



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Εργαστήριο Ανάλυσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα: Άσκηση 4: “ Ικανότητα μεταφοράς ισχύος γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ”

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Παναγής Βοβός

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

Περιεχόμενα

2. Καμπύλη ισχύος γραμμών μεταφοράς	3
3. Έλεγχος ροής ισχύος σε παράλληλες γραμμές	5
4. Χρησιμοποιούμενα όργανα.....	6
5. Πειραματικό μέρος.....	6
5.1 Επίδραση των μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης στην ροή ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς.....	6
5.2 Ροή ισχύος σε παράλληλες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	8
6. Ερωτήσεις – Προβλήματα	9
7. Σημειώματα	10
7.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου	10
7.2 Σημείωμα Αναφοράς.....	10
7.3 Σημείωμα Αδειοδότησης.....	10
7.4 Διατήρηση Σημειωμάτων	11
8. Χρηματοδότηση.....	11

1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή μελετάται η εξάρτηση της πραγματικής ισχύος που ρέει σε μια γραμμή μεταφοράς από τη γωνία ισχύος δ (φασική γωνία μεταξύ των τερματικών τάσεων). Αναφέρονται τρόποι αύξησης της μεταφερόμενης ισχύος με τη χρήση μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης καθώς επίσης με τη χρήση παράλληλων γραμμών μεταφοράς.

2. Καμπύλη ισχύος γραμμών μεταφοράς

Για γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους, όπου είναι δυνατό να αμελήσουμε τις πραγματικές απώλειες και την εγκάρσια αγωγιμότητα, η μεταφερόμενη πραγματική ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (4.1)$$

όπου:

P η συνολική μεταφερόμενη πραγματική ισχύς

V_1 η πολική τάση στο άκρο αναχώρησης της γραμμής

V_2 η πολική τάση στο άκρο άφιξης της γραμμής

X η επαγωγική αντίδραση της γραμμής ανά φάση

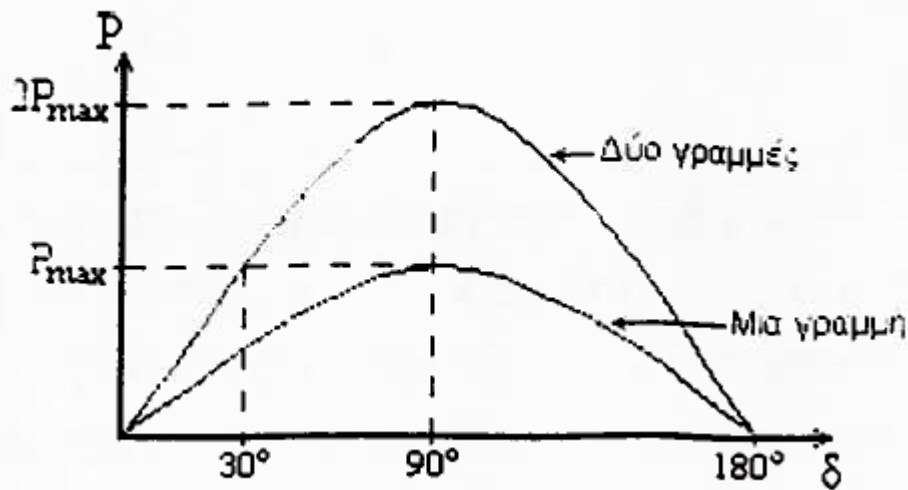
δ η φασική γωνία μεταξύ των τερματικών τάσεων V_1, V_2

Η γωνία $\delta (= \delta_1 - \delta_2)$ λαμβάνεται θετική όταν η τάση $V_1 (=V_1 \angle \delta_1)$ προπορεύεται της $V_2 (=V_2 \angle \delta_2)$. Διαφορετικά λαμβάνεται αρνητική.

Αν οι τερματικές τάσεις V_1, V_2 έχουν σταθερή τιμή, όπως συνήθως συμβαίνει στην πράξη, η μεταφερόμενη ισχύς P εξαρτάται αποκλειστικά από τη φασική γωνία δ . Η γραφική παράσταση της ισχύος P σαν συνάρτηση της γωνίας δ φαίνεται στο **Σχ. 4.1**.

Όταν η “γωνία ισχύος” δ είναι μικρότερη των 90° μια αύξηση της γωνίας δ οδηγεί σε αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος, ενώ για $\delta > 90^\circ$ μια αύξηση της γωνίας δ οδηγεί σε ελάττωση της μεταφερόμενης ισχύος και η γραμμή βρίσκεται σε κατάσταση αστάθειας. Σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας πάντοτε έχουμε $\delta < 90^\circ$ και μόνο σε μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατόν να γίνει $\delta > 90^\circ$. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί λαμβάνεται για $\delta = 90^\circ$, ορίζεται σαν “όριο στατικής ευστάθειας” και είναι:

$$P_{max} = \frac{V_1 V_2}{X} \quad (4.2)$$



Σχήμα 4.1 Καμπύλη ισχύος γραμμών μεταφοράς

Επειδή στις περισσότερες των περιπτώσεων τα μέτρα των τάσεων είναι περίπου ίσα, δηλαδή $V_1 \cong V_2 \cong V$, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι $P_{max} = \frac{V^2}{X}$.

Επειδή η μέγιστη ισχύς P_{max} που μπορεί να μεταφερθεί από γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη του τετραγώνου του μέτρου της τάσης, αύξηση του P_{max} μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας την τάση μεταφοράς. Μεγάλες ποσότητες ισχύος μπορούν να μεταφερθούν οικονομικά σε μεγάλες αποστάσεις υπό υψηλή τάση. Έτσι, αν η τάση της γραμμής διπλασιαστεί, τότε η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί τετραπλασιάζεται. Η υψηλή τάση των γραμμών μεταφοράς επιτυγχάνεται με χρήση μετασχηματιστών στο άκρο αναχώρησης της γραμμής. Μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης στο άκρο άφιξης της γραμμής επαναφέρουν την τάση στα επιθυμητά επίπεδα.

Αν συνδέσουμε μεταξύ δύο ζυγών παράλληλα δύο ίδιες γραμμές, η συνολική επαγωγική αντίδραση των γραμμών υποδιπλασιάζεται και η μέγιστη ισχύς που μπορούν να μεταφέρεται διπλασιάζεται (εξίσωση (4.2) και Σχ. 4.1) με αντίστοιχη αύξηση της αξιοπιστίας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1, η ισχύς P_{max} μπορεί να μεταφέρεται μοιρασμένη εξίσου στις δύο γραμμές με $\delta = 30^\circ$, που είναι ένα ευσταθές σημείο λειτουργίας του διαγράμματος $P = f(\delta)$. Αν παρουσιαστεί βραχυκύκλωμα σε μια από τις γραμμές και αυτή τεθεί εκτός λειτουργίας, η ισχύς της γραμμής αυτής μεταφέρεται στην άλλη γραμμή, αλλά τώρα η γωνία δ γίνεται 90° , που είναι το όριο αποσυγχρονισμού της γραμμής. Αν τα συστήματα προστασίας εκκαθαρίσουν το βραχυκύκλωμα και επανασυνδέσουν την πρώτη γραμμή πριν παρουσιαστούν προβλήματα ευστάθειας, το σύστημα επανέρχεται στη κανονική ευσταθή κατάσταση λειτουργίας.

3. Έλεγχος ροής ισχύος σε παράλληλες γραμμές

Στο Σχ. 4.2 φαίνονται δυο παράλληλες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με εν σειρά σύνθετες αντιστάσεις:

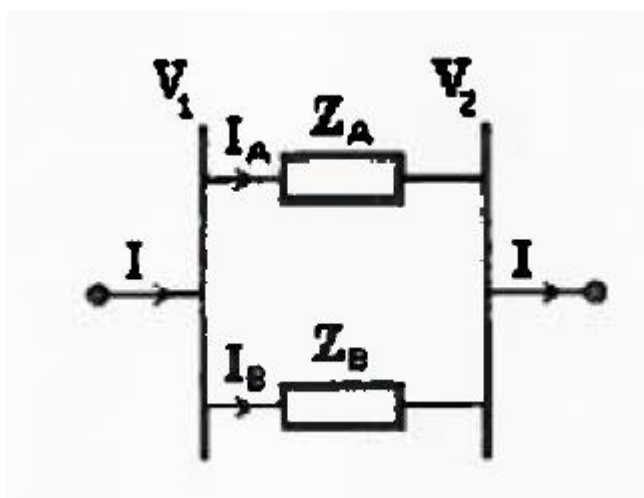
$$Z_A = Z_A \angle \psi_A \quad Z_B = Z_B \angle \psi_B$$

Η κατανομή του ρεύματος φορτίου I στις δυο γραμμές δίνεται από τις σχέσεις:

$$I_A = I \frac{Z_B}{Z_A + Z_B}$$

(4.3)

$$I_B = I \frac{Z_A}{Z_A + Z_B}$$



Σχήμα 4.2

Η κατανομή του ρεύματος φορτίου I στις γραμμές μπορεί να γίνει στο στάδιο σχεδίασης του συστήματος με κατάλληλη εκλογή των Z_A , Z_B ή σε επόμενο στάδιο με προσθήκη σύνθετης αντίστασης στη μια γραμμή.

Έστω τώρα ότι έχουμε γραμμές μικρού μήκους χωρίς απώλειες και χωρίς εγκάρσια αγωγιμότητα. Υποθέτουμε ότι είναι σταθερά τα μεγέθη X_A , X_B , I , V_2 και ότι μπορούμε να μεταβάλλουμε τα μέτρα και τις φάσεις των τάσεων εισόδου των γραμμών V_{1A} , V_{1B} (με τη χρήση μετασχηματιστών ανύψωσης/ υποβιβασμού τάσης και μεταβολής φασικής γωνίας). Από τις σχέσεις που εξήχθησαν στην παράγραφο 2.2.2 της άσκησης 2 και συγκεκριμένα από τις σχέσεις (2.8) και (2.10) έχουμε:

$$P_A = \frac{V_{1A}V_2}{X_A} \sin \delta_A \quad P_B = \frac{V_{1B}V_2}{X_B} \sin \delta_B \quad (4.4)$$

$$Q_{2A} = \frac{V_2^2}{X_A} - \frac{V_{1A}V_2}{X_A} \cos \delta_A \quad Q_{2B} = \frac{V_2^2}{X_B} - \frac{V_{1B}V_2}{X_B} \cos \delta_B \quad (4.5)$$

Σύμφωνα με τις προηγούμενες εξισώσεις:

- α) Αν κρατήσουμε σταθερά τα μέτρα των τάσεων και αυξήσουμε την δ_A τότε για $\delta_A < 90^\circ$ έχουμε σημαντική αύξηση του P_A , οπότε, αν κρατήσουμε σταθερή την συνολική ισχύ $P = P_A + P_B$, θα μετακινηθεί πραγματική ισχύς από τη γραμμή Β στην γραμμή Α. Η κατανομή της αέργου ισχύος μεταξύ των δυο γραμμών επίσης μεταβάλλεται αλλά πολύ λιγότερο.
- β) Αν κρατήσουμε σταθερές τις γωνίες τάσεων και αυξήσουμε το μέτρο της V_{1A} θα έχουμε αύξηση τόσο της P_A όσο και της απόλυτης τιμής της Q_{2A} (η Q_{2A} έχει αρνητική τιμή γιατί άεργος ισχύς φτάνει στο ζυγό 2). Η ανακατανομή της ισχύος ανάμεσα στις δυο γραμμές θα είναι τώρα σημαντική για την άεργο ισχύ και μέτρια για την πραγματική ισχύ.
- γ) Αν αυξήσουμε και το μέτρο και τη φάση της V_{1A} θα έχουμε πιο μεγάλες μεταβολές με αύξηση του P_A και της απόλυτης τιμής της Q_{2A}

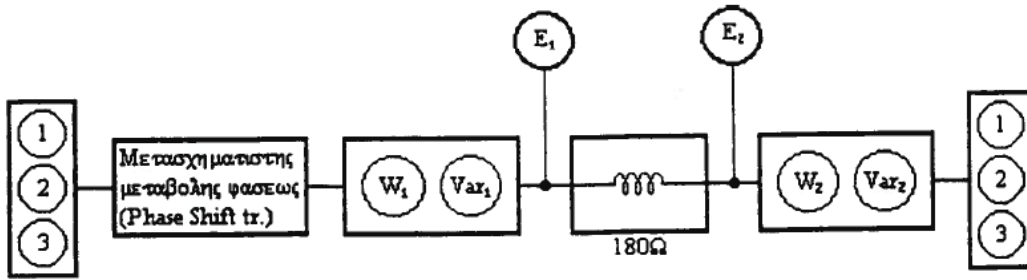
4. Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό ισχύος (120/208 V 3Φ, 0-120/208 V 3Φ)
2. Τριφασικός σύγχρονος κινητήρας/γεννήτρια
3. Τριφασικές γραμμές μεταφοράς
4. Τριφασικοί μετασχηματιστές
5. Τριφασικός μετασχηματιστής ρύθμισης μέτρου και φασικής γωνίας τάσης
6. Όργανα μέτρησης εναλλασσομένων τάσεων
7. Όργανα μέτρησης τριφασικής πραγματικής και αέργου ισχύος (300 W/300 Var)
8. Τροχός αδράνειας
9. Στροφόμετρο

5. Πειραματικό μέρος

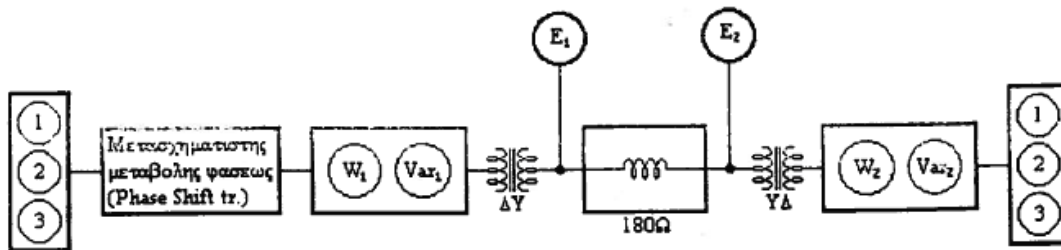
5.1 Επίδραση των μετασχηματιστών ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης στην ροή ισχύος μιας γραμμής μεταφοράς

Π 4.1 Να κατασκευάσετε τη συνδεσμολογία του **Σχ. 4.3** με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής στα 180 Ω και το μετασχηματιστή φάσης στις $+15^\circ$. Μετρήστε τις τάσεις E_1, E_2 και τις ισχείς W_1, W_2, Var_1, Var_2 .



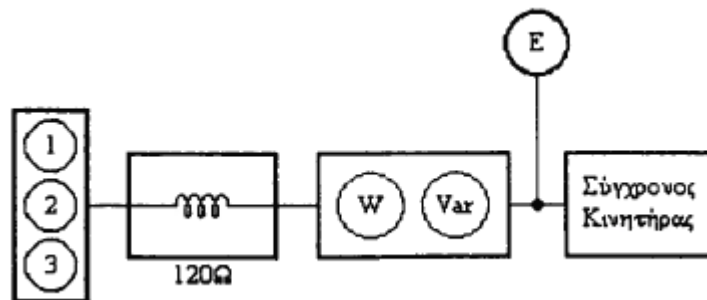
Σχήμα 4.3

Π 4.2 Να κατασκευάσετε τη συνδεσμολογία του Σχ. 4.4 με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής στα 180 Ω και το μετασχηματιστή φάσης στις +15°. Να χρησιμοποιήσετε βολτόμετρα (0-500 V). Μετρήστε τις τάσεις E_1, E_2 και τις ισχύεις W_1, W_2, Var_1, Var_2 . Σχολιάστε και συγκρίνετε τα αποτελέσματα των πειραμάτων Π 4.1 και Π 4.2.



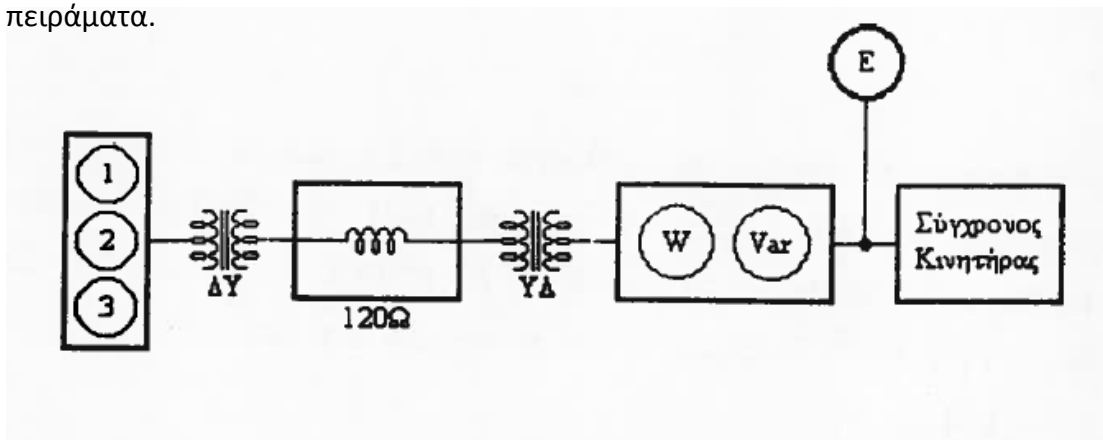
Σχήμα 4.4

Π 4.3 Να συνδέσετε μια γραμμή μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης 180Ω εν σειρά με ένα βατόμετρο-βαρόμετρο, όπως στο Σχ. 4.5. Μετρήστε εν κενώ (ανοικτή γραμμή) τα μεγέθη E, W, Var . Συνδέστε τον κινητήρα στο τέλος της τριφασικής και προσθέστε τον τροχό αδράνειας στο άξονα του κινητήρα. Μετρήστε το χρόνο T_a της περιόδου επιτάχυνσης του κινητήρα και τα E, W, Var στο τέλος της περιόδου επιτάχυνσης.



Σχήμα 4.5

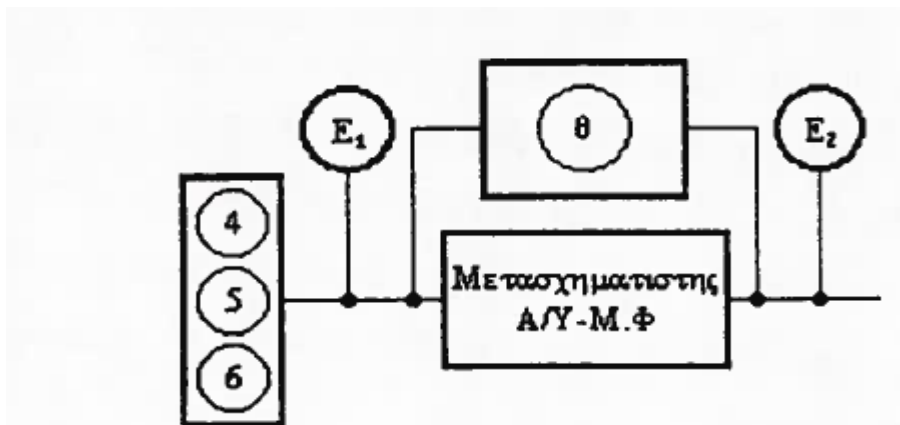
Π 4.4 Να επαναλάβετε το προηγούμενο πείραμα αφού προσθέσετε μετασχηματιστές (ΔΥ) ανύψωσης και (ΥΔ) υποβιβασμού της τάσης στα άκρα της γραμμής (Σχ. 4.6). Εξηγήστε το λόγο διαφοράς των χρόνων επιτάχυνσης στα δύο πειράματα.



Σχήμα 4.6

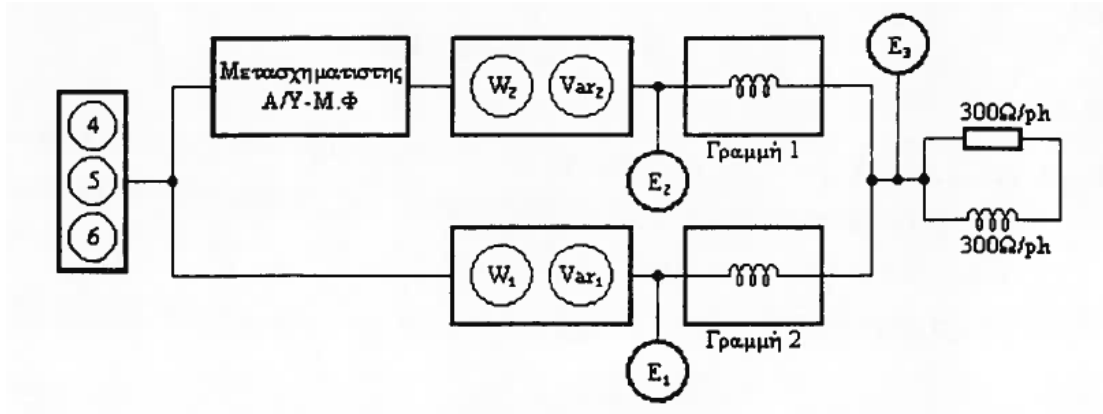
5.2 Ροή ισχύος σε παράλληλες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Π 4.5 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 4.7 και να το τροφοδοτήσετε από το δίκτυο με τάση 200 V. Να μετρήσετε τις τάσεις E_1 , E_2 και τη γωνία θ για όλους τους συνδυασμούς θέσεων του μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (Μ. Μ) και του μετασχηματιστή ρύθμισης φάσης (Μ. Φ).



Σχήμα 4.7

Π 4.6 Κατασκευάστε το κύκλωμα του Σχ. 4.8 και θέστε τις αντιδράσεις των γραμμών μεταφοράς στα 60 Ω. Σημειώστε για $E_1 = 200 \text{ V}$ τις τιμές των E_1 , E_2 , E_3 , W_1 , W_2 , Var_1 , Var_2 , για όλους τους συνδυασμούς θέσεων του μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (Μ. Μ) και του μετασχηματιστή ρύθμισης φάσης (Μ. Φ).



Σχήμα 4.8

Π 4.7 Να επαναλάβετε το πείραμα Π 4.6 με μηδενική αντίδραση στη γραμμή 1.

Π 4.8 Να επαναλάβετε το πείραμα Π 4.6 με αντιδράσεις 180Ω και στις δύο γραμμές. Να περιγράψετε και να σχολιάσετε τα αποτελέσματα των πειραμάτων Π 4.6, Π 4.7 και Π 4.8.

6. Ερωτήσεις – Προβλήματα

1. Ποιό σκοπό εξυπηρετούν οι μετασχηματιστές ανύψωσης/υποβιβασμού της τάσης στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς;
2. Ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη ροή ισχύος σε δύο παράλληλες γραμμές και πως;
3. Για ποιό σκοπό χρησιμοποιούμε τις παράλληλες γραμμές;
4. Ποιά είναι η χρησιμότητα του μετασχηματιστή βηματικής μεταβολής της τάσης;
5. Γιατί χρησιμοποιούμε το μετασχηματιστή βηματικής μεταβολής της φάσης;
6. Πως επιδρούν οι μετασχηματιστές ανύψωσης/υποβιβασμού της τάσης στην εκκίνηση του σύγχρονου κινητήρα;
7. Τριφασική γραμμή μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης $200 \Omega/\text{φάση}$ λειτουργεί υπό τάση 300 kV . Να υπολογιστούν:
 - α) Η μέγιστη συνολική ισχύς που μπορεί να μεταφέρει η γραμμή.
 - β) Η γωνία ισχύος δ όταν η γραμμή μεταφέρει 100 MW .
 - γ) Η ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από τη γραμμή αν η τάση της γραμμής αυξηθεί κατά 20% .

δ) Η αύξηση της πραγματικής ισχύος ΔP που προκαλείται από και αύξηση της γωνίας δ

– από 15° σε 20°

– από 75° σε 80°

Εξηγήστε τα εξαχθέντα αποτελέσματα.

8. Δύο τριφασικές γραμμές μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης $100 \Omega/\text{φάση}$ και $200 \Omega/\text{φάση}$ συνδέονται παράλληλα. Να υπολογιστούν:

α) Η μέγιστη πραγματική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί και από τις δύο γραμμές όταν η τάση είναι 100 kV .

β) Η γωνία ισχύος δ όταν η μεταφερόμενη ισχύς είναι 75 MW .

γ) Η γωνία ισχύος δ αν η γραμμή με επαγωγική αντίδραση 200Ω τεθεί εκτός λειτουργίας. Εξηγήστε τι θα συμβεί αν τεθεί εκτός λειτουργίας η γραμμή με επαγωγική αντίδραση 100Ω .

δ) Η μέγιστη πραγματική ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί αν στην γραμμή των 200Ω και προς την πλευρά του άκρου άφιξης συνδεθεί μετασχηματιστής ρύθμισης φασικής γωνίας τάσης ώστε η πραγματική ισχύς να μοιράζεται εξίσου στις δύο γραμμές. Ποιά η φασική γωνία του μετασχηματιστή σ' αυτή την περίπτωση.

9. Δύο τριφασικές γραμμές μεταφοράς επαγωγικής αντίδρασης $100 \Omega/\text{φάση}$ και $200 \Omega/\text{φάση}$ συνδέονται παράλληλα. Η πολική τάση σε αμφότερα τα άκρα είναι 100 kV . Προς το άκρο άφιξης των γραμμών συνδέονται ένας μετασχηματιστής T_1 ρύθμισης φασικής γωνίας τάσης στη γραμμή των 100Ω και ένας μετασχηματιστής T_2 ρύθμισης μέτρου τάσης στη γραμμή των 200Ω . Αμφότεροι οι μετασχηματιστές ρυθμίζονται έτσι ώστε το ίδιο ποσό πραγματικής και αέργου ισχύος να ρέει σε κάθε γραμμή. Αν στο άκρο άφιξης της γραμμής ζητούνται 50 MW , να υπολογιστούν η φασική γωνία του T_1 και ο λόγος μετασχηματισμού του T_2 .

7. Σημειώματα

7.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **X.YZ**.

7.2 Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος «Εργαστήριο Ανάλυσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Άσκηση 4». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: σύνδεσμο μαθήματος.

7.3 Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση.

Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

7.4 Διατήρηση Σημειωμάτων

- Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

8. Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

