

ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ

6

Ενότητα 1.6

- 1.6.1** Μετασχηματιστές έντασης
- 1.6.2** Μετασχηματιστές τάσης
- 1.6.3** Ηλεκτρονόμοι προστασίας
- 1.6.4** Απαγωγείς τάσης (αλεξικέραυνα)



Διδακτικοί στόχοι

Στο τέλος αυτής της ενότητας οι μαθητές θα πρέπει να είναι σε θέση:

- ✎ να αναφέρουν τα είδη μετασχηματιστών μέτρησης που χρησιμοποιούνται στη μέση τάση.
- ✎ να γνωρίζουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών μέτρησης.
- ✎ να αναφέρουν τη λειτουργία των δύο πυρήνων που συναντάμε στους μετασχηματιστές έντασης με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα.
- ✎ να διαβάζουν και να σχεδιάζουν τα λειτουργικά διαγράμματα που περιέχουν μετασχηματιστές μέτρησης.
- ✎ να μπορούν να περιγράψουν τη λειτουργία και τα είδη των ηλεκτρονόμων που συναντάμε στους υποσταθμούς μέσης τάσης.
- ✎ να αναφέρουν τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου υπερέντασης σταθερού και αντιστροφου χρόνου.
- ✎ να αναφέρουν τη λειτουργία της επιλογικής προστασίας μεταξύ δύο διαδοχικών οργάνων προστασίας.
- ✎ να αναφέρουν τη λειτουργία των απαγωγέων τάσης (αλεξικέραυνων).
- ✎ να απαριθμούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των απαγωγέων τάσεων που χρησιμοποιούμε στα 20 kV.

1.6 Συσκευές μέτρησης και προστασίας υποσταθμών

Όπως γνωρίζουμε, στα δίκτυα μέσης τάσης η πολική τάση είναι 20.000V, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από την τάση των 400/230V που συναντάμε στις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης. Έχουμε μάθει ότι και μόνο το πλησίασμα σε αγωγούς μέσης τάσης είναι θανατηφόρο.

Όλα τα όργανα μέτρησης και προστασίας που διαθέτουμε είναι κατασκευασμένα να λειτουργούν με τάση όχι μεγαλύτερη των 1000 V. Σε περίπτωση που εισέλθει στα όργανα μεγαλύτερη τάση, τότε καταστρέφεται η μόνωσή τους, με αποτέλεσμα το όργανο να αχρηστεύεται και ταυτόχρονα να είναι επικίνδυνο για το χειριστή.

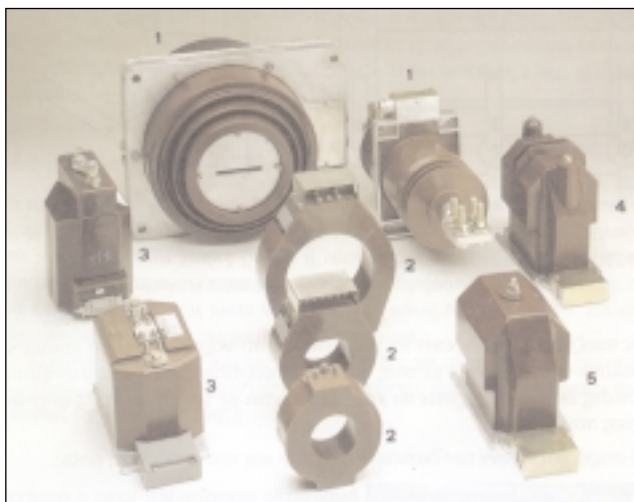
Η ανάγκη όμως μέτρησης αλλά και προστασίας στα δίκτυα μέσης τάσης είναι εξίσου ή και περισσότερο επιτακτική από τα δίκτυα χαμηλής τάσης.

Για να απομονώσουμε γαλβανικά(*) τα όργανα μέτρησης/προστασίας από τη μέση τάση, χρησιμοποιούμε ειδικούς μετασχηματιστές των οποίων το πρωτεύον συνδέεται στη μέση τάση και το δευτερεύον συνδέεται στα όργανα μέτρησης/προστασίας.

Τους ονομάζουμε μετασχηματιστές μέτρησης ή μετασχηματιστές οργάνων (instrument transformers) για να τους ξεχωρίζουμε από τους μετασχηματιστές ισχύος (power transformers) που έχουμε γνωρίσει στην Ενότητα 1.2.

Οι μετασχηματιστές μέτρησης, ανάλογα με το μέγεθος που μετρούν (ένταση ή τάση), χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές έντασης (current transformers)
- Μετασχηματιστές τάσης (voltage transformers)



Εικόνα 1.6 Μετασχηματιστές μέτρησης

1. Μετασχηματιστές έντασης τύπου μονωτήρα διέλευσης (bushing)
2. Μετασχηματιστές έντασης ανοιχτού πυρήνα ή τοροειδής
3. Μετασχηματιστές έντασης τύπου μονωτήρα
4. Διπολικός μετασχηματιστής τάσης
5. Μονοπολικός μετασχηματιστής τάσης

(*) Ο όρος γαλβανική απομόνωση δηλώνει ότι δεν υπάρχει οποιαδήποτε άμεση σύνδεση μεταξύ της μέσης και χαμηλής τάσης και συνεπώς μπορούμε να εργαστούμε στην πλευρά χαμηλής τάσης, λαμβάνοντας μόνο τις γνωστές προφυλάξεις. Εκτός των ΜΣ μετρήσεων χρησιμοποιούνται και άλλες τεχνικές μέτρησης των δικτύων μέσης τάσης, όπως είναι οι χωρητικοί ή ωμικοί καταμεριστές τάσης. Τότε όμως δεν έχουμε γαλβανική απομόνωση.

1.6.1 Μετασχηματιστές έντασης

Οι μετασχηματιστές έντασης αποτελούνται από ένα πρωτεύον και ένα ή περισσότερα (συνήθως δύο) δευτερεύοντα τυλίγματα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6.1, το πρωτεύον χαρακτηρίζεται με τα γράμματα **P1**, **P2** και τα δευτερεύοντα με τα γράμματα **S1**, **S2**. Αν ο μετασχηματιστής διαθέτει περισσότερα του ενός δευτερεύοντα, τότε χρησιμοποιούμε τα γράμματα **1S1**, **1S2** για το πρώτο, τα γράμματα **2S1**, **2S2** για το δεύτερο κ.ό.κ.

Το ένα δευτερεύον τύλιγμα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με ονομαστικό ρεύμα 5 A (σπάνια 1 A) των οργάνων μέτρησης όπως:

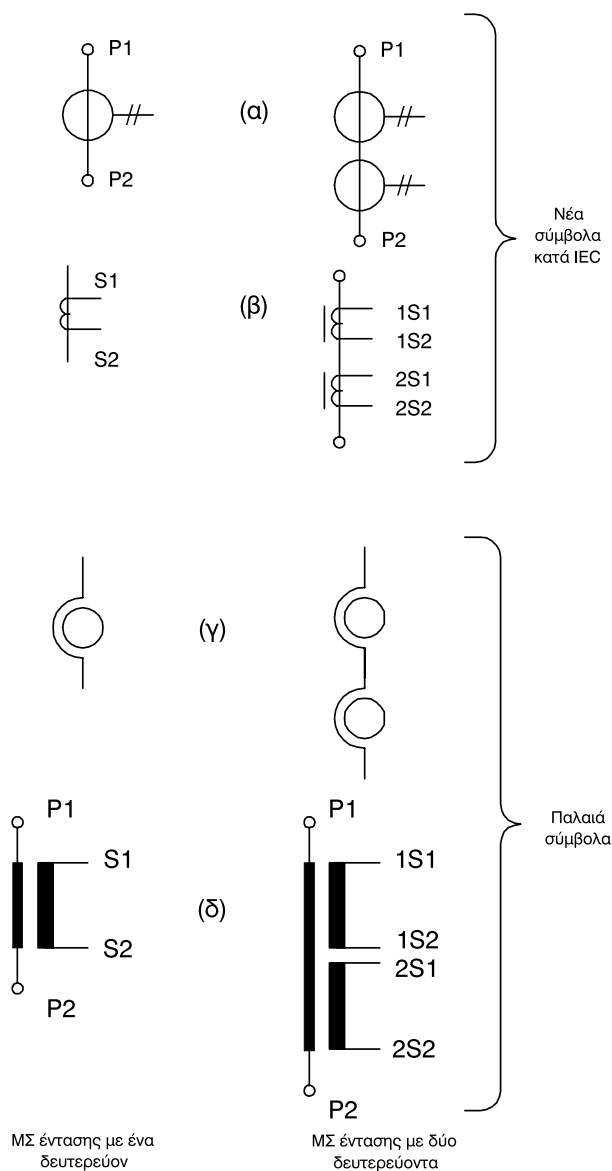
- Α-μετρα
- kW-μετρα (μετρητές ισχύος)
- kWh- μετρα (μετρητές ενέργειας)

Το άλλο δευτερεύον τύλιγμα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με ονομαστικό ρεύμα 5 A (σπάνια 1 A) των ηλεκτρονόμων προστασίας, όπως:

- Ηλεκτρονόμος υπερέντασης
- Ηλεκτρονόμος διαρροής προς γή
- Άλλοι τύποι ηλεκτρονόμων

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6.1, το σώμα των μετασχηματιστών έντασης είναι κατασκευασμένο από χυτο-ρητίνη (cast-resin). Το πρωτεύον τύλιγμα αποτελείται συνήθως από μία ή δύο σπείρες χοντρού χάλκινου αγωγού, στις άκρες του οποίου συγκολλούνται οι ακροδέκτες μέσης τάσης (P1, P2) που καταλήγουν σε σπειρώματα M12.

Το πρωτεύον τύλιγμα διέρχεται από τους πυρήνες μέτρησης και προστασίας, πάνω στους οποίους είναι τοποθετημένα τα δευτερεύοντα τυλίγματα.



Εικόνα 1.6.1 Μετασχηματιστές έντασης
 α. μονογραμμικό σύμβολο κατά IEC
 β. σύμβολο με ακροδέκτες κατά IEC
 γ. μονογραμμικό σύμβολο (παλαιό)
 δ. σύμβολο με ακροδέκτες (παλαιό)

1.6.1α Χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών έντασης

Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών έντασης είναι:

- **Ονομαστική τάση**, π.χ $U_n = 20/24\text{KV}$
- **Ονομαστική ισχύς ή φορτίο** (rated burden), π.χ $S_n = 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90\text{ VA}$. Οι κατασκευαστές δίνουν το φορτίο σε συνδυασμό με την κλάση ακριβείας.
- **Κλάση ακριβείας (cl) για το τύλιγμα μέτρησης** είναι από 0.2 έως 3%, εφόσον το φορτίο σε VA, δεν υπερβαίνει το ονομαστικό.
- **Κλάση ακριβείας (class) για το τύλιγμα προστασίας** είναι το % σφάλμα, το γράμμα P και το πολλαπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος που αντιστοιχεί το σφάλμα. Π.χ 5P15 σημαίνει σφάλμα 5% στο δεκαπενταπλάσιο του ονομαστικού.
- **Ονομαστικό ρεύμα πρωτεύοντος** $I_{1n} = 5$ έως 3000 A.
- **Ονομαστικό ρεύμα δευτερεύοντος** $I_{2n} = 5\text{A}$ ή 1A. Η τιμή του 1A προτιμάται όταν η απόσταση του μετασχηματιστή από τα όργανα μέτρησης/προστασίας είναι μεγάλη ($L > 50\text{m}$).
- **Αντοχή σε ρεύμα βραχείας διάρκειας** I_{th} σε kA. Είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος που αντέχει ο μετασχηματιστής για χρόνο $t = 1\text{s}$. Συνήθως είναι 20 έως 60 φορές το ονομαστικό ρεύμα I_{1n} .



Μετασχηματιστής ARJP1/N2F

- με ένα τύλιγμα στο πρωτεύον
- με δύο τυλίγματα στο δευτερεύον για μέτρηση και προστασία

αντοχή σε ρεύμα βραχίας διάρκειας I_{th} (kA)

	50	100	150	200
I_{1n} (A)				
I_{th} (kA)	4	10	10	10
t (s)	1			
μέτρηση 5 A	7,5 VA - class 0,5			
προστασία 5A	5 VA - 5P10			

Εικόνα 1.6.1α Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών έντασης, όπως τα συναντάμε σε φυλλάδια εταιριών

1.6.1β Πυρήνας μέτρησης και πυρήνας προστασίας, συντελεστές κορεσμού

Στην εικόνα 1.6.1β βλέπουμε την τομή ενός μετασχηματιστή έντασης με δύο διαφορετικούς πυρήνες, ένα για μέτρηση και ένα για προστασία.

Ο πυρήνας για τη μέτρηση είναι κατασκευασμένος από ειδικό κράμμα σιδήρου, ώστε να εμφανίζει όσο γίνεται μικρότερο συντελεστή κορεσμού (saturation factor), έτσι ώστε και με μικρές υπερεντάσεις στο πρωτεύον, το ρεύμα στο δευτερεύον περιορίζεται. Έτσι οι συσκευές μέτρησης δεν καταστρέφονται.

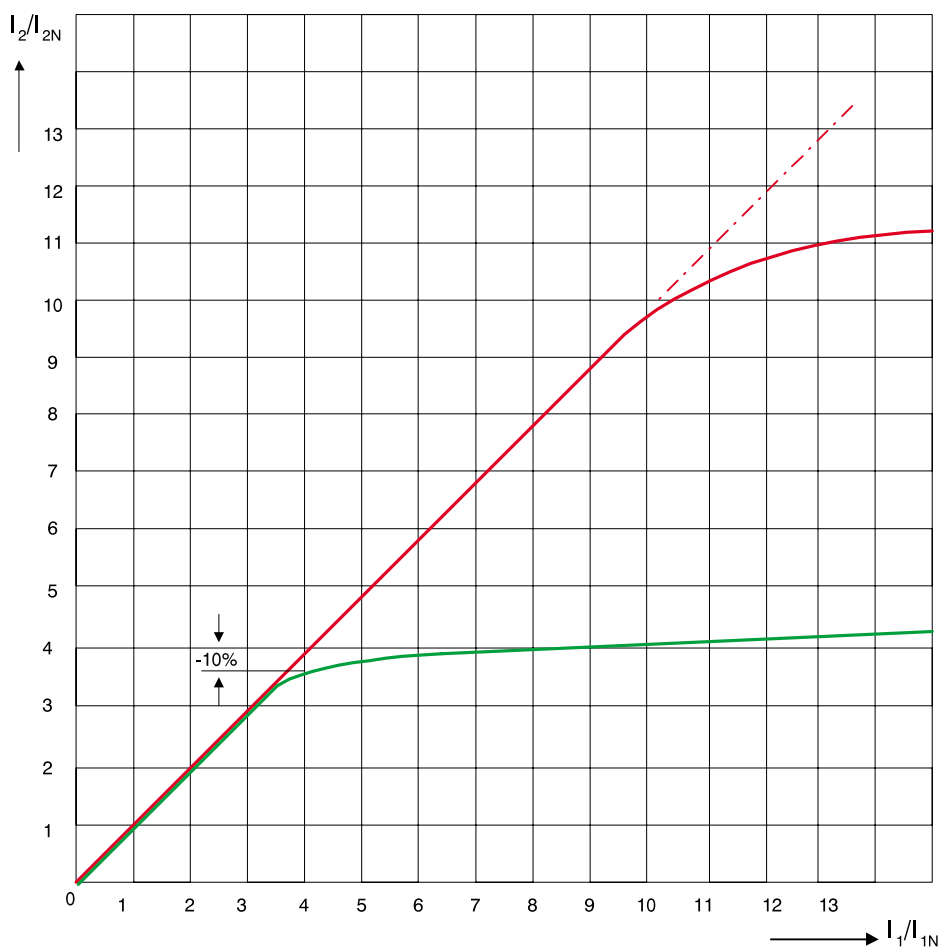
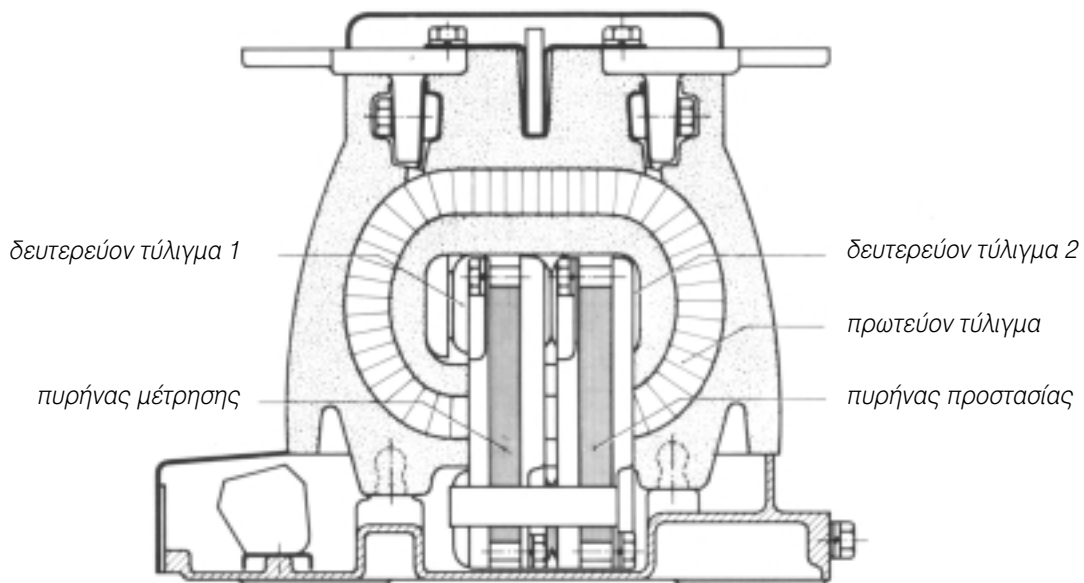
Για να το καταλάβουμε καλύτερα, χρησιμοποιούμε τις καμπύλες απόκρισης του μετασχηματιστή έντασης (Εικόνα 1.6.1β) Ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμολογημένος με το λόγο I_1/I_{1N} του πρωτεύοντος, ενώ ο κάθετος άξονας είναι βαθμολογημένος με το λόγο I_2/I_{2N} του δευτερεύοντος. Οι καμπύλες απόκρισης μας δείχνουν τη συμπεριφορά του μετασχηματιστή σε συνθήκες υπερέντασης στο πρωτεύον.

Η πράσινη καμπύλη αποτελείται από ένα ευθύγραμμο κομμάτι (για λόγο I_1/I_{1N} μέχρι το 3) που στη συνέχεια σχηματίζει ένα γόνατο. Πρακτικά το

γόνατο μας δείχνει ότι ο σιδερένιος πυρήνας του μετασχηματιστή έχει εισέλθει στην περιοχή του μαγνητικού κορεσμού.

Βλέπουμε ότι για το λόγο $I_1/I_{1N} = 4$ (δηλ. για ρεύμα πρωτεύοντος 4 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό ρεύμα), ο λόγος I_2/I_{2N} γίνεται 3,6 αντί του αναμενόμενου 4, δηλαδή έχουμε ένα σφάλμα $4,0 - 3,6 = 0,4$. Κάνοντας αναγωγή του σφάλματος $0,4$ στην τιμή 4 το σφάλμα είναι 10%. Το σφάλμα αυτό μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο λόγος I_1/I_{1N} , με αποτέλεσμα το ρεύμα στο δευτερεύον να περιορίζεται και έτσι δεν καταστρέφονται οι συσκευές μέτρησης.

Ο πυρήνας για την προστασία είναι κατασκευασμένος από διαφορετικό κράμμα σιδήρου, ώστε να εμφανίζει όσο γίνεται μεγαλύτερο συντελεστή κορεσμού ($F_s > 10$). Το ρεύμα του δευτερεύοντος αυξάνεται ανάλογα με το ρεύμα του πρωτεύοντος και περιορίζεται μόνο όταν τα ρεύματα είναι πολύ μεγάλα, π.χ βραχυκύκλωμα. Έτσι ο ΗΝ προστασίας παρακολουθεί σωστά το ρεύμα του δικτύου για να επέμβει, όταν χρειαστεί.



Εικόνα 1.6.1β 1. Τομή μετασχηματιστή έντασης με δύο πυρήνες
 2. Χαρακτηριστικές κορεσμού των πυρήνων ενός μετασχηματιστή έντασης
 Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στον πυρήνα μέτρησης
 Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στον πυρήνα προστασίας

1.6.1γ Σύνδεση μετασχηματιστών μέτρησης

Στην Εικόνα 1.6.1γ βλέπουμε το λειτουργικό διάγραμμα (circuit diagram) ενός διακόπτη ισχύος με τρεις μετασχηματιστές έντασης. Σε κάθε φάση υπάρχει ένας μετασχηματιστής έντασης με δύο δευτερεύοντα τυλίγματα, ένα για τη μέτρηση και ένα για προστασία.

Τα τυλίγματα μέτρησης καταλήγουν μέσω της κλεμμοσειράς(*) X1 στα όργανα μέτρησης που είναι τρία Α-μετρα (ένα για κάθε φάση). Τα ίδια τυλίγματα τροφοδοτούν και άλλα όργανα μέτρησης που χρειάζονται το ρεύμα για να μπορέσουν να με-

τρήσουν. Τέτοια όργανα είναι το τριφασικό kW-μετρο, που δείχνει τη στιγμιαία συνολική ηλεκτρική ισχύ και το τριφασικό kWh-μετρο που καταγράφει την ηλεκτρική ενέργεια που έχουμε καταναλώσει.

Σημειώνουμε ότι τα όργανα μέτρησης είναι βαθμολογημένα πάντα σε αληθινές τιμές.

Για παράδειγμα, αν ο μετασχηματιστής έντασης έχει λόγο 100/5/5A, τότε η κλίμακα του Α-μέτρου είναι από 0-100 A, δηλ. όταν το ρεύμα που περνά μέσα από το Α-μετρο είναι 5 A, η βελόνα του δείχνει 100A.

Ετσι όταν παραγγέλνουμε:

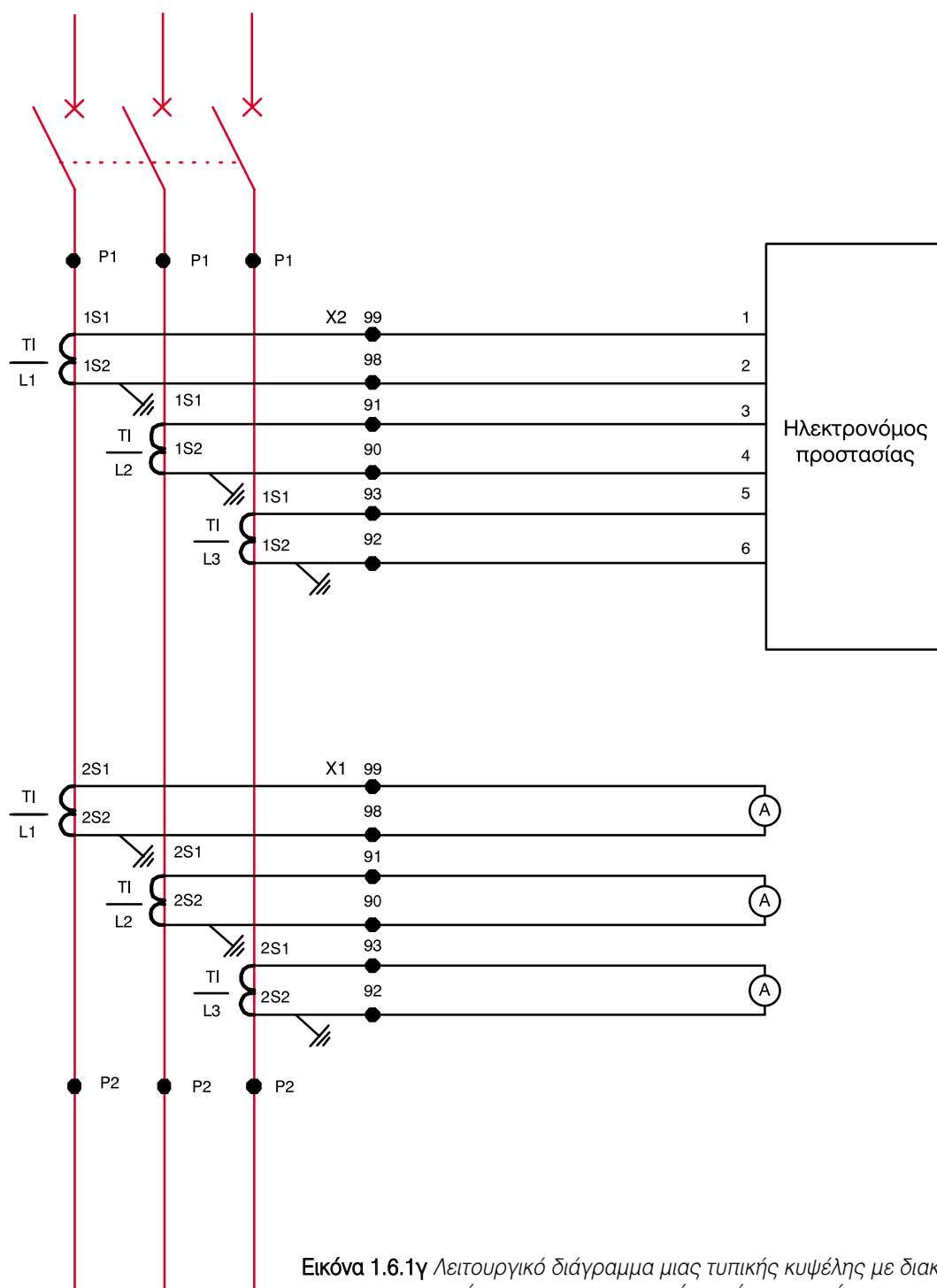
- **ένα Α-μετρο, πρέπει να ορίζουμε και το λόγο του μετασχηματιστή έντασης με τον οποίο θα συνεργαστεί το Α-μετρο.**
- **ένα V-μετρο, πρέπει να ορίζουμε και το λόγο του μετασχηματιστή τάσης με τον οποίο θα συνεργαστεί το V-μετρο.**
- **ένα KW-μετρο, πρέπει να ορίζουμε και τους λόγους των μετασχηματιστών έντασης και τάσης με τους οποίους θα συνεργαστεί το KW-μετρο**

Σημειώνουμε ότι τα όργανα που μετρούν ισχύ και ενέργεια χρειάζονται εκτός του ρεύματος της κάθε φάσης και την αντίστοιχη φασική τάση.

Τα τυλίγματα προστασίας καταλήγουν μέσω της κλεμμοσειράς(*) X2 στον ηλεκτρονόμο προστασίας. Ο ηλεκτρονόμος ελέγχει συνεχώς την τιμή του ρεύματος σε κάθε φάση και, αν ξεπεράσει την τιμή που τον έχουμε ρυθμίσει για περισσότερο χρόνο από αυτό που επίσης έχουμε ρυθμίσει, τότε δίνει εντολή (trip) στο πηνίο ανοίγματος και ο διακόπτης ισχύος ανοίγει.

(*) Αν το δευτερεύον του ΜΣ έντασης μείνει ανοικτό, τότε στα άκρα του δημιουργείται επικίνδυνη υπέρταση.

Οι κλεμμοσειρές X1, X2 που χρησιμοποιούμε για τη σύνδεση των μετασχηματιστών έντασης είναι ειδικές κλέμες, που μας επιτρέπουν να βραχυκυκλώνουμε τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών. Αυτό γίνεται όταν θέλουμε να απομονώσουμε τα όργανα μέτρησης/προστασίας για να τα ελέγξουμε ή να τα ρυθμίσουμε.



1.6.2 Μετασχηματιστές τάσης

Οι μετασχηματιστές τάσης αποτελούνται από ένα πρωτεύον και ένα ή δύο δευτερεύοντα τυλίγματα. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Μονοπολικοί**, οι οποίοι μετράνε την τάση μεταξύ μιας φάσης και της γής, δηλαδή τη φασική τάση. Το πρωτεύον τυλίγμα χαρακτηρίζεται με τα γράμματα **A,N** και το δευτερεύον τυλίγμα με τα γράμματα **a,n**.
- **Διπολικοί**, οι οποίοι μετράνε την τάση μεταξύ δύο φάσεων, δηλαδή την πολική τάση. Το πρωτεύον τυλίγμα χαρακτηρίζεται με τα γράμματα **A,B** και το δευτερεύον τυλίγμα με τα γράμματα **a,b**.

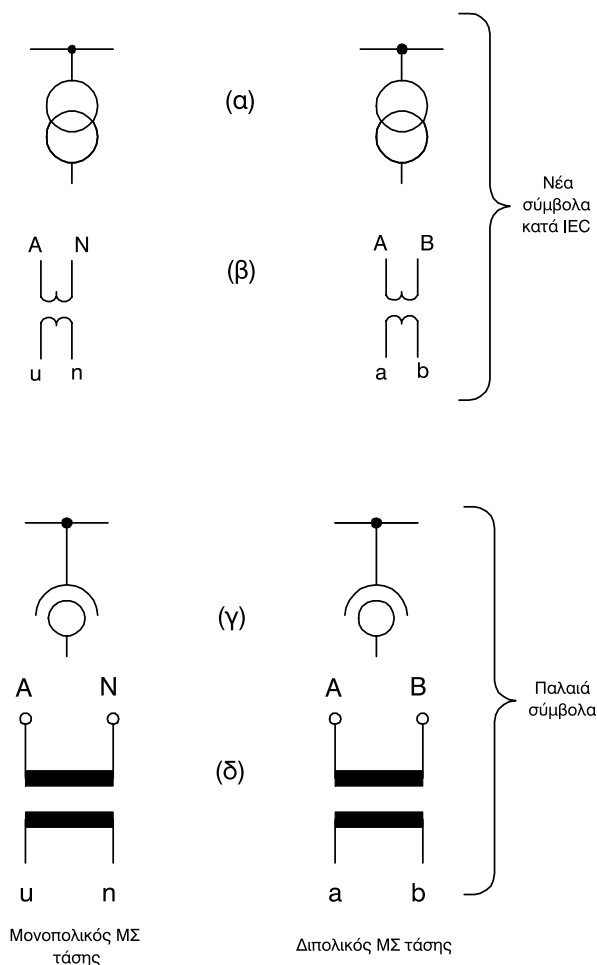
Το ένα δευτερεύον τυλίγμα χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση με ονομαστική τάση 100 V (ή $100/\sqrt{3}$) των οργάνων μέτρησης όπως:

- V-μετρα
- kW-μετρα (μετρητές ισχύος)
- kVA-μετρα (μετρητές αέργου ισχύος)
- kWh-μετρα (μετρητές ενέργειας)
- κ.ά

ή οργάνων προστασίας όπως:

- ηλεκτρονόμος υπέρτασης (over-voltage relays)
- ηλεκτρονόμος υπότασης (under-voltage relays)
- ηλεκτρονόμος σφάλματος προς γή
- κ.ά

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.6.2α, το σώμα των μετασχηματιστών τάσης είναι κατασκευασμένο από χυτο-ρητίνη (cast-resin). Εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε αν ο Μ/Σ τάσης είναι μονοπολικός ή διπολικός. Συνήθως προτιμάμε τους διπολικούς Μ/Σ, διότι με δύο μόνο Μ/Σ μπορούμε να μετρήσουμε ένα τριφασικό σύστημα. Αν αντίθετα χρησιμοποιήσουμε μονοπολικούς Μ/Σ θα χρειαζόμαστε τρεις.



Εικόνα 1.6.2 Μετασχηματιστές τάσης
α. μονογραμμικό σύμβολο κατά IEC
β. σύμβολο με ακροδέκτες κατά IEC
γ. μονογραμμικό σύμβολο (παλαιό)
δ. σύμβολο με ακροδέκτες (παλαιό)

1.6.2α Χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών τάσης

Τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών τάσης είναι:

- **Ονομαστική τάση**, π.χ $U_n = 20/24 \text{ kV}$
- **Ονομαστική ισχύς** ή φορτίο (rated burden), π.χ $S_n = 30$ έως 300 VA . Οι κατασκευαστές δίνουν το φορτίο σε συνδυασμό με την κλάση ακριβείας
- **Κλάση ακριβείας** (class), η οποία είναι από 0.2 έως 3%, εφόσον το φορτίο σε VA, δεν υπερβαίνει το ονομαστικό
- **Ονομαστική τάση πρωτεύοντος** $U_{1n} = 20 \text{ kV}$ για διπολικούς ή $20/\sqrt{3}$ για μονοπολικούς
- **Ονομαστική τάση δευτερεύοντος** $U_{2n} = 100 \text{ V}$ για διπολικούς ή $100/\sqrt{3}$ για μονοπολικούς. Σπάει να συναντάμε την τιμή 110 V αντί των 100 V .
- **Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς** S_{\max} σε VA. Συνήθως είναι 10 φορές το S_n .

Διευκρινίζουμε ότι η ονομαστική ισχύς είναι η τάση 100 V επί το ρεύμα στο δευτερεύον. Μπορεί να γίνει υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος S_n μέχρι S_{\max} , π.χ όταν ο μετασχηματιστής τροφοδοτεί φορτία και όχι μόνο όργανα αλλά η κλάση ακριβείας μεγαλώνει.

Για ένα τυπικό μετασχηματιστή τάσης $30 \text{ VA class } 0.2$ έχουμε:

S σε VA	30	50	100	250
Class	0.2	0.5	1.0	3.0



Μετασχηματιστές VRC2/S1 (μονοπολικός) 50/60 Hz

ονομαστική τάση (kV)	24			
τάση πρωτεύοντος (kV)	$10/\sqrt{3}$	$15-20/\sqrt{3}$	$20/\sqrt{3}$	
τάση δευτερεύοντος (V)	$100/\sqrt{3}$			
μέγιστη ισχύς (VA)	250	250	250	
κλάση ακριβείας	0,5	0,5	0,5	0,5
ονομαστική ισχύς πρωτεύοντος για μονοπολικούς (VA)	30	30		30
ονομαστική ισχύς πρωτεύοντος για διπολικούς (VA)			30-50	

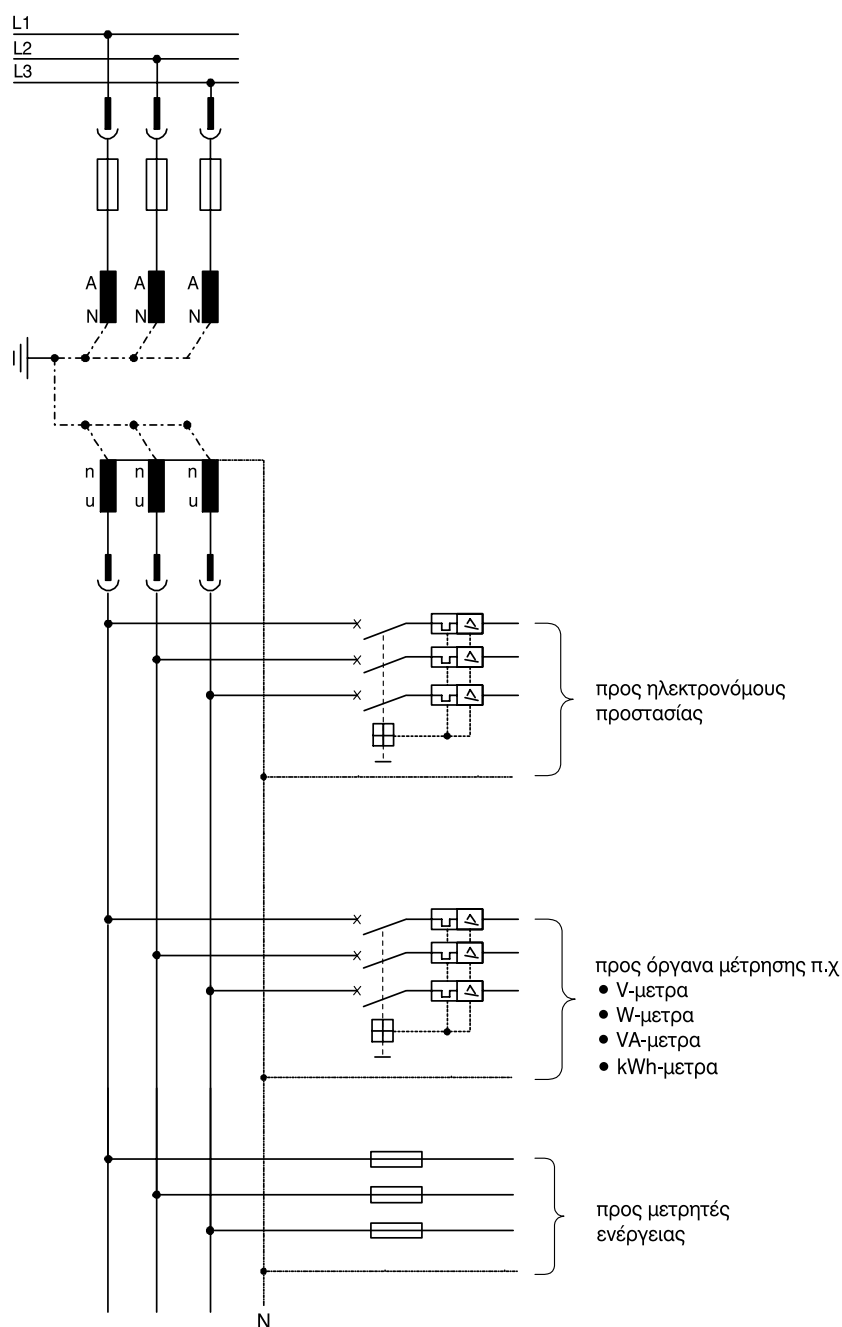
Μετασχηματιστές VRC2/S1 (διπολικός) 50/60 Hz

ονομαστική τάση (kV)	24		
τάση πρωτεύοντος (kV)	10	15	20
τάση δευτερεύοντος (V)	100		
μέγιστη ισχύς (VA)	500		
κλάση ακριβείας	0,5		
ονομαστική ισχύς πρωτεύοντος για μονοπολικούς (VA)	50		

Εικόνα 1.6.2α Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών τάσης όπως τα συναντάμε σε φυλλάδια εταιριών

1.6.2β Σύνδεση μετασχηματιστών τάσης

Στην Εικόνα 1.6.2β βλέπουμε το λειτουργικό διάγραμμα μιας κυψέλης μέτρησης με τρεις μονοφασικούς μετασχηματιστές τάσης. Το δευτερεύον τροφοδοτεί με ξεχωριστές γραμμές τα όργανα μέτρησης και τα όργανα προστασίας. Οι γραμμές ασφαλίζονται με μικρο-αυτόματους διακόπτες ή τηκτές ασφάλειες.



Εικόνα 1.6.2β
Λειτουργικό διάγραμμα
κυψέλης μέτρησης

1.6.3 Ηλεκτρονόμοι προστασίας (Protective relays)

Οι ηλεκτρονόμοι προστασίας (ΗΝ) είναι συσκευές που έχουν σκοπό τη συνεχή επιτήρηση ενός ηλεκτρικού μεγέθους (συνήθως ρεύμα) σε ένα τμήμα της ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Αν το μέγεθος ξεφύγει από τα όρια επιτήρησης, τότε αυτόματα δίνουν τις απαραίτητες εντολές (συνήθως εντολή ανοίγματος), με σκοπό να αποτρέψουν τις συνέπειες στον εξοπλισμό.

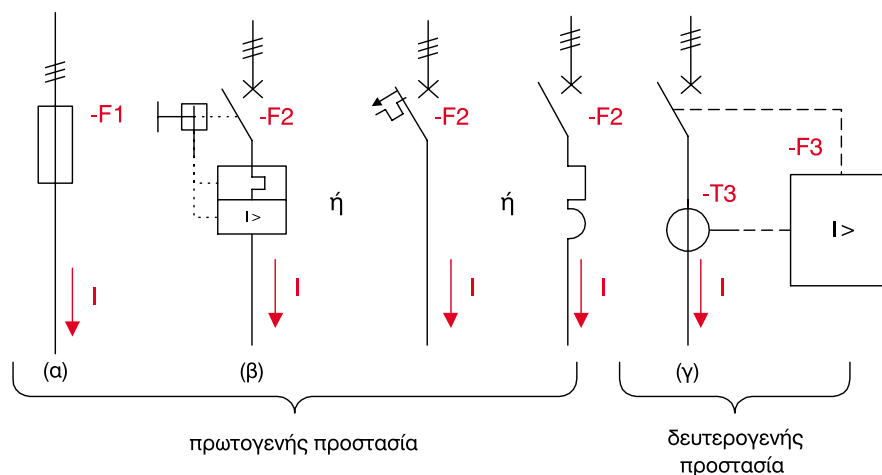
Στη χαμηλή τάση έχουμε γνωρίσει τα θερμικά και

μαγνητικά στοιχεία που υπάρχουν στις αυτόματες ασφάλειες⁽¹⁾ που χρησιμοποιούμε για να ασφαλίσουμε τις γραμμές των ηλεκτρικών πινάκων (Εικόνα 1.6.3). Τα στοιχεία αυτά είναι πρακτικά ηλεκτρονόμοι προστασίας, διότι από μέσα τους διέρχεται το ρεύμα της γραμμής που πρέπει να επιτηρούν. Η προστασία αυτή ονομάζεται πρωτογενής προστασία (primary protection), διότι το ρεύμα που διέρχεται μέσα από τον ηλεκτρονόμο είναι το ίδιο το ρεύμα της γραμμής.

Στα δίκτυα των 20 kV, το πρωτογενές ρεύμα δεν είναι δυνατόν⁽²⁾ να περάσει μέσα από τα όργανα προστασίας, γι' αυτό μετασχηματίζεται με τη βοήθεια των μετασχηματιστών έντασης. Έτσι μέσα από τον ηλεκτρονόμο διέρχεται το πολύ μικρότερο ρεύμα του δευτερεύοντος τυλίγματος, γι' αυτό και ονομάζεται δευτερογενής προστασία (secondary protection)

Υπάρχουν δεκάδες διαφορετικοί τύποι ηλεκτρονόμων προστασίας. Παρακάτω αναφέρουμε τους πιο συνηθισμένους που συναντάμε στα δίκτυα καταναλωτών μέσης τάσης.

- ΗΝ υπερέντασης (Overcurrent relay)
- ΗΝ έλλειψης τάσης (Undervoltage relay)
- ΗΝ σφάλματος προς γή (Ground overcurrent relay)
- ΗΝ διαφορικής προστασίας (Differential protection relay)



Εικόνα 1.6.3 Τα δύο βασικά είδη προστασίας

- α. πρωτογενής προστασία μιας τηκτής ασφάλειας
- β. πρωτογενής προστασία μιας αυτόματης ασφάλειας
- γ. δευτερογενής προστασία σε διακόπτη ισχύος

(1) Σημειώνουμε ότι η αυτόματη ασφάλεια (ή μικροαυτόματος) είναι πρακτικά ένας διακόπτης ισχύος (circuit-breaker) με ενσωματωμένους τους ηλεκτρονόμους (ή στοιχεία) προστασίας, δηλαδή θερμικό και μαγνητικό.

(2) Σε παλιούς υποσταθμούς μπορεί να συναντήσουμε διακόπτες ισχύος 20 kV με πρωτογενή προστασία, δηλαδή το θερμικό και μαγνητικό στοιχείο ήταν πάνω στους πόλους του διακόπτη και με την βοήθεια μονωμένων μοχλών έδινε εντολή στο μηχανισμό ανοίγματος.

1.6.3α Πως είναι κατασκευασμένος ένας ηλεκτρονόμος προστασίας

Μέχρι τη δεκαετία του 1950 οι ηλεκτρονόμοι ήταν ηλεκτρομαγνητομηχανικοί. Αποτελούνταν από μηχανικά μέρη (γρανάζια, ελατήρια, βραχίονες κ.λπ), τα οποία συνεργάζονταν με ηλεκτρομαγνήτες που διεγείρονταν από το δευτερεύον ρεύμα των μετασχηματιστών έντασης. Η έξοδός τους ήταν μια σειρά από βοηθητικές επαφές που έκλειναν και έδιναν έτσι την εντολή να ανοίξει ο διακόπτης ισχύος.

Από τη δεκαετία του 1960 οι ηλεκτρονόμοι αυτοί άρχισαν να αντικαθίστανται με ηλεκτρονικούς. Αποτελούνταν από ηλεκτρονικά στοιχεία στερεάς κατάστασης, δηλαδή τρανζίστορ και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Με την πρόοδο των ψηφιακών ηλε-

κτρονικών οι ηλεκτρονικοί ηλεκτρονόμοι έγιναν πολύ έξυπνοι, δηλαδή συνδυάζουν πολλές λειτουργίες και πολλές ρυθμίσεις.

Σήμερα οι ηλεκτρονόμοι είναι εξ' ολοκλήρου ψηφιακές συσκευές, οι οποίες περιέχουν τουλάχιστον ένα μικρο-επεξεργαστή που αναλαμβάνει το σύνολο των συμβατικών λειτουργιών του ηλεκτρονόμου προστασίας (Εικόνα 1.6.3α).

Παράλληλα ο μικρο-επεξεργαστής, μπορεί να επικοινωνεί με συστήματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (SCADA), κάτι που είναι πολύ σημαντικό στα πολύπλοκα ηλεκτρικά δίκτυα που υπάρχουν σήμερα.



Ενδεικτικές λυχνίες που μας δείχνουν ποιο είναι το μετρούμενο μέγεθος

Ψηφιακή οθόνη που βλέπουμε:

- τις ρυθμίσεις του ηλεκτρονόμου
- το μετρούμενο μέγεθος, δηλαδή το ρεύμα
- τις αποθηκευμένες τιμές προηγούμενων σφαλμάτων

Κομβίο που μας επιτρέπει να προγραμματίσουμε τη λειτουργία και τις ρυθμίσεις του ΗΝ

Εικόνα 1.6.3α Ψηφιακός ηλεκτρονόμος υπερέντασης και σφάλματος προς γη

1.6.3β Ηλεκτρονόμος υπερέντασης σταθερού χρόνου (overcurrent relay with definite time-delay)

Ο Η/Ν αυτός περιλαμβάνει για κάθε φάση δύο στοιχεία που είναι τα εξής:

- Στοιχείο υπερφόρτισης (overload operation) με σταθερή χρονική καθυστέρηση, δηλαδή αν το ρεύμα κάποιας φάσης υπερβεί το όριο I_1 αλλά όχι το όριο I_2 (Εικόνα 1.6.3β), θα υπάρξει διέγερση και, ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος, μετά την παρέλευση του σταθερού χρόνου t_1 , ο ηλεκτρονόμος θα δώσει εντολή να ανοίξει ο διακόπτης ισχύος.
- Στοιχείο στιγμιαίας λειτουργίας (instantaneous operation), δηλαδή αν το ρεύμα υπερβεί το όριο I_2 , θα υπάρξει διέγερση και αμέσως θα δώσει εντολή να ανοίξει ο διακόπτης ισχύος.

Συνήθως ο Η/Ν είναι εφοδιασμένος και με

- στοιχείο σφάλματος προς γή, δηλαδή ελέγχει αν

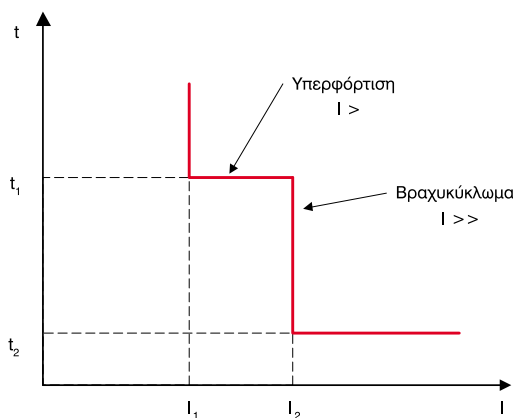
το άθροισμα των τριών ρευμάτων είναι μηδέν⁽¹⁾. Σε περίπτωση σφάλματος κάποιας φάσης προς τη γή, το άθροισμα των τριών ρευμάτων παύει να είναι μηδέν και ο Η/Ν διεγείρεται αμέσως.

Ο τρόπος λειτουργίας του ηλεκτρονόμου παριστάνεται με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής ρεύματος-χρόνου (Εικόνα 1.6.3β) που μοιάζει με σκαλοπάτι.

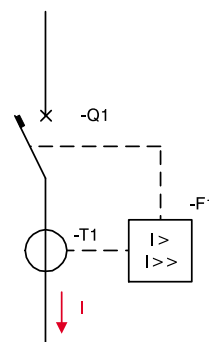
Ο οριζόντιος άξονας είναι βαθμολογημένος με το λόγο I/I_n ($I_n = 5 \text{ A}$) και ο κάθετος άξονας είναι βαθμολογημένος σε s.

Οι ρυθμίσεις (set-points) σε αυτό τον ηλεκτρονόμο είναι οι παρακάτω τρεις:

- ρύθμιση του ρεύματος I_1
- ρύθμιση του ρεύματος I_2
- ρύθμιση του χρόνου t_1



(1)



(2)

Εικόνα 1.6.3β

1. Χαρακτηριστική ρεύματος-χρόνου ηλεκτρονόμου σταθερού χρόνου
2. Λειτουργικό διάγραμμα διακόπτη ισχύος με ηλεκτρονόμο σταθερού χρόνου

(1) Πολλές φορές το στοιχείο σφάλματος προς γή, τροφοδοτείται από το δευτερεύον ενός 4ου διαφορικού μετασχηματιστή έντασης. Ο μετασχηματιστής αυτός αποτελείται από ένα στρογγυλό μαγνητικό πυρήνα, μέσα από τον οποίο διέρχονται τα καλώδια 20 kV και των τριών φάσεων, δηλαδή οι αγωγοί των καλωδίων λειτουργούν σαν πρωτεύον τύλιγμα. Σε περίπτωση σφάλματος προς τη γή, το άθροισμα των ρευμάτων των τριών φάσεων παύει να είναι μηδέν, με αποτέλεσμα στο δευτερεύον τύλιγμα να εμφανίζεται ρεύμα. Σημειώνουμε ότι, η λειτουργία του διαφορικού μετασχηματιστή είναι ακριβώς ίδια με τη λειτουργία του διαφορικού μετασχηματιστή που υπάρχει στους διακόπτες διαφυγής έντασης (αντι-ηλεκτροπληξιακούς διακόπτες) που συναντάμε στους οικιακούς ηλεκτρικούς πίνακες 230/400 V.

1.6.3γ Ηλεκτρονόμος υπερέντασης αντίστροφου χρόνου (overcurrent relay with inverse time-delay)

Ο Η/Ν υπερέντασης σταθερού χρόνου έχει το μειονέκτημα, ότι ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος (εφόσον είναι $< I_2$), περιμένει τον ίδιο χρόνο πριν δώσει την εντολή απόζευξης.

Αυτό μπορεί να είναι μοιραίο για εναέρια δίκτυα ή υπόγεια καλώδια. Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιούμε τους **Η/Ν αντίστροφου χρόνου**, δηλαδή όσο αυξάνεται το ρεύμα τόσο μειώνεται ο χρόνος διέγερσης (Εικόνα 1.6.3γ). Κατά τ' άλλα ισχύουν αυτά που αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο για τον Η/Ν σταθερού χρόνου.

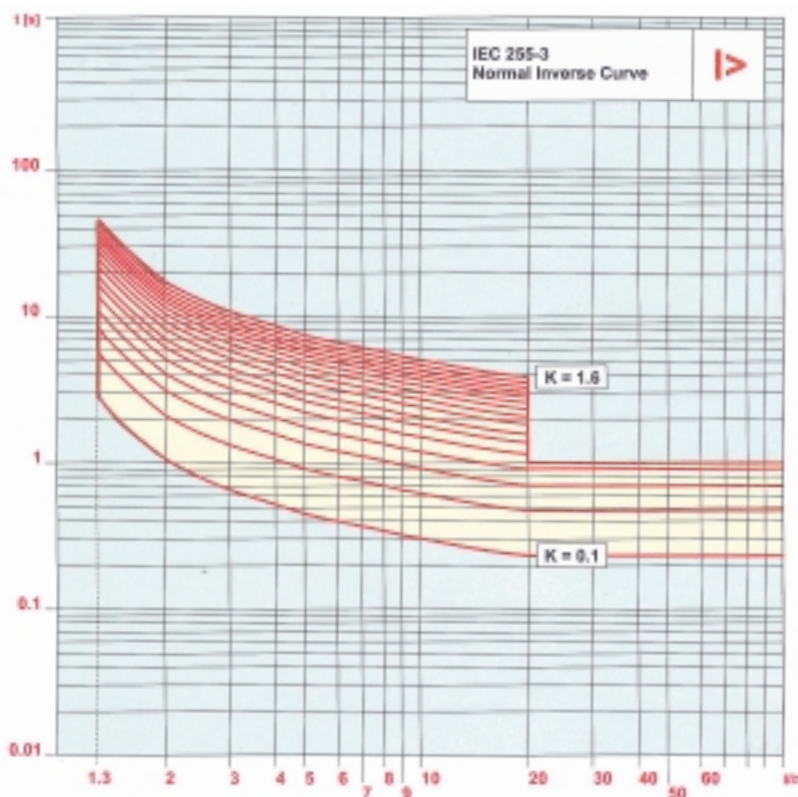
Για να μπορούμε να ρυθμίσουμε τους Η/Ν που υπάρχουν σε ένα εκτεταμένο ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να συνεργάζονται σωστά, δηλαδή το στοιχείο προστασίας που είναι πλησιέστερα στο σφάλμα να ανοίγει πρώτο, χρησιμοποιούμε Η/Ν υπερέντασης:

- **πολύ αντίστροφου χρόνου** (very inverse time-delay)
- **υπερβολικά αντίστροφου χρόνου** (extremely inverse time-delay)

Η διαφορά των δύο αυτών Η/Ν από τον Η/Ν αντίστροφου χρόνου είναι στην κλίση χαρακτηριστικών καμπυλών, που είναι πολύ πιο απότομες.

Σήμερα, οι κατασκευαστές Η/Ν διαθέτουν στην αγορά ένα μοντέλο Η/Ν υπερέντασης, που προγραμματίζεται και μας επιτρέπει:

- να επιλέξουμε τον τρόπο λειτουργίας δηλαδή σταθερού, αντιστρόφου κ.λπ. χρόνου
- την καμπύλη λειτουργίας από ένα σμήνος καμπυλών (Εικόνα 1.6.3γ).
- τις ρυθμίσεις $I>$, $I>>$, $t>$, $t>>$ κ.α.



Εικόνα 1.6.3γ Σμήνος καμπυλών αντιστρόφου χρόνου ΗΝ υπερέντασης

1.6.3δ Επιλογική προστασία

Σε περίπτωση σφάλματος στο τέλος της γραμμής, όλα τα στοιχεία προστασίας διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Επομένως πρέπει να εξασφαλιστεί, ότι από τα τρία στοιχεία προστασίας θα ανοίξει μόνο το F3. Έτσι θα μείνει χωρίς τάση μόνο το κομμάτι της εγκατάστασης που είναι μετά από το F3. Σε αντίθετη περίπτωση, π.χ αν άνοιγε πρώτος ο διακόπτης F2 ή ο F1, τότε θα έβγαине εκτός λειτουργίας ένα πολύ μεγαλύτερο μέρος της εγκατάστασής μας.

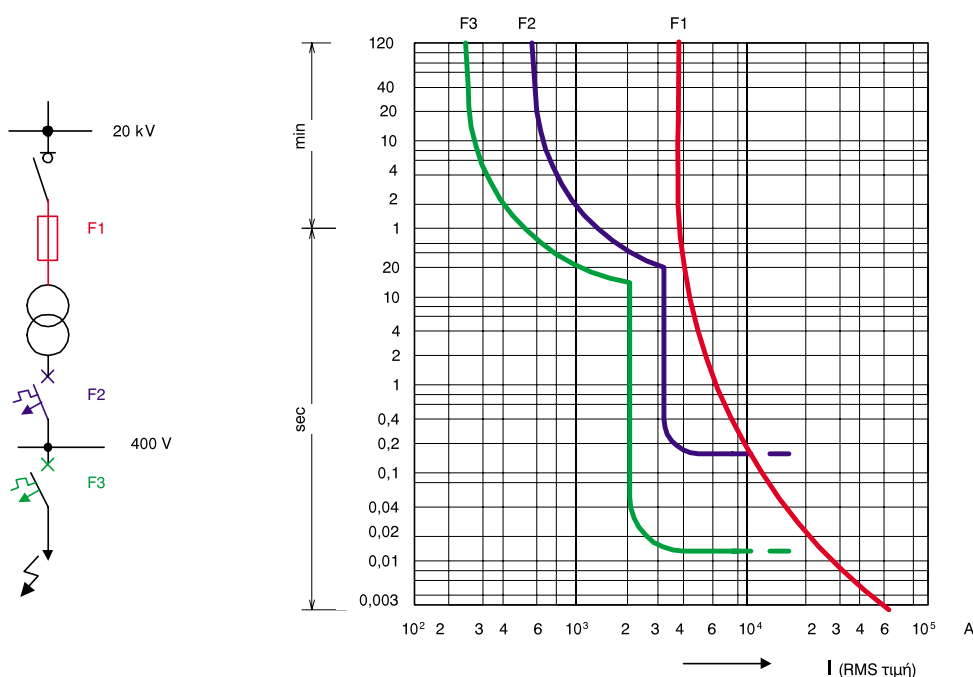
Λέγοντας επιλογική προστασία ή επιλεκτική συνεργασία εννοούμε ότι:

- ο **το όργανο προστασίας που είναι πλησιέστερο στο σφάλμα πρέπει να διακόπτει πρώτο.**
- σε περίπτωση αστοχίας θα πρέπει να διακόψει το αμέσως επόμενο όργανο προστασίας κ.ο.κ.**

Για να λειτουργήσει ένα μέσο προστασίας γρηγορότερα από ότι ένα άλλο, εφ'όσον διαρρέονται και τα δύο από το ίδιο ρεύμα, πρέπει ο χρόνος αντίδρασης του πρώτου να είναι μικρότερος απ' ότι ο χρόνος του δεύτερου για το ίδιο ρεύμα. Η χρονική διαφορά πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,4 s.

Η μελέτη της επιλογικής προστασίας γίνεται πάνω σε διπλό λογαριθμικό χαρτί (Εικόνα 1.6.3δ), στο οποίο σχεδιάζουμε με ακρίβεια τις χαρακτηριστικές απόξευξης, όλων των οργάνων προστασίας που βρίσκονται στη διαδρομή του σφάλματος. Πρέπει, η καμπύλη του F1 να είναι κάτω από την καμπύλη του F2, και η καμπύλη του F2 να είναι κάτω από την καμπύλη του F1

Τη μελέτη αυτή την κάνει ο παροχέας μέσης τάσης (δηλαδή η ΔΕΗ), που μας ορίζει σε ποια περιοχή πρέπει να ρυθμίσουμε τους ηλεκτρονόμους του υποσταθμού μας, ώστε σε περίπτωση σφάλματος στον υποσταθμό μας, να μη δημιουργήσουμε πρόβλημα και σε άλλους καταναλωτές.



Εικόνα 1.6.3δ

- Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης με τα στοιχεία προστασίας F1, F2, F3
- Οι χαρακτηριστικές λειτουργίας των F1, F2, F3 σχεδιάζονται στο ίδιο λογαριθμικό χαρτί

1.6.4 Απαγωγείς τάσης (αλεξικέραυνα)

Οι υπερτάσεις στα δίκτυα μέσης τάσης είναι:

- **εξωτερικές**, δηλαδή να προέρχονται από ατμοσφαιρικές εκκενώσεις (κεραυνούς).
- **εσωτερικές**, δηλαδή να προέρχονται από το άνοιγμα ή κλείσιμο διακοπών που τροφοδοτούν επαγωγικά ή χωρητικά φορτία.

Στα δίκτυα 20 kV συναντάμε δύο είδη απαγωγών τάσεων:

- **Σπινθηριστές ακίδων**. Τους συναντάμε συνήθως στους ακροδέκτες μέσης τάσης των μετασχηματιστών.
- **Απαγωγείς τάσεων** με μη γραμμικές αντιστάσεις

Θυμίζουμε ότι για τα δίκτυα των 20 kV οι ονομαστικές τάσεις που χαρακτηρίζουν την αντοχή είναι:

- ενεργός τιμή 24 kV για βιομηχανική συχνότητα 50 Hz και χρόνο απερίοριστο.
- ενεργός τιμή 50 kV για βιομηχανική συχνότητα 50 Hz και χρόνο $t = 1\text{s}$.
- τιμή κορυφής 125 kV για κρουστική τάση μορφής

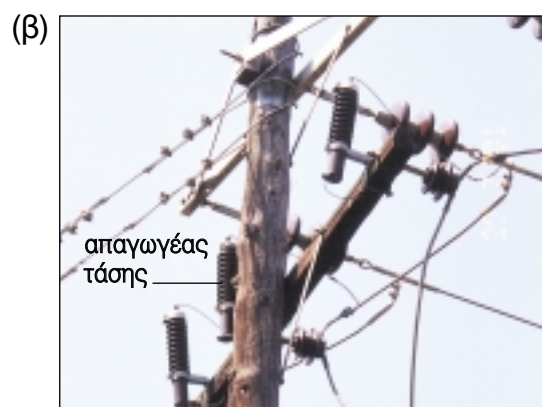
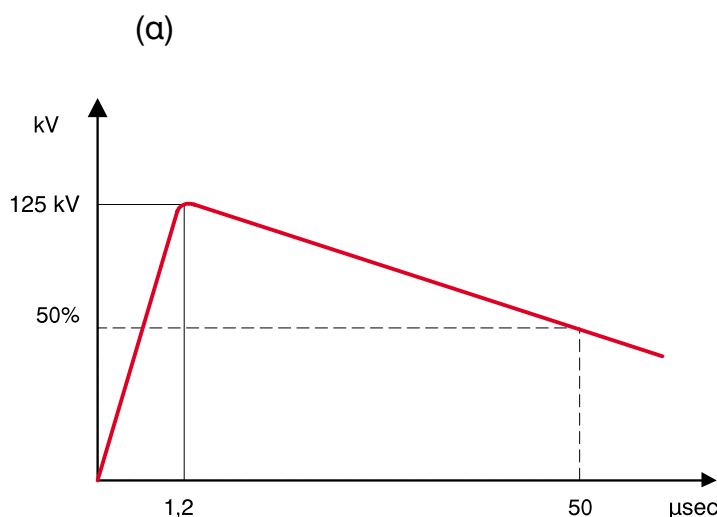
1,2/50 μs (Εικόνα 1.6.4α).

Βλέπουμε δηλαδή ότι η εγκατάστασή μας αντέχει σε διάφορα επίπεδα τάσεων, ανάλογα με το χρόνο διάρκειας της τάσης. Σκοπός των απαγωγών τάσης (surge arresters) είναι να μειώσουν τις υπερτάσεις σε επίπεδα που δεν υπερβαίνουν τις ονομαστικές τάσεις του εξοπλισμού.

Οι απαγωγείς τάσης συνδέονται μεταξύ φάσεων και γης. Όταν η τάση σε κάποια φάση ξεπεράσει κάποια όρια, αυτόματα δημιουργούν αγωγίμο δρόμο προς τη γή, απάγοντας έτσι την υπέρταση στη γείωση. Ο αγωγίμος αυτός δρόμος διαρκεί όσο διαρκεί η υπέρταση, δηλαδή συνήθως κάποια μs ($1\text{ }\mu\text{s} = 1\text{ εκατομμυριοστό του δευτερολέπτου}$). Όταν τελειώσει η υπέρταση, ο απαγωγέας αυτόματα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

Εγκαθίστανται κοντά στις παροχές των εναέριων γραμμών, ώστε να προστατεύουν την εγκατάσταση από ατμοσφαιρικές υπερτάσεις που εμφανίζονται πάνω στις γραμμές από πτώση κεραυνών (Εικόνα 1.6.4β).

Για λόγους ασφαλείας, το ηλεκτρόδιο γείωσης των απαγωγών είναι διαφορετικό από τις άλλες γειώσεις του υποσταθμού.



Εικόνα 1.6.4 α. Τυποποιημένη μορφή κρουστικής τάσης 1,2/50 μs
β. Απαγωγείς τάσης σε εναέριο δίκτυο 20 kV

1.6.4α Πως είναι κατασκευασμένοι οι απαγωγείς τάσης

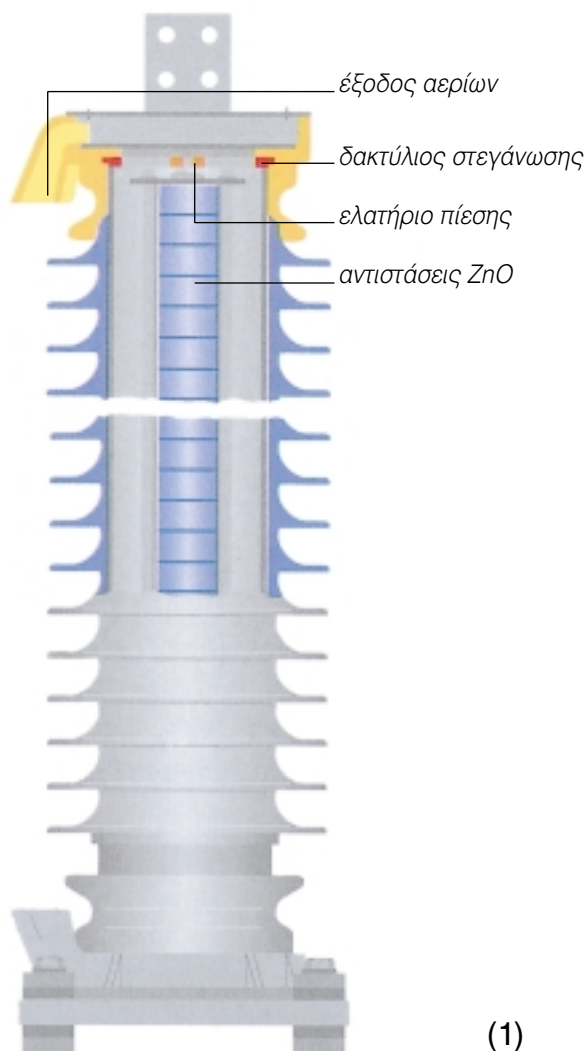
Βασικό μέγεθος για τη σωστή επιλογή των απαγωγέων τάσεων είναι η ηλεκτρική αντοχή της εγκατάστασης (BIL = Basic Insulation Level). Η αντοχή σε κρουστική τάση για τα δίκτυα 20 kV είναι 125 kV.

Οι απαγωγείς τάσης είναι μη γραμμικές αντιστάσεις που φροντίζουν η τάση να μένει κάτω από μια ορισμένη τιμή, την τάση προστασίας.

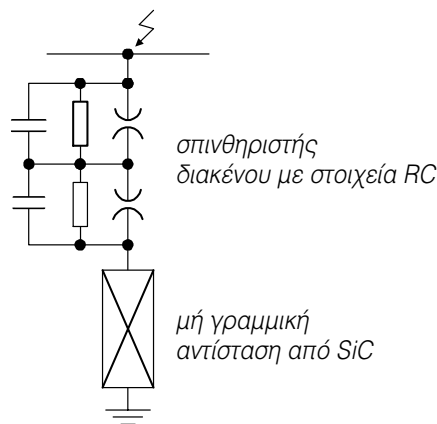
Οι απαγωγείς τάσης αποτελούνται από ένα σπιν-

θηριστή (διάκενο αέρα) σε σειρά με μη γραμμικές αντιστάσεις από ανθρακικό πυρίτιο (SiC). (Εικόνα 1.6.4α2).

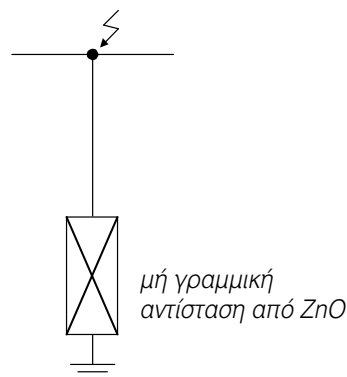
Υπάρχουν και απαγωγείς τάσεων με αντιστάσεις από οξειδίο του ψευδαργύρου (ZnO) που δεν χρειάζονται σπινθηριστή, διότι παρουσιάζουν πιο έντονη μη γραμμικότητα από τις αντιστάσεις του ανθρακικού πυριτίου. Αυτοί δεν χρειάζονται σπινθηριστή, γιατί το ρεύμα στην τάση των 20 kV είναι ασήμαντο. (Εικόνα 1.6.4α3)



(1)



(2)



(3)

Εικόνα 1.6.4α Απαγωγέας τάσης

1. τομή απαγωγέα τάσης με αντιστάσεις ZnO
2. ισοδύναμο κύκλωμα για απαγωγέα τάσης SiC
3. ισοδύναμο κύκλωμα για απαγωγέα τάσης ZnO

1.6.4β Χαρακτηριστικά μεγέθη των απαγωγέων τάσεων

Χαρακτηριστικά μεγέθη των απαγωγέων τάσης είναι:

Τάση αφής (Spark-over voltage). Είναι η τάση που ενεργοποιούνται οι απαγωγείς.

Οι κανονισμοί ορίζουν δύο τιμές τάσης αφής:

- σε ενεργό τιμή για βιομηχανική συχνότητα 50 Hz
- σε τιμή κορυφής για κρουστική τάση 1.2/50 μ s

Για απαγωγείς δικτύων 20 kV οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα 38 kV και 79 kV.

Τάση σβέσης (Rated voltage). Είναι η τάση στην οποία απενεργοποιούνται (σβήνουν) με βεβαιότητα οι απαγωγείς. Για τα δίκτυα των 20 kV ή τάση αυτή είναι τα 24 kV.

Ονομαστικό κρουστικό ρεύμα (Rated discharge current). Είναι η κορυφή του κρουστικού ρεύματος

σε kA στο οποίο μπορεί να αντέξει επανειλημμένα ο απαγωγέας. Αυτό είναι 5 kA ή 10 kA για απαγωγείς δικτύων 20 kV. Σε πολύ κεραυνόπληκτες περιοχές (> 20 κεραυνοί ανά έτος και τετραγωνικό χιλιόμετρο) επιλέγονται απαγωγείς των 10 kA.

Αντοχή σε κρουστικά ρεύματα (Impulse withstand current).

Οι κανονισμοί ορίζουν τιμές αντοχής για κρουστικά ρεύματα:

- βραχείας διάρκειας 4/10 μ s
- μακράς διάρκειας 2000 μ s

Για απαγωγείς δικτύων 20 kV οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα 100 kA και 250A.

Ρεύματα πάνω από την αντοχή των απαγωγέων μπορεί να οδηγήσουν σε έκρηξη του απαγωγέα και βραχυκύκλωμα του δικτύου

Παραμένουσα τάση (Residual voltage) Είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του απαγωγέα όταν περνά το κρουστικό ρεύμα. Δίνεται συνήθως για το ονομαστικό κρουστικό ρεύμα (5 kA ή 10 kA) και επιπρόσθετα και για άλλα ρεύματα.

Συσκευές μέτρησης και προστασίας υποσταθμών

Ερωτήσεις

1. Γιατί πρέπει να χρησιμοποιούμε απαραίτητα μετασχηματιστές μέτρησης στη μέση τάση;
2. Ποιά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών έντασης;
3. Ο υποσταθμός μας έχει ένα Μ/Σ ονομαστικής ισχύος 800 kVA. Στην αρχική σχεδίαση του Υ.Σ. δεν είχε προβλεφτεί η μέτρηση στην πλευρά μέσης τάσης. Τι υλικά πρέπει να παραγγείλουμε και πώς θα τα συνδέσουμε για να βλέπουμε τα ρεύματα στις 3 φάσεις;
4. Ποιά είναι τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μετασχηματιστών τάσης;
5. Ποια είναι η βασική δουλειά του Η/Ν υπερέντασης; Αν διαπιστώσει σφάλμα σε ποιό δίνει εντολή να δράσει ώστε να περιοριστεί το σφάλμα;
6. Πόσες ρυθμίσεις έχει ένας Η/Ν υπερέντασης σταθερού χρόνου;
7. Πόσες ρυθμίσεις έχει ένας Η/Ν υπερέντασης αντιστρόφου χρόνου;
8. Τι ονομάζουμε επιλογική προστασία; Δώστε ένα παράδειγμα.
9. Πως λειτουργεί ο απαγωγέας τάσης;

Ασκήσεις

1. Στο μπλοκ σχεδίασης να σχεδιάσετε τρεις Μ/Σ έντασης με ένα δευτερεύον τύλιγμα μέτρησης έκαστος, που τροφοδοτούν
 - α. τρία Α-μετρα.
 - β. ένα Α-μετρο μέσω ενός ειδικού μεταγωγικού διακόπτη Α-μέτρων, όπως περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα.
2. Στο μπλοκ σχεδίασης να σχεδιάσετε τρεις Μ/Σ έντασης με δύο δευτερεύοντα τύλιγματα έκαστος (μέτρηση και προστασία) που τροφοδοτούν
 - α. τρία Α-μετρα.
 - β. ένα τριφασικό Η/Ν σταθερού χρόνου
 - γ. Τι θα συμβεί, αν τα δύο τυλίγματα από λάθος συνδεθούν αντίστροφα, δηλαδή το τύλιγμα μέτρησης στο ΗΝ και το τύλιγμα προστασίας στα Α-μετρα.
3. Στο μπλοκ σχεδίασης να σχεδιάσετε το κύκλωμα της Εικόνας 6.6.2 και να προσθέσετε τρία V-μετρα και ένα 3φασικό Η/Ν έλλειψης τάσης.