



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα: Άσκηση 5 “Μεταβατική ευστάθεια σύγχρονων μηχανών”

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Παναγής Βοβός

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

Περιεχόμενα

1. Σκοπός	3
2. Μεταβατική ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.....	3
3. Απλό σύστημα δύο μηχανών	3
4. Ορισμοί και επεξήγηση των όρων	5
5. Σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος σε άπειρο ζυγό.....	8
6. Επίδραση των διαταραχών των γραμμών μεταφοράς ισχύος στη λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα	9
7. Χρησιμοποιούμενα όργανα	10
8. Πειραματικό μέρος.....	11
8.1 Ταλάντωση του σύγχρονου κινητήρα	11
8.2 Μεταβατικά φαινόμενα σε συστήματα ισχύος	12
9. Ερωτήσεις.....	13
10. Σημειώματα.....	13
10.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Έργου	13
10.2 Σημείωμα Αναφοράς.....	14
10.3 Σημείωμα Αδειοδότησης.....	14
10.4 Διατήρηση Σημειωμάτων	14
11. Χρηματοδότηση	14

1. Σκοπός

Αντικείμενο αυτής της εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη της ταλάντωσης του δρομέα ενός σύγχρονου κινητήρα μετά από μία διαταραχή και η διερεύνηση της επίδρασης που έχουν στην συχνότητα της ταλάντωσης παράμετροι όπως η αδράνεια του δρομέα και η αντίδραση της μηχανής. Διερευνάται επίσης ο τρόπος με τον οποίον διαταραχές στις γραμμές μεταφοράς επιδρούν στην λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα και εξετάζονται οι διακυμάνσεις που προκαλούνται στην τάση και στη ισχύ.

2. Μεταβατική ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας για αν βρίσκεται σε ευσταθή κατάσταση λειτουργίας πρέπει να εξασφαλίζει συνεχή εξισορρόπηση μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισόδου και του τροφοδοτούμενου ηλεκτρικού φορτίου. Η μεταβατική ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας εξετάζει τις απαραίτητες συνθήκες για την επιτυχή μετάβαση ενός ηλεκτρικού συστήματος από μια μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε μια άλλη, λόγω μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας του. Αυτές οι μεταβολές μπορεί να είναι μικρές και αργές ή μεγάλες και ξαφνικές, όπου με τον όρο αργές εννοούμε τις μεταβολές που η χρονική τους διάρκεια είναι μεγάλη σε σύγκριση με τις χρονικές σταθερές του πεδίου και των συστημάτων ελέγχου της μονάδας ηλεκτροπαραγωγής. Οι ξαφνικές αυτές μεταβολές προκαλούν ανισορροπία μεταξύ των ισχύων εισόδου και εξόδου των ηλεκτρικών μηχανών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών ταλαντώσεων στους δρομείς τους και πιθανό αποσυγχρονισμό των σύγχρονων μηχανών.

Ειδικότερα με την μελέτη της μεταβατικής ευστάθειας υπολογίζουμε την ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να παραμένει σε συγχρονισμό μετά από διαταραχές, που οφείλονται σε απώλειες παραγωγής, σε μεταβολές φορτίων και βραχυκυκλώματα. Αρχικά για τις μελέτες μεταβατικής ευστάθειας χρησιμοποιήθηκε ο “αναλυτής δικτύων” και αργότερα ο ψηφιακός υπολογιστής. Με τον ψηφιακό υπολογιστή η απόκριση του συστήματος στη μεταβατική περίοδο υπολογίζεται με μια συνδυασμένη επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων, που περιγράφουν το δίκτυο και των διαφορικών εξισώσεων, που περιγράφουν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανών.

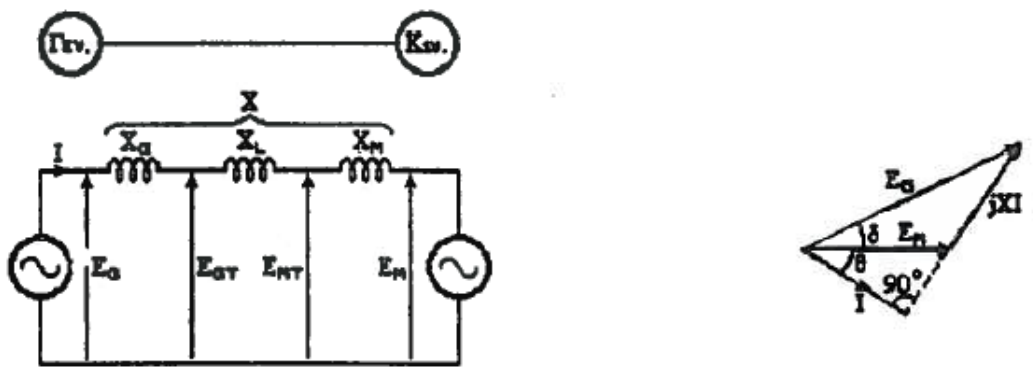
3. Απλό σύστημα δύο μηχανών

Εξετάζουμε το απλό αλλά αντιπροσωπευτικό σύστημα του **Σχ. 5.1**, που αποτελείται από μια γεννήτρια που τροφοδοτεί ισχύ σ' ένα κινητήρα μέσω μιας γραμμής μικρού μήκους.

Το σύστημα αυτό είναι αντιπροσωπευτικό γιατί σε απλοποιημένες μελέτες μπορούμε να παραστήσουμε όλες τις μηχανές μιας περιοχής που εξάγει ηλεκτρική

ενέργεια, με μια ισοδύναμη γεννήτρια και όλες τις μηχανές μιας περιοχής που εισάγει ενέργεια, με ένα ισοδύναμο κινητήρα. Διασυνδεδετικές γραμμές (Tie lines) είναι οι γραμμές που μεταφέρουν την ισχύ από την μια περιοχή στην άλλη.

Για λόγους απλοποίησης θα αμελήσουμε τις ωμικές αντιστάσεις. Κάθε σύγχρονη μηχανή του **Σχ. 5.1(α)**, μπορεί να παρασταθεί προσεγγιστικά από μια πηγή σταθερής τάσης σε σειρά με μια επαγωγική αντίσταση, ενώ η γραμμή παριστάνεται με την επαγωγική αντίσταση X_L .



Σχήμα 5.1 α) Απλό σύστημα δυο μηχανών

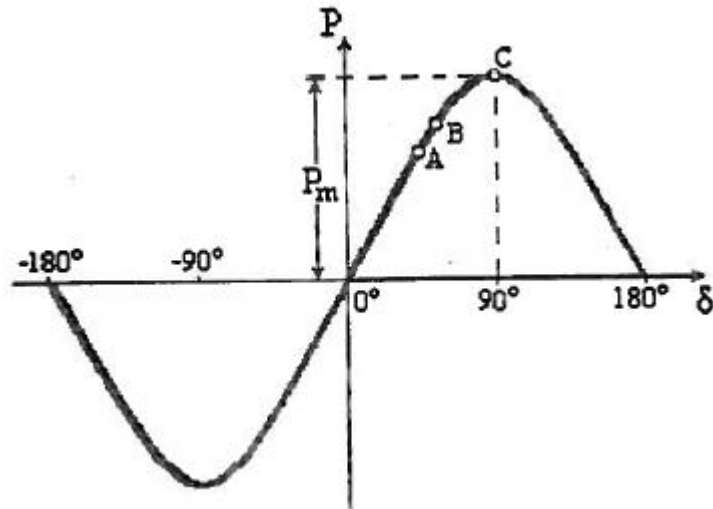
β) Διανυσματικό διάγραμμα

Αν συνδυάσουμε τις αντιδράσεις των μηχανών και της γραμμής σε μια επαγωγική αντίσταση, παίρνουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που αποτελείται από δύο σταθερές πηγές τάσης E_G και E_M , που διασυνδέονται με την επαγωγική αντίσταση $X = X_G + X_L + X_M$. Επειδή οι τάσεις E_G και E_M παράγονται από την ροή που δημιουργείται από τα τυλίγματα πεδίου των μηχανών, η φασική τους διαφορά είναι η ίδια με την ηλεκτρική γωνία μεταξύ των δρομέων των μηχανών. Σύμφωνα με το **Σχ. 5.1**, η ισχύς εξόδου της γεννήτριας, που είναι ίση με την ισχύ εισόδου του κινητήρα, αφού δεν υπάρχει ωμική αντίσταση, δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{E_G E_M}{X} \sin \delta \quad (5.1)$$

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι η ισχύς P , που μεταφέρεται από την γεννήτρια στον κινητήρα, μεταβάλλεται με το ημίτονο της γωνίας μετατόπισης δ μεταξύ των δυο δρομέων, όπως είναι σχεδιασμένη στο **Σχ. 5.2**. Η καμπύλη είναι γνωστή σαν “**καμπύλη ισχύος-γωνίας**”. Η μέγιστη ισχύ που μπορεί να μεταφερθείς τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, με δεδομένη την επαγωγική αντίσταση X και δεδομένες τις εσωτερικές τάσεις E_G και E_M , επιτυγχάνεται με γωνία μετατόπισης $\delta = 90^\circ$ και είναι:

$$P = \frac{E_G E_M}{X} \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.2 Η καμπύλη ισχύος-γωνίας του συστήματος στο Σχ. 5.1

4. Ορισμοί και επεξήγηση των όρων

“Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας” είναι ένας όρος, που χρησιμοποιείται στα εναλλασσομένου ρεύματος συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, για να δηλώσει μια κατάσταση όπου οι σύγχρονες μηχανές του συστήματος βρίσκονται σε συγχρονισμό, δηλαδή στρέφονται με την ίδια μέση ταχύτητα.

Υποθέτουμε ότι το σύστημα του Σχ. 5.1(α) λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση στο σημείο Α του Σχ. 5.2. Η μηχανική είσοδος της γεννήτριας και η μηχανική έξοδος του κινητήρα, αν προστεθούν ή αφαιρεθούν αντίστοιχα οι απώλειες περιστροφής, θα είναι ίσες με την ηλεκτρική ισχύ P . Τώρα υποθέτουμε ότι γίνεται μια μικρή αύξηση στο φορτίο του κινητήρα. Στιγμιαία η γωνιακή θέση του κινητήρα, ως προς την γεννήτρια, μένει αμετάβλητη και άρα η ισχύς εισόδου του κινητήρα δεν μεταβάλλεται ενώ η έξοδος του έχει αυξηθεί. Κατά συνέπεια υπάρχει μια καθαρή ροπή στον κινητήρα που τείνει να τον σταματήσει και η ταχύτητά του μειώνεται προσωρινά. Σαν αποτέλεσμα της ελάττωσης της ταχύτητας του κινητήρα, η γωνία δ αυξάνει, Σχ. 5.1(β), και κατά συνέπεια η ισχύς εξόδου αυξάνει. Η αύξηση αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η είσοδος και η έξοδος του κινητήρα γίνουν πάλι ίσες, οπότε αποκαθίσταται σταθερή λειτουργία στο νέο σημείο Β, που είναι ψηλότερα από το Α στη καμπύλη ισχύος-γωνίας. Στην προηγούμενη ανάλυση δεχθήκαμε ότι η ταχύτητα της γεννήτριας θα παραμείνει σταθερή. Στην πραγματικότητα η ταχύτητα της γεννήτριας θα μειωθεί λίγο έτσι ώστε ο ρυθμιστής ελέγχου της μηχανικής ισχύος εισόδου να λειτουργήσει και να αυξήσει αρκετά την είσοδο της γεννήτριας, για να αντισταθμίσει την αυξημένη έξοδο.

Υποθέτουμε ότι η είσοδος του κινητήρα αυξάνεται βαθμιαία ως το σημείο C της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Αν τώρα συμβεί μια επιπλέον αύξηση φορτίου στον κινητήρα, η γωνία μετατόπισης δ θα αυξηθεί όπως και πριν, αλλά δεν θα αυξηθεί και η είσοδος. Αντίθετα θα υπάρξει μια ελάττωση της εισόδου, που θα έχει σαν αποτέλεσμα μια επιπλέον αύξηση της διαφοράς μεταξύ εισόδου και εξόδου και μεγαλύτερη επιβράδυνση του κινητήρα. Ο κινητήρας θα αποσυγχρονισθεί και πιθανά θα σταματήσει (εκτός αν συνεχίσει να περιστρέφεται σαν κινητήρας επαγωγής λόγω των τυλιγμάτων απόσβεσης που πιθανόν να υπάρχουν). Η P_M είναι το “**όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης**” του συστήματος. Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί. Θα συμβεί αποσυγχρονισμός αν προσπαθήσουμε να μεταφέρουμε περισσότερη ισχύ από αυτό το όριο.

Αν μια μεγάλη αύξηση του φορτίου του κινητήρα συμβεί ξαφνικά, αντί βαθμιαία, ο κινητήρας μπορεί να αποσυγχρονισθεί ακόμη και αν το νέο φορτίο δεν ξεπερνά το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης. Αυτό οφείλεται στο εξής: όταν η μεγάλη αύξηση του φορτίου εφαρμοστεί στον άξονα του κινητήρα, η μηχανική ισχύς εξόδου του κινητήρα ξεπερνά κατά πολύ την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και το έλλειμμα της εισόδου καλύπτεται από την ελάττωση της κινητικής του ενέργειας. Ο κινητήρας ελαττώνει την ταχύτητά του, η γωνία μετατόπισης δ αυξάνει και προκύπτει μια αύξηση της ισχύος εισόδου. Σύμφωνα με την υπόθεση ότι το νέο φορτίο δεν περνά το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης, η δ αυξάνει μέχρι την κατάλληλη τιμή για λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση. Στην κατάσταση αυτή η ισχύς εισόδου του κινητήρα ισούται με την ισχύ εξόδου, οπότε η ροπή επιβράδυνσης μηδενίζεται. Όταν όμως αυτή η τιμή του δ επιτευχθεί, ο κινητήρας περιστρέφεται πολύ αργά. Η στροφορμή του εμποδίζει την ταχύτητά του να πάρει ξαφνικά την ονομαστική της τιμή. Άρα συνεχίζει να κινείται πολύ αργά και η γωνία μετατόπισης αυξάνει πέρα από την κατάλληλη τιμή. Μόλις η γωνία ξεπεράσει αυτή την τιμή, η είσοδος του κινητήρα ξεπερνά την έξοδό του με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας επιταχύνουσας ροπής. Η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνει και πλησιάζει την ονομαστική του ταχύτητα. Πριν όμως φθάσει την ονομαστική του ταχύτητα, μπορεί η γωνία μετατόπισης να έχει αυξηθεί σε τέτοια τιμή, ώστε το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη ισχύος γωνίας, **Σχ. 5.2**, να φτάσει όχι μόνος στο σημείο C, αλλά να πάει τόσο πιο πέρα απ’ αυτό, ώστε η ισχύς εισόδου του κινητήρα να ελαττωθεί σε τιμή μικρότερη από αυτή της εξόδου του. Αν αυτό συμβεί, τότε η συνολική ροπή αλλάζει από επιταχύνουσα σε επιβραδύνουσα πάλι. Η ταχύτητα, που είναι ακόμα μικρότερη από την ονομαστική, μειώνεται πάλι και συνεχίζει να μειώνεται. Ο συγχρονισμός οριστικά χάθηκε και το σύστημα είναι ασταθές.

Αν όμως η ξαφνική αύξηση του φορτίου δεν είναι πολύ μεγάλη, ο κινητήρας θα φτάσει στην ονομαστική του ταχύτητα πριν η γωνία μετατόπισης γίνει πολύ μεγάλη. Τότε η συνολική ροπή είναι ακόμα επιταχύνουσα ροπή και αναγκάζει την ταχύτητα του κινητήρα να συνεχίσει να αυξάνει και άρα να γίνει μεγαλύτερη από την

ονομαστική. Η γωνία μετατόπισης τότε μειώνεται πάλι και πλησιάζει την κατάλληλη τιμή της. Πάλι όμως ξεπερνά αυτή την τιμή λόγω της αδράνειας. Άρα ο δρομέας του κινητήρα ταλαντεύεται γύρω από την νέα γωνιακή θέση μόνιμης κατάστασης. Οι ταλαντώσεις τελικά σταματούν λόγω των ροπών απόσβεσης, που έχουν αμεληθεί σ' αυτή τη στοιχειώδη ανάλυση. Μια αποσβενύμενη ταλαντωτική κίνηση χαρακτηρίζει ένα ευσταθές σύστημα.

Το μέγιστο φορτίο στο οποίο ο κινητήρας μπορεί να εργάζεται πριν από κάποια συγκεκριμένη διαταραχή, ώστε να διατηρεί το συγχρονισμό του και μετά τη διαταραχή, ονομάζεται "**όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης**". Το όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης είναι πάντοτε μικρότερο από το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης, αλλά μπορεί να έχει πολλές διαφορετικές τιμές, που εξαρτώνται από τη φύση και το μέγεθος της διαταραχής. Η διαταραχή μπορεί να είναι στιγμιαία αύξηση φορτίου, όπως έχουμε συζητήσει ή μπορεί να είναι μια ξαφνική αύξηση της αντίδρασης του κυκλώματος, που οφείλεται για παράδειγμα, στην αποσύνδεση μιας ή περισσότερων παράλληλων γραμμών. Ο πιο σοβαρός τύπος διαταραχής που εμφανίζεται σ' ένα σύστημα ισχύος είναι το βραχυκύκλωμα. Γι' αυτό, το αποτέλεσμα των βραχυκυκλωμάτων πρέπει να προσδιορίζεται σχεδόν σε όλες τις μελέτες ευστάθειας.

Ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στον κινητήρα διακόπτει τελείως τη ροή ισχύος μεταξύ των μηχανών. Η έξοδος της γεννήτριας και η είσοδος του κινητήρα μηδενίζονται, γιατί έχουμε αμελήσει τις ωμικές αντιστάσεις. Λόγω της αργής απόκρισης του ρυθμιστή ελέγχου της πραγματικής ισχύος εισόδου της γεννήτριας, η μηχανική ισχύς εισόδου της γεννήτριας παραμένει σταθερή περίπου για 0.5 δευτερόλεπτα. Επίσης, επειδή η ισχύς και η ροπή του φορτίου του κινητήρα είναι συναρτήσεις της ταχύτητας και επειδή η ταχύτητα δεν μπορεί να μεταβληθεί στιγμιαία και αλλάζει βαθμιαία και αργά (τουλάχιστον μέχρι να χάσουμε το συγχρονισμό) η μηχανική ισχύς εξόδου του κινητήρα μπορεί να υποτεθεί σταθερή. Καθώς η ηλεκτρική ισχύς και των δύο μηχανών μειώνεται λόγω του βραχυκυκλώματος, ενώ η μηχανική ισχύς και των δύο παραμένει σταθερή, υπάρχει μια επιταχύνουσα ροπή στην γεννήτρια και μια επιβραδύνουσα ροπή στον κινητήρα. Άρα η γεννήτρια υπερταχύνεται, ενώ ο κινητήρας επιβραδύνεται και είναι προφανές ότι ο συγχρονισμός θα χαθεί εκτός αν το βραχυκύκλωμα εκκαθαρισθεί γρήγορα, έτσι ώστε η ισχύς συγχρονισμού να αποκατασταθεί μεταξύ των μηχανών πριν οι γωνίες και οι ταχύτητες τους διαφοροποιηθούν πολύ μεταξύ τους. Αν το βραχυκύκλωμα είναι σε μια από τις δυο παράλληλες γραμμές και δεν είναι σε κανένα από τα άκρα τους, τότε ένα ποσό της ισχύος συγχρονισμού μπορεί να μεταφέρεται και κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, αλλά το εύρος της καμπύλης γωνίας-ισχύος μειώνεται συγκριτικά μ' εκείνο πριν το βραχυκύκλωμα. Σε μερικές περιπτώσεις το σύστημα θα είναι ευσταθές ακόμα και με ένα βραχυκύκλωμα που παραμένει, ενώ σε άλλες περιπτώσεις το σύστημα θα είναι

ευσταθές μόνο αν το βραχυκύκλωμα εκκαθαρισθεί αρκετά γρήγορα. Κατά πόσο το σύστημα είναι ευσταθές ή όχι μετά από ένα βραχυκύκλωμα εξαρτάται όχι μόνο από το ίδιο το σύστημα, αλλά επίσης και το είδος βραχυκυκλώματος, τη θέση του βραχυκυκλώματος, την ταχύτητα και τη μέθοδο εκκαθάρισης, δηλαδή, αν το βραχυκύκλωμα εκκαθαρισθεί με ακολουθιακό ή ταυτόχρονο άνοιγμα δύο ή περισσότερων διακοπών και αν η γραμμή που συνδέει το βραχυκύκλωμα θα επαναλειτουργήσει ή όχι.

Για οποιαδήποτε όμως συγκεκριμένη διαδικασία διαταραχής το αν το σύστημα είναι ευσταθές ή όχι, εξαρτάται από το ποσόν της ισχύος που αυτό μετέφερε πριν συμβεί το βραχυκύκλωμα. Άρα, για κάθε συγκεκριμένη διαταραχή και συγκεκριμένο τρόπο αντιμετώπισής της, υπάρχει μια τιμή μεταφερόμενης ισχύος, που λέγεται **“όριο ευστάθειας μεταβατικής κατάστασης”** κάτω από την οποία, όταν εργάζεται προσφαλματικά το σύστημα, είναι ευσταθές και πάνω από την οποία είναι ασταθές.

Σ' ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα όλες οι σύγχρονες μηχανές πρέπει να βρίσκονται σε συγχρονισμό, δηλαδή να στρέφονται με την ίδια μέση ταχύτητα. Τα αυτόματα συστήματα ελέγχου φορτίου και συχνότητας προσπαθούν να διατηρήσουν τις στροφές των μηχανών περίπου ίσες με τις ονομαστικές και άρα τις διαφορές των ταχυτήτων του μέσα σε στενά όρια, αλλά η αιτία που εξαναγκάζει τις μέσες διαταραχές ταχυτήτων να είναι μηδέν είναι η μεταβαλλόμενη ροή ισχύος στις διασυνδεδετικές γραμμές. Όταν μια γεννήτρια στρέφεται ταχύτερα από μια άλλη, η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του δρομέα της με τον άξονα του δρομέα της βραδύτερης γεννήτριας αυξάνει, όσο υπάρχει η διαφορά ταχυτήτων. Η φασική αυτή διαφορά εμφανίζεται και τις τάσεις των γεννητριών με αποτέλεσμα μια μεταφορά φορτίου από τη βραδύτερη γεννήτρια στην ταχύτερη, γεγονός που τείνει να ελαττώσει τη διαφορά στην ταχύτητα και τελικά να την μηδενίσει.

Η μεταφορά φορτίου μεταξύ γεννητριών συνεχίζεται μέχρι μια γωνιακή διαφορά 90° . Για γωνίες μεγαλύτερες των 90° η μεταφορά φορτίου αντιστρέφεται και αντί να έχουμε ελάττωση της διαφοράς τις ταχύτητες έχουμε αύξηση και ουσιαστικά οδηγούμαστε στον αποσυγχρονισμό. Αποσυγχρονισμός μπορεί να συμβεί μεταξύ μιας μηχανής και του υπόλοιπου συστήματος ή μεταξύ ομάδων μηχανών, όπου οι μηχανές που ανήκουν στην ίδια ομάδα είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους. Όταν μια μηχανή αποσυγχρονισθεί, έχουμε μεγάλες μεταβολές στα ρεύματα και τις τάσεις, οπότε λειτουργεί το σύστημα προστασίας και αποσυνδέει τη μηχανή.

5. Σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος σε άπειρο ζυγό

Εκτός από την ξαφνική μεταβολή του φορτίου σύγχρονου κινητήρα, παρόμοιες ταλαντώσεις θα παρατηρήσουμε αν έχουμε μια στιγμιαία διακοπή της τροφοδοσίας

του. Ο κινητήρας θα αντιδράσει ακριβώς σαν να φορτίστηκε στιγμιαία με πολύ μεγαλύτερο φορτίο, χωρίς τη στιγμή εκείνη να έχει την απαραίτητη ισχύ γι' αυτό. Σαν αποτέλεσμα ο δρομέας θα καθυστερήσει κατά μια αντίστοιχη γωνία, η οποία δεν θα αντιστοιχεί στο φορτίο του όταν επανέλθει η τροφοδοσία (αν δεν επανέλθει θα αποσυγχρονισθεί και θα σταματήσει) και έτσι θα εκτελέσει πάλι ταλάντωση. Εκτός της στιγμιαίας διακοπής θα έχουμε ταλάντωση και στις περιπτώσεις ξαφνικών ισχυρών πτώσεων της τάσης τροφοδοσίας.

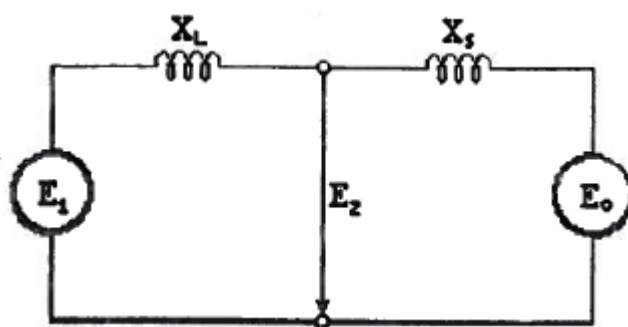
Η συχνότητα της ταλάντωσης, που προκαλείται από τη ξαφνική μεταβολή τόσο της εισόδου όσο και της εξόδου, προκύπτει από την προσεγγιστική λύση της διαφορικής εξίσωσης της μηχανής (εξίσωση ροπών) για μικρές ταλαντώσεις.

Η συχνότητα αυτή εξαρτάται κυρίως από την αδράνεια της μηχανής, την ταχύτητα περιστροφής της (δηλ. τον αριθμό των ζευγών πόλων και τη συχνότητα) και τη μέγιστη ισχύ της μηχανής. Όσο μεγαλύτερη είναι η αδράνεια της μηχανής τόσο μικρότερη είναι η συχνότητα ταλάντωσης, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει με τη μέγιστη ισχύ.

Αν μεταξύ του άπειρου ζυγού και του κινητήρα συνδέσουμε μια γραμμή μεταφοράς, όπως στο Σχ. 5.3, τότε η μέγιστη ισχύς που απορροφά ο κινητήρας είναι:

$$P_m = \frac{E_0 E_1}{X_L + X_s} \quad (5.3)$$

Λόγω της X_L η μέγιστη ισχύς P_m είναι μικρότερη από την ισχύ που θα απορροφούσε ο κινητήρας αν ήταν άμεσα συνδεδεμένος στην E_1 .



Σχήμα 5.3 Σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος σε άπειρο ζυγό μέσω γραμμής

6. Επίδραση των διαταραχών των γραμμών μεταφοράς ισχύος στη λειτουργία του σύγχρονου κινητήρα

Τα διάφορα σφάλματα που μπορούν να παρουσιαστούν στις γραμμές μεταφοράς είναι:

- a) Βραχυκυκλώματα
- b) Ανοικτοκυκλώματα

c) Υπερτάσεις διακοπών

Τέτοιες διαταραχές μπορούν να προκληθούν από πολλούς και διάφορους παράγοντες και έχουν συνήθως μικρή χρονική διάρκεια. Για παράδειγμα ένα τυχαίο βραχυκύκλωμα απαιτεί άμεσο άνοιγμα διακοπών του συστήματος, που συνήθως ξανακλείνουν αμέσως, με την παραδοχή ότι το βραχυκύκλωμα έχει εκκαθαρισθεί. Ένα τέτοιο γρήγορο άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη θα παράγει μια τοπική ηλεκτρική διαταραχή, που γίνεται αντιληπτή από τις διακυμάνσεις της τάσης και της ισχύος, αλλά δεν θα έχει σαν αποτέλεσμα απώλεια συγχρονισμού των σύγχρονων κινητήρων, που είναι ένα κομμάτι του συνολικού φορτίου του συστήματος. Με άλλα λόγια το σύστημα θα εξακολουθήσει να λειτουργεί γιατί δεν έχει ξεπεραστεί το όριο της ευστάθειάς του.

Το άνοιγμα και το κλείσιμο ορισμένων διακοπών του κυκλώματος σύμφωνα με ένα καθορισμένο πρόγραμμα θα δημιουργήσει επίσης παροδικές διαταραχές σ' ένα μεγάλο διασυνδεδεμένο σύστημα. Μια τέτοια περίπτωση είναι το άνοιγμα και κλείσιμο μιας από τις δυο παράλληλες γραμμές.

Οι σύγχρονοι κινητήρες αποτελούν συνήθως ένα σημαντικό κομμάτι του φορτίου του συστήματος και έχει ιδιαίτερη σημασία η διατήρηση ευστάθειάς τους. Για το λόγο αυτό, όταν οι πόλοι ενός κινητήρα πλησιάζουν τις 90° στην καμπύλη $P = f(\delta)$, υπάρχει άμεσος κίνδυνος να αποσυγχρονισθεί και να προκαλέσει πτώση του συστήματος, τουλάχιστον κοντά στο σημείο της διαταραχής. Έτσι είναι αναγκαίο να ανοίξουν άλλοι διακόπτες, που θα απομονώσουν την διαταραχή για να εμποδίσουν την πλήρη κατάρρευση του συστήματος.

Οι διακόπτες παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος και γ' αυτό το λόγο πρέπει να είναι ιδιαίτερα αξιόπιστοι.

Η αδράνεια των σύγχρονων μηχανών βοηθά επίσης στη διατήρηση ενός συστήματος σε συγχρονισμό και σε μερικές περιπτώσεις η αδράνεια της μηχανής αυξάνεται πέρα από τα όρια του σχεδιασμού της με μόνο λόγο την αύξηση της ευστάθειας.

7. Χρησιμοποιούμενα όργανα

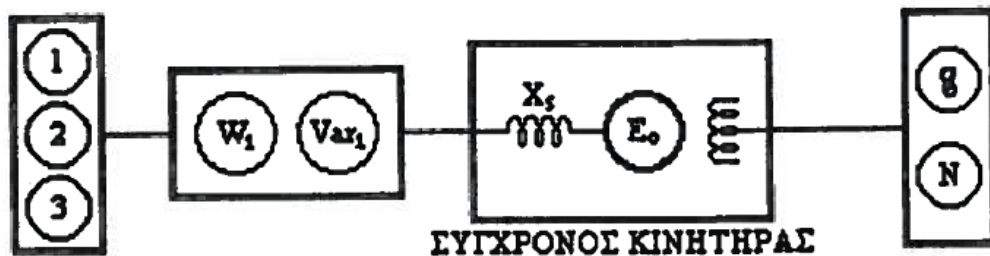
1. Τροφοδοτικά ισχύος
2. Σύγχρονος τριφασικός κινητήρας/γεννήτρια
3. Μηχανή συνεχούς ρεύματος
4. Τριφασική γραμμή μεταφοράς
5. Όργανα μέτρησης τριφασικής πραγματικής και αέργου ισχύος
6. Όργανο μέτρησης εναλλασσομένων τάσεων και ρευμάτων

7. Όργανο μέτρησης συνεχών ρευμάτων
8. Ιμάντας μετάδοσης κίνησης
9. Τροχός αδράνειας

8. Πειραματικό μέρος

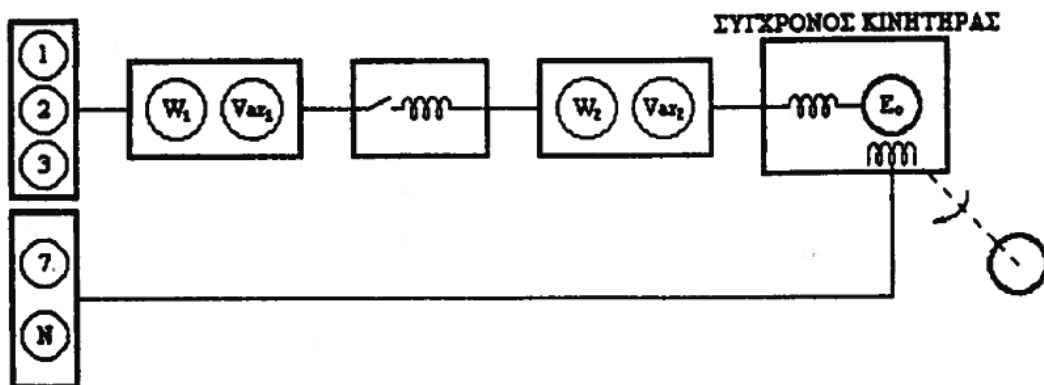
8.1 Ταλάντωση του σύγχρονου κινητήρα

Π5.1 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 5.4. Ρυθμίστε τη διέγερση του κινητήρα ώστε η άεργος ισχύς που απορροφά να μηδενιστεί. Διακόψτε την τροφοδοσία στιγμιαία και παρατηρήστε την ταλάντωση του δρομέα.



Σχήμα5.4

Π5.2 Επαναλάβετε το πείραμα Π5.1 αφού προσθέσετε τροχό αδράνειας στον κινητήρα. Ποια είναι η επίδρασή του συχνότητα ταλάντωσης του δρομέα; Συγκρίνετέ την με εκείνη του προηγούμενου πειράματος.



Σχήμα 5.5

Π5.3 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του Σχ. 5.5 (η γραμμή στα 120 Ω). για την εκκίνηση του κινητήρα, αρχικά μηδενίστε την αντίδραση της γραμμής,

Αφού μηδενίσετε την άεργο ισχύ που απορροφά ο κινητήρας διακόψτε στιγμιαία την τροφοδοσία ισχύος στο στάτη του κινητήρα και παρατηρήστε τη συχνότητα και

το εύρος της ταλάντωσης. Σ' αυτή την άσκηση είναι δυνατό να διατηρηθεί ο συγχρονισμός με γρήγορο κλείσιμο του διακόπτη τροφοδοσίας ισχύος;

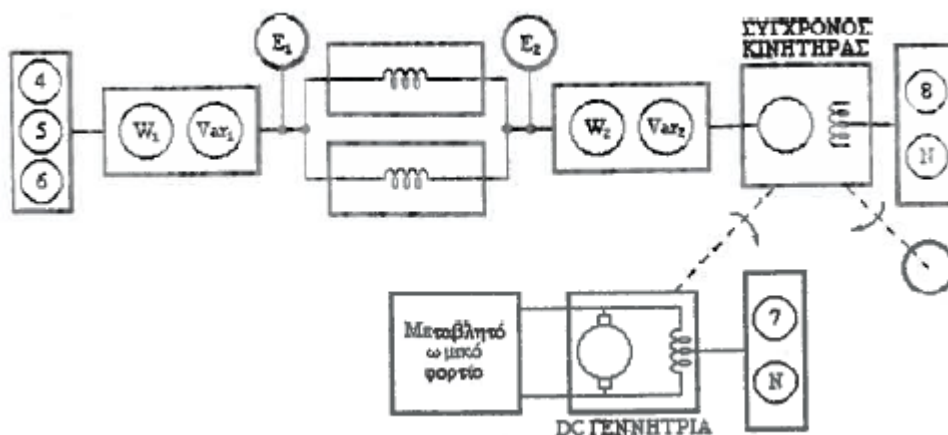
Π5.4 Να επαναλάβετε το πείραμα **Π5.3** χωρίς τροχό αδράνειας. Τι συμβαίνει στην ταχύτητα ταλάντωσης; Μπορεί τώρα να διατηρηθεί ο συγχρονισμός με γρήγορο κλείσιμο του διακόπτη;

Συγκρίνετε και σχολιάστε τις προηγούμενες περιπτώσεις.

8.2 Μεταβατικά φαινόμενα σε συστήματα ισχύος

Π5.5 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του **Σχ. 5.6**. Αρχικά για να εκκινήσετε τον κινητήρα μηδενίστε τις αντιδράσεις των δύο γραμμών και όταν αυτός αποκτήσει την κανονική του ταχύτητα τότε να τις τοποθετήσετε στα 120 Ω. Ρυθμίστε τη διέγερση του σύγχρονου κινητήρα έτσι ώστε $E_2 = E_1 = 220 V$.

Τοποθετείστε στη γεννήτρια σταθερή διέγερση 120 V και φορτίστε την με ωμικό φορτίο έτσι ώστε $W_2 = 150 W$. Μεταβάλλετε ξαφνικά το φορτίο των 300 Ω διακόπτοντας το στιγμιαία και παρατηρήστε τις διακυμάνσεις της τάσης και της ισχύος όπως και της γωνίας φορτίου με το στροβοσκόπιο.



Σχήμα 5.6

Π5.6 Εφόσον το σύστημα λειτουργεί ευσταθώς με $E_2 = E_1 = 220 V$ και $W_2 = 150 W$ ανοίξτε μια από τις παράλληλες γραμμές και παρατηρήστε τις διακυμάνσεις της τάσης και της ισχύος. Αποσυγχρονίζεται το σύστημα στην περίπτωση αυτή;

Κλείστε πάλι τη γραμμή που ανοίξατε και παρατηρήστε τις διακυμάνσεις της τάσης και της ισχύος. Συγκρίνετε τις δύο συχνότητες ταλάντωσης.

Π5.7 Να επαναλάβετε το πείραμα **Π5.6** αλλά να ρυθμίσετε το φορτίο της γεννήτριας ώστε $W_2 = 200 W$. Το σύστημα θα αποσυγχρονισθεί όταν ανοίξετε μια γραμμή; Γιατί; Εκκινήστε πάλι το σύστημα και ανοίξτε στιγμιαία το διακόπτη της μιας γραμμής. Πόσο χρόνο μπορεί να παραμείνει η γραμμή ανοικτή χωρίς το σύστημα να αποσυγχρονισθεί;

Π5.8 Ρυθμίστε το σύστημα ώστε $E_2 = E_1 = 200 V$ και $W_2 = 100 W$. Στιγμιαία βραχυκυκλώστε δύο από τις τρεις φάσεις που τροφοδοτούν τον σύγχρονο κινητήρα, μετά τη γραμμή. Παρατηρήστε τι συμβαίνει και καταγράψτε τα αποτελέσματά σας. Πόσο χρόνο μπορεί να παραμείνει αυτό το βραχυκύκλωμα χωρίς το σύστημα να αποσυγχρονισθεί;

9. Ερωτήσεις

1. Η τάση, σε μια μεγάλη πόλη, αυξάνει και μειώνεται περιοδικά μετά από μια στιγμιαία διακοπή της τροφοδοσίας. Γιατί;
2. Ένας μεγάλος σύγχρονος κινητήρας συνδεδεμένος στο τέλος μιας μεγάλης γραμμής μεταφοράς θα ταλαντεύεται λιγότερο ή περισσότερο απ' ό,τι αν συνδεόταν σ' ένα άπειρο ζυγό;
3. Ο διακόπτης ενός μεγάλου εναλλακτήρα που αποδίδει ισχύ σ' ένα σύστημα ανοίγει ξαφνικά και σε κλάσμα δευτερολέπτου ξανακλείνει. Εξηγήστε τι συμβαίνει το χρονικό διάστημα που ο διακόπτης είναι ανοικτός εξετάζοντας:
α) Την ταχύτητα περιστροφής του εναλλακτήρα β) τη διαφορά φάσης μεταξύ της τερματικής γωνίας του εναλλακτήρα και της τάσης του συστήματος.
4. Εάν ο διακόπτης που αναφέρεται στην ερώτηση 3 ήταν ανοικτός για 1 δευτερόλεπτο, θα ήταν αδύνατο να ξανακλείσει χωρίς να δημιουργήσει μια σοβαρή υπερφόρτιση στον εναλλακτήρα και μια αντίστοιχη σοβαρή διαταραχή στο σύστημα; Εξηγήστε γιατί.

10. Σημειώματα

10.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου

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

10.2 Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος «Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Άσκηση 5». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: σύνδεσμο μαθήματος.

10.3 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.

10.4 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.

11. 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.

