

Ηλεκτρικά Κυκλώματα II

Σημειώσεις Εργαστηρίου version 0.8

Α. Δροσόπουλος

20 Μαρτίου 2022

Περιεχόμενα

2 Άσκηση - Μέτρηση Ισχύος σε Κυκλώματα AC	2
2.1 Γενικοί κανόνες εργασίας στους πάγκους	2
2.2 Κατηγορίες οργάνων μέτρησης	2
2.3 Σύμβολα αναλογικών οργάνων	3
2.4 Σφάλματα κατά τη διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων	3
2.5 Απόλυτο και σχετικό σφάλμα	4
2.6 Ερωτήσεις – Υπολογισμοί	5
2.7 Ορισμοί ισχύος στο AC	5
2.8 Μέτρηση ενεργού ισχύος	7
2.9 Μέτρηση αέργου ισχύος	8
2.10 Πειραματική διαδικασία	9

2 Άσκηση - Μέτρηση Ισχύος σε Κυκλώματα AC

2.1 Γενικοί κανόνες εργασίας στους πάγκους

- Οι πάγκοι εργασίας στις επόμενες ασκήσεις τροφοδοτούνται με τάσεις 230 V ή 400 V. Λόγω επικινδυνότητας δεν θα εκτελεστούν οι ασκήσεις υπό τάση. Θα κατασκευάσετε απλώς τα κυκλώματα που απαιτούνται να υλοποιηθούν. Η μη τήρηση του παραπάνω κανόνα σημαίνει αυτόματα αποβολή από το χώρο του εργαστηρίου.
- Πριν από την έναρξη οποιασδήποτε εργασίας, βεβαιωθείτε ότι ο γενικός διακόπτης τροφοδοσίας του πάγκου είναι ανοικτός, δηλαδή ότι δεν τροφοδοτείται ο πάγκος με τάση.
- Σχεδιάστε πρώτα σε χαρτί το κύκλωμα που ζητείται να υλοποιηθεί.
- Αφού κάνετε τις απαραίτητες συνδέσεις με βάση το κύκλωμα που σχεδιάσατε περιμένετε να γίνει έλεγχος από τον διδάσκοντα.
- Επαναλαμβάνετε την διαδικασία για οποιαδήποτε αλλαγή στο κύκλωμα χρειαστεί.

2.2 Κατηγορίες οργάνων μέτρησης

Η κατηγοριοποίηση των οργάνων μέτρησης μπορεί να γίνει με βάση διάφορα κριτήρια. Παρακάτω αναφέρονται μερικά από αυτά.

- Ανάλογα με το ρεύμα λειτουργίας τους διακρίνονται σε όργανα συνεχούς ρεύματος, εναλλασσομένου ρεύματος, συνεχούς και εναλλασσομένου ρεύματος.
- Ανάλογα με τον τρόπο που λαμβάνουμε από αυτά την τιμή του μετρούμενου μεγέθους τα όργανα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:
 - Ενδεικτικά όργανα: Η μετρούμενη τιμή γίνεται αντιληπτή με απόκλιση κάποιου δείκτη, με ψηφιακή ένδειξη (σε οθόνη LED ή LCD), με παλλόμενα ελάσματα κλπ. Παράδειγμα: Αμπερόμετρο, βολτόμετρο, συχνόμετρο κλπ.
 - Καταγραφικά όργανα: Παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της μεταβολής της τιμής ενός φυσικού μεγέθους συναρτήσει του χρόνου. Διαθέτουν μηχανισμό κίνησης και γραφίδα. Παράδειγμα: Σεισμογράφος.
 - Παλμογράφοι: Παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης ενός μεγέθους και ταυτόχρονα παρακολούθησης της χρονικής μεταβολής της τιμής του μεγέθους.
 - Αθροιστικά όργανα: Η ένδειξη του μετρούμενου μεγέθους είναι αθροιστική, δηλαδή παρουσιάζεται το συνολικό αποτέλεσμα σε κάποιο χρονικό διάστημα. Παράδειγμα: Μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους διακρίνονται σε αναλογικά ή ψηφιακά. Τα ψηφιακά όργανα διαθέτουν αισθητήρες και μετατρέπουν το μετρούμενο μέγεθος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο ενεργοποιεί τη μονάδα απεικόνισης. Παρέχουν δυνατότητες τηλε-εποπτείας και σύνδεσης με Η/Υ. Παρέχουν ταχύτητα στη μέτρηση και αποφεύγονται υποκειμενικά σφάλματα όπως τα σφάλματα παράλλαξης. Τα αναλογικά όργανα είναι συχνά πιο κατάλληλα για περιβάλλοντα με αντίξοες συνθήκες όπως στη βιομηχανία, δίνουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της μεταβολής μιας μετρούμενης τιμής και διευκολύνουν στην εκτίμηση της απόστασης μιας τιμής από το μέγιστο της κλίμακας του οργάνου ή από κάποιο προκαθορισμένο όριο.
- Τα αναλογικά όργανα διακρίνονται με βάση την αρχή λειτουργίας τους στις εξής κατηγορίες:
 - Ηλεκτρομαγνητικά: Η κίνηση της βελόνας βασίζεται στη δύναμη που ασκείται από μαγνητικό πεδίο σε αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα.
 - Ηλεκτροστατικά: Η κίνηση της βελόνας βασίζεται στη δύναμη που ασκείται σε μεταλλική πλάκα μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Μετρούν απευθείας τάση.
 - Θερμικά: Η κίνηση της βελόνας βασίζεται σε θερμικά φαινόμενα όπως η διαστολή των υλικών σε ένα διμεταλλικό στοιχείο.
- Τα αναλογικά όργανα που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτρομαγνητικών οργάνων. Τα ηλεκτρομαγνητικά όργανα διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:
 - Κινητού ή στρεπτού πηνίου: Η λειτουργία του στηρίζεται σε κίνηση πηνίου εντός του πεδίου μόνιμου μαγνήτη. Δείχνει τη μέση τιμή μεγέθους. Χρησιμοποιείται για μέτρηση DC μεγεθών (ρεύματος ή τάσης).

- Ανορθωτικά: Όργανα κινητού πηνίου που διαθέτουν ανορθωτική διάταξη έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εναλλασσόμενα μεγέθη.
- Διασταυρωμένων πηνίων: Χρησιμοποιούνται ως ωμόμετρα.
- Ηλεκτροδυναμικά: Περιέχουν ένα πηνίο που μπορεί να στρέφεται εντός του πεδίου δύο σταθερών πηνίων. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση κυρίως ισχύος στο AC.
- Ηλεκτροδυναμικά διασταυρωμένων πηνίων: Όπως τα παραπάνω αλλά με δύο στρεφόμενα πηνία κάθετα μεταξύ τους. Χρησιμοποιούνται για μέτρηση συντελεστή ισχύος.
- Κινητού σιδήρου: Βασίζονται στην κίνηση μεταλλικών πλακών που βρίσκονται εντός του πεδίου ρευματοφόρου πηνίου. Μετρούν κυρίως rms τιμές AC τάσεων ή ρευμάτων.
- Επαγωγικά: Περιέχουν δίσκο αλουμινίου εντός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για μέτρηση ηλεκτρικής ενέργειας στο AC.
- Παλλομένων ελασμάτων: Χρησιμοποιούνται για μέτρηση συχνότητας.
- Κινητού μαγνήτη: Παρόμοια λειτουργία με κινητού πηνίου. Βασίζονται στην κίνηση μιας μαγνητικής βελόνας μέσα σε μαγνητικό πεδίο σταθερού πηνίου.

2.3 Σύμβολα αναλογικών οργάνων

Τα αναλογικά όργανα έχουν συνήθως στην πρόσοψη μια σειρά χαρακτηριστικών συμβόλων. Αυτά οφείλουμε να τα εξετάσουμε πριν από τη χρήση του οργάνου, καθώς μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τον τύπο και τη σωστή χρήση του. Στα Σχ. 1 και Σχ. 2 φαίνονται τα σύμβολα που συναντάμε σε αναλογικά όργανα και η ερμηνεία τους.

Κύκλωμα	Σύμβολο	Κύκλωμα	Σύμβολο
Όργανο συνεχούς ρεύματος		Τριφασικό όργανο εναλλασσόμενου ρεύματος με ένα κύκλωμα ρεύματος και ένα κύκλωμα τάσης	
Όργανο εναλλασσόμενου ρεύματος		Τριφασικό όργανο εναλλασσόμενου ρεύματος με δύο κυκλώματα ρεύματος και δύο κυκλώματα τάσης	
Όργανο συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος		Τριφασικό όργανο εναλλασσόμενου ρεύματος με τρία κυκλώματα ρεύματος και τρία κυκλώματα τάσης	
Θέση τοποθέτησης του οργάνου			
Κύκλωμα	Σύμβολο	Κύκλωμα	Σύμβολο
Χρήση του οργάνου σε κατακόρυφη θέση		Χρήση του οργάνου σε θέση υπό κλίση	
Χρήση του οργάνου σε οριζόντια θέση		Χρήση του οργάνου σε θέση υπό κλίση 60°	
Τάση δοκιμής και ακρίβεια			
Κύκλωμα	Σύμβολο	Κύκλωμα	Σύμβολο
Τάση δοκιμής 500V		Τάση δοκιμής 5KV	
Τάση δοκιμής 2KV		Όργανο που εξαιρείται από δοκιμή τάσης	
Κλάση, αναφερομένη στην μέγιστη τιμή της κλίμακας του οργάνου	1,5	Κλάση, αναφερομένη στην τιμή που δείχνει το όργανο	

Σχήμα 1: Σύμβολα ηλεκτρικών μετρήσεων πίνακας 1

2.4 Σφάλματα κατά τη διεξαγωγή ηλεκτρικών μετρήσεων

Τα σφάλματα των οργάνων μέτρησης οφείλονται στις παρακάτω αιτίες.

- Αλλαγή της κατάστασης του κυκλώματος με τη σύνδεση του οργάνου. Ένα αμπερόμετρο διαθέτει μια πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση. Όταν συνδέεται σε σειρά με ένα φορτίο για να μετρήσει το ρεύμα του προκαλεί μια μικρή πτώση τάσης μεταβάλλοντας έτσι την τάση στο φορτίο. Ένα βολτόμετρο διαθέτει πολύ μεγάλη εσωτερική αντίσταση. Όταν συνδέεται παράλληλα σε ένα φορτίο για να μετρήσει την τάση του διαρρέεται από ένα πολύ μικρό ρεύμα μεταβάλλοντας έτσι το ρεύμα του κυκλώματος.

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των αναλογικών οργάνων			
Όργανο	Σύμβολο	Όργανο	Σύμβολο
Όργανο στρεπτού πηνίου με μόνιμο μαγνήτη		Όργανο στρεπτόν διασταυρούμενων πηνίων με μόνιμο μαγνήτη για μέτρηση	
Όργανο κινητού σιδήρου		Όργανο κινητού σιδήρου για χρήση ως όργανο ηηλικού ή διαφορικής μέτρησης	
Όργανο κινητού μαγνήτη		Όργανο κινητού μαγνήτη με διασταυρούμενα πηνία	
Ηλεκτροδυναμικό όργανο		Ηλεκτροδυναμικό όργανο με διασταυρούμενα πηνία ως όργανο ηηλικού	
Ηλεκτροδυναμικό όργανο με θωράκιση		Ηλεκτροδυναμικό όργανο με διασταυρούμενα πηνία ως όργανο ηηλικού με θωράκιση	
Επαγωγικό όργανο		Επαγωγικό όργανο ηηλικού, ή διαφορικής μέτρησης	
Θερμού νήματος ασφάλεια υπερφόρτισης		Διμεταλλικού ελάσματος ασφάλεια υπερφόρτισης	
Ηλεκτροστατικό όργανο		Όργανο παλλομένων ελασμάτων.	
Θερμοηλεκτρικό στοιχείο		Θερμοηλεκτρικό στοιχείο με μόνωση.	
Όργανο στρεπτού πηνίου με θερμοηλεκτρικό στοιχείο		Όργανο στρεπτού πηνίου με θερμοηλεκτρικό στοιχείο μονωμένο	
Ανορθωτικό στοιχείο		Όργανο στρεπτού πηνίου με ανορθωτική διάταξη	
Κλωβός FARADAY		Ηλεκτροστατικός κλωβός	

Σχήμα 2: Σύμβολα ηλεκτρικών μετρήσεων πίνακας 2

- Εσωτερικές αιτίες: Σφάλματα μηχανικά λόγω ποιότητας του οργάνου, τριβών, κλίσης. Σφάλματα βαθμονόμησης του οργάνου.
- Εξωτερικές αιτίες: Σφάλματα λόγω επίδρασης θερμοκρασίας, συχνότητας, μαγνητικών εδίων, απόκλισης του δείκτη από το μηδέν κατά την ισορροπία.
- Υποκειμενικές αιτίες: Σφάλματα παράλλαξης. Σφάλματα λόγω στρογγυλοποιήσεων, λόγω εριοχής δύσκολης ανάγνωσης, λόγω της επιλεγμένης μεθόδου μέτρησης κλπ.

2.5 Απόλυτο και σχετικό σφάλμα

Ως απόλυτο σφάλμα ΔX ορίζεται η διαφορά της πραγματικής τιμής X_π ενός μεγέθους και της μετρούμενης τιμής αυτού X_μ , δηλαδή:

$$\Delta X = X_\mu - X_\pi$$

Έχει την ίδια μονάδα μέτρησης με το μετρούμενο μέγεθος. Το απόλυτο σφάλμα δεν χαρακτηρίζει την ποιότητα μιας μέτρησης. Είναι διαφορετική η βαρύτητα απόλυτου σφάλματος 2 V σε μέτρηση 10 V από ότι σε μέτρηση 300 V.

Ως σχετικό σφάλμα $\Sigma\Phi$ ορίζεται το ηηλικό του απόλυτου σφάλματος και της πραγματικής τιμής X_π του μεγέθους επί τοις εκατό, δηλαδή

$$\Sigma\Phi = \frac{\Delta X}{X_\pi} \times 100 (\%)$$

Το σχετικό σφάλμα αποτελεί ποιοτικό χαρακτηριστικό μιας μέτρησης. Είναι όμως προφανές ότι ο τύπος αυτός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη για τον υπολογισμό του σχετικού σφάλματος μιας μέτρησης, αφού η πραγματική τιμή X_{π} ενός μετρούμενου μεγέθους δεν είναι διαθέσιμη. Στον παρονομαστή του κλάσματος η τιμή αυτή μπορεί να αντικατασταθεί από τη μετρούμενη τιμή X_{μ} , δεν μπορεί όμως να γίνει το ίδιο και στον αριθμητή. Μπορούμε ωστόσο να υπολογίσουμε το μέγιστο αναμενόμενο σχετικό σφάλμα μιας μέτρησης αν χρησιμοποιήσουμε ως αριθμητή το μέγιστο απόλυτο σφάλμα του οργάνου, το οποίο προκύπτει εύκολα μέσω της κλάσης του. Η κλάση είναι ένα από τα χαρακτηριστικά στοιχεία του οργάνου που διατίθενται από τον κατασκευαστή του.

Η κλάση G (%) ενός οργάνου μέτρησης είναι το μέγιστο σχετικό σφάλμα που είναι δυνατό να παρουσιάσει ένα όργανο σύμφωνα με τον κατασκευαστή του στους 20°C ως προς το μέγιστο της κλίμακας του X_{\max} , δηλαδή

$$G = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\max}} \times 100$$

Η ποσότητα ΔX_{\max} είναι το ζητούμενο μέγιστο απόλυτο σφάλμα.

Η κλάση ενός οργάνου καθορίζεται από τον κατασκευαστή του στο εργαστήριο και προκύπτει από σύγκριση των τιμών που λαμβάνονται από αυτό με τις τιμές προτύπων οργάνων υψηλής ακρίβειας. Μπορεί να έχει μία από τις παρακάτω τυποποιημένες τιμές:

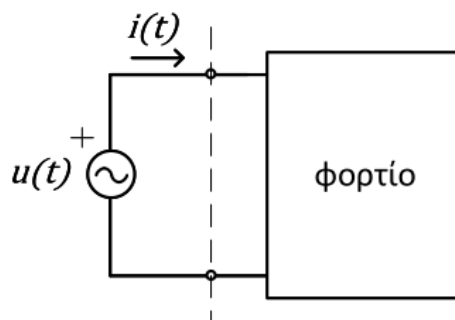
0.05 και 0.1:	πρότυπα όργανα
0.2:	φορητά όργανα μεγάλης ακρίβειας για ειδικές εργαστηριακές μετρήσεις
0.3 και 0.5:	φορητά όργανα ακρίβειας για εργαστηριακές μετρήσεις
1.0:	φορητά όργανα ελέγχου λειτουργίας ηλεκτρικών εγκαταστάσεων
1.5:	όργανα ακρίβειας ηλεκτρικών πινάκων και κανονικά φορητά όργανα
2.5 και 5:	κανονικά όργανα ηλεκτρικών πινάκων

2.6 Ερωτήσεις – Υπολογισμοί

1. Να βρεθεί το μέγιστο απόλυτο και το σχετικό σφάλμα αμπερομέτρου όταν η ένδειξή του είναι 20 A. Η κλάση του οργάνου είναι 1.5 και το μέγιστο της κλίμακας του είναι 100 A.
2. Διαθέτουμε ένα βολτόμετρο 0 – 500 V και θέλουμε να μετρήσουμε μια τάση που γνωρίζουμε ότι θα είναι περίπου 380 V. Αν θέλουμε το σχετικό σφάλμα της μέτρησης να μην ξεπερνά το 2% να βρεθεί η μέγιστη τιμή της κλάσης του οργάνου που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε.
3. Να βρεθεί το μέγιστο απόλυτο και σχετικό σφάλμα βαττομέτρου κλάσης 0.5 με μέγιστο κλίμακας 2000 W, όταν η ένδειξή του είναι α) 1500 W και β) 200 W.

2.7 Ορισμοί ισχύος στο AC

Θεωρούμε ότι το φορτίο του Σχ. 3 τροφοδοτείται από το δίκτυο με τάση $u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t + \phi_u)$ και διαρρέεται από ρεύμα $i(t) = I\sqrt{2}\cos(\omega t + \phi_i)$ όπου U και I οι rms τιμές τάσης και ρεύματος αντίστοιχα.



Σχήμα 3: Φορτίο που τροφοδοτείται από τάση $u(t)$ και διαρρέεται από ρεύμα $i(t)$.

Η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς του φορτίου υπολογίζεται:

$$p(t) = u(t)i(t) = \dots = UI \left[\cos(\phi_u - \phi_i) + \cos(2\omega t + \phi_u + \phi_i) \right]$$

και βλέπουμε ένα τμήμα σταθερό με το χρόνο και ένα δεύτερο που μεταβάλλεται με συχνότητα διπλάσια από αυτή της τάσης ή του ρεύματος.

Η στιγμιαία ισχύς του φορτίου στη γενική περίπτωση έχει θετικό και αρνητικό μέρος. Το πρόσημο εκφράζει φορά ροής της ενέργειας. Όταν αυτό είναι θετικό η ενέργεια ρέει από την πηγή προς το φορτίο ενώ όταν είναι αρνητικό ρέει από το φορτίο προς την πηγή. Όταν το φορτίο είναι καθαρά ωμικό ($\phi = \phi_u - \phi_i = 0$) προκύπτει στιγμιαία ισχύς μόνο θετική, κάτι που είναι αναμενόμενο, αφού το ωμικό φορτίο απορροφά ενέργεια από την πηγή και την μετατρέπει σε θερμότητα και δεν είναι δυνατό να επιστρέφει ενέργεια στην πηγή. Όταν το φορτίο έχει και επαγωγική ή χωρητική συνιστώσα τότε μέρος της ενέργειας που παρέχει η πηγή αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο επαγωγού ή το ηλεκτρικό πεδίο πυκνωτή για ένα χρονικό διάστημα και στη συνέχεια επιστρέφει πίσω στην πηγή.

Η τιμή της στιγμιαίας ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο και δεν παρέχει κάποια χρήσιμη πληροφορία. Επίσης δεν είναι εύκολο να μετρηθεί. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέση τιμή της, η οποία ονομάζεται πραγματική ή ενεργός ισχύς και είναι

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \dots = UI \cos \phi$$

όπου T η περίοδος του εναλλασσομένου. Μονάδα μέτρησης της ενεργού ισχύος είναι το W.

Η ενεργός ισχύς εκφράζει το μέρος εκείνο της ηλεκτρικής ενέργειας που μεταφέρεται από την πηγή στο φορτίο και μετατρέπεται σε άλλη μορφή, όπως θερμότητα, κινητική ενέργεια, φωτεινή ενέργεια κλπ. Συχνά η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως ωφέλιμη αλλά περιλαμβάνει και τις θερμικές απώλειες. Είναι μηδέν στην περίπτωση καθαρά επαγωγικού ή χωρητικού φορτίου, όπως φαίνεται και από τον παραπάνω τύπο αν θέσουμε $\phi = \pm 90^\circ$.

Στην περίπτωση φορτίου αυτής της μορφής, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από την πηγή στο φορτίο, όπου αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο του επαγωγού ή στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή, και μετά από κάποιο διάστημα επιστρέφει πίσω στην πηγή χωρίς να υπάρξει κάποια μόνιμη μετατροπή σε άλλη μορφή. Ορίζεται επίσης η άεργος ισχύς ως εξής:

$$Q = UI \sin \phi$$

με μονάδα μέτρησης το VAR.

Η άεργος ισχύς εκφράζει την ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ πηγής και μαγνητικού πεδίου επαγωγού ή ηλεκτρικού πεδίου πυκνωτή. Είναι μηδέν στην περίπτωση καθαρά ωμικού φορτίου, δηλαδή όταν $\phi = 0$. Γενικά η ισχύς αυτή προκύπτει όταν η τάση και το ρεύμα του φορτίου έχουν διαφορά φάσης $\phi \neq 0$. Όταν $\phi > 0$, δηλαδή όταν το ρεύμα έπεται της τάσης, η άεργος είναι θετική και το φορτίο λέμε ότι έχει επαγωγικό χαρακτήρα. Τότε θεωρούμε ότι το φορτίο απορροφά άεργο ισχύ από το κύκλωμα (καταναλώνει). Όταν $\phi < 0$, δηλαδή όταν το ρεύμα προηγείται της τάσης, η άεργος είναι αρνητική και το φορτίο λέμε ότι έχει χωρητικό χαρακτήρα. Τότε θεωρούμε ότι το φορτίο δίνει άεργο ισχύ στο κύκλωμα (παράγει). Στη γενική περίπτωση ενός RL ή RC φορτίου προκύπτει και ενεργός και άεργος ισχύς στους ακροδέκτες του φορτίου.

Ορίζεται η φαινομένη ισχύς ως εξής:

$$S = UI$$

με μονάδα μέτρησης το VA. Θυμηθείτε επίσης και την μιγαδική

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ$$

Η φαινομένη ισχύς σαν μέτρο της μιγαδικής εκφράζεται επίσης ως:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Η φαινομένη ισχύς δείχνει πόσο επιβαρύνει το φορτίο το δίκτυο, δεδομένου ότι η ποσότητα αυτή περιλαμβάνει εκτός από την ενεργό και την άεργο ισχύ, η οποία μπορεί να μην εκφράζει κάποια ωφέλιμη μετατροπή ενέργειας αλλά απαιτεί πόρους του δικτύου για να μεταφερθεί.

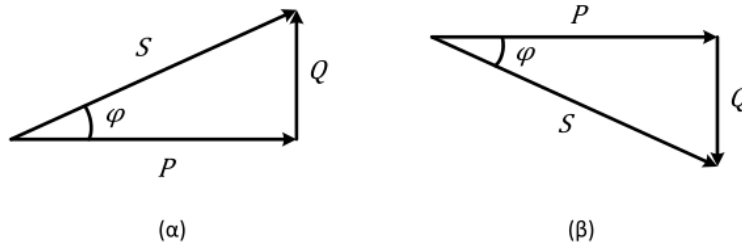
Ορίζεται ο συντελεστής ισχύος (Power Factor) ως εξής:

$$PF = \frac{P}{S}$$

Ο συντελεστής ισχύος εκφράζει το ποσοστό της φαινομένης ισχύος που αντιστοιχεί στην ενεργό ισχύ. Αν θεωρήσουμε την ενεργό ως ωφέλιμη ισχύ, προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή αυτού τόσο καλύτερα εκμεταλλευόμαστε τους πόρους του δικτύου. Αν αντικαταστήσουμε την ενεργό και τη φαινομένη ισχύ από προηγούμενες σχέσεις προκύπτει ότι:

$$PF = \cos \phi$$

Με βάση τα παραπάνω μπορεί κανείς να παραστήσει τις τρεις συνιστώσες της ισχύος με τη μορφή ενός τριγώνου, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.



Σχήμα 4: Τρίγωνο ισχύος α) για φορτίο RL, β) για φορτίο RC.

Για φορτίο RL η άεργος είναι θετική και γιαυτό σχεδιάζεται με φορά προς τα πάνω. Για φορτίο RC η άεργος είναι αρνητική και γιαυτό σχεδιάζεται με φορά προς τα κάτω.

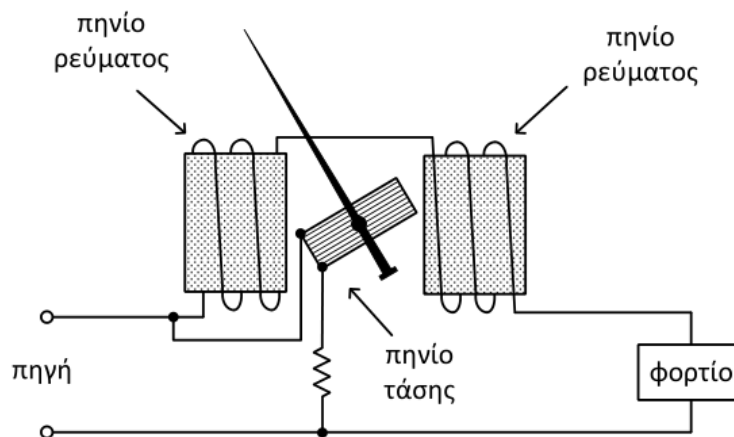
2.8 Μέτρηση ενεργού ισχύος

Η μέτρηση της ενεργού ισχύος γίνεται με το βαττόμετρο, Σχ. 5.



Σχήμα 5: Ηλεκτροδυναμικό βαττόμετρο και σύμβολο.

Το όργανο αυτό ανήκει στην κατηγορία των ηλεκτροδυναμικών οργάνων και αποτελείται από ένα σταθερό μέρος, το οποίο περιλαμβάνει το πηνίο έντασης, και ένα κινητό μέρος, το οποίο περιλαμβάνει το πηνίο τάσης και το οποίο βρίσκεται εντός του πηνίου έντασης. Για κατασκευαστικούς λόγους το σταθερό πηνίο είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα, όπως φαίνεται στο Σχ. 6. Το πηνίο τάσης μπορεί να στραφεί γύρω από άξονα που φέρει ελατήριο και έχει στην άκρη του βελόνα. Το πηνίο τάσης συνδέεται έτσι ώστε να υφίσταται την τάση του φορτίου και το πηνίο έντασης έτσι ώστε να διαρρέεται από το ρεύμα του φορτίου.

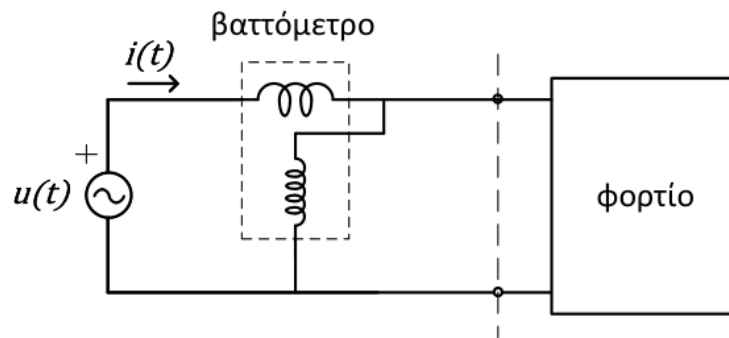


Σχήμα 6: Εσωτερικός μηχανισμός τυπικού ηλεκτροδυναμικού βαττομέτρου.

Αν εξετάσει κανείς τα τυλίγματα των δύο πηνίων του βαττομέτρου θα διαπιστώσει ότι το πηνίο έντασης διαθέτει λίγες και

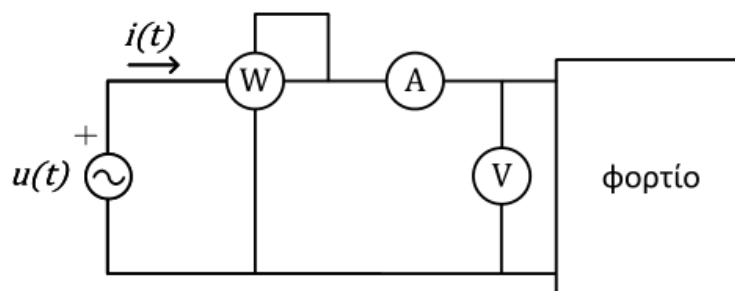
μεγάλης διατομής σπείρες ενώ το πηνίο τάσης πολλές και μικρής διατομής. Όπως είναι γνωστό, το μήκος και η διατομή του χαλκού καθορίζουν μαζί με την ειδική του αντίσταση την ωμική αντίσταση που παρουσιάζει. Προκύπτει λοιπόν ότι το πηνίο έντασης του βαττομέτρου έχει μια πολύ μικρή αντίσταση, με αποτέλεσμα η πτώση τάσης στα άκρα του να είναι αμελητέα και να μην επηρεάζει την τάση στα άκρα του φορτίου. Το πηνίο τάσης αντίθετα έχει πολύ μεγάλη αντίσταση με αποτέλεσμα να διαρρέεται από αμελητέο ρεύμα και να μην επηρεάζει το ρεύμα του φορτίου. Σε σειρά με το πηνίο τάσης συνδέονται ωμικές αντιστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 6, οι οποίες αυξάνουν περαιτέρω την ωμική του αντίσταση.

Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στην αλληλεπίδραση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων των δύο πηνίων όταν αυτά διαρρέονται από ρεύμα. Εφόσον το σταθερό πηνίο συνδέεται σε σειρά με το φορτίο, το πεδίο που δημιουργείται όταν διαρρέεται από ρεύμα είναι ανάλογο του ρεύματος του φορτίου. Το κινητό μέρος συνδέεται παράλληλα με το φορτίο και λόγω της μεγάλης ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει το ρεύμα του είναι σχεδόν συμφασικό με την τάση του φορτίου. Όταν λοιπόν τροφοδοτείται από την τάση του φορτίου το πεδίο που δημιουργείται είναι ανάλογο με την τάση αυτή. Λόγω αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πεδίων όταν τα πηνία διαρρέονται από ρεύμα το κινητό μέρος που φέρει τη βελόνα υφίσταται ροπή στρέψης που είναι ανάλογη του γινομένου των ρευμάτων των πηνίων και επομένως του γινομένου $u(t)i(t)$. Δηλαδή το κινητό μέρος τείνει να στραφεί κατά μία γωνία ανάλογη της στιγμιαίας ισχύος. Λόγω αδράνειας των κινουμένων μερών τελικά η απόκλιση της βελόνας είναι ανάλογη της μέσης τιμής του γινομένου $u(t)i(t)$ δηλαδή της ενεργού ισχύος. Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το βαττόμετρο θα πρέπει να διαθέτει δύο ζεύγη ακροδεκτών, ένα για το πηνίο τάσης και ένα για το πηνίο έντασης. Συνδέεται στο κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 7. Επειδή ένας ακροδέκτης από κάθε πηνίο συνδέεται στο ίδιο σημείο είναι δυνατό το βαττόμετρο να διαθέτει μόνο τρεις ακροδέκτες και το κοινό σημείο σύνδεσης των δύο πηνίων να υπάρχει στο εσωτερικό του οργάνου.



Σχήμα 7: Σύνδεση βαττομέτρου στους ακροδέκτες του φορτίου για τη μέτρηση της ενεργού ισχύος.

Αν συνδέσουμε αμπερόμετρο και βολτόμετρο κατάλληλα στο κύκλωμα είναι δυνατό να βρούμε τη φαινομένη ισχύ. Στο Σχ. 8 φαίνεται το κύκλωμα με το βαττόμετρο συνδεδεμένο έτσι ώστε να μετρά την ενεργό ισχύ που απορροφά το φορτίο, καθώς και βολτόμετρο για μέτρηση της τάσης και αμπερόμετρο για μέτρηση του ρεύματος.



Σχήμα 8: Βαττόμετρο, βολτόμετρο και αμπερόμετρο συνδεδεμένα στο φορτίο.

Το αμπερόμετρο έχει μια πολύ μικρή αντίσταση (ιδανικά μηδενική), το βολτόμετρο μια πολύ μεγάλη αντίσταση (ιδανικά άπειρη). Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με τα πηνία έντασης και τάσης του βαττομέτρου. Λόγω όμως της μη ιδανικής συμπεριφοράς των οργάνων στην πραγματικότητα η σύνδεσή τους αλλοιώνει τη συμπεριφορά του κυκλώματος και εισάγεται σφάλμα στη μέτρηση λόγω των πραγματικών αντιστάσεων των οργάνων.

2.9 Μέτρηση άεργου ισχύος

Η άεργος ισχύς μπορεί να μετρηθεί με τη βοήθεια βαρμέτρου. Το όργανο αυτό λειτουργεί όπως το βαττόμετρο με τη διαφορά ότι περιλαμβάνει διάταξη μετατόπισης φάσης με την οποία η τάση που υφίσταται το πηνίο τάσης στρέφεται

πρώτα κατά 90° . Τότε η ένδειξη του οργάνου θα είναι $Q = UI \sin \phi$. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα έμμεσης μέτρησης με τη χρήση βαττομέτρου, βολτομέτρου και αμπερομέτρου. Αφού βρεθούν η ενεργός και η φαινομένη, τότε μπορεί να υπολογιστεί και η άεργος.

2.10 Πειραματική διαδικασία

1. Να μετρηθούν με ωμόμετρο οι ωμικές αντιστάσεις του βολτομέτρου και του αμπερομέτρου. Να μετρηθεί η ωμική αντίσταση πρώτα μεταξύ του πρώτου ζεύγους ακροδεκτών του βαττομέτρου και στη συνέχεια μεταξύ του δεύτερου. Ποιοι είναι οι ακροδέκτες του πηνίου έντασης και ποιοι του πηνίου τάσης; Πώς το συμπεραίνετε αυτό; Να συμπληρωθεί ο Πίνακας 1.

Πίνακας 1: Ωμικές αντιστάσεις οργάνων

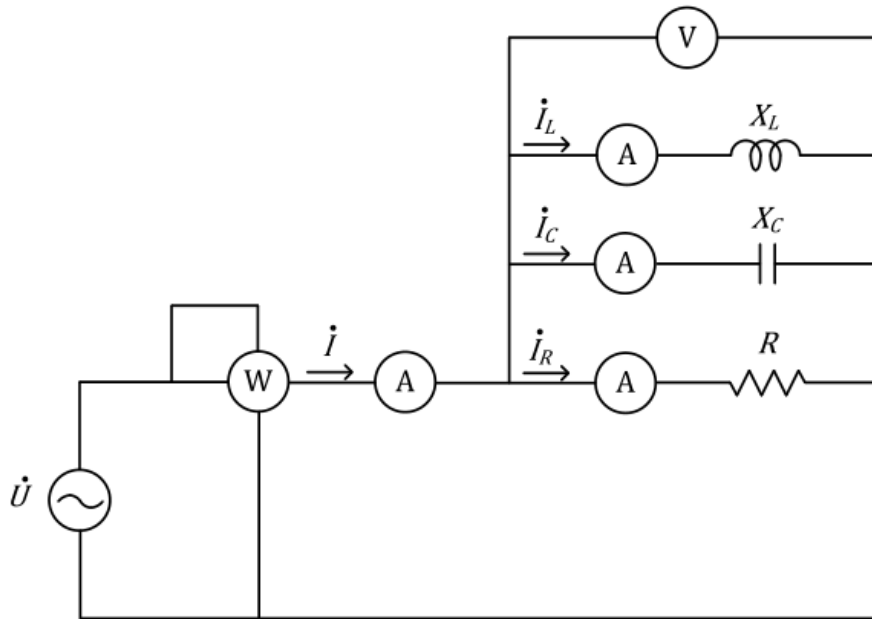
Όργανο μέτρησης		Αντίσταση
Βολτόμετρο		
Αμπερόμετρο		
Βαττόμετρο	Πηνίο έντασης	
	Πηνίο τάσης	

2. Α) Να συνδέσετε ωμικό φορτίο στην πηγή. Να συνδέσετε τα κατάλληλα όργανα για να μετράτε την τάση, το ρεύμα και την ενεργό ισχύ που απορροφά το φορτίο. Να συμπληρώσετε τις τιμές αυτές στον πίνακα 2. Β) Να επαναλάβετε το ίδιο για επαγωγικό φορτίο, Γ) Να επαναλάβετε το ίδιο για χωρητικό φορτίο.

Πίνακας 2: Τάση, ρεύμα και ενεργός ισχύς στο φορτίο

Είδος φορτίου	U (V)	I (A)	I_R (A)	I_L (A)	I_C (A)	P (W)	S (VA)	Q (Var)	PF	ϕ
Ωμικό			×	×	×					
Επαγωγικό			×	×	×					
Χωρητικό			×	×	×					
Ωμικό // επαγωγικό					×					
Ωμικό // χωρητικό				×						
Ωμικό // επαγωγικό // χωρητικό										

3. Α) Να συνδέσετε ωμικό παράλληλα με επαγωγικό φορτίο στην πηγή. Να συνδέσετε τα κατάλληλα όργανα για να μετράτε την τάση, το συνολικό ρεύμα, το ρεύμα σε κάθε επιμέρους κλάδο του φορτίου και τη συνολική ενεργό ισχύ που απορροφά το φορτίο. Να συμπληρώσετε τις τιμές αυτές στον Πίνακα 2. Β) Να επαναλάβετε το ίδιο για ωμικό και χωρητικό φορτίο συνδεδεμένα παράλληλα. Γ) Να επαναλάβετε το ίδιο για ωμικό, χωρητικό και επαγωγικό φορτίο συνδεδεμένα παράλληλα. Το κύκλωμα με τα απαραίτητα όργανα μέτρησης για την τελευταία περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 9.



Σχήμα 9: Κύκλωμα μετρήσεων.

4. Για τα φορτία του Πίνακα 2 να υπολογίσετε τη φαινομένη ισχύ, την άεργο ισχύ, το συντελεστή ισχύος και τη διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος του συνολικού φορτίου. Να συμπληρώσετε τις τιμές στις αντίστοιχες στήλες.
5. Να υπολογίσετε το απόλυτο και το σχετικό σφάλμα για κάθε μέτρηση τάσης και ισχύος του Πίνακα 2 και να συμπληρώσετε τον πίνακα 3(α) και τον πίνακα 3(β).

Πίνακας 3(α): Σφάλματα μετρήσεων τάσης

Είδος φορτίου	U (V)	Κλάση οργάνου	Μέγιστο κλίμακας	Απόλυτο σφάλμα	Σχετικό σφάλμα
Ωμικό					
Επαγωγικό					
Χωρητικό					
Ωμικό // επαγωγικό					
Ωμικό // χωρητικό					
Ωμικό // επαγωγικό // χωρητικό					

Πίνακας 3(β): Σφάλματα μετρήσεων ισχύος

Είδος φορτίου	P (W)	Κλάση οργάνου	Μέγιστο κλίμακας	Απόλυτο σφάλμα	Σχετικό σφάλμα
Ωμικό					
Επαγωγικό					
Χωρητικό					
Ωμικό // επαγωγικό					
Ωμικό // χωρητικό					
Ωμικό // επαγωγικό // χωρητικό					

6. Για όλες τις περιπτώσεις του ερωτήματος 3 να σχεδιάσετε το τρίγωνο ισχύος.
7. Τι συμπεριφορά παρουσιάζει το συνολικό φορτίο στην περίπτωση του ερωτήματος 3(Γ); Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.