ράβδους θαμμένες στο έδαφος και λιγότερο συχνά για το πλέγμα.
- Αλουμίνιο: σπάνια τοποθετείται σε πλέγματα γιατί διαβρώνεται εύκολα από κάποια είδη εδάφους και από εναλλασσόμενα ρεύματα. Επιπλέον το διαβρωμένο κομμάτι του δεν επιτρέπει την ροή του ρεύματος.

Για την επιλογή της διατομής των αγωγών για το σύστημα γείωσης πρέπει να ελεγχθεί η θερμοκρασία που αναπτύσσεται πάνω στους αγωγούς, το είδος του ρεύματος και κάποια χαρακτηριστικά του υλικού τους.

### 5.3. Η τεχνική της θεμελιακής γείωσης

Όλες οι βάσεις και τα μεταλλικά μέρη επί οροφής, πρέπει να είναι ισοδυναμικά συνδεδεμένα με την χρήση αγωγού κατάλληλης διατομής (Φ10). Στα 2 αντιδιαμετρικά άκρα του πάρκου, (5-A) πλευρά του πάρκου, εγκαθίστανται κάθοδοι, οι οποίοι οδηγούν σε 2 τρίγωνα γείωσης τα οποία εξασφαλίζουν την σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων με την Γη και παρέχουν ένα σταθερό σύστημα γείωσης προστασίας και λειτουργίας. Τρίγωνα Γείωσης επίσης τοποθετούνται πλησίον του ερμαρίου της ΔΕΗ καθώς και ένα επιπλέον στην ΝΔ πλευρά του χώρου. Και στις 2 περιπτώσεις το τρίγωνο βρίσκεται σε βάθος 1μ από την επιφάνεια της γης, ενώ αποτελείται από 3 ηλεκτρόδια Φ20x150cm τοποθετημένα κάθετα στην γη, σχηματίζοντας ισόπλευρο τρίγωνο πλευράς 2.5μ, το οποίο συμπληρώνεται με λάμα 30x3 από θερμογαλβανισμένο χάλυβα. Τα δυο ηλεκτρόδια διατρέχει χαλκαγωγός διατομής 50 mm<sup>2</sup> ο οποίος και συνδέεται αφενός στην γείωση των απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων, αφετέρου στον εξοπλισμό της ΔΕΗ. Ο δεύτερος αγωγός, παραμένει συνδεδεμένος σε αναμονή, παρέχοντας έτσι ασφάλεια σε περίπτωση αστοχίας. Και τα δύο τρίγωνα παραμένουν συνδεδεμένα με το υπόλοιπο σύστημα θεμελιακής γείωσης παρέχοντας έτσι ένα πλήρες και ισοδυναμικό σύστημα γείωσης και προστασίας του φωτοβολταϊκού. Πάνω από την θεμελιακή γείωση θα τοποθετηθεί αργιλώδες χώμα, κοσκινισμένο σε ύψος 0,3m. Όλες οι εκτεθειμένες μεταλλικές επιφάνειες του φωτοβολταϊκού συστήματος θα γειωθούν άμεσα ενώ η σχεδίαση, εγκατάσταση και τα υλικά θα είναι σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

### 5.4. Αντίσταση γείωσης

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, όλα τα γειωμένα στοιχεία βρίσκονται στο δυναμικό της γης, που είναι σχεδόν μηδενικό. Αυτό είναι το δυναμικό ενός γειωμένου ουδέτερου αγωγού που είναι σχεδόν ίδιο με το δυναμικό της άπειρης γης. Κατά τη διάρκεια όμως ενός σφάλματος γείωσης, το τμήμα του ρεύματος σφάλματος που διοχετεύεται μέσω του συστήματος γείωσης στη γη, προκαλεί την ανύψωση του δυναμικού του συστήματος. Το μέγιστο ηλεκτρικό δυναμικό που μπορεί να αποκτήσει το σύστημα γείωσης σε σχέση με το δυναμικό της άπειρης γης, ονομάζεται GPR (ανύψωση του δυναμικού της γης). Η τιμή του είναι ίση με

$$GPR = I_g \cdot R_g \quad (5.1)$$

Όπου:

$I_g$  είναι το μέγιστο ρεύμα πλέγματος σε Α

$R_g$  είναι η αντίσταση γείωσης σε Ω

Παρατηρείται επομένως, εξάρτηση μεταξύ της τιμής της αντίστασης γείωσης ενός συστήματος και της ανύψωσης δυναμικού της γης. Συγκεκριμένα, επιδιώκεται μικρή τιμή της αντίστασης (<1Ω για υποσταθμούς), ώστε να αυξηθεί κατά το δυνατόν λιγότερο το δυναμικό της γης σε περίπτωση σφάλματος.

Για σύστημα γείωσης πλέγματος χωρίς ράβδους και για ομοιογενές έδαφος η αντίσταση γείωσης δίνεται από:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L_r} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (5.2)$$

Όπου:

$L_T$  το συνολικό μήκος των αγωγών γείωσης σε m

A το εμβαδό της επιφάνειας που καταλαμβάνει το πλέγμα γείωσης σε  $m^2$

h το βάθος όπου είναι τοποθετημένο το πλέγμα γείωσης σε m

Στην περίπτωση γείωσης συστήματος που περιλαμβάνει πλέγμα αλλά και κάθετες ράβδους η αντίσταση γείωσης δίνεται από την

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 + 2R_m} \quad (5.3)$$

Όπου:

$R_1$  η αντίσταση γείωσης των αγωγών πλέγματος σε  $\Omega$

$R_2$  η αντίσταση γείωσης των ράβδων σε  $\Omega$

$R_m$  η αντίσταση μεταξύ των αγωγών πλέγματος και των ράβδων σε  $\Omega$

Συχνά οι ράβδοι ενός συστήματος γείωσης όπως αυτοί που στηρίζουν τις βάσεις φωτοβολταϊκών πάνελ, είναι ενσωματωμένες σε μπετόν. Το μπετόν επειδή είναι υγροσκοπικό απορροφά την υγρασία του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο όταν μπλοκ μπετού είναι θαμμένα στο έδαφος, συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί με ειδική αντίσταση συνήθως 30-400 $\Omega$ m. Το γεγονός αυτό ενδιαφέρει ειδικά στις περιπτώσεις όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους έχει μεσαία ή μεγάλη τιμή, καθώς μια μεταλλική ράβδος ενσωματωμένη σε μπετόν παρουσιάζει μικρότερη αντίσταση από ένα όμοιο ηλεκτρόδιο θαμμένο απευθείας στο έδαφος.

Η χρήση του οπλισμού των θεμελίων στο σύστημα γείωσης, μπορεί να αποτελέσει ταυτόχρονα και μειονέκτημα για τους ακόλουθους λόγους:

- Από την μία πλευρά δεν είναι πρακτική η σχεδίαση θεμελίων για κατασκευές όπου οι ράβδοι οπλισμού δεν είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένοι με τα μεταλλικά μέρη της κατασκευής. Ακόμη και αν πραγματοποιηθεί με εξαιρετικά μεγάλη προσοχή η τοποθέτηση του κοχλία αγκύρωσης ώστε να αποφευχθεί επαφή των μετάλλων, το μπετόν ως ημιαγωγός μπορεί να δημιουργήσει αυτή την ηλεκτρική σύνδεση.
- Από την άλλη πλευρά έστω και μια μικρή παρουσία DC συνιστώσας ρεύματος μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του μεταλλικού οπλισμού. Επίσης παρόλο που η παρουσία ac ρεύματος δεν προκαλεί διάβρωση, ένα μόνο ποσοστό της τάξης του 0.01% του ac ρεύματος στην διεπαφή της χαλύβδινης μπάρας και του μπετόν μπορεί να ανορθωθεί και να οδηγήσει σε διάβρωση.
- Είναι δυνατό να καταστραφεί το μπετόν είτε από το προηγούμενο φαινόμενο καθώς ο διαβρωμένος χάλυβας καταλαμβάνει 2.2 φορές μεγαλύτερο όγκο από τον φυσιολογικό, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο πιέσεις μεγαλύτερες των 35MPa, είτε από την διέλευση πολύ μεγάλου ρεύματος που εξατμίζει την υγρασία του μπετόν απότομα.

Υπάρχει ένα κατώφλι δυναμικού περίπου 60V, που αφορά την διάβρωση λόγω της DC συνιστώσας ρεύματος. Κάτω από αυτό το όριο δεν εμφανίζεται διάβρωση. Προκειμένου να βρεθεί το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να διαρρεύσει ηλεκτρόδια γείωσης που βρίσκονται μέσα στο μπετόν, έχουν γίνει πειράματα από τους Bogajewski, Dawalibi, Gervais και Mukhedkar [21], από τους Dick και Holliday καθώς και από τους Miller, Hart και Brown. Το βραχυχρόνιο ρεύμα ICE που μπορεί



να διαρρεύσει ηλεκτρόδια γείωσης που βρίσκονται μέσα σε μπετόν, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του Ollendorff για ένα ρεύμα που μπορεί να διαρρέει συνεχώς, πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή 1.4.

Τέλος, κατά την σχεδίαση συστήματος γείωσης με ράβδους ενσωματωμένες σε μπετόν πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι τόσο το ρεύμα που διαρρέει τα ηλεκτρόδια σε περίπτωση σφάλματος όσο και το τυχόν συνεχές ρεύμα που μπορεί να τα διαρρέει, διατηρούνται σε επιτρεπτά επίπεδα. Αυτό είναι εφικτό, όταν πολλά ηλεκτρόδια άγουν το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος σφάλματος.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### «Αντικεραυνική προστασία»

Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις λόγω της θέσης τους στις στέγες των σπιτιών και εξαιτίας της μεγάλης έκτασης της οποίας καλύπτουν, είναι περισσότερο ευάλωτες στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα και στις εισερχόμενες υπερτάσεις από της συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κίνδυνος από άμεσο κεραυνικό πλήγμα στις στέγες δεν αυξάνεται όμως με την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών. Η αναγκαιότητα εφαρμογής προστασίας από υπερτάσεις όμως είναι πλέον απαραίτητη σύμφωνα με το ΦΕΚ470 (5 Μαρτίου 2004) Άρθρα 3 έως και 6, όπου τα φαινόμενα εκδήλωσης υπερτάσεων, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν σύμφωνα με τα ισχύοντα εθνικά και ευρωπαϊκά πρότυπα, τα οποία είναι τα πρότυπα σειράς ΕΛΟΤ EN 61643.

Αν και η πιθανότητα να χτυπήσει κεραυνός την φ/β εγκατάσταση είναι αρκετά μικρή εντούτοις η ζημιά που μπορεί να προκαλέσει ένα τέτοιο ενδεχόμενο είναι πολύ μεγάλη στα φ/β πλαίσια και τον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό (inverters, καλώδια, συστήματα ελέγχου κλπ.).

Στόχος είναι να προστατευτούν οι φ/β συστοιχίες από μια ενδεχόμενη φωτιά εξαιτίας ενός άμεσου χτυπήματος από κεραυνό και η προστασία του ηλεκτρονικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού από έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό που μπορεί να προκληθεί από τον κεραυνό. Για να προστατευτεί η εγκατάσταση στον χώρο που καταλαμβάνουν τα φ/β πλαίσια πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Ανάλογα με τον τύπο της αντικεραυνικής προστασίας και το ύψος των απαιτούμενων ράβδων – αλεξικέραυνων, καθορίζεται η ποσότητά τους καθώς και η απόστασή τους. Για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας για αντικεραυνική προστασία τύπου III ( υπάρχουν συνολικά τέσσερις τύποι προστασίας και ξεκινώντας από την προστασία τύπου I, που προσφέρει τη μέγιστη ασφάλεια καταλήγουμε στην τύπου IV, που προσφέρει συγκριτικά με τις υπόλοιπες τη λιγότερη ασφάλεια) κατά VDE V 0185-3.

Για την υλοποίηση της αντικεραυνικής προστασίας χρησιμοποιήθηκαν ακίδες σύλληψης και κυλινδρικοί μεταλλικοί δοκοί για τη στήριξή τους, οι οποίοι θα εδράζονται σε μια βάση από μπετόν και επιπλέον επειδή έχουν μεγάλο ύψος, θα στηρίζονται, όπου είναι απαραίτητο, από τις βάσεις στήριξης των συστοιχιών μέσω ηλεκτρομονωτικού υλικού.

Ανάμεσα σε μια εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας και τον μεταλλικό και ηλεκτρολογικό εξοπλισμό της κατασκευής μπορεί να δημιουργηθεί μη ελεγχόμενη διαπήδηση ηλεκτρικού σπινθήρα εάν δεν υπάρχει μεταξύ τους η απαραίτητη απόσταση ασφαλείας.

#### 6.1. Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας

Κατά την δημιουργία και εκδήλωση ενός κεραυνού ή μιας αστραπής δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις σε όλες τις γειτονικές, στο σημείο πτώσης, αγωγίμες επιφάνειες που βρίσκονται στην γη. Το φαινόμενο λειτουργεί ακριβώς όπως ο πυκνωτής, δηλαδή ως φορτισμένη επιφάνεια θεωρείται αυτή του οχετού του κεραυνού ή του νέφους και ως αφόρτιστες αυτές όλων των αγωγίμων επιφανειών. Αυτές οι επιδράσεις, συνήθως μεταφέρονται μέσω των καλωδίων των ισχυρών και ασθενών ρευμάτων και μέσω των αγωγών καθόδου και γείωσης, με την

μορφή κρουστικών τάσεων (ηλεκτρομαγνητικά κύματα) και συχνά καταστρέφουν ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές, δημιουργούν πυρκαγιές ή επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Ενδεικτικά, οι τιμές των κρουστικών υπερτάσεων είναι τέτοιες ώστε να μπορούν να δημιουργήσουν κρουστικά ρεύματα με πλάτος από λίγα Ampere έως 200.000 Ampere (200kA). Όσο πιο κοντά βρίσκεται μια εγκατάσταση στο σημείο πτώσης του κεραυνού τόσο εντονότερα είναι τα φαινόμενα, αφού το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξασθενεί ανάλογα του αντιστρόφου του τετραγώνου της απόστασης. Ύστερα από εκτενείς έρευνες έχει βρεθεί ότι η επικίνδυνη απόσταση από το σημείο πτώσης ενός κεραυνού μέχρι το σημείο που δημιουργούνται καταστροφικές επαγόμενες υπερτάσεις για τις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές είναι περίπου το 1,5 χιλιόμετρο. Ο ΕΛΟΤ έχει δημοσιεύσει τον «ισοκεραυνικό» χάρτη της Ελλάδας, όπου αναφέρεται ο μέσος όρος των ημερών καταιγίδων ανά έτος και τετραγωνικό χιλιόμετρο για όλη την επικράτεια. Ο μέσος όρος κυμαίνεται από 20 έως 100. Δεδομένου ότι κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας δημιουργούνται αρκετές κεραυνοπτώσεις ή αστραπές, ο κίνδυνος από υπερτάσεις ανά έτος, που προκύπτει από το γινόμενο των κεραυνοπτώσεων με τον μέσο όρο καταιγίδων, είναι πολύ μεγαλύτερος.

## 6.2. Χαρακτηριστικά κεραυνικού ρεύματος

Μία κεραυνική εκκένωση χαρακτηρίζεται από δύο κατηγορίες παραμέτρων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετικές με την ιδιοσυστασία της εκκένωσης, τη διάρκεια των ρευμάτων και τα διαστήματα όπου το ρεύμα είναι μηδενικό κατά την εκδήλωση πολλαπλών εκκενώσεων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει παραμέτρους σχετιζόμενες με τα κεραυνικά ρεύματα, των οποίων η διάρκεια είναι μικρότερη από λίγα ms. Οι σημαντικότερες παράμετροι είναι οι ακόλουθες:

1. Η μέγιστη τιμή ρεύματος, σαν συνέπεια της οποίας έχουμε υπερπήδηση μονωτήρων, λόγω ανύψωσης δυναμικού του γειωμένου πυλώνα.
2. Η μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος  $(di/dt)_{\max}$  καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων, δηλαδή τάσεις, που αναπτυσσόμενες λόγω χάρη σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών, μπορούν να έχουν δραματικές συνέπειες.
3. Το ολοκλήρωμα  $\int_0^{00} i(t)dt$ , δηλαδή το μεταφερόμενο φορτίο, γίνεται η αιτία τοπικής τήξης και διάτρησης μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.
4. Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος  $\int_0^{00} i^2(t)dt$ , είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

Όταν ένα αντικείμενο, όπως ένα κτίριο, μία γραμμή σε μία υπόγεια σήραγγα ή ένα αεροπλάνο που πετά, κτυπηθεί από ένα κεραυνό, το μέγεθος της καταπόνησης που θα υποστεί εξαρτάται από το ρεύμα που εκφορτίζεται μέσω αυτού. Ως εκ τούτου, από την άποψη της προστασίας από τους κεραυνούς, το ρεύμα αυτό αντιπροσωπεύει την πιο σημαντική παράμετρο της εκκένωσης του κεραυνού.

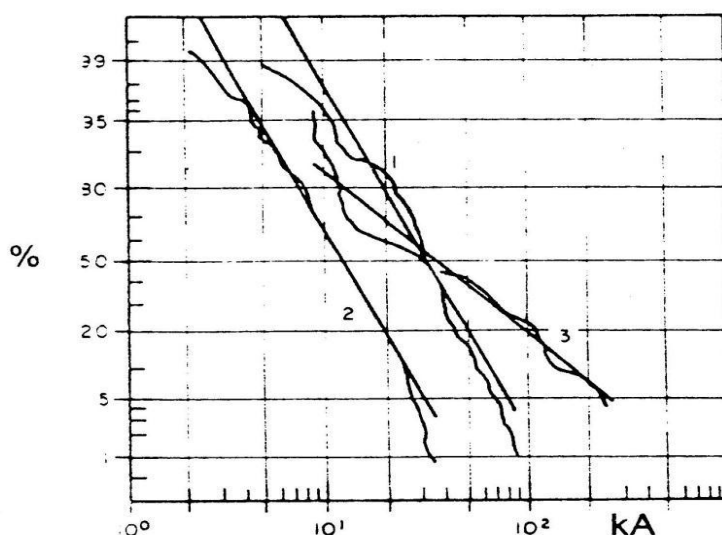
Το κύριο ρεύμα που συνοδεύει μία εκκένωση κεραυνού, οφείλεται στον οχετό επιστροφής. Το ηλεκτρικό φορτίο του κατερχόμενου οχετού εξουδετερώνεται από το αντίστοιχο ετερόσημο φορτίο της γης. Το φορτίο αυτό ρέει μέσα από τον αγωγό προεκκένωσης που έχει συνδέσει προηγουμένως το σύννεφο με τη γη. Το μέγεθος

του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά τη ροή του φορτίου αυτού εξαρτάται κατ' αρχήν από το μέγεθος του φορτίου του νέφους αλλά επίσης και από την ταχύτητα με την οποία κινείται ο οχετός επιστροφής από τον ήδη ιονισμένο δρόμο που χάραξε ο οχετός προεκκένωσης.

Για τη μέτρηση αυτού του ρεύματος αλλά και για την απόκτηση μιας αντίληψης για τη μορφή του, τα οποία θα βοηθήσουν να βρεθούν και οι άλλες σχετικές παράμετροι του κεραυνού όπως διάρκεια ροής κλπ., έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Οι παλαιότερες στηρίζονται σε μια εκτίμηση του ρεύματος η οποία γινόταν μελετώντας τα θερμικά ή μηχανικά αποτελέσματα που προκαλεί το πλήγμα του κεραυνού. Έτσι, από την τήξη λεπτών μετάλλων ή από τα ίχνη πάνω σε λεπτές μεταλλικές επιφάνειες, γινόταν εκτίμηση της συνολικής ενέργειας του κεραυνού. Επίσης, εκτίμηση του εύρους του ρεύματος γινόταν από τη σύσφιξη που προκαλεί η ροή του ρεύματος διαμέσου ενός σωλήνα.

Ένας άλλος τρόπος μέτρησης είναι η μέθοδος της μαγνητικής ζεύξης. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός ότι όταν το ρεύμα του κεραυνού διαρρέει έναν αγωγό, σχηματίζεται γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Αν τοποθετηθεί κοντά στον αγωγό ένα μαγνητικό υλικό, αυτό θα μαγνητιστεί με τη μέγιστη τιμή του πεδίου η οποία εξαρτάται από το μέγιστο ρεύμα που διέρρευσε τον αγωγό. Αν το υλικό παρουσιάζει μεγάλη υστέρηση μπορεί να μεταφερθεί στο εργαστήριο και να παρθούν οι σχετικές μετρήσεις. Τέτοια μαγνητιζόμενα υλικά τοποθετούνται συνήθως σε επαφή με τα σκέλη μεταλλικών πύργων γραμμών μεταφοράς.

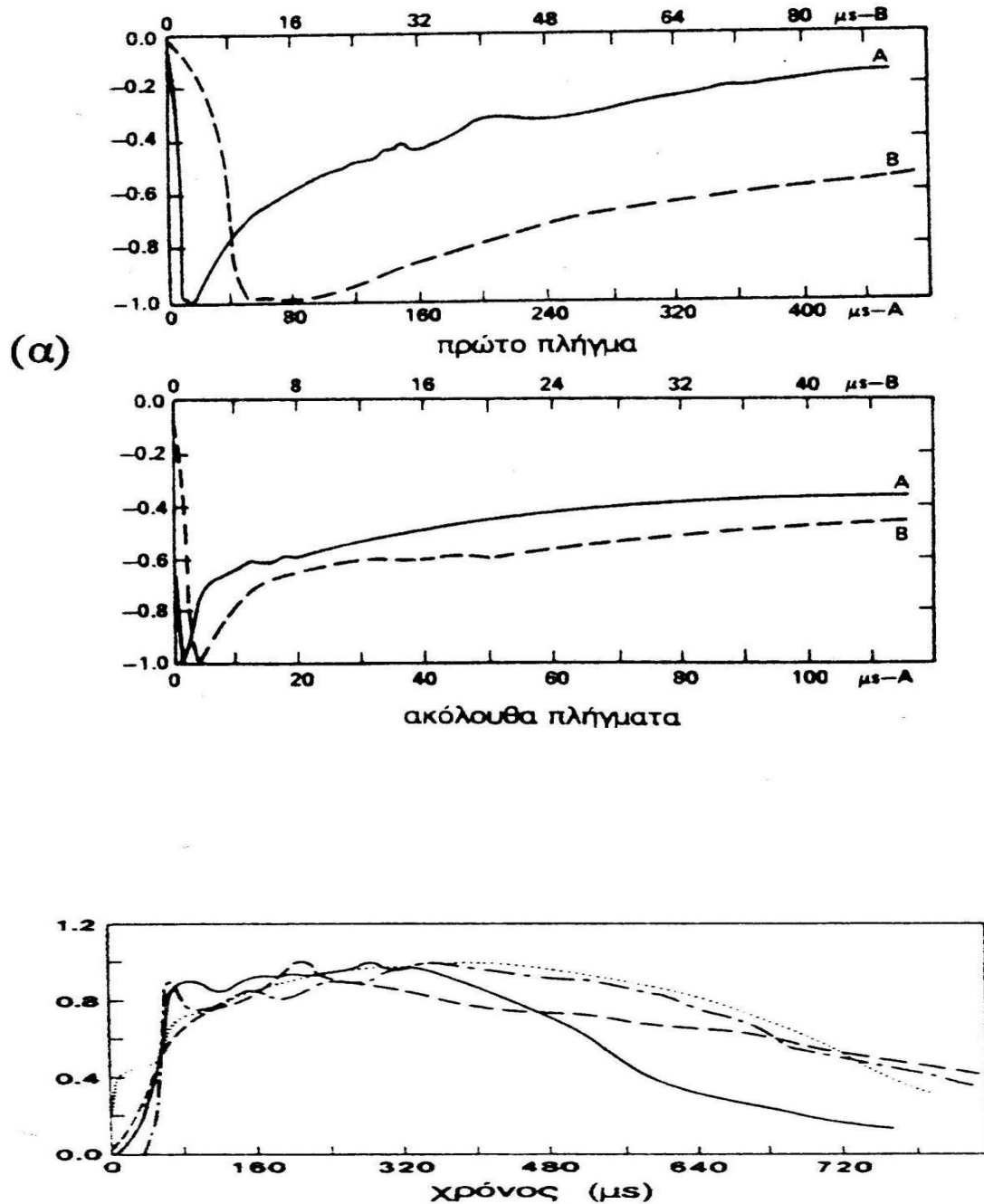
Ωστόσο, η ακρίβεια όλων αυτών των μεθόδων είναι μετριότατη γιατί πρώτον δεν μπορούν να μετρήσουν όλες τις περιοχές που εκτείνεται το ρεύμα του κεραυνού όπως φαίνεται στο Σχ.1.8 και δεύτερο γιατί μετρώντας μόνο τη μέγιστη τιμή, δε γίνεται διάκριση ανάμεσα στο ρεύμα διαφόρων εκκενώσεων ενός πολλαπλού κεραυνού. Γι' αυτούς τους λόγους, ο πλέον σύγχρονος και αποτελεσματικός τρόπος μέτρησης που χρησιμοποιείται, είναι μέσω του παλμογράφου.



Σχήμα 6.1: Κατανομή ρεύματος κεραυνών κατά Burger.

1. Πρώτη εκκένωση αρνητικών κεραυνών
2. Επόμενες εκκενώσεις αρνητικών κεραυνών
3. Θετικοί κεραυνοί

Το βασικό πρόβλημα που υπάρχει με τον παλμογράφο, είναι το ότι το φαινόμενο είναι σπάνιο και επομένως δύσκολο να ληφθούν παλμογραφήματα και συγχρόνως είναι αρκετά δαπανηρή μέθοδος. Στο Σχ. 1.9 φαίνονται τα παλμογραφήματα του ρεύματος ενός πολλαπλού αρνητικού κεραυνού και ενός θετικού.



(6)

Σχήμα 6.2: Παλμογραφήματα του ρεύματος ενός πολλαπλού αρνητικού κεραυνού (α), και ενός θετικού κεραυνού (β) (K. Berger). [1]

Από τα Σχ. 6.2 (α), (β) βγαίνουν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα. Έτσι στο Σχ. 6.2 (α) φαίνεται ότι το ρεύμα της πρώτης εκκένωσης αυξάνει γρήγορα και φθάνει στη μέγιστη τιμή κορυφής σε 10-15  $\mu\text{s}$ . Κατόπιν το ρεύμα παύει να αυξάνει και αρχίζει να μειώνεται είτε αμέσως είτε μετά από μία πλατιά κορυφή. Η διάρκεια της ουράς του ρεύματος όπου και το ρεύμα μειώνεται, είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να φτάσει τα 20% της τιμής κορυφής σε 200-300  $\mu\text{s}$ . Σε πολλαπλούς κεραυνούς, οι ακόλουθες εκκενώσεις έχουν πολύ συντομότερο μέτωπο από την πρώτη εκκένωση, φτάνοντας στην τιμή κορυφής σε 1 ή 2  $\mu\text{s}$ . Η ουρά του σχήματος του ρεύματος των ακόλουθων εκκενώσεων είναι παρόμοια με αυτή της πρώτης. Οι μέγιστες τιμές του ρεύματος των ακόλουθων εκκενώσεων είναι κατά κανόνα μικρότερες της τιμής της πρώτης.

Οι θετικοί κεραυνοί παρουσιάζουν συχνά υψηλότερες τιμές ρεύματος από τους αντίστοιχους αρνητικούς. Στο Σχ. 6.2 (β) φαίνεται ότι το μέτωπο του ρεύματος των θετικών κεραυνών διαρκεί περισσότερο από αυτό του αρνητικού ρεύματος, δηλαδή περίπου 20-50  $\mu\text{s}$ . Η ουρά του επίσης έχει μεγαλύτερη διάρκεια, περίπου 1000  $\mu\text{s}$ .

Από τα σχήματα φαίνεται πως μια ενδιαφέρουσα παράμετρος εκτός από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, είναι και η διάρκεια ροής μιας ορισμένης έντασης ρεύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διάρκεια τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που συσσωρεύεται μέσα στην αντίσταση που διαρρέει και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη η εκλυόμενη θερμότητα, αφού είναι ανάλογη του  $\int i^2 dt$ . Για το λόγο αυτό κεραυνοί με μεγάλη διάρκεια ρεύματος, έστω και αν η μέγιστη τιμή του ρεύματος δεν είναι πολύ υψηλή ονομάζονται θερμοί σε αντίθεση με άλλους που μπορεί να αναπτύσσουν μεγάλα ρεύματα μικρής διάρκειας. Οι θερμοί κεραυνοί είναι πιο επικίνδυνοι μόνον όταν προκύπτει θέμα πυρκαγιάς ή έκρηξης ενώ για τα ηλεκτρικά συστήματα πιο επικίνδυνοι είναι οι κεραυνοί με μεγάλες εντάσεις και μικρή διάρκεια.

### 6.3. Σχεδιασμός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας

Η αντικεραυνική προστασία είναι ένα σύνθετο αντικείμενο που συνδυάζει το φυσικό φαινόμενο του κεραυνού και τα μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προστασία έναντι των πληγμάτων του. Αν και το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνού διοχετεύεται στη γη υπάρχουν περιπτώσεις που ένας κεραυνός να έχει επικίνδυνες επιπτώσεις σε διάφορες κατασκευές ή ακόμα και στον ανθρώπινο παράγοντα. Σκοπός ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι εάν πληγεί από κεραυνό άμεσα ή έμμεσα να διοχετεύσει το ρεύμα της εκκένωσης ελεγχόμενα στη γη και να περιορίσει όσο το δυνατόν περισσότερο τις ζημιές στην εγκατάσταση που έχει σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.



Ως σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ορίζεται το πλήρες σύστημα που χρησιμοποιείται για να προστατεύσει μία εγκατάσταση ή ακόμα και ολόκληρη την περιοχή της εγκατάστασης από τα πλήγματα κεραυνών. Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ονομάζεται και ΣΑΠ. Οι επιστήμονες μέχρι και σήμερα δεν έχουν ανακαλύψει μεθόδους έτσι ώστε να μπορέσουν να εμποδίσουν το σχηματισμό κεραυνού ή να τον εμποδίσουν να πλήξει μια κατασκευή. Ουσιαστικά η μέθοδος που χρησιμοποιείται για αντικεραυνική προστασία φαίνεται στο παραπάνω σχεδιάγραμμα.

### 6.3.1 Μη συμβατικές διατάξεις σύλληψης του κεραυνού

Οι επιστήμονες τα τελευταία χρόνια υποστηρίζουν ότι ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας μπορεί να βελτιωθεί αν χρησιμοποιήσουμε τις λεγόμενες ενεργές διατάξεις σύλληψης του κεραυνού οι οποίες υποτίθεται ότι αυξάνουν το πεδίο δράσης του συστήματος. Υπάρχουν 3 τύποι ενεργών διατάξεων:

#### ***1. Τα ραδιενεργά αλεξικέραυνα***

Τα ραδιενεργά αλεξικέραυνα αποτελούν συλλεκτήριες διατάξεις τύπου ράβδου με ραδιενεργή ουσία στην απόληξη της ράβδου οι οποίες θεωρείται ότι επεκτείνουν την ακτίνα σύλληψης της ακίδας και διευκολύνουν την εκκίνηση θετικών leader μέσω πρόσθετου ιονισμού του αέρα. Τα λεγόμενα αυτά έχουν εξετασθεί τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά και έχει αποδειχθεί ότι τα ραδιενεργά αλεξικέραυνα δεν παρέχουν βελτιωμένη προστασία και επιπλέον έχουν απαγορευθεί με απόφαση της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας ως επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία.



*Εικόνα 6.1: Αλεξικέραυνο ραδιενεργού τύπου*

### **2. Τα αλεξικέραυνα απόθησης κεραυνού**

Τα αλεξικέραυνα απόθησης κεραυνού αποτελούν συλλεκτήριες διατάξεις τύπου ράβδου αλλά με πολλές ακίδες στην απόληξή της σφαιρικά κατανεμημένες. Υποστηρίζεται ότι οι πολλές ακίδες δημιουργούν χωρικό φορτίο γύρω από την απόληξη της ράβδου που εξουδετερώνει μέρος του φορτίου του σύννεφου που προσεγγίζει τη περιοχή της, παρεμποδίζοντας με τον τρόπο αυτό τη φάση του οχετού επιστροφής επεκτείνοντας επομένως τη παρεχόμενη προστασία. Τα συγκεκριμένα αλεξικέραυνα δεν προβλέπονται από κανένα διεθνή οργανισμό.



*Εικόνα 6.2: Αλεξικέραυνο απόθησης κεραυνού*

### **3. Τα αλεξικέραυνα πρώιμου οχετού**

Τα αλεξικέραυνα πρώιμου οχετού είναι συλλεκτήριες διατάξεις τύπου ράβδου οι οποίες ενσωματώνουν ένα μηχανισμό σκανδαλισμού ο οποίος στέλνει παλμούς υψηλής τάσης στην απόληξη της ράβδου όταν τα φορτισμένα σύννεφα καταφθάνουν στη περιοχή εγκατάστασής τους. Η χρήση τους προβλέπεται από τους κανονισμούς διαφόρων χωρών όπως είναι η Γαλλία, η Ισπανία και έχουν ήδη εγκατασταθεί και σε πολλές κατασκευές αν και η αποτελεσματικότητά τους ακόμη δεν έχει αποδειχθεί ικανοποιητικά και οι επιστήμονες παραμένουν επιφυλακτικοί.





*Εικόνα 6.3: Αλεξικέρανο πρώιμου οχető*

### 6.3.2. Αποτίμηση κινδύνου από πλήγμα κεραυνού

Απόλυτη προστασία έναντι πληγμάτων κεραυνού μπορεί να εξασφαλισθεί μόνο εσωκλείοντας πλήρως την υπό προστασία κατασκευή εντός ενός κελύφους με παχιά μεταλλικά τοιχώματα (κλωβός Faraday). Αν και η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για τη προστασία ευαίσθητων ηλεκτρονικών διατάξεων όπου απαιτείται αδιάλειπτη και απρόσκοπη λειτουργία το ιδανικό αυτό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας είναι πρακτικά αδύνατο να υλοποιηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις προστασίας κατασκευών. Ο σχεδιασμός ενός ΣΑΠ μιας κατασκευής είναι πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ της αποτελεσματικότητας της προστασίας που αυτό παρέχει και του κόστους επένδυσης και συντήρησης του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που το συνιστά. Ένα τέτοιο σύστημα δε μπορεί ποτέ να εξασφαλίσει την απόλυτη προστασία της κατασκευής ωστόσο μπορεί να μειώσει σε αποδεκτό βαθμό τις επιζήμιες επιπτώσεις του κεραυνού σ' αυτήν. Γι' αυτό το λόγο ο σχεδιασμός ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας μιας κατασκευής συνιστάται στην επιλογή της αποδεκτής στάθμης προστασίας.

### 6.3.3. Στάθμες προστασίας

Η στάθμη προστασίας ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σχετίζεται με την πιθανότητα με την οποία αυτό προστατεύει ένα χώρο από τις επιπτώσεις του κεραυνού, διαμορφώνει τα χαρακτηριστικά του όπως τις διαστάσεις του και κατατάσσει το ΣΑΠ σύμφωνα με την αποτελεσματικότητά του. Η σχέση μεταξύ της στάθμης και της αποτελεσματικότητάς του ΣΑΠ δίνεται στο παρακάτω πίνακα 6.1.

Πίνακας 6.1: Αποτελεσματικότητα επιπέδων προστασίας

Επίπεδο προστασίας	Αποτελεσματικότητα
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

Η αποτελεσματικότητα του ΣΑΠ μειώνεται πηγαίνοντας από τη στάθμη προστασίας I στη στάθμη προστασίας IV. Σε κάθε στάθμη προστασίας αντιστοιχούν ανώτατα όρια τιμών των παραμέτρων του κεραυνού οι οποίες έχουν συγκεκριμένη πιθανότητα να μη ξεπεραστούν.

Παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας είναι οι διαστάσεις της εγκατάστασης, η τοποθεσία της και το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο η κατασκευή. Επίσης είναι η κατηγορία στην οποία κατατάσσεται η εγκατάσταση ανάλογα με τη χρήση της και τις συνέπειες τις οποίες θα έχει η καταστροφή της στον ανθρώπινο παράγοντα και στο περιβάλλον καθώς επίσης και η κεραυνική δραστηριότητα που αναπτύσσεται στη περιοχή που βρίσκεται η εγκατάσταση. Αναλυτικότερα για την επιλογή της κατάλληλης στάθμης προστασίας απαιτείται η γνώση της συχνότητας άμεσων κεραυνικών πληγμάτων της εγκατάστασης καθώς και της αποδεκτής συχνότητας κεραυνικών πληγμάτων της εγκατάστασης.

### 6.3.4. Συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή

Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή  $N_d$  εκφράζει το μέσο αριθμό άμεσων κεραυνικών πληγμάτων που μπορούν να συμβούν σε μια κατασκευή ανά έτος και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$N_d = N_g * A_e * 10^{-6} \text{πλήγματα κεραυνού ανά έτος}$$

όπου,

$N_g$  : η μέση ετήσια πυκνότητα τοπικής πτώσης κεραυνού ανά  $\text{km}^2$ .

$A_e$  : η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια της κατασκευής

### 6.3.5. Υπολογισμός της μέσης ετήσιας πυκνότητας πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος ( $N_g$ )

Η μέση ετήσια πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος καθορίζεται με μετρήσεις μέσω δικτύου καταγραφής κεραυνών, ωστόσο σύμφωνα με την IEC εάν η ακριβής τιμή δεν είναι διαθέσιμη αυτή μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από την παρακάτω ξίσωση:

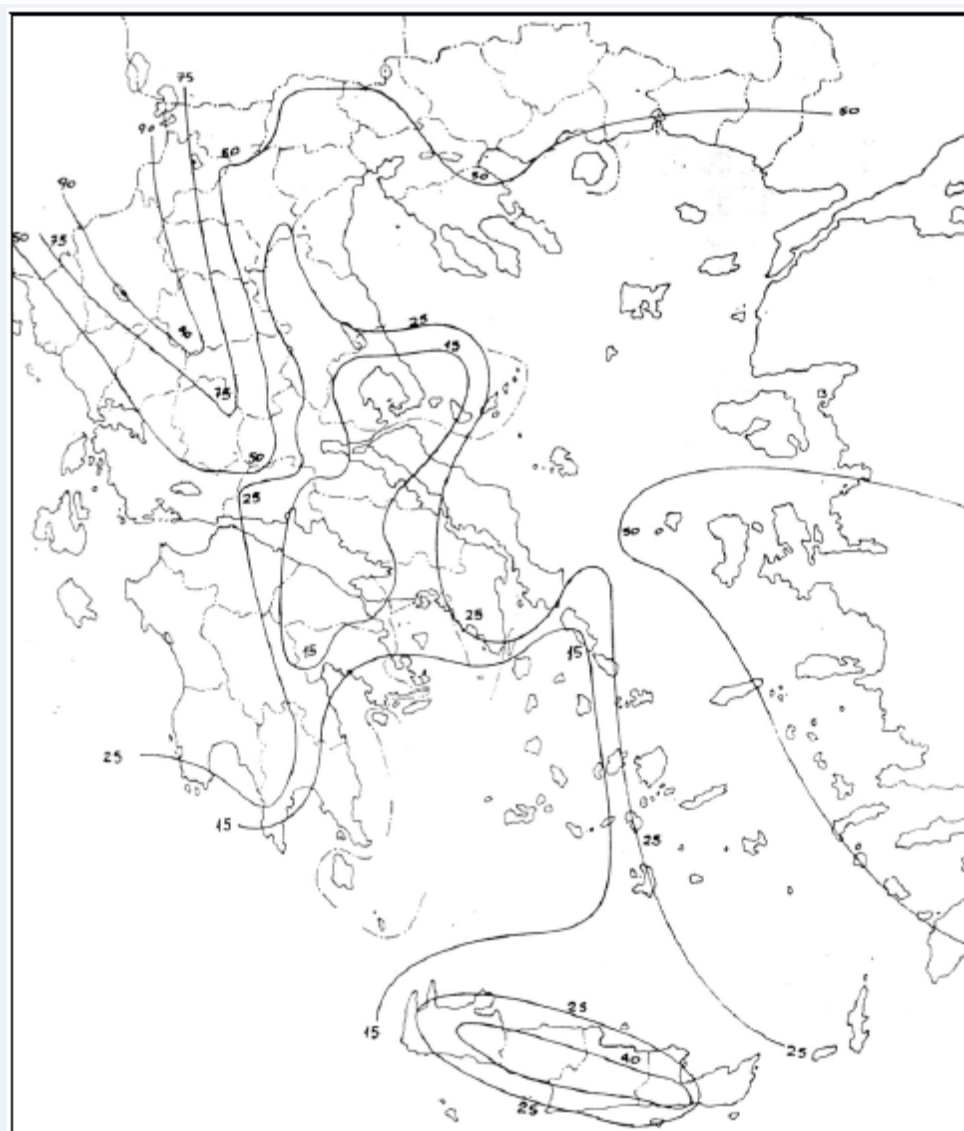
$$N_g = 0,04 * T_d^{1,25} \text{ πλήγματα κεραυνού ανά km}^2 \text{ και έτος}$$

όπου,

$N_g$  : η μέση ετήσια πυκνότητα τοπικής πτώσης κεραυνού ανά  $\text{km}^2$

$T_d$  : ο αριθμός των ημερών καταιγίδας ανά έτος (από ισοκεραυνικό χάρτη)

Ως ημέρα καταιγίδας για μια συγκεκριμένη περιοχή ορίζεται η ημέρα για την οποία στη περιοχή αυτή έχει γίνει αντιληπτός ο θόρυβος της βροντής και έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της αστραπής δηλαδή του κεραυνού. Γι' αυτό για να βρούμε τον αριθμό  $T_d$  ανατρέχουμε στον ισοκεραυνικό χάρτη και πιο συγκεκριμένα στον ισοκεραυνικό χάρτη της περιοχής.



#### Εικόνα 6.4: Ισοκεραυνικός χάρτης της Ελλάδας

Σημαντικό στοιχείο είναι ότι και η δημοσίευση μετεωρολογικών δεδομένων ωρών καταιγίδας αντί ημερών ανά έτος και η συσχέτισή τους με την πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος ( $N_g = 0,054 * Th^{1.1}$  πλήγματα κεραυνού ανά  $km^2$  και έτος) έδειξε ότι σε περιοχές μικρής κεραυνικής δραστηριότητας η πυκνότητα πληγμάτων κεραυνού στο έδαφος υπολογισμένη με βάση τις ημέρες καταιγίδας είναι περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη υπολογισμένη με βάση τις ώρες καταιγίδας ανά έτος.

αυτό για να έχουμε σωστό υπολογισμό της  $N_g$  θα πρέπει να γνωρίζουμε τη χρονική διάρκεια των καταιγίδων.

#### 6.3.6. Αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή

Η αποδεκτή συχνότητα κεραυνικών πληγμάτων για μια κατασκευή  $N_c$  εκφράζει τη μέγιστη αποδεκτή τιμή του αριθμού άμεσων κεραυνικών πληγμάτων που μπορούν να συμβούν σε μία κατασκευή ανά έτος και μπορούν να προκαλέσουν ζημιά. Η τιμή του  $N_c$  μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μελέτης αποτίμησης κινδύνου από πλήγμα κεραυνού λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλους συντελεστές όπως είναι ο τύπος δόμησης, η παρουσία εύφλεκτων και εκρηκτικών ουσιών, ληφθέντα μέτρα για μείωση των επιπτώσεων του πλήγματος, πλήθος ανθρώπων που επηρεάζονται από τη καταστροφή, τύπος και σπουδαιότητα υπηρεσιών εξυπηρέτησης του κοινού που επηρεάζονται, αξία των αγαθών που ενδεχομένως καταστραφούν, άλλους συντελεστές. Η συχνότητα άμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε μια κατασκευή πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή  $K$  που βγαίνει από το γινόμενο συντελεστών που λαμβάνουν υπόψη τους τη χρήση του κτιρίου και τον αριθμό των ανθρώπων που στεγάζει (συντελεστής  $A$ ), τα υλικά κατασκευής του κτιρίου (συντελεστής  $B$ ), το περιεχόμενο του κτιρίου (συντελεστής  $C$ ), το βαθμό απομόνωσης του κτιρίου (συντελεστής  $D$ ) και τη μορφολογία του εδάφους (συντελεστής  $E$ ).

## 6.4. Μετάδοση κρουστικών υπερτάσεων

Με τον όρο κρουστικές υπερτάσεις, εννοούμε τις απότομες αυξήσεις της απόλυτης τιμής του δυναμικού, η διάρκεια των οποίων κυμαίνεται από εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου ( $10^{-6}$ s) μέχρι κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου ( $10^{-3}$ s). Η αύξηση της απόλυτης τιμής του δυναμικού κυμαίνεται από μερικά Volts, μέχρι χιλιάδες Volts. Τα αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων είναι είτε φυσικά, είτε τεχνητά. Φυσικές πηγές είναι οι κεραυνοί (lightning electromagnetic pulses ή LEMP), τόσο μεταξύ νέφους και γης, όσο και μεταξύ νεφών, και οι διάφορες ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (electrostatic discharges ή ESD). Τεχνητές πηγές είναι τα ηλεκτρικά δίκτυα που αναπτύσσουν κρουστικές υπερτάσεις, είτε από χειρισμούς διακοπών, είτε από βραχυκυκλώματα (switching electromagnetic pulses ή SEMP).

Τα κρουστικά κύματα δημιουργούν ρεύματα με πολύ μεγάλη ένταση, ικανά να καταστρέψουν κάθε μορφής ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων και να βλάψουν την ανθρώπινη ζωή. Τα ρεύματα αυτά περνάνε μέσα στις συσκευές και στις εγκαταστάσεις διαμέσου των καλωδίων ισχύος, των τηλεφωνικών καλωδίων, των κεραιών, των γειώσεων, των δικτύων ύδρευσης, θέρμανσης, ψύξης, αερισμού κλπ. Ακόμα και αν ο κεραυνός πέσει εκατοντάδες μέτρα μακριά από μια κατασκευή, η σχετικά υψηλή ιδιοσυχνότητα του παραγόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου του επιτρέπει να ταξιδεύσει σε μεγάλη απόσταση και πιθανότατα να προσβάλλει τη συγκεκριμένη κατασκευή μέσω κάποιων από τους παραπάνω «δρόμους». Ένας κεραυνός λοιπόν μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία στα ηλεκτρικά μέρη μιας κατασκευής ακόμα και αν πέσει ένα χιλιόμετρο μακριά. Η απόσταση που μπορεί να πλήξει μία κατασκευή, είναι συνάρτηση της έντασής του.

Ο τρόπος που ένας κεραυνός επιδρά μπορεί να είναι είτε επαγωγικός, είτε ωμικός, είτε χωρητικός, είτε κάποιος συνδυασμός αυτών, όπως εξηγείται παρακάτω. Υπάρχει, φυσικά, και η ακραία περίπτωση να πέσει απευθείας πάνω σε κάποια καλώδια ή σωλήνες που καταλήγουν στο συγκεκριμένο κτίριο.

Δύο διαφορετικές περιπτώσεις επαγωγικών επιδράσεων έχουν παρατηρηθεί. Όταν ένας κεραυνός πέσει σε ένα κτίριο που έχει αντικεραυνική προστασία, το ρεύμα του θα διοχετευθεί μέσω του αγωγού καθόδου στη γη. Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο όμως που θα δημιουργηθεί γύρω από τον αγωγό, μπορεί να μεταφέρει επαγωγικά φορτία στις διάφορες καλωδιώσεις του κτιρίου ή ακόμα και σε γειτονικά κτίσματα. Στη δεύτερη περίπτωση, αποφορτίσεις κεραυνών στην ύπαιθρο φορτίζουν επαγωγικά, καλώδια ηλεκτρικής παροχής, μεταφοράς δεδομένων ή τηλεφωνικά και μέσω αυτών εισχωρούν μέσα σε κατασκευές προκαλώντας φθορές στα ηλεκτρικά τους μέρη.

Οι ωμικές επιδράσεις είναι ένας άλλος τρόπος μετάδοσης κρουστικών ρευμάτων και πλήττουν, τόσο υπόγειες, όσο και υπέργειες ή εναέριες γραμμές και σωληνώσεις. Συναντάται και ως γαλβανικό φαινόμενο. Όταν ένας κεραυνός πλήξει ακόμα και το έδαφος σε κοντινή κατασκευή, το κεραυνικό ρεύμα που διαχέεται ψάχνει διόδους εκτόνωσης μέσα στη γη. Επειδή ακολουθείται πάντα η ευκολότερη δίοδος, δηλαδή με την μικρότερη ωμική αντίσταση, ένα ποσοστό του ρεύματος θα περάσει μέσα στα κοντινά κτίσματα, είτε διαμέσου των ηλεκτροδίων της γείωσης των κατασκευών, είτε διαμέσου διαφόρων μεταλλικών σωληνώσεων (ύδρευση, αποχέτευση κλπ.). Η μόνωση των καλωδίων έχει μεγαλύτερη αντίσταση από ότι το έδαφος, αλλά λόγω μεγάλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ γης και μονωμένων μερών, η μόνωση αυτή διασπάται και η υπέρταση διοχετεύεται στους αγωγούς καταστρέφοντας ηλεκτρονικές συσκευές συνδεδεμένες στο δίκτυο. Ακόμα περισσότερο, όταν αυτό το κτίριο συνδέεται ηλεκτρικά με άλλα κτίρια, λόγω της

διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται στην άκρες των γραμμών, το ρεύμα θα συνεχίσει την πορεία του καταστρέφοντας και συσκευές γειτονικών κτιρίων.

Όσον αφορά τις χωρητικές επιδράσεις, αυτές δημιουργούνται όταν ένα νέφος χάσει απότομα το ηλεκτρικό του φορτίο, με συνέπεια τα δίκτυα που βρίσκονται κάτω από αυτό, να χάσουν και αυτά χωρητικά το φορτίο τους. Ως αποτέλεσμα αυτού, αναπτύσσονται οδεύοντα κύματα προς τις δύο κατευθύνσεις. Αν μάλιστα τα δίκτυα αυτά είναι μεγάλου μήκους και καλά μονωμένα χειροτερεύει η κατάσταση, καθώς το κύμα αντανακλάται και μεγαλώνει αλλά και δεν μπορεί να αποφορτιστεί. Σε περίπτωση λοιπόν, που το δυναμικό του δικτύου φτάσει σε τιμή μεγαλύτερη της αντοχής των ηλεκτρικών μονώσεων των συσκευών που υπάρχουν στα άκρα του, αυτές θα καταστραφούν.

Τέλος, υπερτάσεις δημιουργούνται και από χειρισμούς διακοπών ισχύος, μαγνητική ζεύξη μετασχηματιστών ισχύος, βραχυκυκλώματα και ζεύξη-απόζευξη συστοιχιών πυκνωτών, κυρίως διότι τα ρεύματα που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια των φαινομένων αυτών αποκτούν κρουστική μορφή με δραματικές συνέπειες στη μονωτική ικανότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών. Όπως είναι γνωστό, το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο στο οποίο αποθηκεύεται ενέργεια. Αν αυτό το ρεύμα διακοπεί ξαφνικά, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου απελευθερώνεται. Στην προσπάθειά της να αναλωθεί, παίρνει τη μορφή ενός κρουστικού κύματος. Όσο περισσότερη, φυσικά, είναι η αποθηκευμένη ενέργεια, τόσο μεγαλύτερο και το κύμα. Μεγάλα ρεύματα και μεγάλα μήκη αγωγών δυσχεραίνουν την κατάσταση. Αυτός είναι και ο λόγος που επαγωγικά φορτία όπως κινητήρες ή μετασχηματιστές, αποτελούν συχνά αιτίες δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων.

## 6.5. Απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων

Αναφέραμε νωρίτερα ότι οι κρουστικές υπερτάσεις μπορούν να περάσουν μέσα στα ηλεκτρικά κυκλώματα είτε μέσα από την ηλεκτρική παροχή, συμπεριλαμβανομένου και του αγωγού γειώσεως, είτε μέσα από τις τηλεφωνικές γραμμές, τις γραμμές μεταφοράς δεδομένων και τις γραμμές μεταφοράς αναλογικών σημάτων (από κεραία τηλεόρασης, κάμερα παρακολούθησης κλπ.) και γενικά μέσα από οποιοδήποτε ηλεκτρικά αγωγήμο δίκτυο. Οι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων (surge protection devices ή SPDs), που συχνά θα συναντηθούν και ως αλεξικέραυνα ηλεκτρολογικών εγκαταστάσεων, είναι οι συσκευές αυτές που τοποθετούνται πριν από τα μηχανήματα που θέλουμε να προστατεύσουμε ή σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στο δίκτυο, με στόχο να μειώσουν το κρουστικό κύμα άμεσα σε μεγέθη ακίνδυνα.

Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: ο κάθε απαγωγός κρουστικών υπερτάσεων, SPD, χαρακτηρίζεται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του, από μία πολύ υψηλή αντίσταση μεταξύ των άκρων του. Όταν στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένος εφαρμοστεί μία κρουστική τάση με τιμή μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης του SPD, βραχυκυκλώνει τα άκρα του σε χρόνο της τάξης ns, μειώνοντας έτσι τις διαφορές δυναμικού μεταξύ των ηλεκτρικά μονωμένων αγωγών και μεταξύ των γειωμένων μερών, σε στάθμη που πρέπει να είναι χαμηλότερη της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών της εγκατάστασης, όπως αυτή ορίζεται στο Διεθνές πρότυπο IEC 60664-1. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση προστασίας ( $U_p$ ) και είναι το βασικότερο κριτήριο επιλογής του SPD. Όταν η τάση του δικτύου επανέλθει στα φυσιολογικά επίπεδα, ο απαγωγός κρουστικών υπερτάσεων, SPD, αυτόματα επανέρχεται στην αρχική φυσιολογική του θέση, χωρίς την ανάγκη διακοπής της παροχής του ηλεκτρικού δικτύου, αντικατάσταση τηκτών, ή επαναοπλισμού αυτόματων διακοπών.

Η τάση προστασίας,  $U_p$ , λειτουργίας του SPD, πρέπει να είναι μικρότερη της στάθμης μόνωσης της συσκευής που προστατεύει. Αν για παράδειγμα πρέπει να προστατευθεί ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με διηλεκτρική αντοχή 800V, ο απαγωγός κρουστικής υπέρτασης θα πρέπει να χαρακτηρίζεται με  $U_p < 800V$ , ή ακόμη χαμηλότερη, έτσι ώστε να προστατευθεί η συσκευή επαρκώς και να υπάρχει και ένα όριο ασφαλείας.

Για αξιόπιστη μακράς διάρκειας λειτουργία, το SPD που θα επιλεγεί πρέπει να μπορεί να αντέξει το μεγαλύτερο κρουστικό ρεύμα  $I_{imp}$  ή  $I_{max}$  που αναμένεται στο συγκεκριμένο σημείο εγκατάστασής του και υπολογίζεται με βάση την αναγκαία στάθμη προστασίας, όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

Οι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων επιλέγονται λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες του συστήματος στο οποίο τοποθετούνται. Πιο αναλυτικά οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην επιλογή τους είναι οι εξής:

**Χαρακτηριστικά δικτύου:** Για να εξασφαλιστεί η συμβατότητα με το δίκτυο είναι αναγκαία η γνώση των τριών επόμενων παραμέτρων. Η Ονομαστική τάση λειτουργίας (Voltage rating,  $U_N$ , ή Continuous operating voltage,  $U_C$ ) καθορίζεται με βάση την ονομαστική τάση της ηλεκτρικής γραμμής. Η μέγιστη τάση λειτουργίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές κυμαίνεται περίπου στο +15% της ονομαστικής τιμής. Για τα Ελληνικά δεδομένα, όπως και για ολόκληρη την Ευρώπη, σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η ονομαστική τάση λειτουργίας για όλα τα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι 230/400V. Για τα ασθενή ρεύματα (π.χ. σήματα data) ονομαστική τάση είναι η θετική ή αρνητική τιμή κορυφής του σήματος (Voltage peak value,  $U_{pk}$ ). Το

Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας, (Continuous operating current,  $I_C$ ), ενδιαφέρει μόνο στην περίπτωση που ο απαγωγός συνδέεται σε σειρά με το δίκτυο. Τέλος, ανάλογα με τη Συχνότητα λειτουργίας,  $f$ , του δικτύου, επιλέγεται και ο απαγωγός που λειτουργεί στην ανάλογη συχνότητα.

**Τάση εκφόρτισης ή Παραμένουσα τάση (Residual voltage,  $U_{res}$ ):** είναι η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του απαγωγού κρουστικών υπερτάσεων κατά τη διάρκεια της διέλευσης του ονομαστικού ρεύματος εκφόρτισης, το οποίο ορίζεται παρακάτω. Η μέγιστη παραμένουσα τάση (Voltage limiting) είναι αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης που μπορεί να αντέξει ο συγκεκριμένος απαγωγός. Στην περίπτωση απαγωγού τύπου σπινθηριστή η παραμένουσα τάση ισούται με την Τάση διάσπασης (Spark overvoltage), την τάση δηλαδή στην οποία έχουμε έναρξη του σπινθήρα. Όπως γίνεται σαφές, όσο μικρότερη είναι η τάση προστασίας ενός απαγωγού τόσο το καλύτερο, και τόσο πιο ευαίσθητες συσκευές μπορεί να προστατεύσει.

**Τάση προστασίας (Voltage protection level,  $U_P$ ):** η συγκεκριμένη παράμετρος χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του απαγωγού και πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη παραμένουσα τάση ή την τάση διάσπασης. Η χρησιμότητα της παραμέτρου αυτής είναι ίσως η σημαντικότερη όλων, καθώς μεγαλύτερη τάση προστασίας από αυτή που αντέχει η υπό προστασία συσκευή, θα οδηγήσει σε ανεπαρκή προστασία της και ενδεχόμενη καταστροφή της.

**Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης (Maximum discharge current,  $I_{max}$  ή Maximum impulse current,  $I_{imp}$ ):** είναι το μεγαλύτερο ρεύμα εκφόρτισης που διέρχεται μέσα από το αλεξικέραυνο δικτύου τουλάχιστον για μία φορά, χωρίς αυτό να καταστραφεί. Με βάση αυτή τη μεταβλητή εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα του απαγωγού. Το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή κρούσης του κύματος. Όταν λέμε μορφή κρούσης (Impulse waveshape) εννοούμε το πηλίκο του χρόνου που φτάνει το ρεύμα στη μέγιστη τιμή του, προς το χρόνο που πέφτει στο μισό της μέγιστης τιμής. Ο λόγος που χρησιμοποιείται είναι το γεγονός ότι κάθε κρουστικό κύμα έχει απρόβλεπτη μορφή κρούσης και συνεπώς τα μεγέθη δεν είναι συγκρίσιμα. Εισάγοντας αυτή την παράμετρο είμαστε πιο ακριβής στον καθορισμό του  $I_{max}$  της αντικεραυνικής συσκευής. Για παράδειγμα, ένας απαγωγός στο οποίο εφαρμόζεται κρούση μορφής 8/20 $\mu$ s έχει ικανότητα  $I_{max}=5kA$ . Στον ίδιο απαγωγό αν εφαρμοστεί κρούση μορφής 4/10 $\mu$ s για παράδειγμα, έχει ικανότητα  $I_{max}=65kA$ . Η μορφή κρούσης καθορίζεται από τα Διεθνή πρότυπα IEC σε 8/20 $\mu$ s, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις για τη μέτρηση του  $I_{max}$  φτάνει και σε διάρκεια τα 10ms (IEC 61643-1). Από εδώ και στο εξής ότι τιμές έντασης και αν αναφέρονται, ως μορφή κρούσης θα εννοείται η 8/20 $\mu$ s.

**Ονομαστικό ρεύμα εκφόρτισης (Nominal discharge current,  $I_n$ ):** Ετσι ονομάζεται το ρεύμα αυτό που μπορεί να αντιμετωπιστεί από τον απαγωγό για τουλάχιστον είκοσι φορές, χωρίς αυτός να παρουσιάσει δυσλειτουργία. Όταν για παράδειγμα λέμε ότι ο συγκεκριμένος απαγωγός έχει  $I_{max}=40kA$  και  $I_n=15kA$ , ρεύματος 8/20 $\mu$ s εννοούμε ότι μπορεί να αντεπεξέλθει χωρίς να καταστραφεί σε ρεύμα 40kA τουλάχιστον μία φορά και σε ρεύμα 15kA τουλάχιστον για είκοσι φορές, πάντα μορφής 8/20 $\mu$ s.

**Υπέρταση μεγάλης διάρκειας του ηλεκτρικού πεδίου διανομής,  $U_{TON}$ :** μία σημαντική παράμετρος που πρέπει να συνεκτιμάται κατά την επιλογή του απαγωγού, κυρίως στα ενεργειακά συστήματα, είναι οι υπερτάσεις του συστήματος μακράς διάρκειας  $U_{TON}$ , με χρονική διάρκεια  $0,05 < t < 10s$ . Οι τάσεις αυτές λόγω της διάρκειάς τους δεν έχουν κρουστική μορφή και ο απαγωγός υπερτάσεων, αν λειτουργήσει για να τις μειώσει υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να καταστραφεί, καθώς καταπονείται για

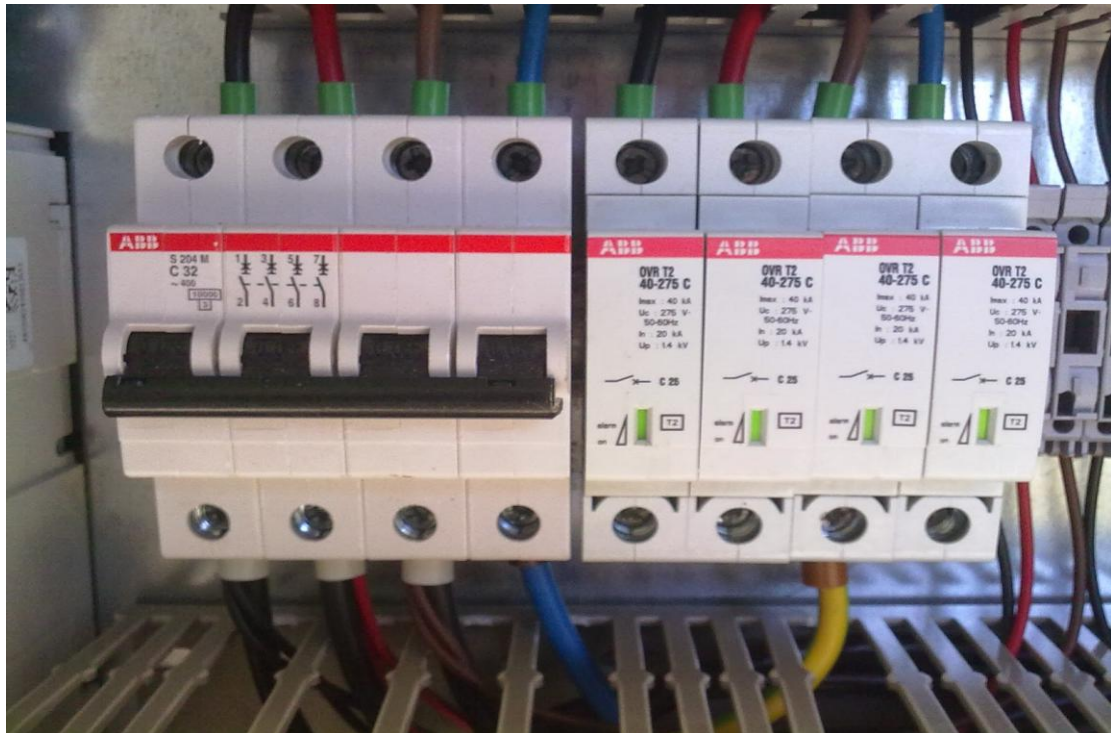


μεγάλη χρονική διάρκεια από το ρεύμα του συστήματος που ρέει μέσα σε αυτόν. Στατιστικά, έχει αποδειχθεί ότι σε απομονωμένα δίκτυα η καταστροφή των απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων από αυτό το αίτιο, είναι συνηθέστερη από ότι η καταστροφή τους από ένα κεραυνικό ρεύμα. Το Διεθνές πρότυπο IEC της σειράς 60364 συνιστά στις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να κατασκευάζουν δίκτυα που οι υπερτάσεις μεγάλης διάρκειας να μην υπερβαίνουν την τιμή  $1,5xU_N+750V$  για χρόνο  $0,05 < t < 5s$ , και την τιμή  $1,5xU_NV$  για χρόνο  $5 < t < 10s$ . Η επιλογή του κατάλληλου απαγωγού κρουστικών υπερτάσεων θα πρέπει να γίνεται με το κριτήριο να λειτουργεί σε τάσεις μεγαλύτερες της  $U_{TOV}$ , όπως αυτή ορίζεται από το IEC 60364. Αν και αναφέρθηκε, δηλαδή, ότι όσο μικρότερη είναι η τάση προστασίας τόσο το καλύτερο, οι ελάχιστες τιμές της  $U_P$  περιορίζονται από την  $U_{TOV}$ .

**Χρόνος απόκρισης (Time Response,  $t_R$ ):** είναι ο χρόνος που απαιτείται μέχρις ότου να ενεργοποιηθεί η λειτουργία του απαγωγού. Είναι πολύ βασική παράμετρος, καθώς πρέπει να λειτουργήσει πριν περάσει το κύμα και κάνει τη ζημιά και πρέπει να είναι μικρότερος των 25 ns ( $25 \times 10^{-9}$ ). Αυτός είναι και ο λόγος που οι σταθεροποιητές τάσης (UPS) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αντικεραυνική προστασία, καθώς ο χρόνος απόκρισής τους είναι συγκριτικά πολύ μεγαλύτερος (της τάξης των ms,  $10^{-3}$ ). Αντιθέτως, κινδυνεύουν και οι ίδιοι από τα κρουστικά κύματα και χρειάζονται προστασία.

Υπάρχουν και άλλες μεταβλητές που παίζουν ρόλο στην επιλογή του σωστού απαγωγού, όπως η ισχύς λειτουργίας, η θερμοκρασία λειτουργίας, το μέγιστο υψόμετρο λειτουργίας κλπ. που δεν χρήζουν ανάλυσης τη συγκεκριμένη στιγμή, καθώς ο ρόλος τους είναι σημαντικός μεν, πολύ λεπτομερειακός δε.





Εικόνα 6.5.: Απαγωγοί Κρουστικών Υπερτάσεων για εγκατάσταση στο γενικό πίνακα

### 6.5.1. Είδη απαγωγών κρουστικών υπερτάσεων

Ανάλογα με το τι συσκευή θέλουμε να προστατεύσουμε και από ποια σημεία εισόδου του κύματος, υπάρχουν και οι αντίστοιχοι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων. Οι απαγωγοί που συνηθέστερα συναντώνται είναι οι εξής: Οι απαγωγοί μέσης τάσης έχουν σκοπό να προστατεύσουν έναν υποσταθμό ή γενικότερα ένα δίκτυο μέσης τάσης από κρουστικά κύματα ερχόμενα από το δίκτυο της ΔΕΗ. Η ονομαστική τάση λειτουργίας τους είναι συνήθως για τη χώρα μας 21kV και τοποθετούνται παράλληλα με το δίκτυο, ένας σε κάθε φάση (συνολικά τρεις για τριφασικό ρεύμα). Αποτελούν την πρώτη βαθμίδα προστασίας, και χωρίζονται σε πορσελάνης και πολυμερίου (polymer). Οι απαγωγοί χαμηλής τάσης για συστήματα TN-S, όπως αυτό της ΔΕΗ (εκτός από το ιστορικό κέντρο της Αθήνας που έχει σύστημα TT και στο οποίο χρησιμοποιούνται πάλι οι ίδιοι απαγωγοί), τοποθετούνται στον κεντρικό πίνακα και παράλληλα στην κάθε φάση του ρεύματος αλλά και στον ουδέτερο (συνολικά τέσσερα για τριφασικό ρεύμα, δύο για μονοφασικό). Όποτε κρίνεται σκόπιμο τοποθετούνται απαγωγοί και στους υποπίνακες ως επιπλέον ζώνες προστασίας, αλλά και ακριβώς πριν από μία συσκευή. Επαναλαμβάνεται σε αυτό το σημείο ότι οι συγκεκριμένοι απαγωγοί δεν πρέπει κατά την απαγωγή των κρουστικών υπερτάσεων να διακόπτουν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο μηδενίζοντας την τάση του δικτύου, αλλά να συνεχίζεται η ομαλή τροφοδοσία του, έστω και με μεγαλύτερη τάση, μέσα στα πλαίσια της αντοχής των μονωτικών των συσκευών που τροφοδοτούνται από το δίκτυο.

Οι κεραίες των τηλεοράσεων συλλαμβάνουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των κεραυνών και δια μέσου του ομοαξονικού καλωδίου διοχετεύουν την υπέρταση στις συνδεδεμένες συσκευές προκαλώντας την καταστροφή τους. Οι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων κεραιών προστατεύουν τους δέκτες από αυτές τις

υπερτάσεις διοχετεύοντάς τις στη γείωση. Το κύκλωμα προστασίας του απαγωγού δεν πρέπει να επηρεάζει την καλή λειτουργία των συσκευών, ούτε να προκαλεί απώλεια της ισχύος και εξασθένηση του σήματος που συλλαμβάνει η συσκευή, για αυτό και πρέπει να είναι ανάλογης ισχύος και συχνότητας. Ανάλογοι απαγωγοί υπάρχουν και για πομπούς – δέκτες χαμηλής ισχύος και συχνοτήτων από VHF ως UHF (κάμερες παρακολούθησης κλπ.).

Οι απαγωγοί κρουστικών υπερτάσεων τηλεμετρίας και τηλεχειρισμών προστατεύουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα και διατάξεις από κρουστικά ρεύματα που εισέρχονται από τις γραμμές μεταφοράς δεδομένων ή σημάτων. Οι απαγωγοί αυτοί εγκαθίστανται σε σειρά με το δίκτυο και κοντά στις υπό προστασία συσκευές, επιτρέποντας τη διέλευση όλων των σημάτων και δεδομένων. Πρέπει να είναι συμβατοί με το δίκτυο και να μην προκαλούν παρεμβολές, επιδράσεις ή εξασθενήσεις στα σήματα. Σε περίπτωση καταστροφής τους βραχυκυκλώνουν με τη γείωση ώστε να γίνει αντιληπτή η απώλειά τους και να προστατεύσουν το σύστημα μέχρι την αντικατάστασή τους.

Τέλος, για να προστατεύσουμε τηλεφωνικές συσκευές ή ψηφιακά κέντρα από την είσοδο κρουστικών υπερτάσεων διαμέσου του δικτύου του ΟΤΕ, χρησιμοποιούμε ειδικούς απαγωγούς που τοποθετούνται σε σειρά με το τηλεφωνικό δίκτυο και υπάρχουν είτε ημιαγωγικού τύπου, είτε τύπου σπινθηριστή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Σημειώσεις Ηλεκτροτεχνίας

2. Διαδίκτυο:

[http://www.cres.gr/kape/pdf/odigos\\_pv\\_systimaton.pdf](http://www.cres.gr/kape/pdf/odigos_pv_systimaton.pdf)

[http://artemis.cslab.ntua.gr/el\\_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0006/DT2010-0006.pdf](http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2010-0006/DT2010-0006.pdf)

[http://vivliothmyy.ee.auth.gr/535/1/Anastopoulou\\_Ag.pdf](http://vivliothmyy.ee.auth.gr/535/1/Anastopoulou_Ag.pdf)

[http://vivliothmyy.ee.auth.gr/1673/2/mavromati-kakana\\_elena\\_diplomatiki.pdf](http://vivliothmyy.ee.auth.gr/1673/2/mavromati-kakana_elena_diplomatiki.pdf)

<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hle/2012/ZeritisAnastasios/attached-document-1338367542-244299-5439/Zeritis2012.pdf>

<http://www.epaggelmaties.com/anthis/geiwseis.html>

[http://artemis.cslab.ntua.gr/el\\_thesis/artemis.ntua.ece/DT2011-0312/DT2011-0312.pdf](http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2011-0312/DT2011-0312.pdf)

<http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/1626>

[http://www.technicalreview.gr/index.php?option=com\\_content&task=view&id=936](http://www.technicalreview.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=936)

<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse2/stef/hle/2011/SarrisMichael/attached-document-1297155818-449289-27404/Sarris2011.pdf>

<http://www.elemko.gr/Documents/arresters.asp>