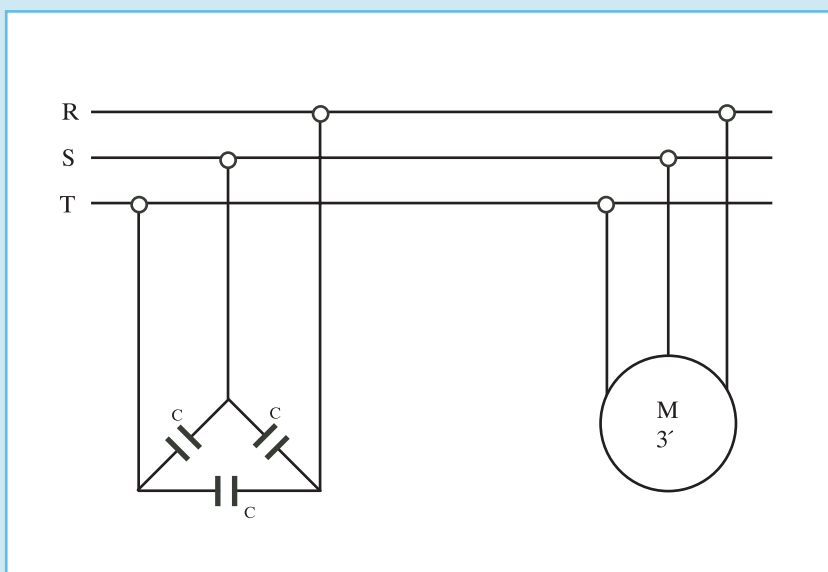


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ



11.1. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

Ο συντελεστής ισχύος **συν φ** είναι ο λόγος της πραγματικής ισχύος **P** προς την φαινόμενη ισχύ **S** και αντιστοιχεί στο τμήμα της φαινόμενης ισχύος, που παράγει πραγματική (ενεργό) ισχύ.

$$P = U_{\pi} \cdot I_{\pi} \cdot \text{συν } \varphi = S \cdot \text{συν } \varphi$$

$$\text{συν } \varphi = P/S$$

Σε σταθερή τάση και σταθερή πραγματική ισχύ, όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ισχύος, τόσο μεγαλύτερα είναι: το ρεύμα, η φαινόμενη ισχύς και η άεργη ισχύς. Η άεργη ισχύς στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει το ρεύμα φόρτισης των γραμμών και των καταναλωτών με αρνητικές επιπτώσεις όπως: η ανάγκη αύξησης της εγκαταστημένης ισχύος στο εργοστάσιο παραγωγής και η αύξηση της διατομής των αγωγών του δικτύου διανομής με συνέπεια την αύξηση του κόστους εγκαταστάσεων.

Παράδειγμα 1

Πραγματική ισχύς 1KW με συντελεστή ισχύος **συνφ₁=0,5** μεταφέρεται στον καταναλωτή. Αν ο συντελεστής ισχύος βελτιωθεί (αυξηθεί) στο **συνφ₂=1**, υπολογίστε το λόγο των ρευμάτων των δύο καταστάσεων.

Λύση:

Η ενεργός ισχύς $P=1\text{KW}$ είναι σταθερή και στις δύο καταστάσεις:

$$P_1 = U_{\pi} \cdot I_{\pi 1} \cdot \text{συν } \varphi_1$$

$$P_2 = U_{\pi} \cdot I_{\pi 2} \cdot \text{συν } \varphi_2$$

Αν διαιρέσουμε τις δύο αυτές σχέσεις βρίσκουμε:

$$P_1/P_2 = U_{\pi} \cdot I_{\pi 1} \cdot \cos \varphi_1 / U_{\pi} \cdot I_{\pi 2} \cdot \cos \varphi_2$$

$$I_{\pi 1}/I_{\pi 2} = \cos \varphi_2 / \cos \varphi_1 = 1/0,5 = 2$$

$$I_{\pi 1}/I_{\pi 2} = 2$$

Το ρεύμα προ της βελτίωσης (αντιστάθμισης) του $\cos \varphi$ είναι διπλάσιο του ρεύματος με αντισταθμισμένο $\cos \varphi$.

11.2. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

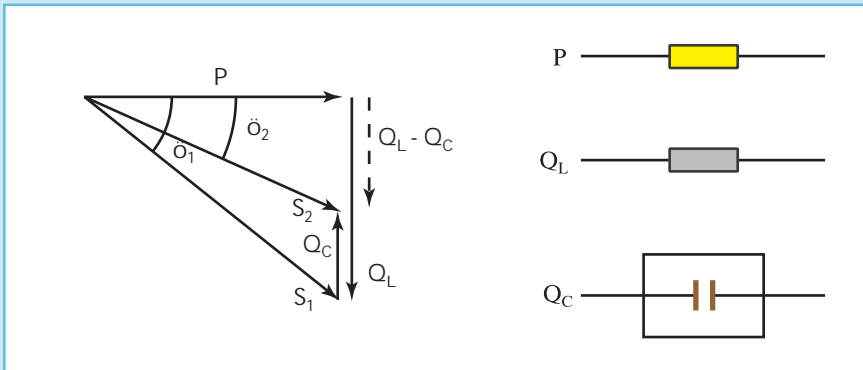
Αντιστάθμιση της άεργης ισχύος ονομάζεται η ελάττωση της επαγωγικής άεργης ισχύος μέσω αύξησης της χωρητικής άεργης ισχύος.

Επομένως, η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος οδηγεί στην βελτίωση (αύξηση) του συντελεστή ισχύος.

Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται με σύνδεση πυκνωτών, οι οποίοι παράγουν χωρητική άεργη ισχύ. Ως γνωστό, η επαγωγική άεργη ισχύς και η χωρητική άεργη ισχύς έχουν διαφορά φάσης 180° . Επομένως το **πηγίο απορροφάει άεργη ισχύ από το δίκτυο**, ενώ ο **πυκνωτής τροφοδοτεί το δίκτυο με άεργη ισχύ**. Η αντιστάθμιση ολοκληρώνεται όταν $\cos \varphi = 1$.

Στο Σχήμα 11.1 απεικονίζεται η διαδικασία αντιστάθμισης του συντελεστή ισχύος. Αρχικά, στο δίκτυο ρέει **P** ενεργός ισχύς, **Q_L** άεργη επαγωγική ισχύς και **S₁** φαινόμενη ισχύς. Η γωνία φάσης χωρίς αντιστάθμιση μεταξύ **S₁** και **P** είναι η φ_1 .

Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται μέσω εισαγωγής στο δίκτυο της **Q_C** χωρητικής άεργης ισχύος. Ως αποτέλεσμα η ενεργός ισχύς **P** παραμένει σταθερή, η τελική άεργη ισχύς γίνεται **Q_L-Q_C**, η τελική φαινόμενη ισχύς γίνεται **S₂** και η τελική γωνία φάσης με αντιστάθμιση γίνεται φ_2 .



Σχήμα 11.1. Αντιστάθμιση (βελτίωση) του συντελεστή ισχύος

Παρατηρούμε ότι:

$$\epsilon\phi \phi_1 = Q_L / P$$

$$\epsilon\phi \phi_2 = (Q_L - Q_C) / P$$

Επομένως:

$$\phi_2 < \phi_1 \quad \text{ή} \quad \sin \phi_2 < \sin \phi_1$$

$$Q_C = P \cdot (\epsilon\phi \phi_1 - \epsilon\phi \phi_2)$$

$\Delta Q = Q_L - Q_C$ είναι η τελική άεργη ισχύς μετά την αντιστάθμιση

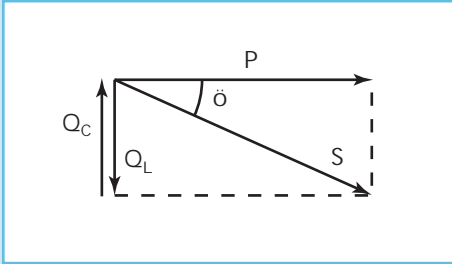
$$Q_C = Q_L - \Delta Q = U^2 / X_C = \omega \cdot C \cdot U^2$$

Ο πυκνωτής για την αντιστάθμιση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C = Q_C / (\omega \cdot U^2)$$

Έτσι υπολογίζεται η χωρητικότητα του πυκνωτή για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και του συντελεστή ισχύος στο δίκτυο.

Η άεργη ισχύς, η οποία απαιτείται για την ολική αντιστάθμιση ($Q_L=Q_C$ και $\cos \varphi=1$), είναι η Q_C και παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 11.2.



Σχήμα 11.2. Ολική αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος ($Q_L=Q_C$)

Παράδειγμα 2

Υπολογίστε την χωρητικότητα του πυκνωτή που απαιτείται για την ολική αντιστάθμιση άεργης ισχύος 5 kVAr σε δίκτυο τάσης 220 V και συχνότητας 50 Hz.

Λύση:

Το διάγραμμα της ισχύος παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.2. Η επαγωγική άεργη ισχύς που πρέπει να αντισταθμισθεί είναι $Q_L=5000$ VAr και η γωνία φάσης είναι φ .

Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης παράλληλα με το δίκτυο μπαταρίας πυκνωτών χωρητικότητας C και χωρητικής αντίστασης X_C η οποία παράγει άεργη χωρητική ισχύ $Q_C = Q_L=5000$ VAr. Ως συνέπεια η γωνία φ μηδενίζεται και τότε $\cos \varphi=1$.

Το χωρητικό ρεύμα I_C και η χωρητική άεργη ισχύς Q_C υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_C=U/X_C$$

$$Q_C=U \cdot I_C=U^2/X_C$$

Η χωρητική αντίδραση υπολογίζεται από την τελευταία σχέση ως:

$$X_C = U^2 / Q_C = 220^2 V^2 / 5000 \text{ VAr} = 9,68 \, \Omega$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή προκύπτει άμεσα:

$$C = 1 / (\omega \cdot X_C) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 9,68 \Omega) = 329 \mu\text{F}$$

Προσοχή:

Μια συστοιχία πυκνωτών με σταθερή χωρητικότητα αντισταθμίζει μόνο συγκεκριμένη ποσότητα άεργης ισχύος. Όταν η άεργη ισχύς μεταβάλλεται, ή η τάση του δικτύου παρουσιάζει διακυμάνσεις, τότε η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται μόνο για ένα μέρος της άεργης ισχύος.

Σύμφωνα με την πρακτική των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, ο αντισταθμισμένος συντελεστής ισχύος κυμαίνεται μεταξύ $\cos\phi=0,8$ επαγωγικός και $\cos\phi=0,9$ χωρητικός. Μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή ισχύος αυξάνει σημαντικά το κόστος των πυκνωτών αντιστάθμισης και ως συνέπεια το κόστος των εγκαταστάσεων.

Οι κατασκευαστικές εταιρίες αναγράφουν στους πυκνωτές αντιστάθμισης την τάση, την συχνότητα και την άεργη ισχύ (kVAr) την οποία παράγουν. Επομένως για την υλοποίηση μιας εγκατάστασης αντιστάθμισης πρέπει να γνωρίζουμε την τάση της γραμμής και την άεργη ισχύ που πρέπει να αντισταθμιστεί.

Οποσδήποτε, η σύνδεση στο δίκτυο των πυκνωτών αντισταθμίζει την άεργη ισχύ και βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος.

Παράδειγμα 3

Υπολογίστε τη χωρητικότητα του πυκνωτή για την ολική αντιστάθμιση ($\cos\phi=1$) τριφασικής άεργης ισχύος 9kVAr σε τριφασικό δίκτυο 380V συχνότητας 50Hz για την τροφοδότηση τριφασικού κινητήρα.

Λύση:

Θεωρούμε ότι η τριφασική άεργη ισχύς είναι το τριπλάσιο της μονοφασικής ισχύος και ως αποτέλεσμα μπορούμε να υπολογίσουμε την αντιστάθμιση για μία μόνο φάση.

Η ανά φάση άεργη ισχύς υπολογίζεται από την τριφασική ισχύ ως:

$$Q_C/\text{φάση}=9000 \text{ VAr}/3=3000 \text{ VAr}/\text{φάση}$$

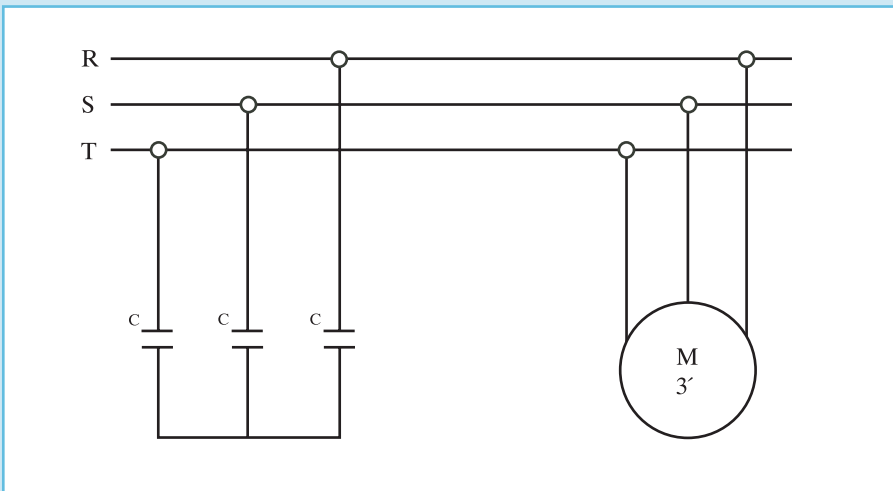
Η φασική τάση του δικτύου υπολογίζεται ως γνωστό:

$$U_\phi=380\text{V}/\sqrt{3}=220\text{V}$$

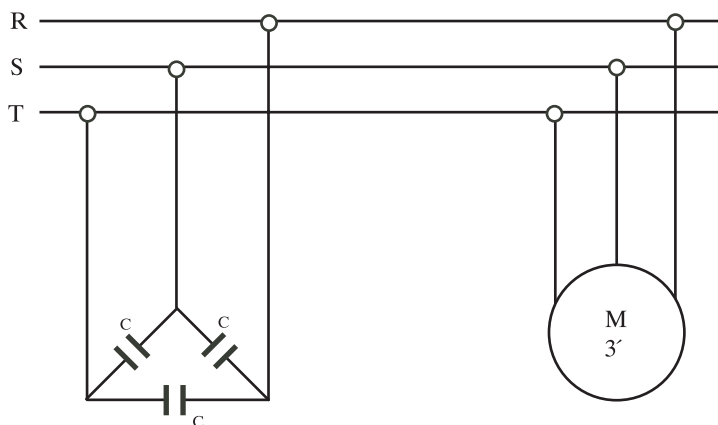
Στη συνέχεια υπολογίζουμε την χωρητικότητα του πυκνωτή ανά φάση.

$$C=Q_C/(\omega \cdot U^2)=3000\text{VAr}/(2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 220^2\text{V}^2)=198 \mu\text{F}.$$

Επομένως, θα χρειαστούν τρεις πυκνωτές των 198 μF , οι οποίοι συνδέονται σε αστέρα, Σχήμα 11.3 ή σε τρίγωνο, Σχήμα 11.4.



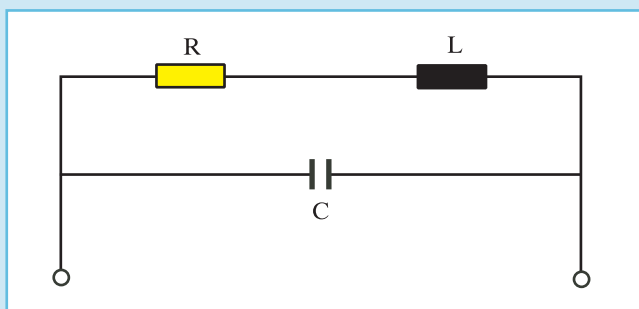
Σχήμα 11.3. Σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών σε αστέρα για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος τριφασικού κινητήρα



Σχήμα 11.4. Σύνδεση συστοιχίας πυκνωτών σε τρίγωνο για την αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος τριφασικού κινητήρα

Παράδειγμα 4

Σε τάση 220 V και συχνότητα 50 Hz συνδέονται σε σειρά ένα πηνίο με μια ωμική αντίσταση, Σχήμα 11.5. Το κύκλωμα απορροφάει 10 kW πραγματική ισχύ με συντελεστή ισχύος 0,5. Με την σύνδεση ενός πυκνωτή παράλληλα στο δίκτυο ο συντελεστής ισχύος πρέπει να αντισταθμιστεί στο 0,87. Υπολογίστε: α) την άεργη ισχύ του πυκνωτή και β) την χωρητικότητα του πυκνωτή.



Σχήμα 11.5. Αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος του κυκλώματος R-L σειράς με σύνδεση πυκνωτών

Λύση:

Σύμφωνα με το Σχήμα 11.1 υπολογίζουμε την αρχική φάση φ_1 , την αντισταθμισμένη φάση φ_2 , την άεργη επαγωγική ισχύ του πηνίου Q_L και την μεταβολή της άεργου ισχύος $\Delta Q = Q_L - Q_C$.

$$\text{συν } \varphi_1 = 0,5 \text{ ή } \varphi_1 = 60^\circ$$

$$\text{συν } \varphi_2 = 0,87 \text{ ή } \varphi_2 = 30^\circ$$

$$Q_L = P \cdot \varepsilon\varphi 60^\circ = 10000 \text{ W} \cdot 1,73 = 17300 \text{ VAr}$$

$$\Delta Q = Q_L - Q_C = P \cdot \varepsilon\varphi 30^\circ = 10000 \text{ W} \cdot 0,57 = 5700 \text{ VAr}$$

$$Q_C = Q_L - \Delta Q = 17300 - 5700 = 11600 \text{ VAr}$$

$$C = Q_C / (\omega \cdot U^2) = 11600 \text{ VAr} / (2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 220^2 \text{ V}^2) = 760 \text{ } \mu\text{F}$$

Παράδειγμα 5

Ένας μονοφασικός μετασχηματιστής για τάση 220V και συχνότητα 50 Hz απορροφάει ρεύμα 15A. Η άεργη ισχύ είναι 1750VAr. Υπολογίστε: α) την ισχύ αντιστάθμισης ώστε $\varphi_2 = 15^\circ$ και β) τη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Λύση:

$$\alpha) S = U \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 15 \text{ A} = 3300 \text{ VA}$$

$$Q_L = 1750 \text{ VAr}$$

$$\eta\mu\varphi_1 = Q_L / S = 1750 \text{ VAr} / 3300 \text{ VA} = 0,53 \text{ ή } \varphi_1 = 32^\circ$$

$$\varphi_2 = 15^\circ \text{ ή } \Delta Q = Q_L - Q_C = S \cdot \eta\mu\varphi_2 = 3300 \text{ VA} \cdot 0,259 = 854 \text{ VAr}$$

$$Q_C = Q_L - \Delta Q = 1750 \text{ VAr} - 854 \text{ VAr} = 896 \text{ VAr}$$

$$\beta) C = Q_C / (\omega \cdot U^2) = 896 \text{ VAr} / (2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 220^2 \text{ V}^2) = 59 \mu\text{F}.$$

Μπορούμε να επιλέξουμε $C = 60 \mu\text{F}$.

Παράδειγμα 6

Ένας τριφασικός κινητήρας έχει στην πινακίδα του τα ακόλουθα ονομαστικά μεγέθη: 380V/220V, 50Hz, 10kW, $\cos\phi = 0,85$. Η άεργη ισχύς των πυκνωτών αντιστάθμισης είναι 30% της ονομαστικής ισχύος. Υπολογίστε: α) την άεργη ισχύ αντιστάθμισης και β) την χωρητικότητα των πυκνωτών αντιστάθμισης σε σύνδεση αστέρα.

Λύση:

Ο συντελεστής ισχύος και το άεργο ρεύμα του τριφασικού κινητήρα αυξάνουν με την αύξηση του φορτίου. Για την αποφυγή υπεραντιστάθμισης η ισχύς των πυκνωτών αντιστάθμισης πρέπει να υπολογίζεται σε συνάρτηση (η ποσοστό) της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα.

$$\alpha) Q_C = 30\% \cdot 10000 \text{ W} = 3000 \text{ VAr} = 3 \text{ kVAr}$$

β) Η φασική τάση είναι 220V. Για κάθε φάση του κινητήρα αντιστοιχεί το ένα τρίτο της άεργου ισχύος του κινητήρα.

$$Q_C / \text{φάση} = 3000 \text{ VAr} / 3 = 1000 \text{ VAr} / \text{φάση}$$

$$C = Q_C / (\omega \cdot U^2) = 1000 \text{ VAr} / (2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 220^2 \text{ V}^2) = 65,8 \mu\text{F} / \text{φάση}$$

Επομένως θα εγκαταστήσουμε τρεις πυκνωτές των 65,8μF συνδεδεμένους σε αστέρα. Επίσης μπορούμε να αυξήσουμε κατά 2%-5% την χωρητικότητα των πυκνωτών και επιλέγουμε $C = 70 \mu\text{F}$ για κάθε φάση.

11.3. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Η άεργη ισχύς στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει το ρεύμα φόρτισης των γραμμών και των καταναλωτών με αρνητικές επιπτώσεις και είναι ανεπιθύμητη.

Αντιστάθμιση της άεργης ισχύος σημαίνει ελάττωση της επαγωγικής άεργης ισχύος μέσω αύξησης της χωρητικής άεργης ισχύος και οδηγεί στην βελτίωση του συντελεστή ισχύος.

Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται με σύνδεση πυκνωτών, οι οποίοι παράγουν χωρητική άεργη ισχύ και ολοκληρώνεται όταν $\text{συν}\varphi=1$.

11.4. ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΠΡΟΣ ΛΥΣΗ

1. Ένα εργοστάσιο απορροφάει 100A με συντελεστή ισχύος $\text{συν}\varphi=0,7$ επαγωγικό από γραμμή τάσης 15kV και συχνότητας 50Hz. Υπολογίστε: α) τον πυκνωτή ο οποίος θα αυξήσει τον συντελεστή ισχύος, ώστε $\text{συν}\varphi=1$ και β) το ρεύμα στον πυκνωτή.

Απάντηση: α) 15μF, β) 71A.

2. Σύνθετη αντίσταση αποτελούμενη από ωμική αντίσταση 30 Ω και πηνίο με επαγωγική αντίσταση 23 Ω συνδέεται σε τάση 220 V και συχνότητα 50 Hz. Υπολογίστε την χωρητικότητα του πυκνωτή, ο οποίος συνδεδεμένος παράλληλα με την σύνθετη αντίσταση θα αντισταθμίσει τον συντελεστή ισχύος στο 0,95 επαγωγικό.

Απάντηση: 242 μF

3. Τριφασικός κινητήρας έχει στην πινακίδα του τα ακόλουθα ονομαστικά μεγέθη: 5 kW, 380 V /220 V, 50 Hz και $\text{cos}\varphi=0,7$. Υπολογίστε: α) τον πυκνωτή για την αντιστάθμιση, ώστε ο συντελεστής ισχύος να αυξηθεί στο 0,9 επαγωγικό, β) το αρχικό ρεύμα προ της αντιστάθμισης, γ) το ρεύμα του κινητήρα μετά την

αντιστάθμιση και δ) την μείωση του ρεύματος που απορροφάει ο κινητήρας.

Απάντηση: α) 176 μF , β) 32,47 A, γ) 25,25 A, δ) 7,22 A.

4. Ένα βιομηχανικό φορτίο 10kW τροφοδοτείται από γραμμή ηλεκτρικής ενέργειας 220V και συχνότητας 50Hz. Το φορτίο έχει συνδεθεί παράλληλα με συστοιχία πυκνωτών χωρητικότητας 299 μF , η οποία αυξάνει τον συντελεστή ισχύος στο 0,95 επαγωγικό. Υπολογίστε τον αρχικό συντελεστή ισχύος (προ της αντιστάθμισης).

Απάντηση: $\cos\varphi=0,85$.