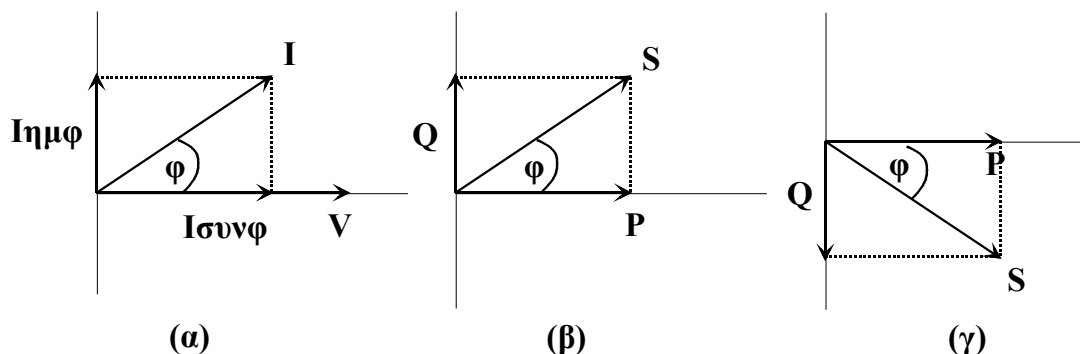


## Κεφάλαιο 14<sup>ο</sup>

### Μέτρηση αέργου ισχύος-Διόρθωση συντελεστή ισχύος

#### 14.1 Ορισμός αέργου ισχύος

Όπως ορίσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ενεργός ισχύς ορίζεται από τη



Σχήμα 14.1 Ορισμοί αβατικής συνιστώσας ρεύματος (α) και αέργου ισχύος με ρεύμα σε προπορεία (β) ή καθυστέρηση (γ)

σχέση  $P=VI\cos\phi$ . Ουσιαστικά δηλαδή, η πραγματική (χρήσιμη) ισχύς σε ένα κύκλωμα δίνεται από το γινόμενο της τάσης επί την συνιστώσα του ρεύματος που είναι σε φάση με την τάση ( $I_\phi=I\cos\phi$ ). Υπάρχει όμως και μία άλλη συνιστώσα του ρεύματος ( $I_\alpha=I\sin\phi$ ) η οποία έχει διαφορά φάσης  $\pi/2$  από την τάση και που ονομάζεται αβατική ή μαγνητίζουσα συνιστώσα (σχήμα 14.1α). Αυτή η συνιστώσα ρεύματος ορίζει την άεργο ισχύ  $Q$  η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$Q = VI\sin\phi \quad (14.1)$$

Η άεργος ισχύς, που έχει μονάδες VAR (Volt Ampere Reactive), σχετίζεται με απώλειες ισχύος-ενέργειας στους πυκνωτές και στα πηνία υπό μορφή ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων αντίστοιχα. Τέλος, το γινόμενο  $VI$  αντιστοιχεί στην φαινόμενη ισχύ  $S$  ( $S=VI$ ), η οποία έχει μονάδες VA. Από τα διαγράμματα των σχημάτων 14.1β και 14.1γ (όπου στην περίπτωση β ρεύμα είναι σε προπορεία σε σχέση με την τάση ενώ σε καθυστέρηση για την περίπτωση γ) έχουμε τις σχέσεις:

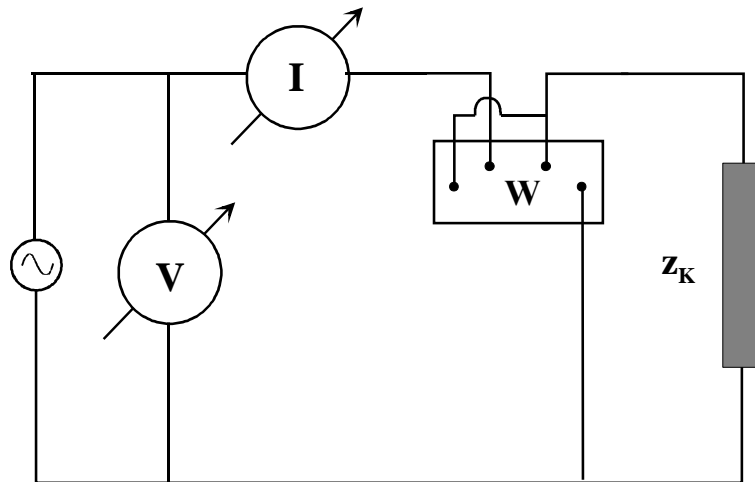
$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad P = S\cos\phi \quad Q = S\sin\phi \quad (14.2)$$

#### 14.2 Μέθοδοι μέτρησης αέργου ισχύος

##### 14.2.1 Με βολτόμετρο, αμπερόμετρο και βατόμετρο.

Ένας απλός τρόπος μέτρησης της αέργου ισχύος είναι με χρήση βολτομέτρου, αμπερομέτρου και βατομέτρου (σχήμα 14.2). Το γινόμενο των ενδείξεων βολτομέτρου, αμπερομέτρου δίνουν την φαινόμενη ισχύ ενώ το βατόμετρο την ενεργό ισχύ. Επομένως η άεργος ισχύς δίνεται από τη σχέση:

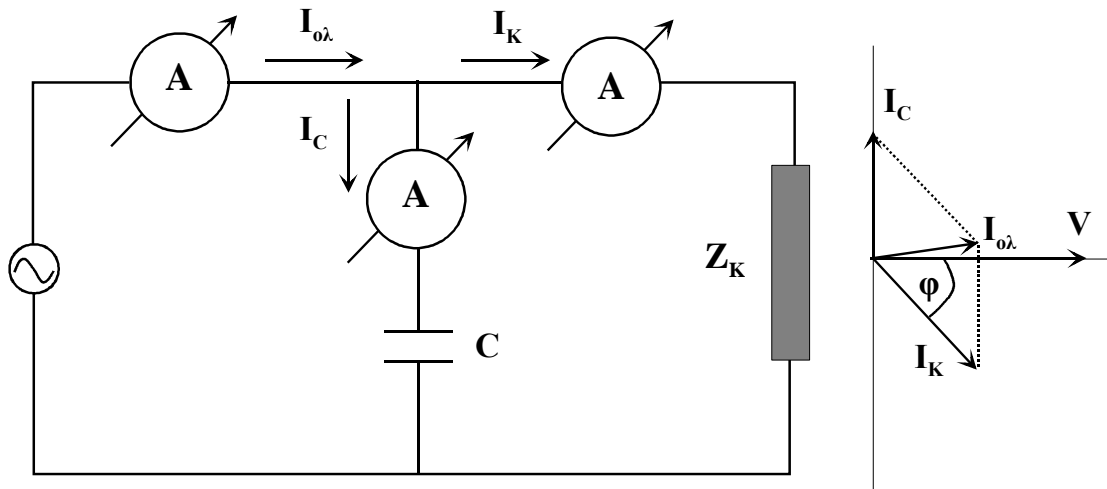
$$Q = \sqrt{(VI)^2 - P^2} \quad (14.3)$$



Σχήμα 14.2 Μέτρηση ισχύος με βολτόμετρο, αμπερόμετρο και βατόμετρο

#### 14.2.2 Με τρία αμπερόμετρα

Μία άλλη απλή μέθοδος μέτρησης της αέργου ισχύος είναι η σύγκριση της



Σχήμα 14.3 Μέτρηση της αέργου ισχύος με τρία αμπερόμετρα

απόκρισης του καταναλωτή με αυτή ενός πυκνωτή  $C$  (σχήμα 14.3). Η σύγκριση, για πυκνωτή συνδεδεμένο παράλληλα στον καταναλωτή, μπορεί να γίνει με τη χρήση τριών αμπερομέτρων τα οποία μετρούν τα ρεύματα στον καταναλωτή  $I_K$ , στον πυκνωτή  $I_C$  και το ολικό ρεύμα  $I_{ολ}$ . Στο σχήμα 14.3 δεξιά φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα των τριών ρευμάτων όπου έχει υποθεθεί ότι ο καταναλωτής εμφανίζει επαγωγική συμπεριφορά. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι:

$$I_{ολ}^2 = I_K^2 + I_C^2 + 2I_K I_C \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \Rightarrow 2I_K I_C \eta \mu \varphi = I_C^2 + I_K^2 - I_{ολ}^2 \quad (14.4)$$

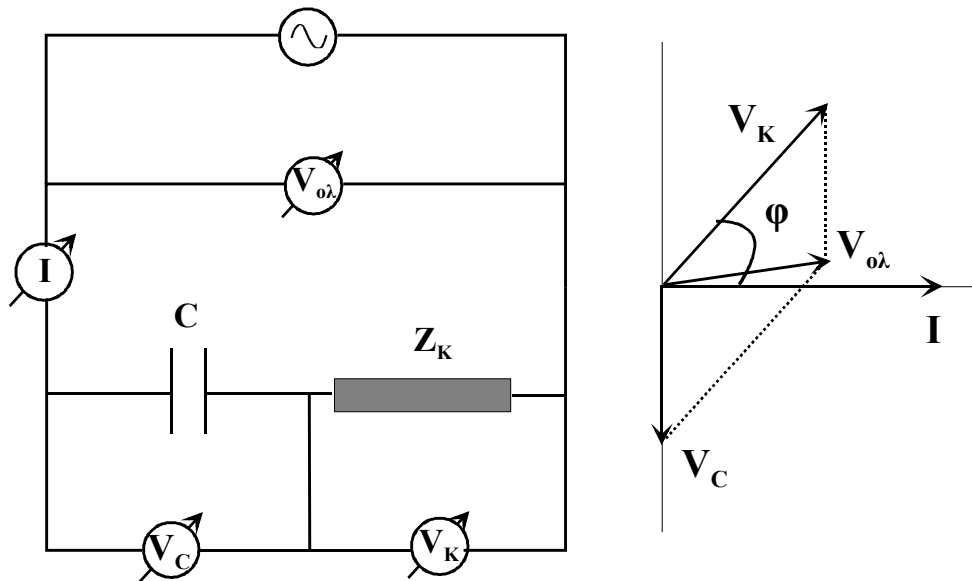
Όμως,  $V_K=V_C=I_C/\omega C$  και  $Q=V_K I_K \eta \mu \phi$ . Επομένως,  $Q=(1/\omega C)I_K I_C \eta \mu \phi$  και η σχέση (14.4) γράφεται ως:

$$Q = \left( \frac{1}{2\omega C} \right) (I_C^2 + I_K^2 - I_{ολ}^2) \quad (14.5)$$

Δηλαδή, η άεργος ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τις ενδείξεις των τριών αμπερομέτρων και την τιμή της χωρητικότητας.

### 14.2.3 Με τρία βολτόμετρα

Μία άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό της αέργου ισχύος καταναλωτή μέσω



Σχήμα 14.4 Μέτρηση της αέργου ισχύος με τρία βολτόμετρα

σύγκρισης της απόκρισης του με αυτή πυκνωτή  $C$ , είναι η χρήση τριών βολτομέτρων (με τον πυκνωτή συνδεδεμένο σε σειρά στον καταναλωτή) όπως φαίνεται στο σχήμα 14.4. Τα βολτόμετρα μετρούν τις τάσεις στον καταναλωτή  $V_K$ , στον πυκνωτή  $V_C$  και την ολική τάση  $V_{ολ}$ . Στο σχήμα 14.4 δεξιά φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων όπου έχει υποτεθεί ότι ο καταναλωτής εμφανίζει επαγωγική συμπεριφορά. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει ότι:

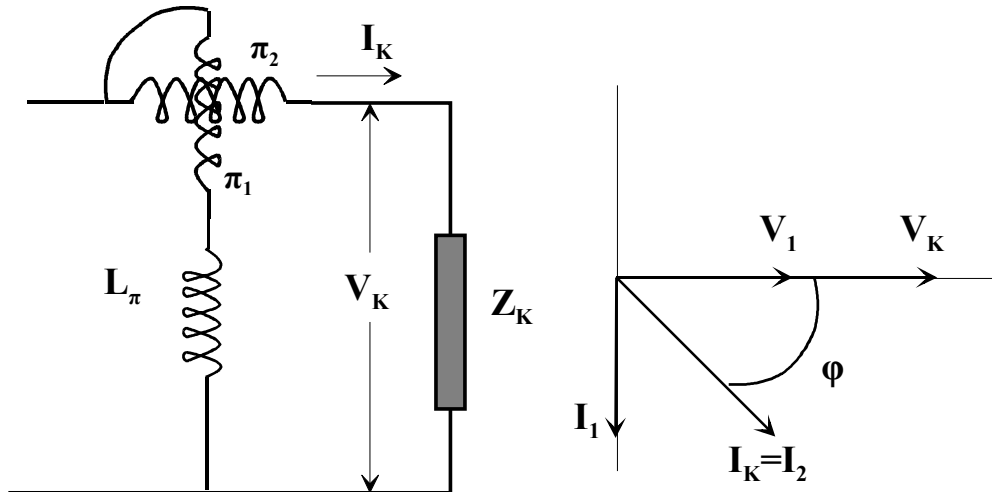
$$V_{ολ}^2 = V_K^2 + V_C^2 + 2V_K V_C \sin\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) \Rightarrow 2V_K V_C \eta \mu \phi = V_C^2 + V_K^2 - V_{ολ}^2 \quad (14.6)$$

Όμως,  $I_K=I_C=V_C \omega C$  και  $Q=V_K I_K \eta \mu \phi$ . Επομένως,  $Q=\omega C V_K V_C \eta \mu \phi$  και η σχέση (14.6) γράφεται ως:

$$Q = \omega C / 2 (V_C^2 + V_K^2 - V_{ολ}^2) \quad (14.7)$$

Δηλαδή, η άεργος ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τις ενδείξεις των τριών βολτομέτρων και την τιμή της χωρητικότητας.

#### 14.2.4 Με βάρμετρο.



Σχήμα 14.5 Συνδεσμολογία βάρμετρου για την μέτρηση της αέργου ισχύος

Ένας βασικός τρόπος μέτρησης αέργου ισχύος είναι η χρήση βάρμετρου. Η λειτουργία και η διάταξη του βάρμετρου (σχήμα 14.5) είναι ακριβώς η ίδια με αυτές του βατομέτρου με μόνη διαφορά την αντικατάσταση της αντίστασης  $R_{\Pi}$  με ένα πηνίο  $L_{\Pi}$  μεγάλης αυτεπαγωγής ( $\omega L_{\Pi} \gg R_1$ , όπου  $R_1$  η ωμική αντίσταση του πηνίου τάσης). Όπως θα αποδείξουμε, κάτω από αυτές τις συνθήκες, η ένδειξη του οργάνου είναι απ' ευθείας ανάλογη της αέργου ισχύος.

Το διανυσματικό διάγραμμα φάσεων για το βάρμετρο φαίνεται στο σχήμα 14.5 δεξιά. Λόγω της μεγάλης επαγωγικής αντίστασης  $L_{\Pi}$ , η γραμμή του πηνίου τάσης  $\pi_1$  θα έχει καθαρή επαγωγική συμπεριφορά, οπότε το ρεύμα  $I_1$  θα καθυστερεί κατά  $\pi/2$  σε σχέση με την τάση  $V_1$ . Από την εξίσωση (4.5) όμως είναι γνωστό ότι η ένδειξη ενός ηλεκτροδυναμικού οργάνου καθορίζεται από το γινόμενο των ρευμάτων που διαρρέουν τα δύο πηνία του επί το συνημίτονο της διαφοράς φάσης των ρευμάτων. Για την περίπτωση του βάρμετρου έχουμε:

$$\text{ένδειξη} = C I_1 I_K \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = C I_1 I_K \eta \mu \varphi \quad (14.8)$$

Αν τώρα λάβουμε υπόψη την σχέση μεταξύ  $I_1$  και  $V_K$  έχουμε:

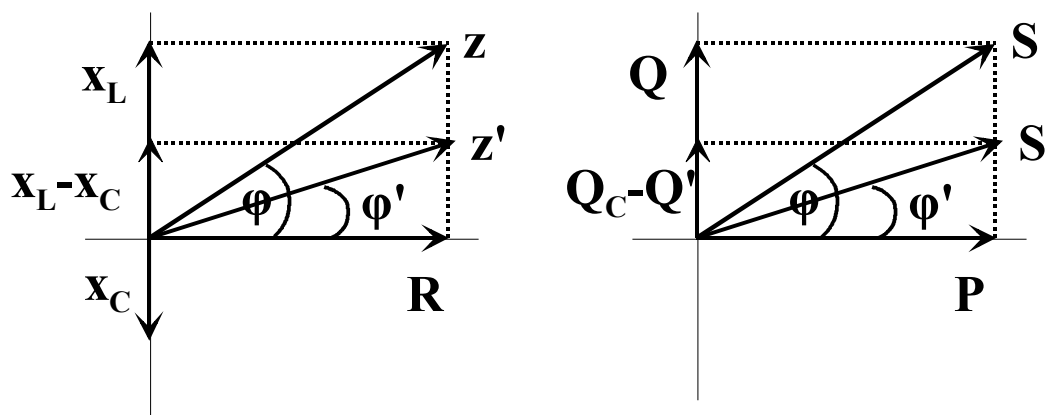
$$\text{ένδειξη} = C I_1 I_K \eta \mu \varphi = C \frac{V_K}{|Z_1|} I_K \eta \mu \varphi = K Q_K \quad (14.9)$$

όπου  $|z_1|$  είναι το μέτρο της εμπέδησης στη γραμμή του πηνίου τάσης και υποθέσαμε ότι η πτώση τάσης στο πηνίο ρεύματος είναι μηδαμινή ( $V_1 = V_K$ ). Βλέπουμε δηλαδή ότι η ένδειξη του βάρμετρου είναι απ' ευθείας ανάλογη της αέργου ισχύος.

Τέλος, όπως και στην περίπτωση του βατόμετρου, η ακρίβεια της μέτρησης της αέργου ισχύος εξαρτάται από την συνδεσμολογία του βάρμετρου στο κύκλωμα. Η σύνδεση του πηνίου ρεύματος απ' ευθείας στον καταναλωτή συνίσταται για μικρά ρεύματα και μεγάλες τάσεις ενώ για μεγάλα ρεύματα και μικρές τάσεις είναι προτιμότερη η απ' ευθείας σύνδεση του πηνίου τάσης στον καταναλωτή

### 14.3 Διόρθωση συνημιτόνου

Πολλοί καταναλωτές εμφανίζουν επαγωγική συμπεριφορά (κινητήρες, μετασχηματιστές κλπ) με αποτέλεσμα, λόγω της συνεπαγόμενης αέργου ισχύος, να υπάρχουν απώλειες στο δίκτυο παραγωγής-διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός τις απώλειες αυτές όμως, η επαγωγική συμπεριφορά σημαίνει ότι ο συντελεστής ισχύος  $\cos\phi$  θα είναι μικρότερος της μονάδας. Σε δίκτυα ηλεκτρική ενέργειας που λειτουργούν με σταθερή τάση, το ρεύμα σε ένα καταναλωτή ισχύος  $P$  δίνεται από:  $I=P/(V\cos\phi)$ , επομένως, το ρεύμα είναι αντιστρόφως ανάλογο του συντελεστή ισχύος. Μικρή τιμή του συντελεστή ισχύος σημαίνει μεγάλο ρεύμα, συνθήκη αντικονομική καθώς θα απαιτούνται αγωγοί μεγάλης διαμέτρου για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και θα υπάρχουν μεγάλες απώλειες σε αυτούς. Για όλους



Σχήμα 14.6 Διανυσματικά διαγράμματα για την διόρθωση συνημιτόνου

τους παραπάνω λόγους, η ΔΕΗ επιβάλλει ο συντελεστής ισχύος να έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.95.

Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος, δηλαδή η μεταβολή της τιμής του  $\cos\phi$  έτσι ώστε να μεγαλώσει η τιμή του, επιτυγχάνεται με την προσθήκη παράλληλα στον καταναλωτή ενός κατάλληλου πυκνωτή. Με αυτόν τον τρόπο, όπως φαίνεται στο σχήμα 14.6, η χωρητική αντίσταση ελαττώνει την γωνία  $\phi$ . Σαν αποτέλεσμα, η πραγματική ισχύς παραμένει η ίδια ενώ ελαττώνεται η άεργος και η φαινόμενη ισχύς.

Σχετικά με τον υπολογισμό της χωρητικότητας του πυκνωτή που απαιτείται για μία συγκεκριμένη διόρθωση συνημιτόνου, αυτή μπορεί να προκύψει από τα διαγράμματα του σχήματος 14.6 ως εξής: ισχύουν

$$\text{εφφ}' = \frac{Q'}{P} = \frac{Q - Q_c}{P} \Rightarrow Q_c = Q - P\text{εφφ}' \quad (14.10)$$

$$\text{εφφ} = \frac{Q}{P} \Rightarrow Q = P\text{εφφ} \quad (14.12)$$

άρα από τις (14.10) και (14.11) έχουμε:

$$Q_c = P(\text{εφφ} - \text{εφφ}') \quad (14.13)$$

Η σχέση (14.13) τελικά μας δίνει:

$$Q_c = P(\text{εφφ} - \text{εφφ}') \Rightarrow V^2 \omega C = P(\text{εφφ} - \text{εφφ}') \Rightarrow C = \frac{P}{V^2 \omega} (\text{εφφ} - \text{εφφ}') \quad (14.14)$$

Δηλαδή, από τη σχέση (14.14) μπορούμε να υπολογίσουμε την χωρητικότητα για μία αλλαγή της γωνίας φάσης από φ σε φ' για καταναλωτή με ισχύ P και τάση V. Στην πράξη, για μία διόρθωση του συντελεστή ισχύος δεν απαιτούνται υπολογισμοί με την εξίσωση (14.14) αλλά χρησιμοποιούνται ειδικοί πίνακες και διαγράμματα. Σε αυτά, κάθε μεταβολή από ένα δεδομένο συνφ σε ένα συγκεκριμένο συνφ' αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή K ο οποίος είναι ίσος με τον λόγο της απαιτούμενης για διόρθωση άεργης ισχύος προς την ενεργό ισχύ του καταναλωτή. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της διόρθωσης συνημιτόνου είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο εγχείρημα στην βιομηχανία όπου η ύπαρξη μεγάλων μονάδων με επαγωγική συμπεριφορά απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

#### **14.4 Παράδειγμα.**

Έστω λάμπα 60 W που λειτουργεί στα 220V/50Hz με συντελεστή ισχύος 0.4. Να βρεθεί η τιμή της χωρητικότητας που πρέπει να συνδεθεί παράλληλα έτσι ώστε ο συντελεστής ισχύος να γίνει 0.9.

Θέλουμε το συνφ=0.4 να γίνει συνφ'=0.9 δηλαδή η διαφορά φάσης από φ=66.42° να γίνει φ'=25.84°. Από την εξίσωση 14.14 έχουμε:

$$C = \frac{P}{V^2 \omega} (\text{εφφ} - \text{εφφ}') = \frac{60}{220^2 \times 2 \times \pi \times 50} (\text{εφ}66.42^\circ - \text{εφ}25.84^\circ) = 7.1 \mu\text{F}$$