

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

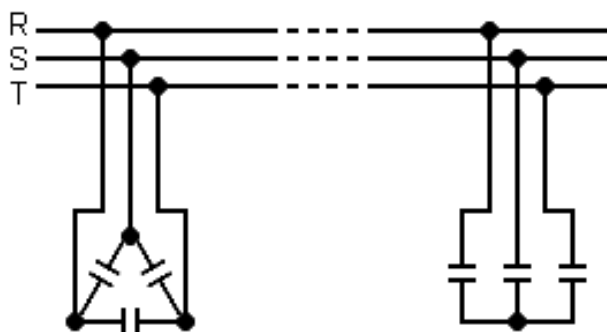
## Αντιστάθμιση Άεργης Ισχύος

## 3.1 Ύπαρξη Άεργης Ισχύος στα Δίκτυα – λόγοι Αντιστάθμισής της

Η άεργη ισχύς είναι μια αναγκαιότητα στα δίκτυα ηλεκτρισμού. Η πλειονότητα των στοιχείων των ηλεκτρικών δικτύων έχουν επαγωγικό χαρακτήρα. Επίσης, συνήθως οι ηλεκτρικές καταναλώσεις έχουν επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Έτσι, πρακτικά είναι αδύνατο να παρέχεται η ζητούμενη πραγματική ισχύς στην κατανάλωση χωρίς να μην διακινείται παράλληλα και άεργη ισχύς.

Η ύπαρξη της άεργης ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα δεν είναι χωρίς προβλήματα. Είδαμε ήδη στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι κάποιες ανεπιθύμητες πτώσεις τάσης σε ΓΜ οφείλονται στη μεταφερόμενη άεργη ισχύ. Είναι φανερό επίσης ότι η κυκλοφορία άεργης ισχύος στα δίκτυα προκαλεί απώλειες πραγματικής ισχύος οι οποίες κοστίζουν στις εταιρείες ηλεκτρισμού. Ένα άλλο επίσης σοβαρό πρόβλημα που δημιουργεί η άεργη ισχύς είναι η μείωση της ικανότητας φόρτισης των στοιχείων του ηλεκτρικού δικτύου, εξ αιτίας του γεγονότος ότι η κυκλοφορία της άεργης ισχύος δια των στοιχείων αυτών συνεπάγεται την αύξηση των ρευμάτων.

Η αντιστάθμιση της επαγωγικής άεργης ισχύος γίνεται με την προσθήκη χωρητικοτήτων. Το σχήμα 3.1.1 δείχνει τους δυο τρόπους σύνδεσης πυκνωτών σε μια τριφασική γραμμή. Είναι φανερό ότι στη μεν σύνδεση τριγώνου ο κάθε πυκνωτής βρίσκεται υπό την πολική τάση του δικτύου, ενώ, στη σύνδεση αστέρα ο πυκνωτής βρίσκεται υπό τη φασική τάση.



Συνδέσεις πυκνωτών κατά τρίγωνο, ή αστέρα

Σχήμα 3.1.1

Κατ αντιστοιχία, η αντιστάθμιση χωρητικής άεργης ισχύος γίνεται, όμοια, με τη σύνδεση αυτεπαγωγών.

Η αντιστάθμιση της άεργης ισχύος γίνεται και στους καταναλωτές και στα δίκτυα. Ενδεικτικά φορτία που απαιτούν αντιστάθμιση άεργης ισχύος είναι: μεγάλοι κινητήρες ιδιαίτερα όταν λειτουργούν με συχνές διακοπές και επανεκκινήσεις, υψικάμινοι ηλεκτρικού τόξου ή επαγωγικοί, ηλεκτρικές συγκολλήσεις τόξου ή επαγωγικές, βιομηχανικά συγκροτήματα εξέλασης χάλυβα, εγκαταστάσεις ορυχείων, πειραματικές διατάξεις φυσικής υψηλών ενεργειών (όπως λ.χ. σύγχροτρο).

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιστάθμισης της άεργης ισχύος στην πράξη, ως προς την επιλογή των σημείων και του πλήθους των, στα οποία συνδέονται οι συσκευές αντιστάθμισης και ως προς το πώς γίνεται η σύνδεση ή αποσύνδεση των συσκευών

αυτών. Είναι προφανές ότι η άεργη ισχύς αντιστάθμισης σε κάποιο σημείο του δικτύου είναι γενικά συνάρτηση του χρόνου, αφού και η ζήτηση ισχύος είναι γενικά συνάρτηση του χρόνου.

### Παράδειγμα 3.1.1

Μια τριφασική γραμμή ΧΤ, με διαμήκη ωμική αντίσταση ανά χιλιόμετρο ίση προς  $0,5\Omega$  και μήκος ίσο προς 300 μέτρα, τροφοδοτεί φορτίο 20 kW, επαγωγικού συντελεστή ισχύος 0,8, με τάση 380 V. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος της γραμμής, εξετάζεται η τοποθέτηση πυκνωτών στο τέρμα της. Να προσδιοριστούν οι απαιτούμενοι πυκνωτές. Πόση μείωση απωλειών επιτυγχάνεται με τη σύνδεση των πυκνωτών; (Ηλεκτρολόγοι ΤΕΙΚ 1996)

### Λύση:

Η επαγωγική άεργη ισχύς στο φορτίο είναι:

$$Q = P \tan \varphi = 20 \times \tan(\cos^{-1} 0,8) = 15 \text{ kvar}$$

Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ισχύος στη γραμμή πρέπει να αντισταθμιστεί εξ ολοκλήρου η πιο πάνω επαγωγική ισχύς. Υπάρχουν δυο εναλλακτικές λύσεις να συνδεθούν τρεις πυκνωτές κατά τρίγωνο ( $\Delta$ ) ή κατ αστέρα ( $Y$ ). Υπολογίζουμε λοιπόν τους τρεις απαιτούμενους πυκνωτές σε κάθε μια από τις δυο επιλογές:

(α) σύνδεση τριών ομοίων πυκνωτών ονομαστικής τάσης 380 V κατά τρίγωνο:

$$\text{Χωρητικότητα κάθε πυκνωτή: } C_{\Delta} = \frac{Q/3}{V^2 \omega} = 110,22 \text{ } \mu\text{F}$$

(β) σύνδεση τριών ομοίων πυκνωτών ονομαστικής τάσης  $380/\sqrt{3}$  V κατ αστέρα:

$$\text{Χωρητικότητα κάθε πυκνωτή: } C_Y = \frac{5000}{(380/\sqrt{3})^2 \times 2 \times 50 \times \pi} = 330,65 \text{ } \mu\text{F}$$

Με οποιαδήποτε εκ των δυο αυτών αντισταθμίσεων το φορτίο της γραμμής μετατρέπεται σε ωμικό και επομένως ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ισχύος στη γραμμή. Πράγματι, χωρίς τους πυκνωτές, το ρεύμα (κατά μέτρο) της γραμμής είναι:

$$I = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,8} = 37,98 \text{ A} \text{ και επομένως οι απώλειες Joule στους αγωγούς των τριών φάσεων της γραμμής είναι:}$$

$$3RI^2 = 3 \times (0,5 \times 0,3) \times 37,98^2 = 649 \text{ W}$$

ενώ, με τους πυκνωτές το ρεύμα της γραμμής είναι:

$$I = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 380} = 30,39 \text{ A} \text{ και οι αντίστοιχες απώλειες στη γραμμή είναι:}$$

$$3 \times (0,5 \times 0,3) \times 30,39^2 = 415,5 \text{ W}$$

Άρα, η μείωση των απωλειών στη γραμμή με την αντιστάθμιση της άεργης ισχύος στο φορτίο είναι ίση προς την διαφορά των τελευταίων δυο αποτελεσμάτων, δηλαδή, ίση προς 233,7 W.

### Παράδειγμα 3.1.2

Μια κοντή γραμμή (μονοφασική) διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ονομαστικής τάσης 220 V έχει ωμική αντίσταση 0,06 Ω και επαγωγική αντίδραση 0,032 Ω. Η γραμμή τροφοδοτεί στο τέρμα της κατανάλωση ισχυρά επαγωγικού χαρακτήρα ισχύος 13 kW στα 209 V ενώ η τάση στην αναχώρηση της γραμμής είναι ίση προς την ονομαστική.

Προκειμένου να αυξηθεί η τάση στο φορτίο, συνδέονται πυκνωτές παράλληλα προς το φορτίο, ώστε τελικά να μετατραπεί ο συντελεστής ισχύος στην άφιξη από επαγωγικός σε χωρητικό με την ίδια αρχική τιμή του.

Αν η εγκάρσια πτώση τάσης στη γραμμή προσεγγιστικά υποτεθεί αμελητέα και αν η τάση στην αναχώρηση της γραμμής παραμείνει ίση με την ονομαστική, να υπολογιστεί η νέα τάση στην κατανάλωση μετά την τοποθέτηση των πυκνωτών.

(Ηλεκτρολόγοι TEIK 2000)

### Λύση:

Αφού υποτίθεται ότι η εγκάρσια πτώση τάσης στη γραμμή είναι αμελητέα, η εξίσωση (2.53) γίνεται:

$$V_1 = V_2 + \frac{PR + QX}{V_2}$$

από την εξίσωση αυτή, μπορούμε να υπολογίσουμε το Q, με αντικατάσταση των τιμών των υπολοίπων παραμέτρων και με την εκτέλεση των αριθμητικών πράξεων:

$$Q \cong 47 \text{ kvar}$$

Στη συνέχεια, μετά την τοποθέτηση των πυκνωτών, η μεν πραγματική ισχύς της κατανάλωσης παραμένει η ίδια, όμως, η συνολική άεργη ισχύς στην άφιξη της γραμμής γίνεται αρνητική (χωρητική) ενώ διατηρεί το μέτρο της:

$Q' = -47 \text{ kvar}$ , οπότε αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην πιο πάνω εξίσωση έχουμε:

$$V_2^2 - 220V_2 - 724 = 0 \quad \text{από την οποία βρίσκουμε την νέα τάση στην κατανάλωση:}$$

$$V_2 \cong 223 \text{ V.}$$

## **3.2 Εισαγωγή στις Αντισταθμίσεις ΓΜ**

Ξεκινούμε με την διατύπωση των αλγεβρικών εκφράσεων των ισχύων στην άφιξη μιας ΓΜ. Όπως και κατά την ανάπτυξη της θεωρίας της μέγιστης απόδοσης των γραμμών μεταφοράς, έτσι κι εδώ η χρησιμοποίηση των σταθερών του ισοδυνάμου τετραπόλου της γραμμής ενδείκνυται διότι καταλήγουν σε πιο εύχρηστες εκφράσεις. Από την εξίσωση (2.23) έχουμε επιλύοντας ως προς το ρεύμα φορτίου  $I_2$ :

$$I_2 = \frac{V_1 - AV_2}{B} \quad (3.1)$$

Υιοθετούμε τώρα τις πιο κάτω εκφράσεις:

$$A = |A| \angle a, B = |B| \angle b, V_2 = |V_2| \angle 0^\circ, V_1 = |V_1| \angle \vartheta \quad (3.2)$$

οπότε, η (3.1) με αντικατάσταση των εκφράσεων (3.2) γίνεται:

$$I_2 = \frac{|V_1|}{|B|} \angle (\vartheta - b) - \frac{|A||V_2|}{|B|} \angle (a - b) \quad (3.3)$$

επομένως, η φαινόμενη ισχύς στην άφιξη της ΓΜ είναι, σύμφωνα με τη (1.8):

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = \frac{|V_1||V_2|}{|B|} \angle (b - \vartheta) - \frac{|A||V_2|^2}{|B|} \angle (b - a) \quad (3.4)$$

τέλος, μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα πραγματικά από τα φανταστικά μέρη και να γράψουμε δυο εξισώσεις πραγματικών αριθμών:

$$P_2 = \frac{|V_1||V_2|}{|B|} \cos(b - \vartheta) - \frac{|A||V_2|^2}{|B|} \cos(b - a) \quad (3.5)$$

$$Q_2 = \frac{|V_1||V_2|}{|B|} \sin(b - \vartheta) - \frac{|A||V_2|^2}{|B|} \sin(b - a) \quad (3.6)$$

Ένα θέμα σημαντικού ενδιαφέροντος είναι ποια είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί στην κατανάλωση. Από την εξίσωση (3.5) παρατηρούμε ότι εφόσον η μεταβλητή φασική γωνία της τάσης στην αναχώρηση της γραμμής λάβει την τιμή  $b$  θα υπάρξει μέγιστο της πραγματικής ισχύος ίσο προς:

$$P_{2\text{μεγ}} = \frac{|V_1||V_2|}{|B|} - \frac{|A||V_2|^2}{|B|} \cos(b - a) \quad (3.7)$$

Ας προχωρήσουμε τώρα στο θέμα της αντιστάθμισης έργων στοιχείων της ΓΜ. Κατ αρχήν όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο η ΓΜ έχει και επαγωγικά και χωρητικά έργα στοιχεία, τα οποία αντισταθμίζουν άλληλα σε κάποιο βαθμό. Έτσι, όταν η ΓΜ μεγάλου μήκους είναι ελαφρά φορτισμένη παρουσιάζει συνολικά χωρητικό χαρακτήρα. Αντίθετα, όταν είναι πλήρως φορτισμένη παρουσιάζει επαγωγικό χαρακτήρα, δηλαδή, υπερισχύουν τα επαγωγικά της στοιχεία. Είναι λογικό λοιπόν να υποθέσουμε ότι αν αντισταθμίσουμε ένα ποσοστό των επαγωγικών στοιχείων μιας γραμμής μεγάλου μήκους (με προσθήκη λ.χ. πυκνωτών σειράς), θα αυξηθεί η μέγιστη ισχύς μεταφοράς. Έτσι, ορίζουμε τον συντελεστή αντιστάθμισης σειράς, ως:

$$k_s = \frac{|X_c|}{X} \quad (3.8)$$

όπου  $X$  είναι η συνολική διαμήκης επαγωγική αντίδραση της γραμμής και  $X_c$  είναι η χωρητική αντίδραση των πυκνωτών αντιστάθμισης σειράς. Βέβαια το θέμα δεν τελειώνει εδώ, η επιλογή των σημείων τοποθέτησης των πυκνωτών αντιστάθμισης (δηλαδή, συνολικού αριθμού σημείων και θέσεων κατά μήκος της γραμμής) προσφέρει πολλές επιλογές. Μια απλή πρώτη προσέγγιση είναι να τοποθετηθεί η χωρητικότητα αντιστάθμισης εξ ολοκλήρου στο μέσο της ΓΜ.

### Παράδειγμα 3.2.1

Για μια ΓΜ ονομαστικής τάσης 220 kV και μήκους 370 km δίδονται: η διαμήκης σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους ίση προς  $0,5239/79^\circ \Omega/\text{km}$  και η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα ανά μονάδα μήκους ίση προς  $3,172/90^\circ \mu\text{S}/\text{km}$ . Προκειμένου να αυξηθεί η μέγιστη ισχύς μεταφοράς της γραμμής, γίνεται αντιστάθμιση της άεργης επαγωγικής ισχύος με την τοποθέτηση στο μέσο της γραμμής πυκνωτών σειράς. Να υπολογιστεί η αύξηση της μέγιστης ισχύος μεταφοράς της γραμμής με συντελεστή αντιστάθμισης σειράς ίσο προς 70%. (Ηλεκτρολόγοι TEIK 2002)

#### Λύση:

Πρώτα υπολογίζουμε τη μέγιστη ισχύ μεταφοράς της γραμμής χωρίς αντιστάθμιση. Με τα δεδομένα του θέματος, βρίσκουμε κατά τα γνωστά τις σταθερές του ισοδύναμου τετραπόλου της ΓΜ:

$A = 0,89057/1,345^\circ$  ,  $B = 186,71/79,42^\circ \Omega$  οπότε έχουμε ως μέγιστη ισχύ μεταφοράς:

$$P_{2\mu\epsilon\gamma} = \frac{220^2}{186,71} - \frac{0,89057 \times 220^2}{186,71} \cos(79,42 - 1,345) = 211,5 \text{ MW}$$

Στη συνέχεια πρέπει να υπολογίσουμε τα νέα στοιχεία μετά την αντιστάθμιση. Σύμφωνα πάντα με τα δεδομένα, στο μέσον της γραμμής μεταφοράς θα τοποθετηθεί πυκνωτής σειράς με διαμήκη χωρητική σύνθετη αντίσταση ίση προς:

$jX_c = -j0,7 \times \text{Im}(370 \times 0,5239/79^\circ) = -j133,2$  ενώ αριστερά και δεξιά αυτής της αντίστασης υπάρχουν δυο γραμμές μισού, προς το αρχικό, μήκους με τις ακόλουθες σταθερές καθεμιά:

$$A' = 0,9722/0,317^\circ \text{ , } B' = 96,02/79,1^\circ \Omega \text{ , } C' = 5,81 \times 10^{-4}/90,1^\circ \text{ S}$$

Συνεπώς, ουσιαστικά έχουμε τη σύνδεση τριών τετραπόλων στη σειρά. Μια γραμμή μεταφοράς μισού μήκους, σε σχέση με τη δοθείσα, στα αριστερά. Μια διαμήκης σύνθετη αντίσταση στο μέσον (ισοδύναμη, από άποψη εξισώσεων, με μια κοντή γραμμή, και τέλος μια γραμμή μισού μήκους στα δεξιά. Μπορούμε λοιπόν να υπολογίσουμε τις σταθερές του ισοδύναμου τετραπόλου του προκύπτοντος δικτύου με πολλαπλασιασμό πινάκων, από τις σταθερές των συνιστωσών γραμμών:

$$\begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & A_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & A' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & jX_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & A' \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} A'^2 + jX_c A' C' + B' C' & 2A' B' + jX_c A'^2 \\ 2A' C' + jX_c C'^2 & C' B' + jX_c C' A' + A'^2 \end{bmatrix}$$

και αντικαθιστώντας τα  $A', B', C', X_c$  με τις τιμές τους βρίσκουμε:

$$A_s = 0,966/1,27^\circ, \quad B_s = 67,79/58,24^\circ \Omega, \quad C_s = 1,17 \times 10^{-3}/90,4^\circ \text{ S}$$

Παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι η αντιστάθμιση άλλαξε κυρίως τη σταθερά  $B$  του τετραπόλου. Υπολογίζουμε τώρα τη μέγιστη ισχύ μεταφοράς της ΓΜ μετά την αντιστάθμιση, από την εξίσωση (3.7):

$$P_{2\mu\epsilon\gamma} = \frac{220^2}{67,79} - \frac{0,966 \times 220^2}{67,79} \cos(58,24 - 1,27) = 338,1 \text{ MW}$$

Βλέπουμε ότι με την αντιστάθμιση της ΓΜ επετεύχθη μια σημαντικότερη αύξηση της μέγιστης ισχύος μεταφοράς της γραμμής.

**Σημείωση:** Είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί επίσης αν η συγκεκριμένη αντιστάθμιση έχει επίπτωση και αν ναι ποια πάνω στο μέγιστο βαθμό απόδοσης της γραμμής. Αυτό μπορεί να γίνει με εφαρμογή της εξίσωσης (2.36) πριν και μετά την αντιστάθμιση, με τα εξής αποτελέσματα: Πριν την αντιστάθμιση:  $\eta_{\mu\epsilon\gamma} = 97,56\%$ , μετά:  $\eta'_{\mu\epsilon\gamma} = 97,45\%$ . Βλέπουμε δηλαδή ότι η συγκεκριμένη αντιστάθμιση αύξησε κατά πολύ σημαντικό βαθμό τη μέγιστη ισχύ μεταφοράς, ενώ ουσιαστικά δεν άλλαξε τον μέγιστο βαθμό απόδοσης της ΓΜ (υπήρξε μια μηδαμινή μείωση).

Η δυνατότητα να αυξηθεί η μέγιστη ισχύς μεταφοράς μιας ΓΜ, δηλαδή, μια ΓΜ να μπορεί να εξυπηρετήσει μια αυξημένη κατανάλωση είναι εξαιρετικής πρακτικής σπουδαιότητας σήμερα που η προσθήκη νέων ΓΜ στα δίκτυα είναι δυσχερής. Εξ άλλου η αντιστάθμιση με πυκνωτές σειράς των ΓΜ έχει και άλλες επωφελείς δυνατότητες: βελτίωση της ευστάθειας λειτουργίας, διαχείριση της ροής φορτίου κατά βούληση, κλπ. Σήμερα, η ελεγχόμενη (με θυρίστορ) αντιστάθμιση με πυκνωτές σειράς (TCSC) είναι μέρος της τεχνολογίας Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΣΜΕΡ, FACTS) που θεμελίωσε ο N. Hingorani.

### Θέματα για εξάσκηση

1. Μια τριφασική Γραμμή Μεταφοράς ηλεκτρικού δικτύου 66 kV έχει μήκος 16 km και διαμήκη σύνθετη αντίσταση ανά μονάδα μήκους ίση προς  $0,125 + j0,4375 \Omega/\text{km}$ . Η γραμμή τροφοδοτεί φορτίο 70 MVA, με συντελεστή ισχύος 0,8 επαγωγικό, με τάση 64 kV.  
Τρεις όμοιοι πυκνωτές συνδέονται κατ' αστέρα παράλληλα προς το φορτίο, ώστε η τάση στο φορτίο να είναι 64 kV, ενώ η τάση στην αναχώρηση της ΓΜ είναι 69 kV. Να υπολογίσετε τη συνολική άεργη ισχύ των πυκνωτών καθώς και τη χωρητικότητα καθενός από αυτούς. (Ηλεκτρολόγοι TEIK 2000)
2. Να υπολογίσετε τους απαιτούμενους πυκνωτές για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος τριφασικού φορτίου 100 kW τάσης 10 kV, από 0,8 επαγωγικού στην μονάδα. (Ηλεκτρολόγοι TEIK 1985)