

Άσκηση 6

Φαινόμενο Ferranti.

Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης
μεγάλου μήκους και ο σύγχρονος
πυκνωτής.

Αντικείμενο

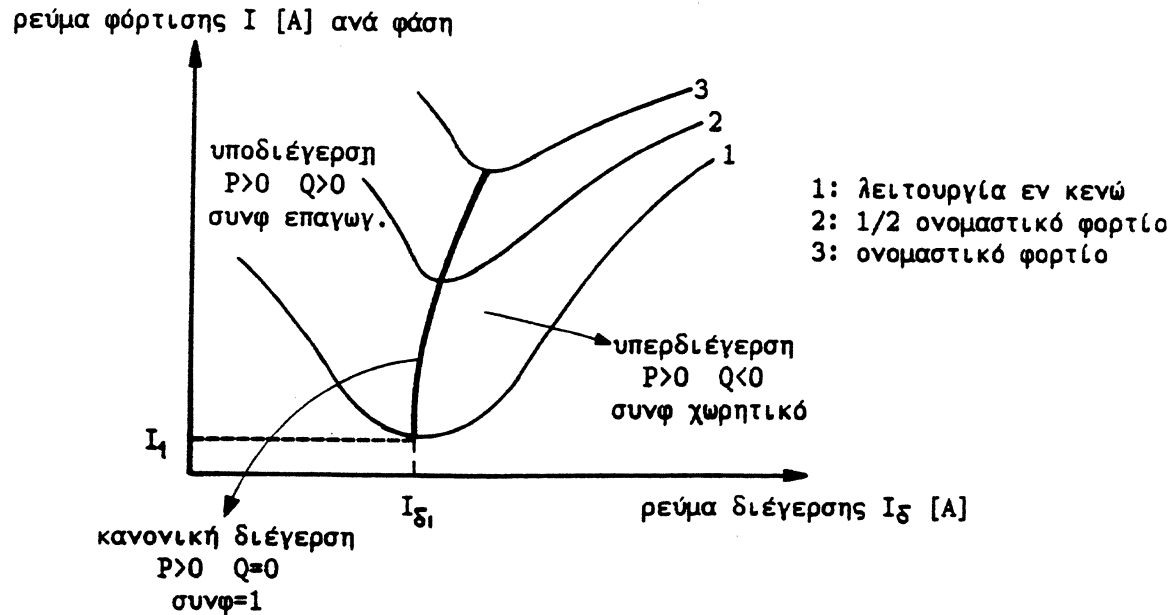
- Παρουσίαση της δυνατότητας του σύγχρονου πυκνωτή για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους.
- Παρουσίαση των αιτίων και των αποτελεσμάτων του φαινομένου Ferranti.

Σύγχρονος πυκνωτής

- Στην άσκηση 3 για ρύθμιση της τάσης στο τέλος μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς παρουσιάστηκε η **συστοιχία στατών πυκνωτών**. Η ρύθμιση με χρήση τέτοιων συστοιχιών γίνεται σε βήματα (πυκνωτές συνδέονται και αποσυνδέονται μέσω διακοπών).
- Στην παρούσα άσκηση θα χρησιμοποιηθεί **σύγχρονος πυκνωτής** με τον οποίο επιτυγχάνεται πιο ομαλή ρύθμιση.

Σύγχρονος κινητήρας

- Καμπύλες V της σύγχρονης μηχανής (ρεύμα φόρτισης συναρτήσει ρεύματος διέγερσης):



- Η καμπύλη 1 δείχνει πώς μεταβάλλεται το ρεύμα φόρτισης (το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο), όταν μεταβάλλεται το ρεύμα διέγερσης στην εν κενώ λειτουργία, δηλαδή χωρίς μηχανικό φορτίο συνδεδεμένο στον άξονά του. Η 3 δείχνει το ίδιο σε ονομαστικό φορτίο.
- Από 1 έως 3 υπάρχουν άπειρες άλλες δυνατές καμπύλες.

Διερεύνηση καμπύλης 1

- Για μία ορισμένη τιμή του ρεύματος διέγερσης ($I_{\delta 1}$) το ρεύμα φόρτισης γίνεται ελάχιστο (I_1).
 - Ο κινητήρας φορτίζει το δίκτυο ωμικά, δηλαδή η τάση του δικτύου και το ρεύμα του κινητήρα είναι σε φάση και $\cos\varphi = 1$.
 - Κανονική διέγερση.
- Για τιμή του ρεύματος διέγερσης μικρότερη ή μεγαλύτερη του $I_{\delta 1}$ το ρεύμα φόρτισης μεγαλώνει.
 - $\cos\varphi < 1$.
 - Υποδιέγερση κινητήρα όταν το ρεύμα διέγερσης γίνεται μικρότερο του $I_{\delta 1}$ ($\cos\varphi$ επαγωγικό).
 - Υπερδιέγερση κινητήρα όταν το ρεύμα διέγερσης γίνεται μεγαλύτερο του $I_{\delta 1}$ ($\cos\varphi$ χωρητικό).

Εφαρμογές σύγχρονων κινητήρων

- Οι σύγχρονοι κινητήρες συνήθως είναι πάνω από 100 kW. Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται απολύτως σταθερή ταχύτητα περιστροφής και μεγάλος βαθμός απόδοσης.
- Εφαρμογές:
 - Κίνηση αντλιών, συμπιεστών, ελάστρων κλπ.
 - Βελτίωση του συντελεστή ισχύος. Ο κινητήρας κινεί φορτίο και παράλληλα βελτιώνει το συντελεστή ισχύος μιας εγκατάστασης ή λειτουργεί εν κενώ και χρησιμοποιείται μόνο για βελτίωση του συντελεστή ισχύος (ονομάζεται σύγχρονος αντισταθμιστής ή πυκνωτής).
 - Ρύθμιση της τάσης στο τέλος τριφασικής γραμμής μεταφοράς υψηλής τάσης, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί εν κενώ (ονομάζεται **σύγχρονος πυκνωτής**). Λειτουργεί είτε ως επαγωγέας είτε ως πυκνωτής όταν είναι υποδιεγερμένος ή υπερδιεγερμένος αντίστοιχα.

Φαινόμενο Ferranti

- Όταν το φορτίο μιας γραμμής υψηλής τάσης μεγάλου μήκους που τροφοδοτείται με τάση U_s μηδενιστεί, η τάση ανοικτού κυκλώματος U_r στο τέλος της γραμμής θα είναι υψηλότερη από αυτή στην αρχή της.

- Τυπικές τιμές για γραμμές ΥΤ:

$$R_0 = 0.00 \dots \Omega/km \text{ ανά φάση}$$

$$X_{L0} = 0.4 \Omega/km \text{ ανά φάση}$$

$$X_{C0} = 4 \cdot 10^5 \Omega \cdot km \text{ ανά φάση.}$$

- Έτσι μια γραμμή 300 km έχει:

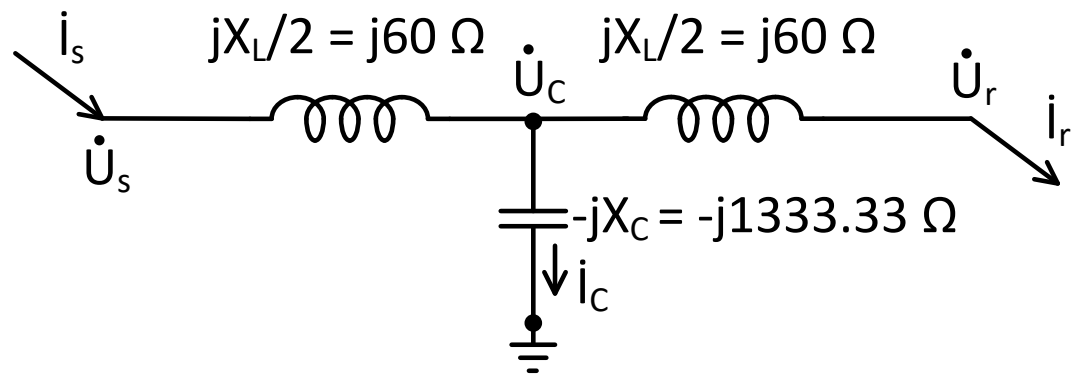
$$X_L = 120 \Omega \text{ ανά φάση}$$

$$X_C = 1333.33 \Omega \text{ ανά φάση}$$

Επειδή η ωμική αντίσταση είναι πολύ μικρότερη από την επαγωγική αντίδραση μπορούμε να την παραλείψουμε.

Παρουσίαση φαινομένου Ferranti

- Χρησιμοποιούμε το απλοποιημένο ισοδύναμο μιας γραμμής μεταφοράς με τη χωρητικότητα συγκεντρωμένη σε ένα σημείο και ωμική αντίσταση αμελητέα:



- Γενικά ισχύουν οι σχέσεις:

$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y} \dot{Z}\right) \dot{U}_r + \dot{Z} \left(1 + \frac{1}{4} \dot{Y} \dot{Z}\right) \dot{i}_r$$

$$\dot{i}_s = \dot{Y} \dot{U}_r + \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y} \dot{Z}\right) \dot{i}_r$$

Όπου (λαμβάνοντας υπόψη και την ωμική αντίσταση της γραμμής R):

$$\dot{Z} = R + jX_L = R + j\omega L, \quad \dot{Y} = j \frac{1}{X_C} = j\omega C$$

Παρουσίαση φαινομένου Ferranti

- Επειδή δεν υπάρχει φορτίο, $\dot{I}_r = 0$ και επομένως οι σχέσεις αυτές απλοποιούνται ως εξής:

$$\dot{U}_s = \left(1 + \frac{1}{2} \dot{Y} \dot{Z}\right) \dot{U}_r \Rightarrow \dot{U}_s = \dot{A} \dot{U}_r$$
$$\dot{I}_s = \dot{Y} \dot{U}_r = \dot{I}_C$$

- Η μιγαδική σταθερά \dot{A} «ευθύνεται» για το φαινόμενο Ferranti. Το μέτρο της είναι λίγο μικρότερο από 1 (συνήθως 0.91 έως 0.99).
- ➔ Όταν μια τριφασική γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους τροφοδοτείται στην αρχή με μια τάση \dot{U}_s και λειτουργεί χωρίς φορτίο, η τάση ανοικτού κυκλώματος \dot{U}_r στο τέλος της γραμμής θα είναι υψηλότερη της \dot{U}_s .

Παρουσίαση φαινομένου Ferranti

- Έστω ότι:

$$U_s = 300 \text{ kV}$$

$$\dot{Z} = R + jX_L = j120 \Omega/\varphi$$

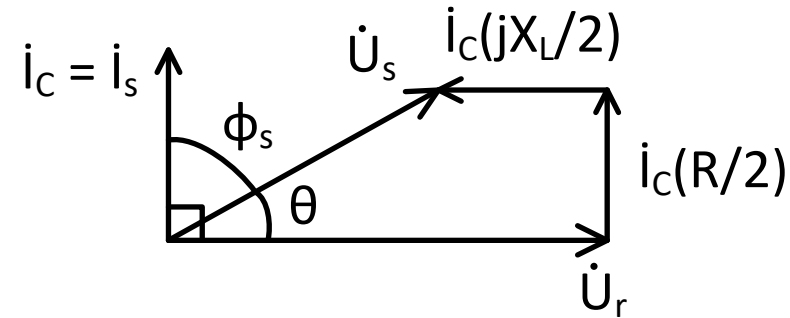
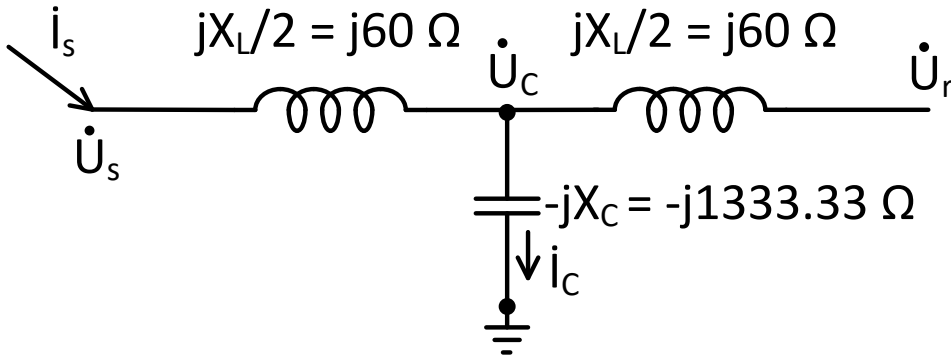
$$\dot{Y} = j\frac{1}{X_C} = \frac{j}{1333.33} = j0.00075 \text{ S}/\varphi$$

- Τότε:

$$\dot{A} = \left(1 + \frac{1}{2}\dot{Y}\dot{Z}\right) = 0.955$$

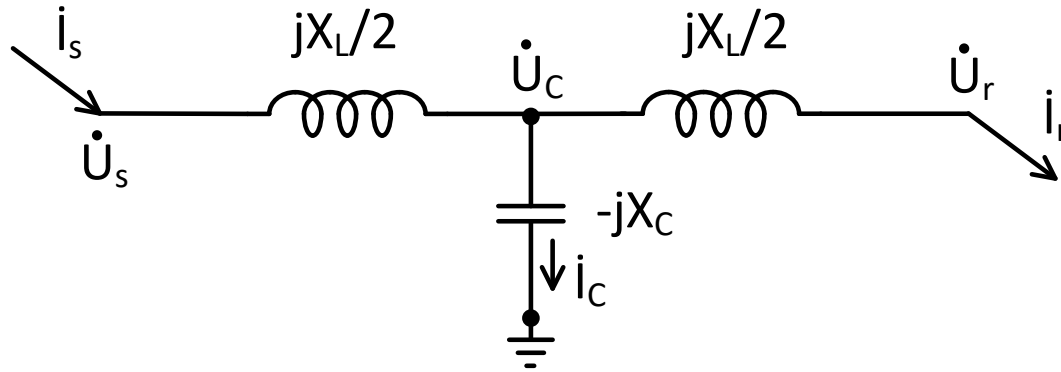
$$\dot{U}_s = 0.955\dot{U}_r \Rightarrow U_r = \frac{300 \text{ kV}}{0.955} = 314.136 \text{ kV}$$

Διάγραμμα τάσεων και ρευμάτων



- Το \dot{I}_s είναι κάθετο στο \dot{U}_r , γιατί $\dot{I}_r = 0 \Rightarrow \dot{U}_r = \dot{U}_C$ και $\dot{I}_s = \dot{I}_C$.
- Θεωρούμε ότι η γραμμή περιλαμβάνει και μια μικρή ωμική αντίσταση R .
- Η γωνία μεταξύ \dot{I}_s και \dot{U}_s είναι φ_s και η γωνία μεταξύ \dot{U}_s και \dot{U}_r είναι θ . Η γωνία μεταξύ \dot{I}_s και \dot{U}_r είναι $\varphi_s + \theta = 90^\circ$.
 - ↳ $\varphi_s = 90^\circ - \theta$ και ο PF στο άκρο s είναι έντονα χωρητικός.
- Μόνο στο μισό κύκλωμα ρέει ρεύμα.
 - ↳ Η πτώση τάσης στη γραμμή είναι $\dot{I}_C(jX_L/2) + \dot{I}_C(R/2)$.
 - ↳ $U_r > U_s$.

Αποτελέσματα φαινομένου Ferranti



Άκρο S:

\dot{U}_s σταθερή

$\dot{I}_s \downarrow$

$\dot{I}_C \uparrow$

$\dot{I}_s = \dot{I}_C$

$\cos \varphi_s$ έντονα χωρητικό

Άκρο R:

$\dot{U}_r \uparrow$

$\dot{I}_r = 0$

$\cos \varphi_r$ δεν υπάρχει

Αποτελέσματα φαινομένου Ferranti

- Για παράδειγμα, σε κανονική λειτουργία:

$$U_S = 300 \text{ kV}$$

$$I_S = 440 \text{ A}/\varphi$$

$$I_r = 480 \text{ A}/\varphi$$

$$U_r = 295 \text{ kV}$$

$$I_C = 20 \text{ A}/\varphi$$

Αφού προκύψει φαινόμενο Ferranti:

$$U_r = 314 \text{ kV}$$

$$I_C = 90 \text{ A}/\varphi$$

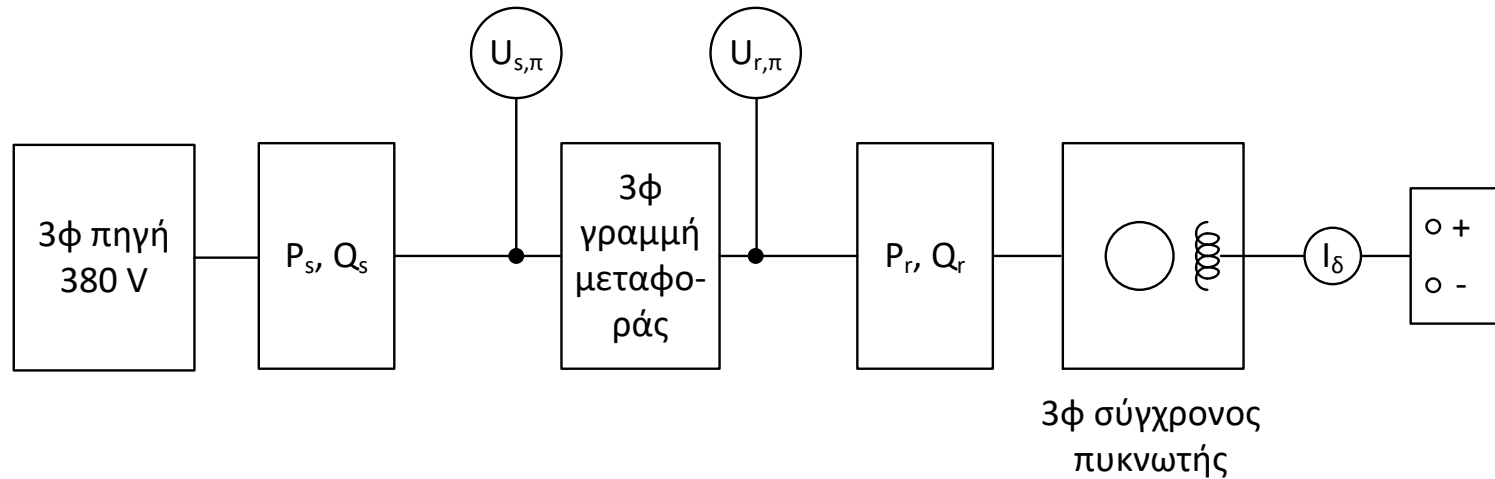
$$I_r = 0$$

- Η αύξηση των U_r , I_C μπορεί να γίνει αιτία καταστροφών σε υποσταθμούς.

Συμπεράσματα

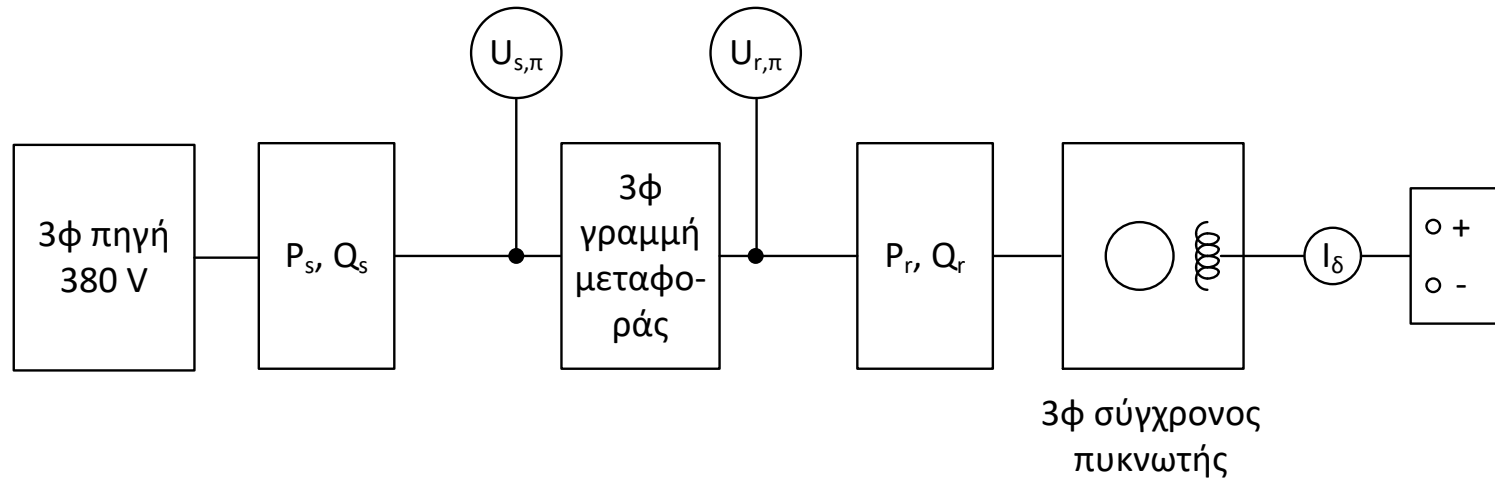
- Αν η γραμμή έχει μικρή φόρτιση, η τάση $U_{r,\pi}$ ανυψώνεται λόγω φαινομένου Ferranti.
 - ➔ Ένας υποδιεγερμένος σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος στο τέλος της έχει επαγωγική συμπεριφορά, επομένως απορροφά άεργο ισχύ και μειώνει την $U_{r,\pi}$.
- Αν η γραμμή έχει μεγάλη φόρτιση, η τάση $U_{r,\pi}$ μειώνεται.
 - ➔ Ένας υπερδιεγερμένος σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος στο τέλος της έχει χωρητική συμπεριφορά, άρα παράγει άεργο ισχύ και αυξάνει την $U_{r,\pi}$.
- Βέβαια, λόγω της χρήσης του σύγχρονου κινητήρα, υπάρχει επιπλέον κατανάλωση ενεργού ισχύος.

Πειραματική διαδικασία



- Συνδέουμε στο τέλος της γραμμής σύγχρονη μηχανή χωρίς φορτίο. Η τάση τροφοδοσίας ρυθμίζεται στα 380 V.
- Μεταβάλλουμε το ρεύμα διέγερσης I_δ σε βήματα και καταγράφουμε τις τιμές των $P_s, Q_s, U_{s,\pi}, P_r, Q_r, U_{r,\pi}$ για γραμμές μεταφοράς 100 km, 200 km και 300 km.
- Να σχεδιαστούν τα διαγράμματα $U_{r,\pi} = f(Q_r)$, από $-Q_r$ έως $+Q_r$, και για τις 3 γραμμές μαζί.

Πειραματική διαδικασία



- Συνδέουμε ωμικό φορτίο στο τέλος της γραμμής παράλληλα στον κινητήρα. Η γραμμή ρυθμίζεται στα 100 km. Η U_s ρυθμίζεται στα 380 V.
- Μεταβάλλουμε το φορτίο κατά ένα βήμα κάθε φορά και ρυθμίζουμε την U_r στα 380 V με τη βοήθεια του σύγχρονου κινητήρα. Καταγράφουμε τις τιμές των $P_s, Q_s, U_{s,\pi}, P_r, Q_r, U_{r,\pi}$.
- Να σχεδιαστεί στην τελευταία περίπτωση το διάγραμμα $P_r = f(Q_r)$.