



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ανάλυση Σ.Η.Ε

Ενότητα 5: Κυματικά φαινόμενα και ανάλυση συμμετρικών βραχυκυκλωμάτων

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος
Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και τεχνολογίας Υπολογιστών



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.



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.



Άδειες χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης creative commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκεινται σε άλλου τύπου άδειες χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Εισαγωγή

- Οι αιτίες που προκαλούν σημαντικές διαταραχές στα ηλεκτρικά συστήματα είναι οι πτώσεις κεραυνών, οι διακοπτικές λειτουργίες και τα βραχυκυκλώματα (συμμετρικά και ασύμμετρα).
- Τις διαταραχές αυτές ανάλογα με τη διάρκειά τους μπορούμε να τις χωρίσουμε σε τρεις κατηγορίες.



Υπερταχέα μεταβατικά - κυματικά φαινόμενα(1)

- Αυτός ο τύπος μεταβατικών φαινομένων προκαλείται από πτώση κεραυνών στις γραμμές μεταφοράς και από απότομες αλλά προγραμματισμένες μεταβολές δικτύου, που οφείλονται σε διακοπτικές λειτουργίες.
- Η φύση αυτών των διαταραχών είναι τελείως ηλεκτρική και περιλαμβάνουν ουσιαστικά μόνο τις γραμμές μεταφοράς.
- Η διαταραχή αυτού του τύπου προκαλεί ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται περίπου με την ταχύτητα του φωτός κατά μήκος των γραμμών και προκαλεί ανακλώμενα κύματα και υπερτάσεις στο τέλος των γραμμών.
- Η πλειοψηφία των ρευμάτων κεραυνών έχει τιμές μεταξύ 5 και 100 kA και διάρκεια από 20 μ s για τα μεγάλα ρεύματα, σε μερικά ms, για τα μικρά ρεύματα.



Υπερταχέα μεταβατικά - κυματικά φαινόμενα(2)

- Στην περίπτωση μιας γραμμής 144 Km, ένα κύμα διαταραχής που ταξιδεύει με 288.000 Km/s χρειάζεται μόνο ένα χιλιοστό του δευτερολέπτου για να φτάσει στο τέλος της γραμμής και να επιστρέψει. Για αυτό τα φαινόμενα που συνδέονται με αυτά τα κύματα διαρκούν μόνο λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου.
- Η μεγάλη επαγωγική αντίσταση των μετασχηματιστών λειτουργεί σαν ανοικτοκύκλωμα γι' αυτές τις διαταραχές και τις εμποδίζει να φτάσουν τα τυλίγματα των γεννητριών.
- Η ανάκλαση όμως των κυμάτων στην αντίσταση των μετασχηματιστών δημιουργεί μεγάλη κυματική τάση, που μπορεί να καταστρέψει τη μόνωση των συσκευών υψηλής τάσης.
- Τα κύματα αυτά είναι ηλεκτρικά φορτία που ταξιδεύουν και μπορούμε να τα διοχετεύσουμε στη γη με **εκτροπείς κυμάτων ή αλεξικέραυνα**, που δρουν σαν βαλβίδες ασφαλείας και δεν επιτρέπουν τη δημιουργία υψηλών κυματικών τάσεων ικανών να καταστρέψουν τη μόνωση των συσκευών.
- Αν όμως, παρ' όλα τα προφυλακτικά μέτρα έχουμε διάσπαση της μόνωσης σε κάποιο σημείο, έχουμε την εμφάνιση βραχυκυκλώματος, που ανήκει στον επόμενο τύπο διαταραχών.



Μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα– βραχυκυκλώματα(1)

- Σε αυτή την κατηγορία μεταβατικών φαινομένων ανήκουν οι διαταραχές που οφείλονται στις απότομες, ανώμαλες δομικές αλλαγές –βραχυκυκλώματα– στο σύστημα.
- Το άνοιγμα των διακοπών ισχύος απομονώνει το βραχυκυκλωμένο μέρος της γραμμής μεταφοράς από το υπόλοιπο σύστημα και διακόπτει τη ροή του ρεύματος στον ιονισμένο δρόμο, ώστε αυτός να απιονισθεί.
- Μετά από ένα χρονικό διάστημα περίπου 400 ms, ο απιονισμός ολοκληρώνεται και οι διακόπτες ισχύος ξανακλείνουν χωρίς αποκατάσταση του τόξου. Η εμπειρία αποδεικνύει ότι περίπου 70 με 80% των βραχυκυκλωμάτων γραμμών είναι παροδικού τύπου, της φύσης που μόλις περιγράφει.



Μέσης ταχύτητας μεταβατικά φαινόμενα– βραχυκυκλώματα(2)

- Η φύση των βραχυκυκλωμάτων είναι τελείως ηλεκτρική και η μορφή τους καθορίζεται από τη μαγνητική αλληλεπίδραση των τυλιγμάτων των γεννητριών. Οι χρονικές σταθερές αυτών των τυλιγμάτων κυμαίνονται από μερικές δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου για τα τυλίγματα **απόσβεσης** μέχρι μερικά δευτερόλεπτα για τα τυλίγματα **πεδίου**. Γι' αυτό, αυτές οι διαταραχές μελετώνται για ένα διάστημα μέχρι 100 ms μετά την έναρξη του βραχυκυκλώματος.
- Ένα βραχυκύκλωμα πάντα συνοδεύεται από ελάττωση της ισχύος στην έξοδο των γεννητριών και επειδή η ισχύς εισόδου παραμένει σταθερή (πριν λειτουργήσει το σύστημα ελέγχου του στροβίλου) η γεννήτρια επιταχύνεται.
- Αν το φαινόμενο αυτό διατηρηθεί, θα οδηγήσει σε μηχανικές ταλαντώσεις, που θα συζητηθούν στην επόμενη παράγραφο.
- Τα ρεύματα που ρέουν στα διάφορα μέρη ενός ηλεκτρικού δικτύου αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα διαφέρουν πολύ από τα ρεύματα που ρέουν λίγους κύκλους αργότερα, δηλαδή λίγο πριν λειτουργήσουν οι διακόπτες ισχύος για να απομονώσουν τη βραχυκυκλωμένη γραμμή.



Βραδέα μεταβατικά φαινόμενα – Μεταβατικά ευστάθεια

- Αν το βραχυκύκλωμα είναι σε μια ζωτικής σημασίας γραμμή, οδηγούμαστε στην πιο σοβαρή διαταραχή μεταβατικής κατάστασης, όπου το ηλεκτρικό σύστημα υποβάλλεται σε μηχανικές ταλαντώσεις των δρομέων των σύγχρονων μηχανών.
- Αυτές οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε αποσυγχρονισμό μερικών ή όλων των μηχανών.
- Τέτοια περιστατικά οδηγούν σε μερική ή ολική διακοπή της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος και λέμε ότι το σύστημα έφτασε στο όριο μεταβατικής ευστάθειας.
- Η φύση των ταλαντώσεων των δρομέων είναι μηχανική. Κατά συνέπεια η περίοδος ταλάντωσής τους είναι αρκετά μεγάλη και εξαρτάται από τον τρόπο ταλάντωσης. Για το λόγο αυτό μια μελέτη μεταβατικής ευστάθειας μπορεί να γίνεται για μια χρονική περίοδο 1-10 s.



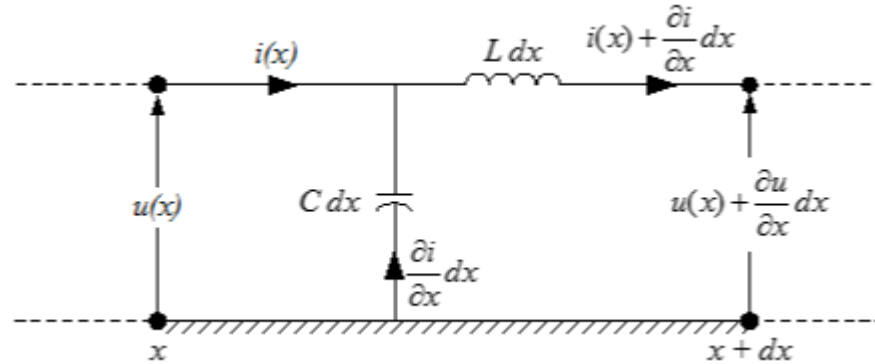
Διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς(1)

- Θα δώσουμε μια σύντομη ερμηνεία αυτών των φαινομένων με σκοπό την κατανόηση της φύσης τους. Το μαθηματικό μας μοντέλο θα στηρίζεται στις παρακάτω απλοποιήσεις:
- **1.** Η ωμική αντίσταση των γραμμών αμελείται. Αυτή είναι μια λογική υπόθεση και μας δίνει αποτελέσματα που είναι προς την ασφαλή πλευρά (Γιατί;).
- **2.** Χρησιμοποιείται το μονοφασικό μοντέλο. Αυτή η υπόθεση συχνά οδηγεί σε σημαντικά λάθη, αλλά δίνει καλά αποτελέσματα για συστήματα με γειωμένο ουδέτερο.





Διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς(2)



- Διαφορικό στοιχείο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους.

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} dx = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} dx$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} dx = -C \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} dx$$

Με διαφόριση της πρώτης εξίσωσης ως προς x και της δεύτερης ως προς t και συνδυάζοντας τα δύο αποτελέσματα έχουμε:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}, \text{ όπου } v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Η παράμετρος v έχει διαστάσεις m/sec, δηλαδή ταχύτητας και ονομάζεται ταχύτητα του κύματος.

Διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς(3)

- Η προηγούμενη εξίσωση είναι η γνωστή κυματική εξίσωση για γραμμή χωρίς απώλειες. Με αντικατάσταση μπορούμε να αποδείξουμε ότι δέχεται τη γενική λύση:

$$u(x, t) = u_1(x - vt) + u_2(x + vt)$$

όπου u_1, u_2 αυθαίρετες συναρτήσεις των $x - vt$ και $x + vt$ αντίστοιχα.

- Η μορφή της λύσης, που παριστά το ρεύμα, υπολογίζεται με αντικατάσταση, οπότε παίρνουμε:

$$\frac{\partial u_1(x-vt)}{\partial(x-vt)} + \frac{\partial u_2(x+vt)}{\partial(x+vt)} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$

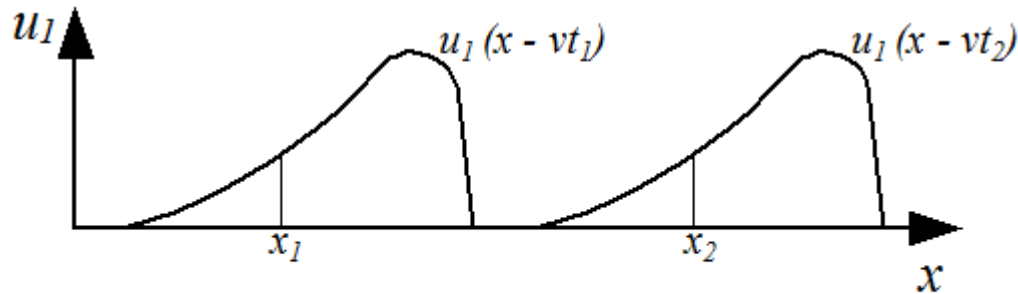
- Ολοκληρώνουμε αυτήν την εξίσωση ως προς t και παίρνουμε τελικά τη λύση:

$$i(x, t) = \frac{1}{R_w} u_1(x - vt) - \frac{1}{R_w} u_2(x + vt) = i_1(x - vt) + i_2(x + vt)$$

Όπου $R_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$ η κυματική ή χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής



Διάδοση κυμάτων στις γραμμές μεταφοράς(4)



Παράσταση της συνάρτησης u_1 .

- Η μία συνιστώσα της λύσης παριστά ένα κύμα, που διαδίδεται στη θετική x διεύθυνση με ταχύτητα v .

$$x_1 - vt_1 = x_2 - vt_2 \quad \text{ή} \quad \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v \quad \text{ή} \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} = v$$

- Όμοια η συνιστώσα u_2 παριστάνει ένα κύμα που διαδίδεται στην αρνητική x διεύθυνση με την ίδια ταχύτητα.
- το κύμα τάσης u_1 συνοδεύεται από κύμα ρεύματος $i_1 = \frac{u_1}{R_w}$, ενώ το u_2 συνοδεύεται από το $i_2 = -\frac{u_2}{R_w}$.



Ανακλάσεις κύματος(1)

- Όταν ένα κύμα φτάσει σε μια ασυνέχεια της γραμμής, δημιουργεί ανακλώμενα κύματα. Η συνολική τάση και ρεύμα στην ασυνέχεια της γραμμής παίρνονται με υπέρθεση των δύο κυμάτων.
- Θα εξετάσουμε την απλή περίπτωση κατά την οποία με το κλείσιμο ενός διακόπτη ένα κύμα τάσης , συνοδευόμενο από ένα κύμα ρεύματος , αρχίζουν να διαδίδονται κατά μήκος μιας γραμμής, που τροφοδοτεί την αντίσταση R .
- Τα κύματα αυτά ανακλώμενα στο τέλος της γραμμής δημιουργούν τα ανακλώμενα κύματα u_2 και i_2 , που πρέπει να έχουν τέτοια τιμή, ώστε το πηλίκο της συνολικής τάσης u_r προς το συνολικό ρεύμα i_r στο τέλος της γραμμής να είναι ίσο με R , δηλαδή:
- $$\frac{u_r}{i_r} = \frac{u_1 + u_2}{i_1 + i_2} = R$$



Ανακλάσεις κύματος(2)

- Αλλά ξέρουμε ότι:

$$i_1 = \frac{u_1}{R_w} \text{ και } i_2 = -\frac{u_2}{R_w}$$

$$\frac{u_r}{i_r} = \frac{u_1 + u_2}{i_1 + i_2} = R$$

- Με αντικατάσταση αυτών των εξισώσεων παίρνουμε:

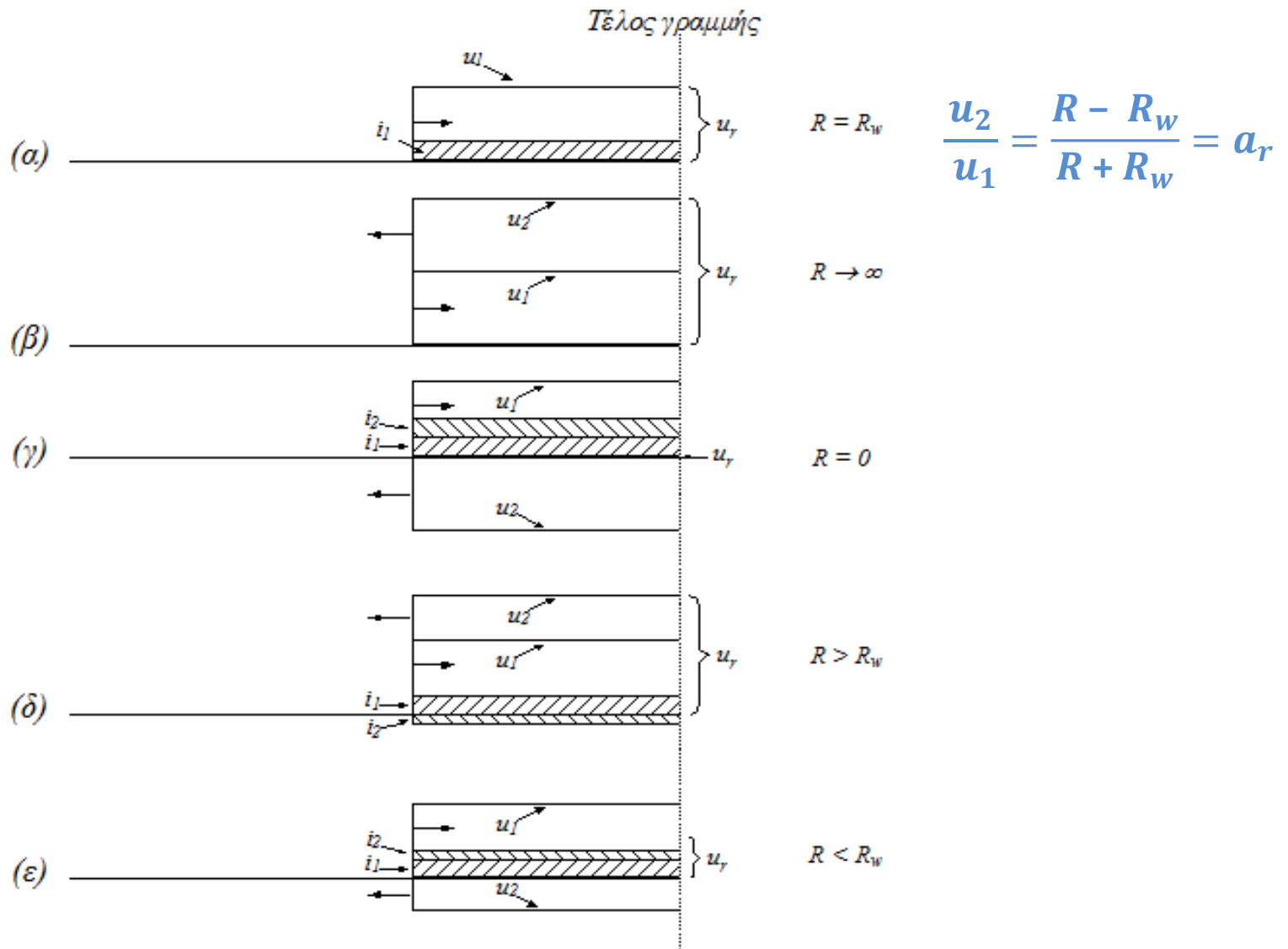
$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{R - R_w}{R + R_w} = a_r$$

όπου a_r είναι ο **συντελεστής ανάκλασης** για τάση, ενώ ο συντελεστής ανάκλασης για ρεύμα είναι πάντοτε αρνητικός του a_r (υπολογίζεται με αντικατάσταση των u_1 και u_2).

- Τα ανακλώμενα σήματα στο τέλος της γραμμής επιστρέφουν στην αρχή της γραμμής, όπου ανακλώνται και πάλι κ.ο.κ



Ανακλάσεις κύματος(3)



Ανακλάσεις ορθογώνιου κύματος στο τέλος γραμμής, για διαφορετικές αντιστάσεις φορτίου.

Ανακλάσεις κύματος(4)

- Ανάκλαση συμβαίνει και στην περίπτωση σύνδεσης μιας γραμμής με κάποια άλλη διαφορετικής σύνθετης αντίστασης (π.χ. σύνδεση εναέριας γραμμής με καλώδιο). Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται ως η πρώτη γραμμή να τερματίζεται με τη χαρακτηριστική αντίσταση της δεύτερης γραμμής, αν και στην περίπτωση αυτή το μέρος του κύματος, που δεν ανακλάται, διαδίδεται στη δεύτερη γραμμή.
- Συνήθως ανάκλαση συμβαίνει στους ακροδέκτες υψηλής τάσης των μετασχηματιστών και δημιουργεί τάση διπλάσια του μεγίστου του αρχικού κύματος, γιατί η μεγάλη σύνθετη αντίσταση των μετασχηματιστών δρα ως ανοικτοκύκλωμα για τη γραμμή.
- Για την προστασία των μετασχηματιστών και των υπόλοιπων συσκευών, που βρίσκονται στα άκρα των γραμμών, χρησιμοποιούνται **εκτροπείς κύματος** ή **αλεξικέραυνα**, που συνδέονται μεταξύ της γραμμής και ενός γειωμένου ουδετέρου.



Παράδειγμα

Μια πηγή ΣP , 200 V με μηδενική εσωτερική αντίσταση συνδέεται με ένα διακόπτη σε μια γραμμή χωρίς απώλειες, μήκους 277 Km με $L = 0.144 * 10^{-6} \text{ H/m}$ και $C = 90 * 10^{-12} \text{ F/m}$. Αν ο διακόπτης κλείσει στο χρόνο $t=0$ να υπολογίσετε:

α) Τη χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής, την ταχύτητα του κύματος και το χρόνο T , που χρειάζεται το κύμα να διανύσει το μήκος της γραμμής.

β) Η γραμμή τερματίζεται με μια αντίσταση $R = 120\Omega$. Να υπολογίσετε και να σχεδιάσετε την τερματική τάση για χρόνο $t = 5T$.

γ) Να επαναλάβετε την ερώτηση **β)** για αντίσταση $R = 13.33\Omega$.



Λύση(1)

$$L = 0.144 * 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$C = 90 * 10^{-12} \text{ F/m}$$

α) Η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και η ταχύτητα κύματος είναι:

$$R_w = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{0.144 * 10^{-6}}{90 * 10^{-12}}} = 40 \Omega$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0.144 * 10^{-6} * 90 * 10^{-12}}} = 277 * 10^6 \text{ m/s} = 277000 \text{ km/s}$$

Αν l το μήκος της γραμμής, ο χρόνος T δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{l}{v} = \frac{277}{277000} \text{ s} = 1 \text{ ms}$$



Λύση(2)

β) Μετά το κλείσιμο του διακόπτη, ένα ορθογώνιο κύμα πλάτους **200 V** αρχίζει να ταξιδεύει κατά μήκος της γραμμής και μετά από χρόνο $t = 1 \text{ ms} = T$ φτάνει στο άκρο της γραμμής και αρχίζει αν ανακλάται με έναν συντελεστή ανάκλασης τάσης:

$$a_r = \frac{R - R_w}{R + R_w} = \frac{120 - 40}{120 + 40} = 0.5$$

Το ανακλώμενο κύμα έχει τιμή τάσης:

$$u_2 = a_r u_1 = 0.5 * 200 = 100 \text{ V}$$

ενώ η συνολική τάση u_r είναι:

$$u_r = u_1 + u_2 = 200 + 100 = 300 \text{ V}$$

Μετά από χρόνο $t = 2T$, το ανακλώμενο κύμα u_2 φτάνει στην αρχή της γραμμής, όπου ο συντελεστής ανάκλασης με μηδενική αντίσταση πηγής είναι:

$$a_r = \frac{0 - 40}{0 + 40} = -1$$

Συνεπώς αρχίζει η δημιουργία ενός ανακλώμενου κύματος **-100 V** στην αρχή της γραμμής, που εξουδετερώνει το προσπίπτον κύμα **100 V** και η συνολική τάση διατηρείται στα **200 V**, που είναι η τάση πηγής. Αυτό το νέο κύμα των **-100 V** φτάνει στο τέλος της γραμμής μετά από χρόνο $t = 3T$ κ.λ.π.

$$R_w = 40 \Omega$$

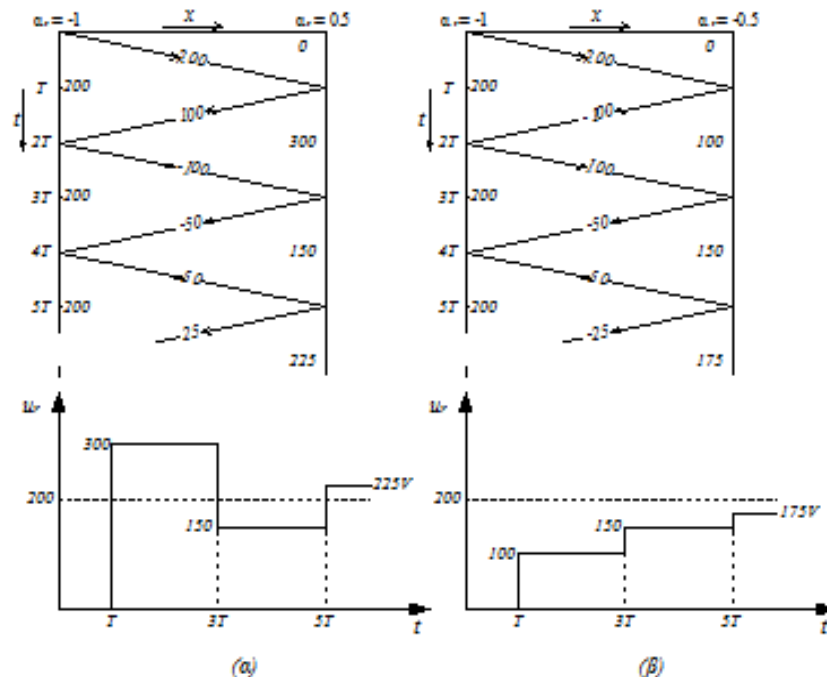
$$R = 120 \Omega$$



Λύση(3)

γ) Όταν η τερματική αντίσταση ελαττωθεί στα **13.33 Ω** ο συντελεστής ανάκλασης στην αρχή της γραμμής παραμένει ο ίδιος, αλλά ο συντελεστής ανάκλασης στο τέλος της γραμμής γίνεται:

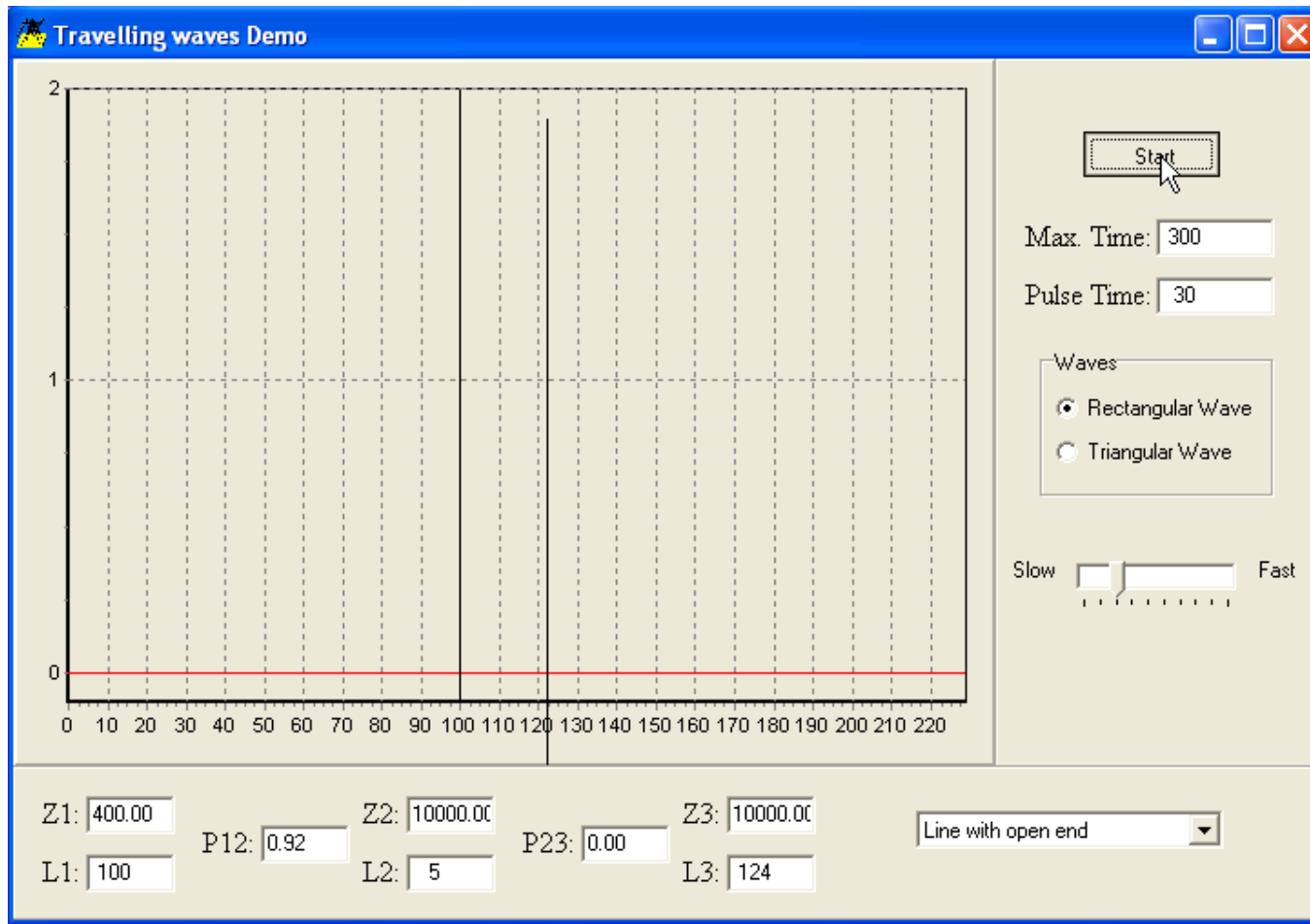
$$a_r = \frac{13.33 - 40}{13.33 + 40} = -0.5$$



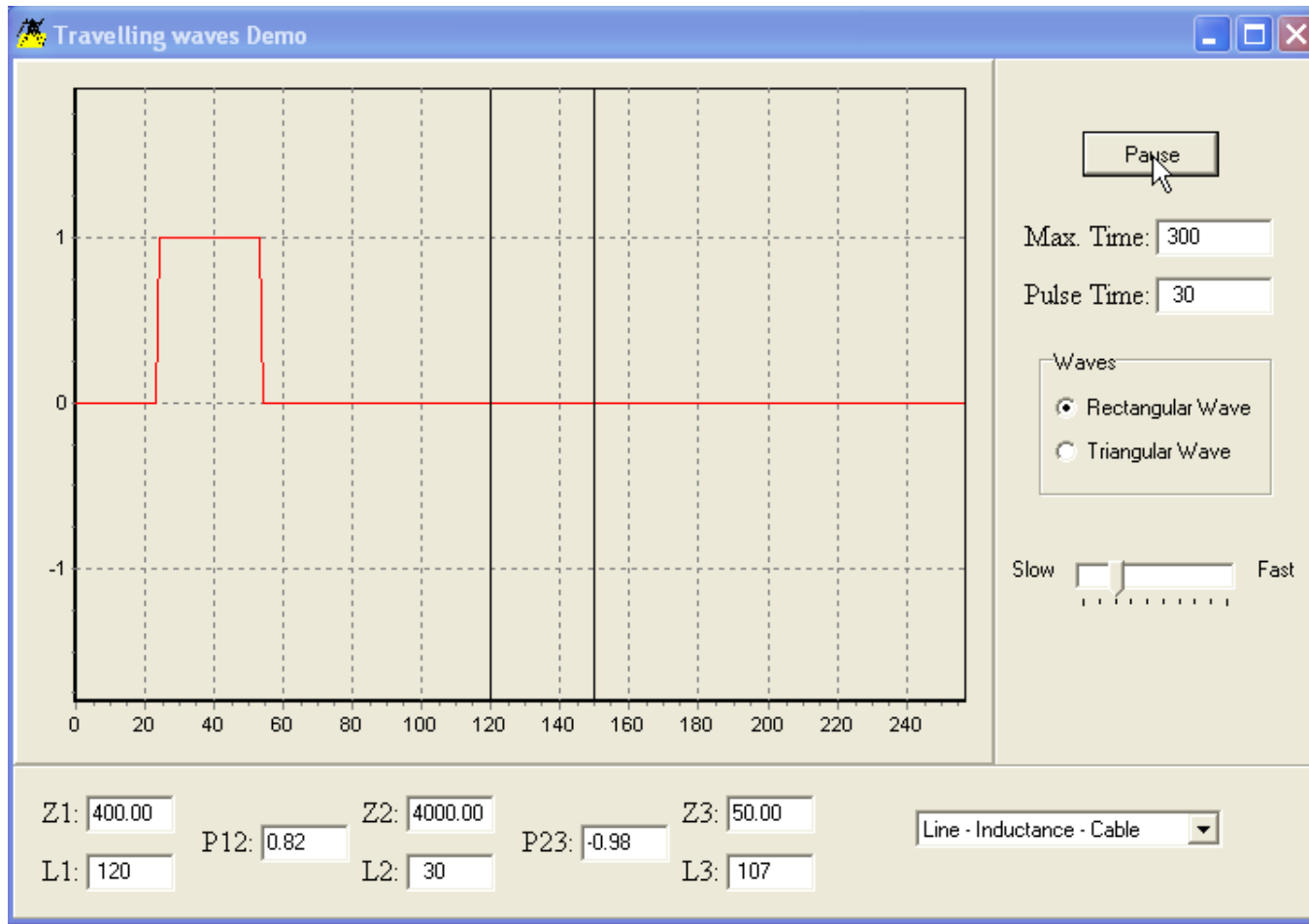
Δικτυωτό διάγραμμα και τάση στο τέλος της γραμμής:
 α) Για αντίσταση φορτίου 120 Ω.
 β) Για αντίσταση φορτίου 13.33 Ω.



Λύση(4)

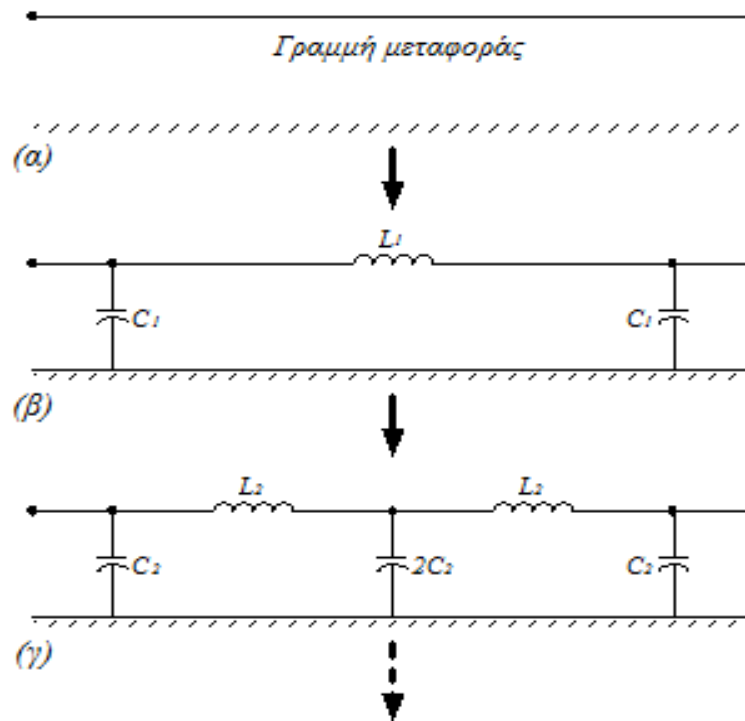


Λύση(5)



Παράσταση γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους

- Η ικανότητα που έχουν οι γραμμές να επιτρέπουν τη διάδοση κυμάτων οφείλεται στη συνέχεια των παραμέτρων τους. Στην εξομοίωση όμως μεταβατικών φαινομένων, η συγκέντρωση των παραμέτρων της γραμμής είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια.
- Η παράσταση της γραμμής με **LC** τονίζει τον ταλαντωτικό της χαρακτήρα.



Σχ. 2.5 Συγκέντρωση των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς



Παράδειγμα(1)

- Θεωρούμε τη γραμμή του προηγούμενου παραδείγματος. Αν τη παραστήσουμε με το πιο απλό μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων, παίρνουμε:

$$L = 277 * 10^3 * 0.144 * 10^{-6} = 39.888 * 10^{-3} H$$

$$C = 0.5 * 277 * 10^3 * 90 * 10^{-12} = 1.2465 * 10^{-7} F$$

- Η συχνότητα συντονισμού του LC κυκλώματος που δημιουργούμε θα είναι:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(2C)}} = 159.6 Hz$$



Παράδειγμα(2)

- Επειδή όμως το οδεύον κύμα χρειάζεται για να φτάσει στο τέλος της γραμμής και να επιστρέψει χρόνο:

$$t = 2T = 2 \text{ ms}$$

η πραγματική συχνότητά του είναι:

$$f = \frac{1}{t} = 500 \text{ Hz}$$

- Παρατηρούμε ότι η απλή παράσταση της γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους καταλήγει σε σημαντικά λάθη, όταν χρησιμοποιείται στη μελέτη κυματικών φαινομένων.

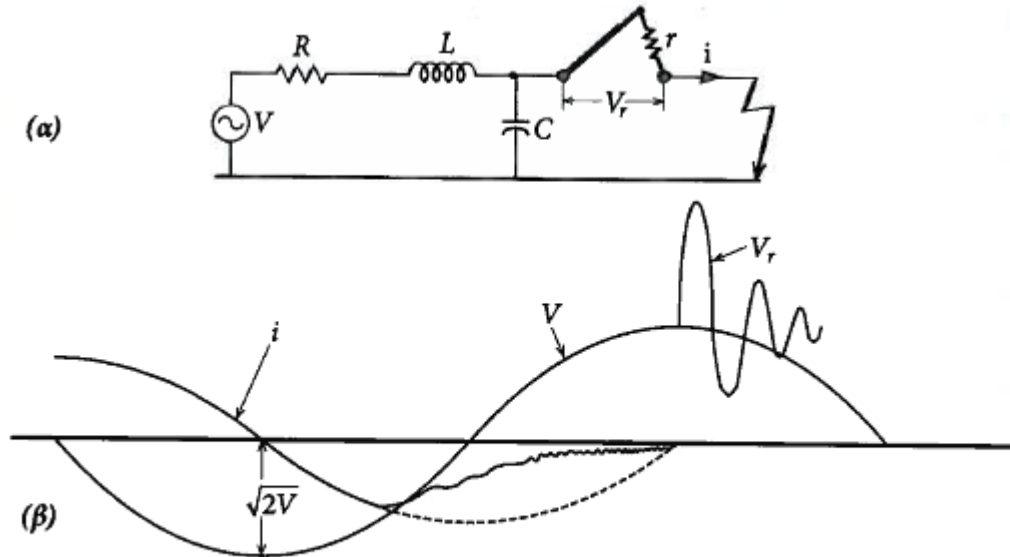


Μεταβατικά φαινόμενα λόγω λειτουργίας διακοπών(1)

- Η πιο απλή μορφή ενός τέτοιου μεταβατικού φαινομένου είναι το κύμα που δημιουργείται κατά την ενεργοποίηση μιας γραμμής μεταφοράς.
- Το πλάτος του μετώπου του κύματος εξαρτάται από την τιμή της τάσης τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης. Η χειρότερη περίπτωση είναι το κλείσιμο να γίνει όταν η τάση είναι μέγιστη. Αν η τάση έχει ενεργό τιμή $|V|$, το μέτρο της θα είναι $\sqrt{2}|V|$ και μετά την ανάκλαση, η τάση στο άκρο της γραμμής θα φτάσει την τιμή $2\sqrt{2}|V|$.
- Επικίνδυνες υπερτάσεις μπορούν να δημιουργηθούν και κατά το άνοιγμα ενός διακόπτη και να οδηγήσουν σε αποτυχία της λειτουργίας του.



Μεταβατικά φαινόμενα λόγω λειτουργίας διακοπών(2)



Μεταβατική τάση αποκατάστασης για βραχυκύκλωμα κοντά στο διακόπτη.

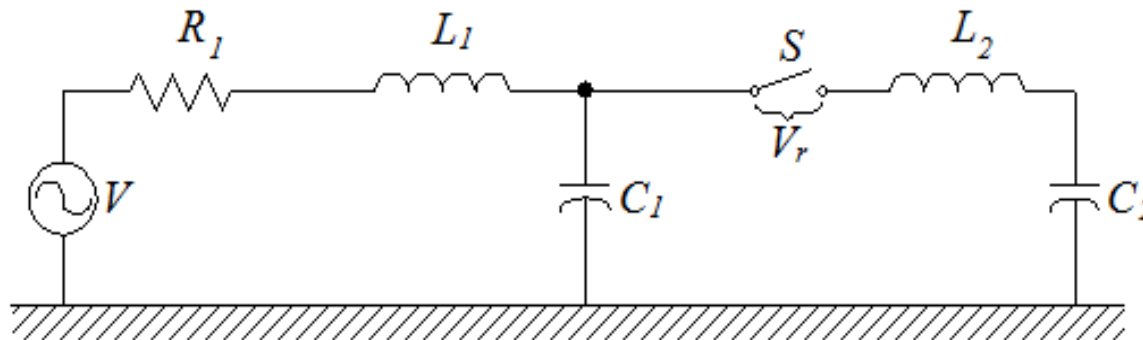
- Για μικρό χρονικό διάστημα, αμέσως μετά τη διακοπή του ρεύματος βραχυκύκλωσης, η μεταβατική τάση αποκατάστασης V_r δίνεται από την σχέση: $\sqrt{2}|V|(1 - \cos \omega_n t)$.



Μεταβατικά φαινόμενα λόγω λειτουργίας διακοπών(3)

- Αν το βραχυκύκλωμα δεν είναι κοντά στο διακόπτη, έχουμε την ανάπτυξη δύο ταλαντωτικών τάσεων με συχνότητες $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ και $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ και η μεταβατική τάση αποκατάστασης είναι:

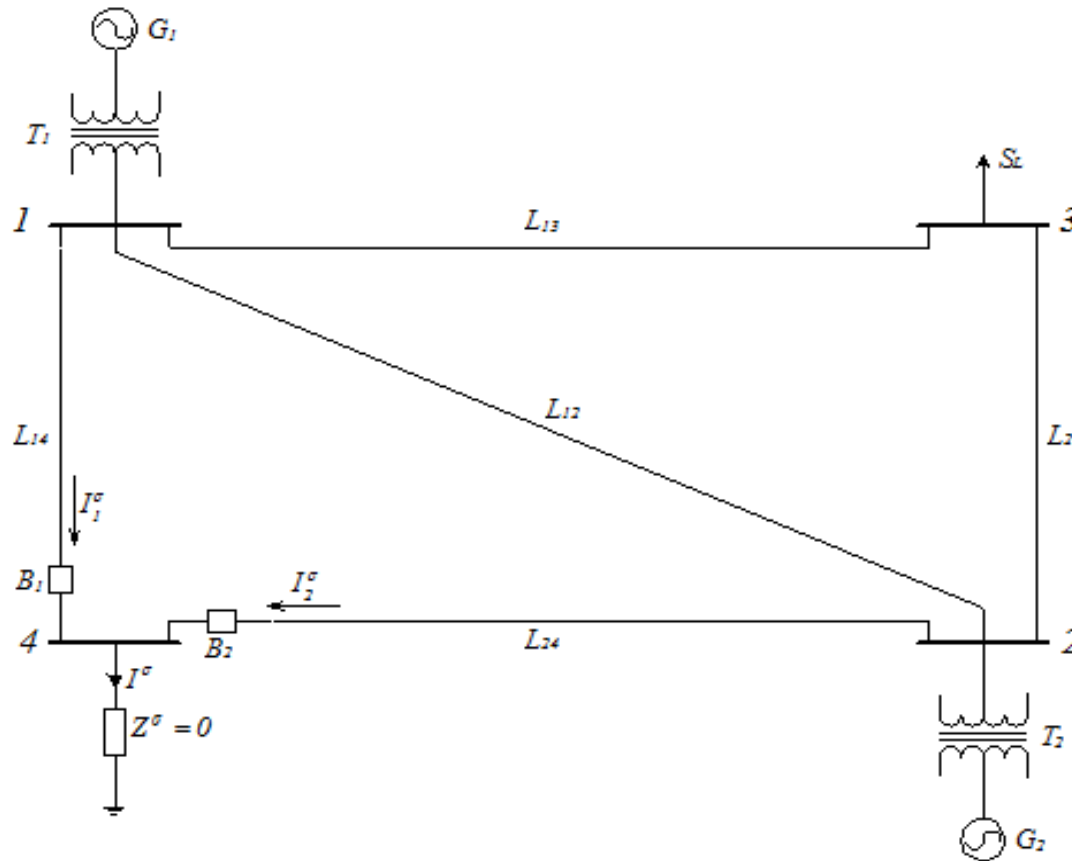
$$V_r = \sqrt{2}|V| \left(1 - \frac{L_1}{L_1 + L_2} \cos \omega_1 t - \frac{L_2}{L_1 + L_2} \cos \omega_2 t \right)$$



Κύκλωμα για βραχυκύκλωμα μακράν του διακόπτη.



Συμμετρικά βραχυκυκλώματα(1)



Συμμετρικό βραχυκύκλωμα ζυγού





Αντοχή σε βραχυκύκλωμα(SCC)

- Οι τάσεις των ζυγών 1 και 2, όπως και όλων των ζυγών του δικτύου, ελαττώνονται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Το μέγεθος αυτής της πτώσης τάσης είναι μια ένδειξη της αντοχής του δικτύου.
- Χρειαζόμαστε ένα μέτρο αυτής της αντοχής, αλλά και ένα μέτρο της σοβαρότητας του βραχυκυκλώματος.
- Τα δύο αυτά μέτρα εκφράζονται από μία ποσότητα που λέγεται **αντοχή σε βραχυκύκλωμα (Short Circuit Capacity (SCC))** ή **επίπεδο σφάλματος** του εξεταζόμενου ζυγού.

$$|SCC| = |V_{\pi\beta}| |I_{\pi\beta}| \text{ pu MVA}$$

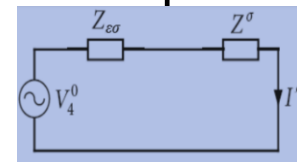
$$\sqrt{3} |SCC| = |V_{\pi\beta}| |I_{\pi\beta}| \text{ pu MVA}$$

- Επειδή συνήθως η προσφαλματική τάση είναι **1 pu**, μπορούμε να πάρουμε την προσεγγιστική σχέση:

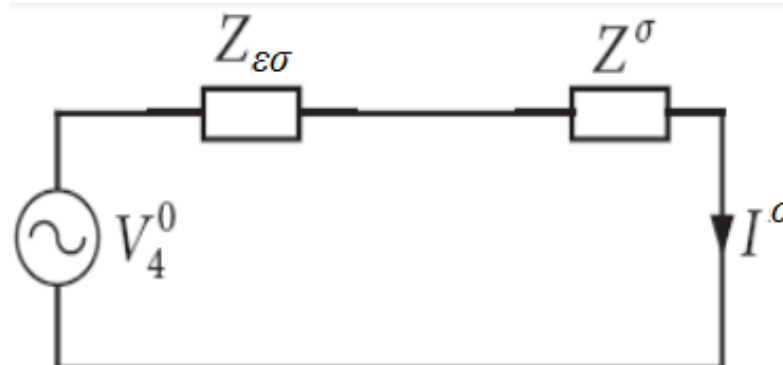
$$|SCC| \cong |I_{\pi\beta}| \text{ pu MVA}$$

Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με το θεώρημα του Thevenin(1)

- «Οι μεταβολές, που συμβαίνουν στις τάσεις και τα ρεύματα ενός δικτύου κατά την πρόσθεση μιας σύνθετης αντίστασης μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου, είναι ίδιες με τις τάσεις και τα ρεύματα που θα προκαλούνταν από μια πηγή τάσης, με μέτρο και πολικότητα ίσα με εκείνα της προσφαλαμτικής τάσης μεταξύ των δύο κόμβων, τοποθετημένη σε σειρά με τη σύνθετη αντίσταση και την εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος, που παίρνουμε όταν μηδενίσουμε όλες τις πηγές του (μηδενισμός πηγών σημαίνει να βραχυκυκλώσουμε τις πηγές τάσης και να ανοιχτοκυκλώσουμε τις πηγές ρεύματος)».
- Για να πάρουμε τις τελικές τιμές των τάσεων και των ρευμάτων στο δίκτυο μετά το βραχυκύκλωμα, πρέπει να υπερθέσουμε τις μεταβολές Thevenin στις τάσεις και τα ρεύματα πριν το βραχυκύκλωμα.
- Θα συμβολίζουμε στο εξής όλες τις προσφαλαμτικές τιμές με το δείκτη $^{\circ}$ και όλες τις μετασφαλαμτικές τιμές με το δείκτη σ .



Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με το θεώρημα του Thevenin(2)



Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin για τον υπολογισμό του ρεύματος I^σ

$$I^\sigma = \frac{V_4^0}{Z^\sigma + Z_{\varepsilon\sigma}}$$

ή στην περίπτωση στερεού βραχυκυκλώματος ($Z^\sigma = 0$)

$$I^\sigma = \frac{V_4^0}{Z_{\varepsilon\sigma}}$$

Από αυτήν την εξίσωση παίρνουμε:

$$Z_{\varepsilon\sigma} = \frac{V_4^0}{I^\sigma}$$

Αν εκφράσουμε όλες τις ποσότητες σε ρυ, επειδή συνήθως $V_4^0 \cong 1$ ρυ, παίρνουμε $|SCC| \cong |I^\sigma|$ και έχουμε:

$$|Z_{\varepsilon\sigma}| = \frac{1}{|SCC|}$$

Υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης με το θεώρημα του Thevenin(3)

- **1.**Όταν η **SCC** αυξάνει, η σύνθετη αντίσταση του δικτύου, όπως φαίνεται από το ζυγό, μειώνεται. Έτσι αυξάνει η ικανότητα του ζυγού να διατηρεί την τάση του, ενώ τα ρεύματα βραχυκύκλωσης είναι πολύ μεγάλα.
- **2.**Τα **MVA** βραχυκυκλώματος σαν μέτρο της καταπόνησης που υφίσταται ένας διακόπτης είναι προτιμότερα από το ρεύμα βραχυκύκλωσης.
- **3.**Μερικές φορές για να απλοποιήσουμε την ανάλυση, δεχόμαστε ότι ένας ζυγός είναι **άπειρα ισχυρός**, που σημαίνει ότι η **SCC** είναι άπειρη.



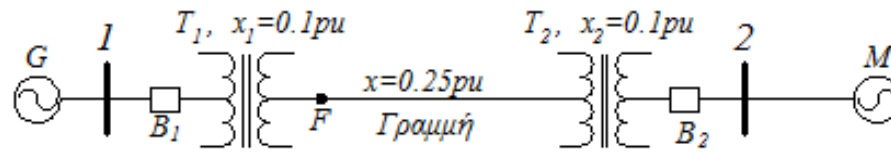
Παράδειγμα

Θεωρούμε το αφόρτιστο δίκτυο του Σχήματος. Με τους διακόπτες B_1 και B_2 ανοικτούς η αντοχή σε βραχυκύκλωμα των ζυγών **1** και **2** είναι:

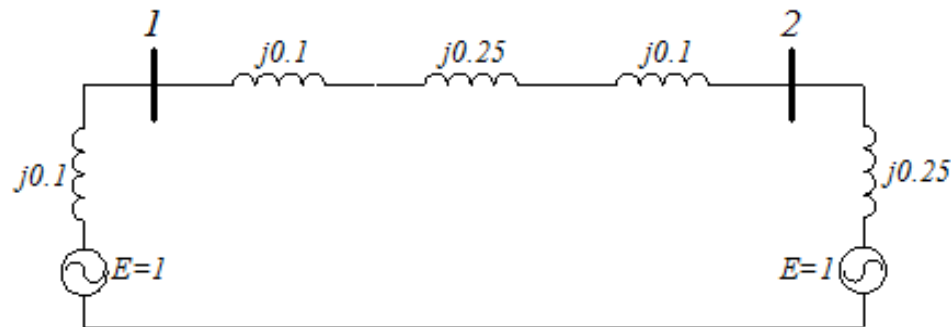
$$|SCC_1| = 10pu \text{ και } |SCC_2| = 4pu$$

α) Όταν κλείσουμε τους διακόπτες B_1 και B_2 ποια τιμή παίρνουν οι $|SCC_1|$ και $|SCC_2|$;

β) Ποια είναι η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης για ένα βραχυκύκλωμα στο **F**;



(α)



(β)

α) Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος.
β) Ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος.



Λύση(1)

α) Η εσωτερική αντίσταση του δικτύου αριστερά του ζυγού 1 και δεξιά του ζυγού 2 είναι:

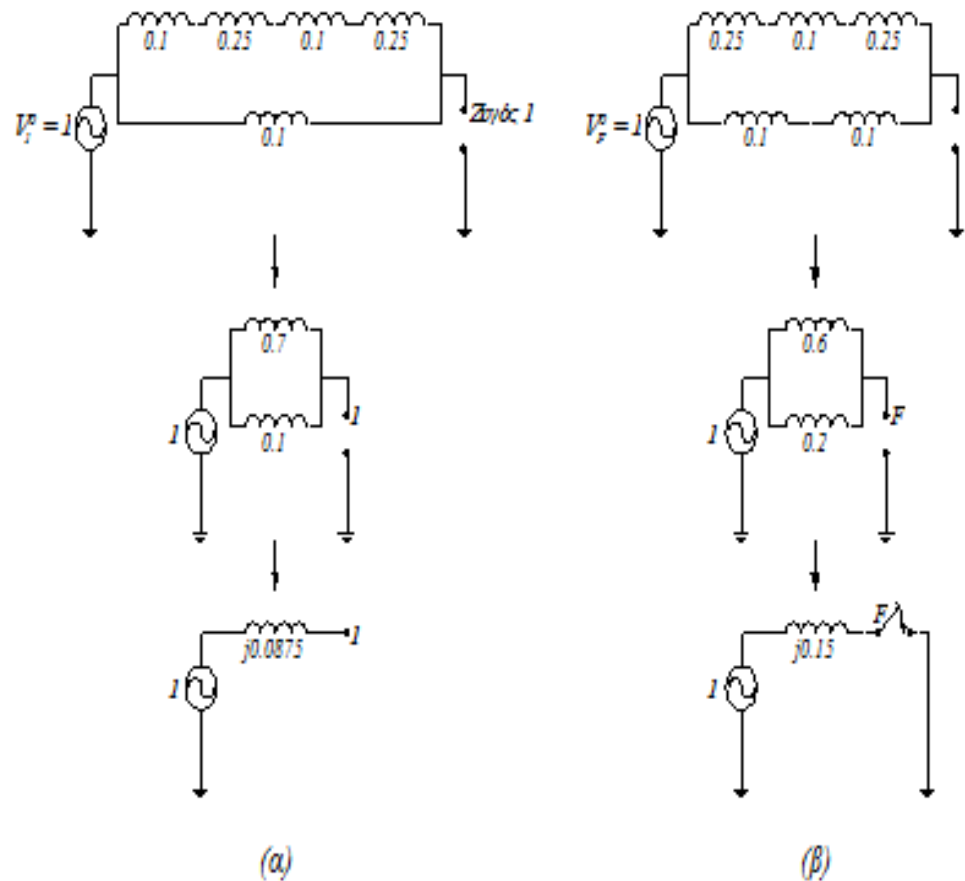
$$|Z_{\varepsilon\sigma,1}| = \frac{1}{|SCC_1|} = \frac{1}{10} = 0.1 pu$$

$$|Z_{\varepsilon\sigma,2}| = \frac{1}{|SCC_2|} = \frac{1}{4} = 0.25 pu$$

$$\beta) |SCC_1| = \frac{1}{0.0875} = 11.428 pu$$

$$|SCC_2| = \frac{1}{0.1719} = 5.818 pu$$

$$I^\sigma = \frac{V_F^0}{Z_{\varepsilon\sigma}} = \frac{1}{j 0.15} = -j 6.666 pu$$



Βηματική απλοποίηση του δικτύου για την κατασκευή του ισοδύναμου Thevenin:

α) Ως προς το ζυγό 1.

β) Ως προς το βραχυκύκλωμα.



Λύση(2)

Fault Analysis

Choose the Faulted Bus

Sort by Name Sort by Number

1 (One) [15 KV]
2 (Two) [345 KV]
3 (Three) [15 KV]
4 (Four) [345 KV]
5 (Five) [345 KV]

Fault Location: Bus Fault In-Line Fault

Location %: 0

Fault Type: Single Line-to-Ground Line-to-Line 3 Phase Balanced Double Line-to-Ground

Data Type Shown: Current Units: p.u. Amps

Online Display: Normal Phase A Phase C All Phases Phase B

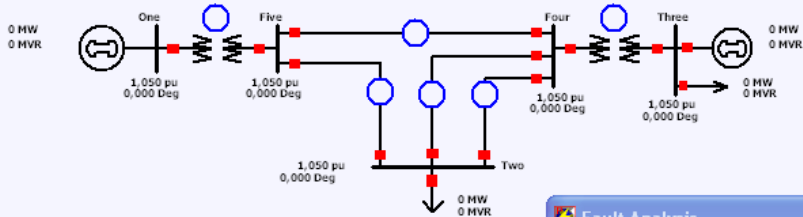
Fault Current: Magnitude: 3085,330 Angle: -90,00

	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	One	0,72362	0,72362	0,72362	0,00	-120,00	120,00
2	2	Two	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00
3	3	Three	0,79837	0,79837	0,79837	0,00	-120,00	120,00
4	4	Four	0,68653	0,68653	0,68653	0,00	-120,00	120,00
5	5	Five	0,57857	0,57857	0,57857	0,00	-120,00	120,00

Calculate Clear Close ?



Λύση(3)



Fault Analysis

Fault Data | Fault Options

Choose the Faulted Bus
 Sort by Name Sort by Number

1 (One) [15 KV]
2 (Two) [345 KV]
3 (Three) [15 KV]
4 (Four) [345 KV]
5 (Five) [345 KV]

Fault Location
 Bus Fault
 In-Line Fault
 Location %: 0

Fault Type
 Single Line-to-Ground
 Line-to-Line
 3 Phase Balanced
 Double Line-to-Ground

Data Type Shown
 Current Units: p.u. Amps
 Oneline Display: Normal Phase A Phase C
 All Phases Phase B

Fault Current
 Magnitude: 3903,660 Amp
 Angle: -90,00 deg

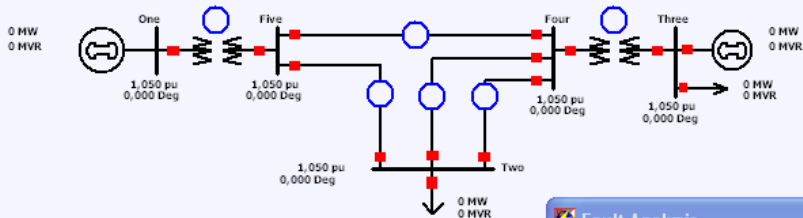
Buses | Lines | Generators | Loads | Switched Shunts

	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	One	0,67748	0,67748	0,67748	0,00	-120,00	120,00
2	2	Two	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00
3	3	Three	0,71141	0,71141	0,71141	0,00	-120,00	120,00
4	4	Four	0,56092	0,56092	0,56092	0,00	-120,00	120,00
5	5	Five	0,51192	0,51192	0,51192	0,00	-120,00	120,00

Calculate Clear Close ? He



Λύση(4)



Fault Analysis

Fault Data | Fault Options

Choose the Faulted Bus
 Sort by Name Sort by Number

1 (One) [15 KV]
2 (Two) [345 KV]
3 (Three) [15 KV]
4 (Four) [345 KV]
5 (Five) [345 KV]

Fault Location
 Bus Fault
 In-Line Fault
 Location %: 0

Fault Type
 Single Line-to-Ground
 Line-to-Line
 3 Phase Balanced
 Double Line-to-Ground

Data Type Shown
 Current Units: p.u. Amps
 Oneline Display: Normal Phase A Phase C
 All Phases Phase B

Fault Current
 Magnitude: 145788,000 Amp
 Angle: -90,00 deg

Buses | Lines | Generators | Loads | Switched Shunts

	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	One	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00
2	2	Two	0,44512	0,44512	0,44512	0,00	-120,00	120,00
3	3	Three	0,72277	0,72277	0,72277	0,00	-120,00	120,00
4	4	Four	0,57733	0,57733	0,57733	0,00	-120,00	120,00
5	5	Five	0,29087	0,29087	0,29087	0,00	-120,00	120,00

Calculate Clear Close ? He



Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές (1)

- Το ρεύμα μιας σύγχρονης μηχανής αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα, λίγο μετά και το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης διαφέρουν σημαντικά, λόγω της επίδρασης του ρεύματος τυμπάνου στη ροή.
- Ρεύματα βραχυκύκλωσης σε εναλλακτήρα.
- Πριν μελετήσουμε το πρόβλημα υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης σε μια σύγχρονη μηχανή, θα εξετάσουμε ένα απλό αλλά παρόμοιο πρόβλημα, που είναι η εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης τάσης σε μια σε σειρά σύνδεση αντίστασης (R)-επαγωγής (L).



Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές (2)

Έστω ότι η τάση έχει τη μορφή $\sqrt{2}|V| \sin(\omega t + \alpha)$, όπου t είναι μηδέν τη στιγμή που εφαρμόζουμε την τάση και το α καθορίζει το μέτρο της τάσης για $t=0$.

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει αυτό το κύκλωμα είναι:

$$\sqrt{2}|V| \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt}$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής είναι:

$$i = \frac{\sqrt{2}|V|}{|Z|} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-Rt/L} \sin(\alpha - \theta)]$$

όπου: $|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ και $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right)$

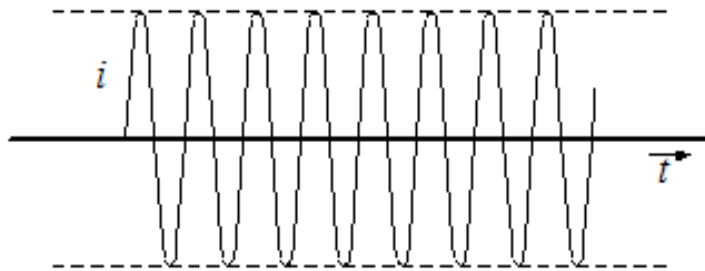
Ο ημιτονοειδής όρος είναι η τιμή του ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση.

Η **συνιστώσα συνεχούς ρεύματος** εμφανίζεται στη λύση για να ικανοποιήσει τη φυσική συνθήκη μηδενικού ρεύματος την στιγμή που εφαρμόζουμε την τάση.

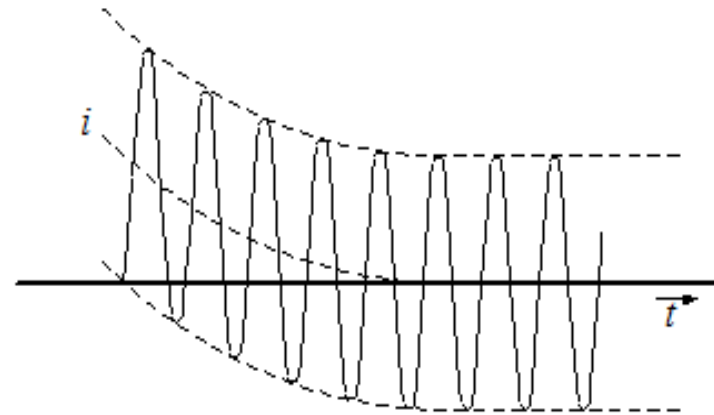


Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές (3)

- Σημειώνουμε, ότι η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος δεν υπάρχει, αν κλείσουμε το διακόπτη σε τέτοιο σημείο της κυματομορφής της τάσης ώστε $\alpha - \theta = 0^0$ ή $\alpha - \theta = \pi$ και είναι μέγιστη για $\alpha - \theta = \pm \pi/2$.



(α)



(β)

Κυματομορφές ρεύματος σε RL κύκλωμα για:

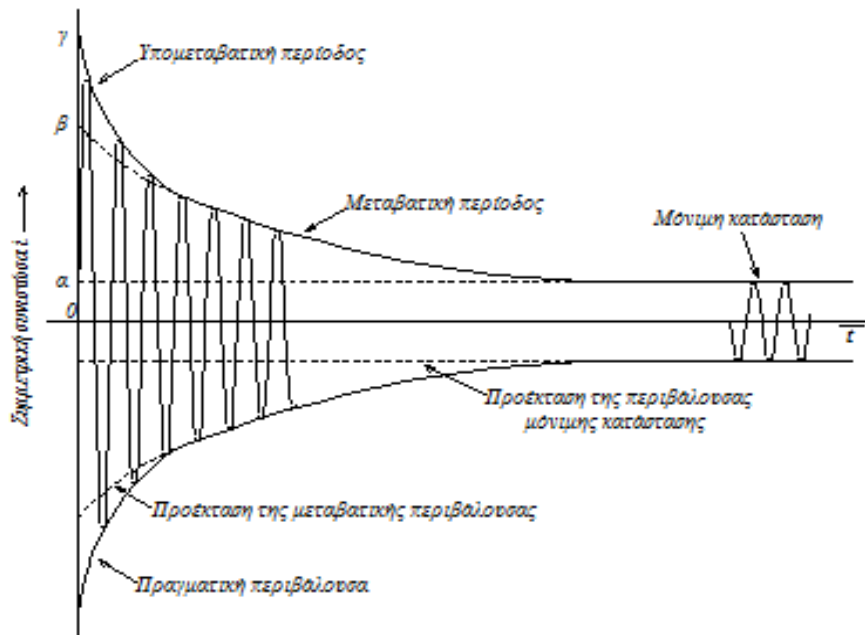
α) $\alpha - \theta = 0$.

β) $\alpha - \theta = \pi/2$.



Συμμετρικά τριφασικά βραχυκυκλώματα στις σύγχρονες μηχανές (4)

- Το ρεύμα που ρέει σε ένα εναλλάκτη, όταν ξαφνικά βραχυκυκλώνεται, είναι παρόμοιο με το ρεύμα που διαρρέει ένα κύκλωμα RL σε σειρά, όταν ξαφνικά εφαρμόζουμε σε αυτό μια εναλλασσόμενη τάση αλλά υπάρχουν και αρκετές διαφορές, γιατί το ρεύμα τυμπάνου και το ρεύμα στα πηνία απόσβεσης επηρεάζουν το στρεφόμενο πεδίο.
- Αν αφαιρέσουμε τη συνεχή συνιστώσα του ρεύματος από κάθε φάση, η κυματομορφή του ρεύματος βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες ενός αφόρτιστου εναλλακτήρα είναι η ακόλουθη :



Κυματομορφή ρεύματος βραχυκύκλωσης εναλλακτήρα, χωρίς τη συνιστώσα συνεχούς ρεύματος.

Η ροή στο διάκενο μίας σύγχρονης μηχανής είναι πολύ μεγαλύτερη τη στιγμή του βραχυκυκλώματος από εκείνη που υπάρχει λίγους κύκλους αργότερα. Η μείωση της ροής προκαλείται από τη μαγνητεγερτική δύναμη του ρεύματος τυμπάνου και των ρευμάτων στα πηνία απόσβεσης (ονομάζεται αντίδραση του τυμπάνου). Η συνολική ροή στο διάκενο οφείλεται στο συνδυασμό της μαγνητεγερτικής δύναμης των ρευμάτων στα τυλίγματα πεδίου, τυμπάνου και πηνίων απόσβεσης. Καθώς μειώνεται η ροή διακένου, το ρεύμα τυμπάνου μειώνεται, γιατί το ρεύμα τυμπάνου οφείλεται στην τάση που προκαλείται από τη συνολική ροή διακένου.



Επαγωγικές αντιστάσεις σύγχρονων μηχανών

- Στη μελέτη βραχυκυκλωμάτων παριστούμε τις μηχανές με τις σύνθετες αντιστάσεις τους, όπως αυτές θα ορισθούν στη συνέχεια, παρόλο που οι θεμελιώδης συνιστώσες των ρευμάτων βραχυκύκλωσης αποσβένονται εκθετικά.

$$X_d = \frac{|E_G|}{|I|} = \frac{|E_G|}{oa/\sqrt{2}}$$

ορίζεται ως η **σύγχρονη επαγωγική αντίσταση του d-άξονα**.

$$X'_d = \frac{|E_G|}{|I'|} = \frac{|E_G|}{o\beta/\sqrt{2}}$$

ορίζεται ως η **μεταβατική επαγωγική αντίσταση του d-άξονα**.

$$X''_d = \frac{|E_G|}{|I''|} = \frac{|E_G|}{o\gamma/\sqrt{2}}$$

ορίζεται ως η **υπομεταβατική επαγωγική αντίσταση του d-άξονα**.

- Από τον τρόπο ορισμού τους είναι προφανής η σχέση:

$$X''_d < X'_d < X_d$$



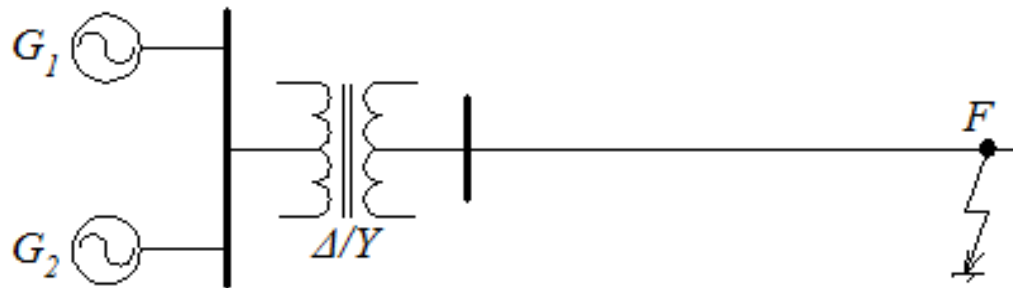
Προσεγγίσεις στην ανάλυση βραχυκυκλωμάτων

- **1.** Παραλείπουμε όλες τις συνιστώσες του ρεύματος εκτός από τη συνιστώσα στη θεμελιώδη συχνότητα.
- **2.** Οι σύγχρονες μηχανές παριστάνονται με μια ΗΕΔ συνδεδεμένη σε σειρά ή με την υπομεταβατική ή με τη μεταβατική ή τη σύγχρονη επαγωγική αντίσταση της μηχανής.
- **3.** Όλες οι αντιστάσεις του δικτύου υποθέτουμε ότι είναι καθαρά άεργες.
- **4.** Η επίδραση της συνιστώσας συνεχούς ρεύματος λαμβάνεται εμπειρικά υπόψη στους υπολογισμούς:
- **α)** Για τον υπολογισμό του στιγμιαίου ρεύματος που οφείλει να δέχεται ο διακόπτης αμέσως μετά το βραχυκύκλωμα πολλαπλασιάζουμε με το συντελεστή 1.6 την ενεργό τιμή του υπομεταβατικού ρεύματος.
- **β)** Για τον προσδιορισμό των ονομαστικών MVA της διακοπτικής ικανότητας ενός διακόπτη πολλαπλασιάζουμε με τους ακόλουθους συντελεστές:
- Διακόπτης 8 κύκλων ή πιο αργός.....1.0
- Διακόπτης 5 κύκλων.....1.1
- Διακόπτης 3 κύκλων.....1.2
- Διακόπτης 2 κύκλων.....1.4



Παράδειγμα

Δύο γεννήτριες συνδέονται παράλληλα στην πλευρά χαμηλής τάσης ενός τριφασικού Δ/Y μετασχηματιστή. Οι ονομαστικές τιμές της γεννήτριας 1 είναι **75 MVA, 13.8 KV** και της 2 είναι **25 MVA, 13.8 KV**. Κάθε γεννήτρια έχει υπομεταβατική επαγωγική αντίσταση $X''_d = 20\%$. Οι ονομαστικές τιμές του μετασχηματιστή είναι **100 MVA, 13.8 Δ /150Y KV**, με επαγωγική αντίσταση $X = 10\%$. Ο μετασχηματιστής τροφοδοτεί την εναέρια γραμμή μικρού μήκους με $X = 10.8 \Omega$, στο άκρο **F** της οποίας συμβαίνει τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα. Πριν το βραχυκύκλωμα η τάση στο **F** ήταν **155 KV**. Ο μετασχηματιστής είναι αφόρτιστος και δεν υπάρχει κυκλοφορούν ρεύμα μεταξύ των γεννητριών. Να βρείτε το υπομεταβατικό ρεύμα σε κάθε γεννήτρια.



Μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου.



Λύση(1)

Για την πλευρά υψηλής τάσης επιλέγουμε βάσεις **100 MVA, 150 KV**. Τότε η βάση τάσης στην πλευρά χαμηλής τάσης είναι **13.8 KV**.

$$\text{Γεννήτρια 1: } X''_d = 0.2 \frac{100}{75} = 0.266 \text{ pu}$$

$$\text{Γεννήτρια 2: } X''_d = 0.2 \frac{100}{25} = 0.8 \text{ pu}$$

$$\text{Μετασχηματιστής: } X = 10 \text{ pu}$$

Η βάση αντίστασης στην πλευρά υψηλής τάσης είναι:

$$Z_b = \frac{150^2}{100} = 225 \Omega$$

και η επαγωγική αντίσταση της γραμμής είναι:

$$X = \frac{10.8}{225} = 0.048 \text{ pu}$$

Η προσφαλματική τάση στο **F** είναι:

$$V_F^0 = \frac{155}{150} = 1.033 \text{ pu}, \text{ και φασική γωνία } 0^\circ, \text{ εφ' όσον το δίκτυο είναι αφόρτιστο.}$$

Με τη χρήση των παραπάνω αποτελεσμάτων κατασκευάζουμε το ισοδύναμο Thevenin.



Λύση(2)

Η εσωτερική αντίσταση του κυκλώματος είναι:

$$Z_{\varepsilon\sigma} = j \frac{0.266 \cdot 0.8}{0.266 + 0.8} + j0.1 + j0.048 = j0.348 \text{ pu}$$

Το υπομεταβατικό ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I'' = \frac{1.033}{j0.348} = -j2.972 \text{ pu}$$

Επειδή αυτό το ρεύμα διαιρείται μεταξύ των δύο γεννητριών αντιστρόφως ανάλογα των επαγωγικών αντιστάσεων τους, έχουμε:

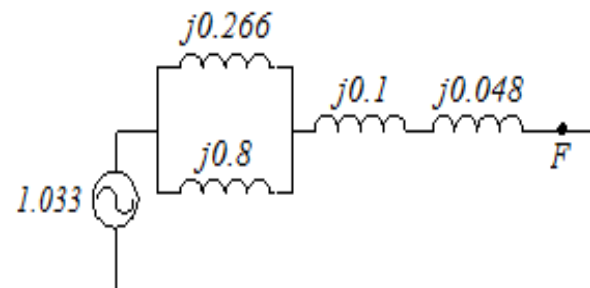
$$\text{Στη γεννήτρια 1: } I'' = -j2.972 \text{ pu} * \frac{0.8}{1.066} = -j2.23 \text{ pu}$$

$$\text{Στη γεννήτρια 2: } I'' = -j2.972 \text{ pu} * \frac{0.266}{1.066} = -j0.742 \text{ pu}$$

Τα ρεύματα αυτά σε A είναι:

$$\text{Στη γεννήτρια 1: } I'' = 2.23 * \frac{100000}{\sqrt{3} * 13.8} = 9329.64 \text{ A}$$

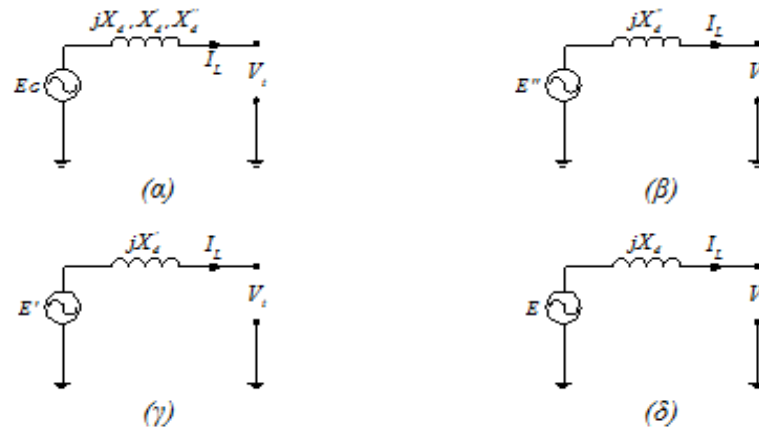
$$\text{Στη γεννήτρια 2: } I'' = 0.742 * \frac{100000}{\sqrt{3} * 13.8} = 3104.3 \text{ A}$$



Ισοδύναμο Thevenin ως προς F.



Εσωτερικές τάσεις φορτισμένων μηχανών σε μεταβατικές συνθήκες



Σχ.2.16 Ισοδύναμα κυκλώματα γεννητριών.

Στα ισοδύναμα αυτά κυκλώματα ο υπολογισμός των εσωτερικών τάσεων των γεννητριών για τη μελέτη των βραχυκυκλωμάτων γίνεται από τις σχέσεις:

$$E'' = V_t + jI_L X''_d$$

$$E' = V_t + jI_L X'_d$$

$$E = V_t + jI_L X_d$$

Οι εσωτερικές τάσεις των σύγχρονων κινητήρων, για μελέτες σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μετά το βραχυκύκλωμα, δίδονται από τις σχέσεις:

$$E'' = V_t - jI_L X''_d$$

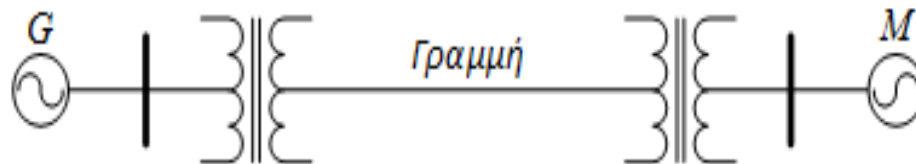
$$E' = V_t - jI_L X'_d$$

$$E = V_t - jI_L X_d$$



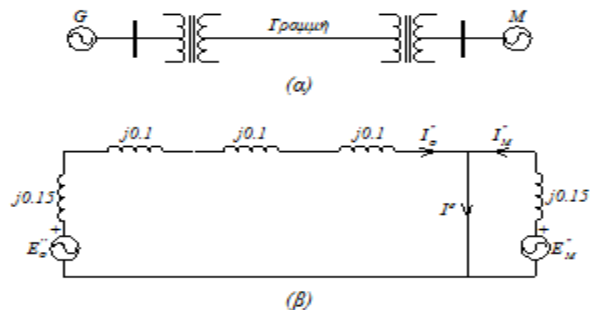
Παράδειγμα

Μια σύγχρονη γεννήτρια και ένας σύγχρονος κινητήρας έχουν ονομαστικές τιμές **25 MVA**, **11 KV**, υπομεταβατικές επαγωγικές αντιστάσεις **15%** και συνδέονται μέσω μετασχηματιστών και μιας γραμμής, Σχ. 2.17α. Η γραμμή έχει επαγωγική αντίσταση $X_L = 10\%$ στη βάση των μετασχηματιστών και οι μετασχηματιστές με ονομαστικές τιμές **25 MVA**, **11/150 KV** έχουν επαγωγική αντίσταση σκέδασης $X_t = 10\%$. Ο κινητήρας απορροφά **15 MW**, με τάση **10.6 KV** και συντελεστή ισχύος **0.8 χωρητικό**, όταν ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα συμβαίνει στους ακροδέκτες του κινητήρα. Να υπολογίσετε τα υπομεταβατικά ρεύματα στη γεννήτρια, στον κινητήρα και στο βραχυκύκλωμα με τη χρήση **α)** των εσωτερικών τάσεων των μηχανών **β)** με το θεώρημα Thevenin.



Λύση(1)

α) Εκλέγουμε βάσεις τα 25 MVA, 11 KV στη γεννήτρια και κινητήρα και 150 KV στη γραμμή. Όλες οι αντιστάσεις έχουν δοθεί σε αυτό το σύστημα βάσεων.



Κύκλωμα του παραδείγματος.

α) Μονοφασικό διάγραμμα του συστήματος.

β) Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος.

Χρησιμοποιούμε σαν διάνυσμα αναφοράς την προσφαιματική τάση στο βραχυκύκλωμα, που είναι:

$$V^{\sigma} = \frac{10.6}{11} = 0.9636 \angle 0^{\circ} pu$$

$$\text{Βάση ρεύματος στις μηχανές} = \frac{25000}{\sqrt{3} \cdot 11} = 1312.16 A$$

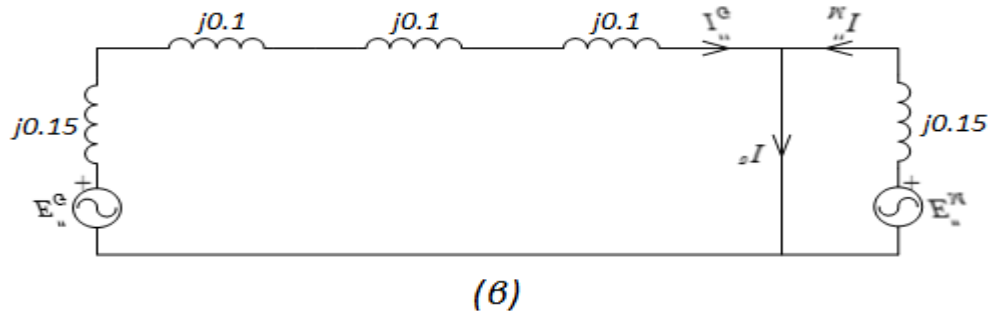
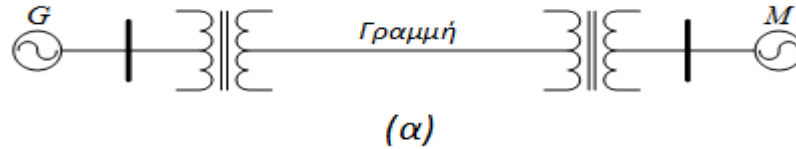
Το ρεύμα φορτίου έχει γωνία χωρητική 36.9° (0.8 χωρητικός συντελεστής ισχύος) και ισούται με:

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 10.6 \cdot 0.8} \angle 36.9^{\circ} A = 1021.26 \angle 36.9^{\circ} A = \frac{1021.26}{1312.16} \angle 36.9^{\circ} A = \\ &= 0.7783 \angle 36.9^{\circ} A = 0.6224 + j0.4673 pu \end{aligned}$$





Λύση(2)



$E''_G = 0.9636 \angle 0^\circ + j(0.15 + 0.1 + 0.1 + 0.1) * 0.7738 \angle 36.9^\circ = 0.7536 + j0.28 pu$
και το υπομεταβατικό ρεύμα, που τροφοδοτεί στο βραχυκύκλωμα:

$$I''_G = \frac{E''_G}{j(X''_d + X_L + 2X_t)} = \frac{0.7536 + j0.28}{j(0.15 + 0.1 + 0.1 + 0.1)} = 0.6222 - j1.6746 pu$$

Για τον κινητήρα:

$$E''_M = V_t - jX''_d I_L = 0.9636 \angle 0^\circ - j0.15 * 0.7783 \angle 33.62^\circ = 1.0336 - j0.0933 pu$$

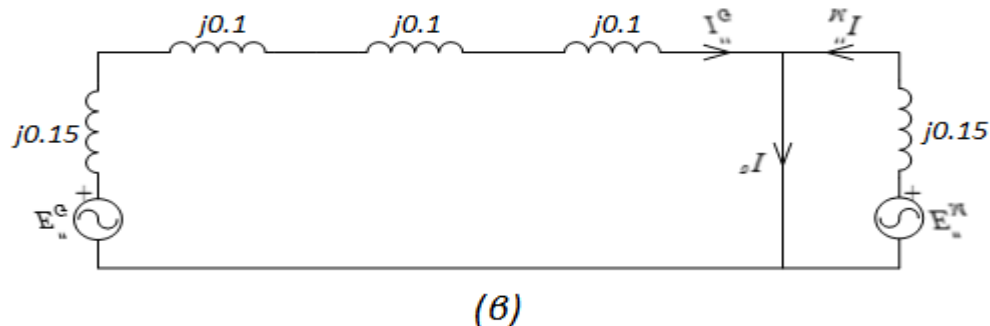
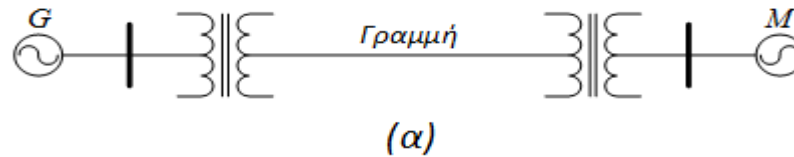
$$I''_M = \frac{E''_M}{jX''_d} = \frac{1.0336 - j0.0933}{j0.15} = -0.6222 - j6.8906 pu$$

Στο βραχυκύκλωμα:

$$I'' = I''_G + I''_M = 0.6222 - j1.6746 pu - 0.6222 - j6.8906 = -j8.5653 pu =$$

$$= -j8.5653 pu * 1312.16 = -j11239 A$$

Λύση(3)



β) Η αντίσταση στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin είναι:

$$Z = j \frac{0.45 \cdot 0.15}{0.45 + 0.15} = j0.1125 \text{ pu}$$

Η προσφαλματική τάση στη θέση του βραχυκυκλώματος είναι:

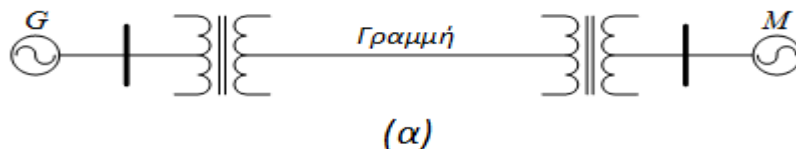
$$V^{\sigma} = 0.9636 / _0^{\circ} \text{ pu}$$

Το υπομεταβατικό ρεύμα στο βραχυκύκλωμα είναι:

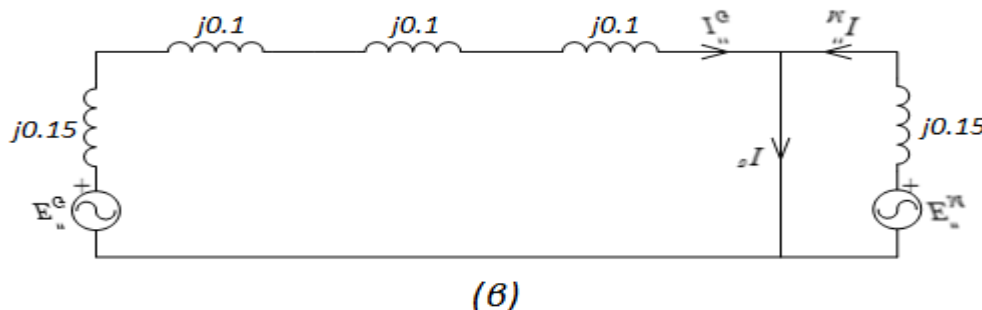
$$I'' = \frac{0.9636}{j0.1125} = -j8.5653 \text{ pu}$$

όπως στην περίπτωση (α).





Λύση(4)



Το υπομεταβατικό ρεύμα στο βραχυκύκλωμα διαιρείται μεταξύ της γεννήτριας και του κινητήρα αντιστρόφως ανάλογα των αντιστάσεων:

Μεταβολή ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας:

$$-j8.5653 * \frac{j0.15}{j0.6} = -j2.1413 pu$$

Μεταβολή ρεύματος στην πλευρά του κινητήρα:

$$-j8.5653 * \frac{j0.45}{j0.6} = -j6.424 pu$$

Οι τελικές τιμές των ρευμάτων ισούνται με τα προηγούμενα ρεύματα συν το ρεύμα φορτίου:

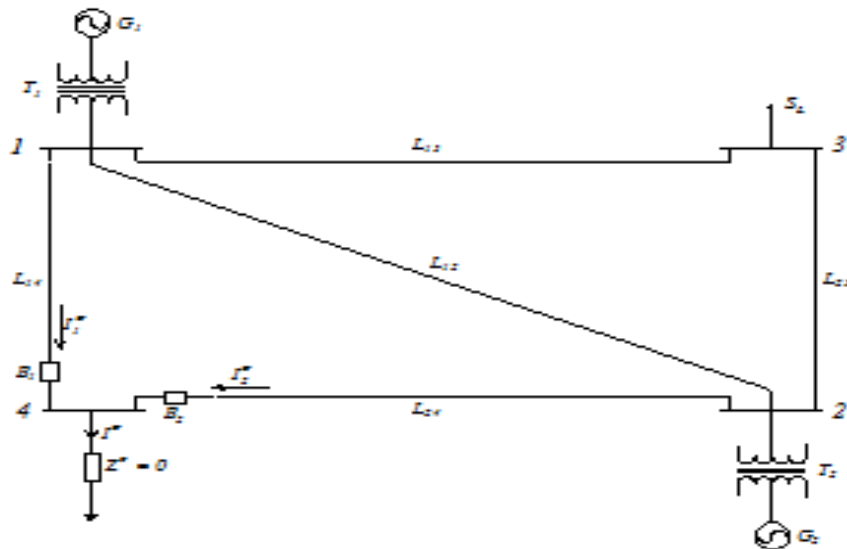
$$I''_G = 0.6224 + j0.4673 - j2.1413 = 0.6224 - j1.674 pu$$

$$I''_M = -0.6224 - j0.4673 - j6.424 = -0.6224 - j6.8913 pu$$

Τα MVA βραχυκυκλώματος είναι: $\sqrt{3} * 10.6 * 11.239 = 206.34 MVA$

Διευκρινιστικό παράδειγμα για την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων

- Υποθέτουμε ότι ένα συμμετρικό τριφασικό βραχυκύκλωμα συμβαίνει στο ζυγό 4 του δικτύου. Θα επιλύσουμε το πρόβλημα με τεχνικές προσέγγισης, ενώ στην επόμενη παράγραφο θα περιγράψουμε τη γενική μέθοδο, που χρησιμοποιούμε για τη λεπτομερή επίλυση του προβλήματος με υπολογιστή.



Πορεία της λύσης

- Για την ανάλυση θα ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα:
- **1.** Κατασκευάζουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου πριν από το βραχυκύκλωμα.
- **2.** Προσδιορίζουμε την κατανομή ρευμάτων και τάσεων σε όλο το δίκτυο πριν το βραχυκύκλωμα, με μια μελέτη ροής φορτίου.
- **3.** Προσδιορίζουμε τις μεταβολές ρευμάτων και τάσεων σε όλο το δίκτυο, που οφείλονται στο βραχυκύκλωμα.
- **4.** Για τον υπολογισμό των τελικών ρευμάτων και τάσεων μετά το βραχυκύκλωμα, υπερθέτουμε τις αρχικές τιμές τους (βήμα **2**) και τις μεταβολές τους (βήμα **3**).

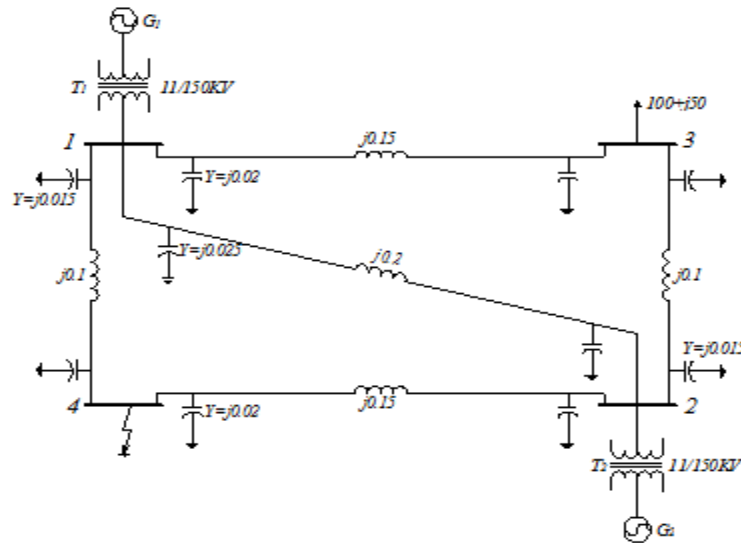


Κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος(1)

- Για το δίκτυο του Σχ. 2.8 δίνονται τα εξής δεδομένα. Οι ονομαστικές τιμές των γεννητριών είναι **11 KV, 100 MVA** με μεταβατική επαγωγική αντίσταση **10%**. Οι μετασχηματιστές έχουν ονομαστικές τιμές **11/150 KV, 100 MVA** και **X=5%**. Οι γραμμές παριστάνονται με το ισοδύναμο π και έχουν τις παραμέτρους που φαίνονται στο Σχ. 2.18, σε pu με βάσεις **100 MVA, 150 KV**. Το φορτίο στο ζυγό 3 είναι **100 MW+j50 Mvar**.



Κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος(2)



Το δίκτυο που μελετάται.

Χρησιμοποιούμε βάσεις τα **100 MVA** και **11 KV** στην πλευρά των γεννητριών και **150 KV** στην πλευρά των γραμμών.

Κάθε γεννήτρια παριστάνεται με μια ΗΕΔ σε σειρά με τη μεταβατική επαγωγική αντίσταση, επειδή ενδιαφερόμαστε για τις τιμές τάσεων και ρευμάτων τρεις-τέσσερις κύκλους μετά το βραχυκύκλωμα. Τους μετασχηματιστές τους παριστάνουμε με την επαγωγική αντίσταση σκέδασης τους. Η ολική επαγωγική αντίσταση των $G_1 + T_1$ και $G_2 + T_2$ είναι 0.15 pu ⁵⁹

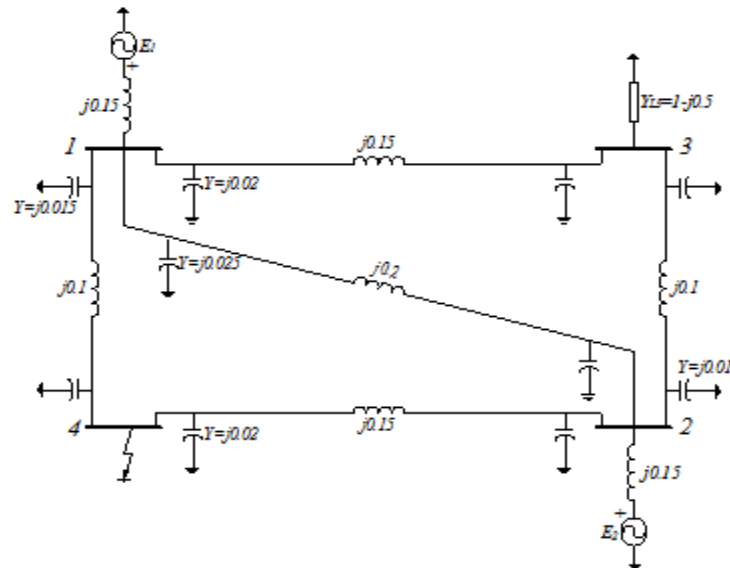
Κατασκευή του ισοδύναμου κυκλώματος(3)

Αν υποθέσουμε ότι οι προσφαλματικές τάσεις είναι **1 pu** και δεχθούμε ότι τα φορτία είναι σύνθετες αγωγιμότητες (αυτή είναι η πρώτη προσέγγιση στην ανάλυσή μας) μπορούμε να παραστήσουμε το φορτίο στο ζυγό **3** με τη σύνθετη αγωγιμότητα Y_{L3} , που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = VI^* = V(VY)^* = |V|^2 Y^* \text{ pu}$$

Επειδή $S_{L3} = 100 \text{ MW} + j50 \text{ MVar} = 1 + j0.5 \text{ pu}$ έχουμε:

$$1 + j0.5 = |1.0|^2 Y^*_{L3} \text{ δηλαδή } Y^*_{L3} = 1 - j0.5 \text{ pu}$$



Ισοδύναμο κύκλωμα με τις παραμέτρους του.



Ρεύματα και τάσεις πριν το βραχυκύκλωμα

- Εφ' όσον ξέρουμε τις ισχείς όλων των ζυγών και τις προδιαγραφές τάσεων, μπορούμε να κάνουμε μια μελέτη ροής φορτίου για τον υπολογισμό όλων των προσφαλματικών τάσεων και ρευμάτων. Για να αποφύγουμε αυτή τη μελέτη δεχόμαστε τις παρακάτω προσεγγίσεις:

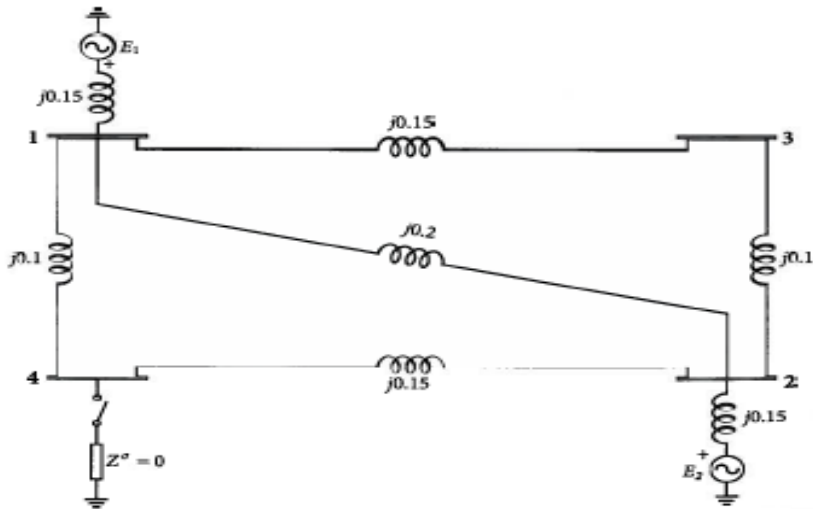
- **1.** Όλες οι προσφαλματικές τάσεις είναι 1 pu (προσέγγιση 2)
- **2.** Όλα τα προσφαλματικά ρεύματα είναι μηδέν (προσέγγιση

Η δεύτερη προσέγγιση συνεπάγεται ότι:

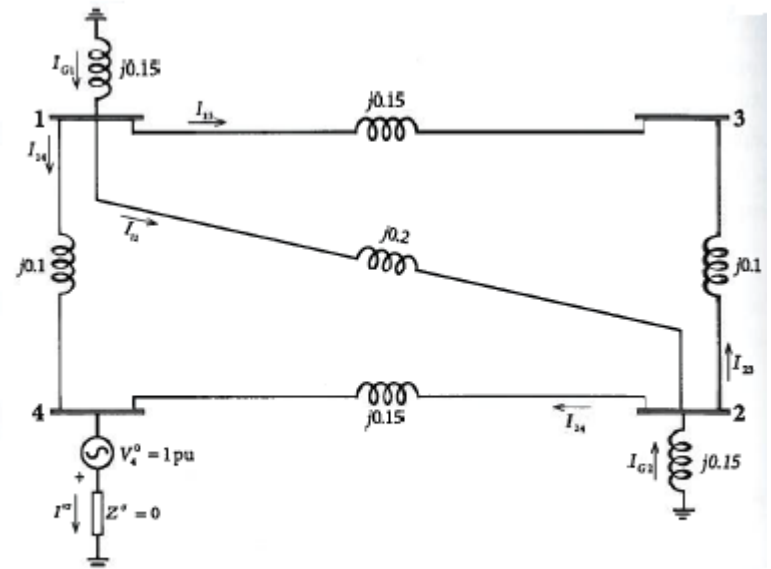
- **α.** Όλες οι εγκάρσιες αγωγιμότητες των γραμμών είναι μηδέν.
- **β.** Παραλείπουμε τις αγωγιμότητες των φορτίων, που είναι περίπου 1 pu και επομένως δέχονται ρεύματα της τάξης του 1 pu.

Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων(1)

Θα υπολογίσουμε τώρα με το θεώρημα Thevenin τις μεταβολές των ρευμάτων και των τάσεων λόγω του βραχυκυκλώματος στο ζυγό 4.



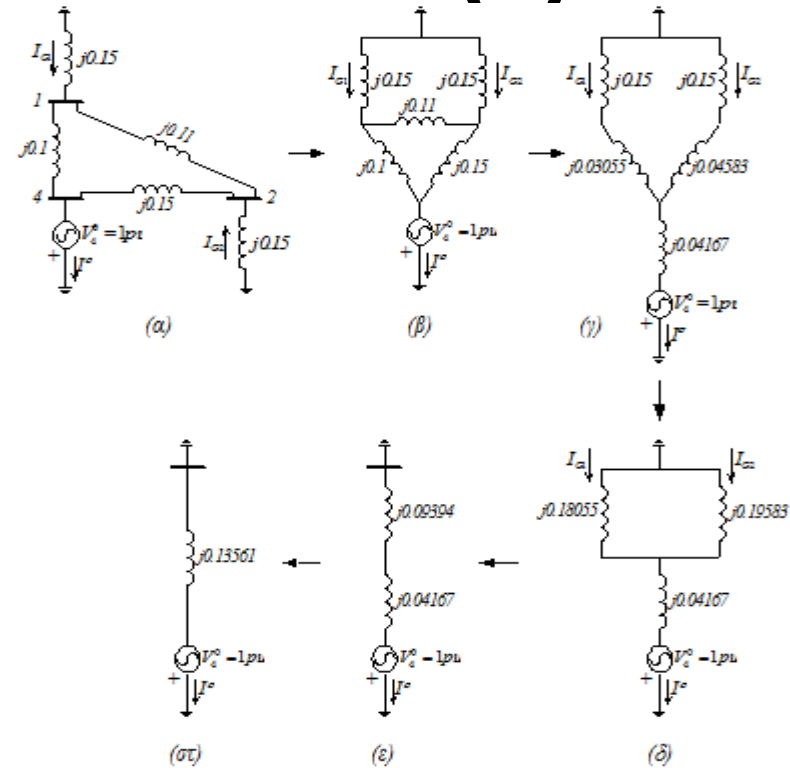
Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου.



Ισοδύναμο κατά Thevenin του κυκλώματος του Σχ. 5.20.



Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων(2)



Διαδοχικά βήματα απλοποίησης του ισοδύναμου δικτύου κατά Thevenin.

$$I^{\sigma} = \frac{1.0}{j0.13561} = -j7.37409 \text{ pu}$$

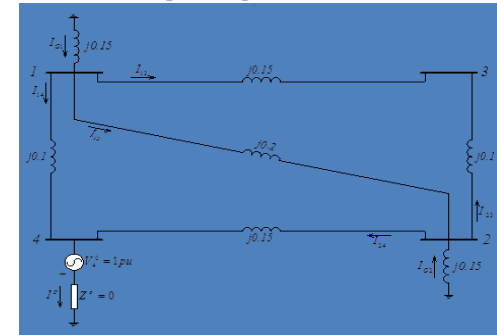
όπου η τάση V_4^0 έχει επιλεγεί σαν διάνυσμα αναφοράς.

Από το Σχ. 2.22δ μπορούμε να βρούμε αμέσως πως το ρεύμα σφάλματος διαιρείται μεταξύ των δύο γεννητριών. Παίρνουμε:

$$I_{G1} = \frac{j0.19583}{j0.19583+j0.18055} I^{\sigma} = -j3.83673 \text{ pu}$$

$$I_{G2} = I^{\sigma} - I_{G1} = -j3.53736 \text{ pu}$$

Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων(3)



$$I_{G2} = I^{\sigma} - I_{G1} = -j3.53736 \text{ pu}$$

Από το Σχ. 2.22α υπολογίζουμε τις μεταβολές των τάσεων στους ζυγούς 1 και 2, που είναι αρνητικές, δηλαδή μειώσεις των τάσεων λόγω του βραχυκυκλώματος. Έχουμε:

$$\Delta V_1 = 0 - (j0.15)(-j3.83673) = -0.57551 \text{ pu}$$

$$\Delta V_2 = 0 - (j0.15)(-j3.53736) = -0.5306 \text{ pu}$$

Η αλλαγή της τάσης στο ζυγό 3 υπολογίζεται από το Σχ. 2.21. Έχουμε:

$$I_{13} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{j0.15 + j0.1} = j0.17964 \text{ pu}$$

$$\Delta V_3 = \Delta V_1 - (j0.15 * j0.17964) = -0.57551 + 0.02695 = -0.54856 \text{ pu}$$

Η αλλαγή της τάσης στο ζυγό 4 είναι προφανώς:

$$\Delta V_4 = -1.0 \text{ pu}$$

Οι αλλαγές αυτές στις τάσεις ζυγών αποτελούν το διάνυσμα τάσεων ζυγών του Thevenin ΔV_T , που είναι:

Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων(4)

$$\Delta V_T = \begin{bmatrix} \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 1} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 2} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 3} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.57551 \\ -0.53060 \\ -0.54856 \\ -1.00000 \end{bmatrix}$$

Από τις αλλαγές των τάσεων ζυγών παίρνουμε τις αλλαγές των ρευμάτων στις γραμμές, που είναι:

$$I_{12} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{j0.2} = \frac{-0.57551 + 0.53060}{j0.2} = j0.22455 \text{ pu}$$

$$I_{13} = -I_{23} = j0.17964 \text{ pu}$$

$$I_{14} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_4}{j0.1} = \frac{-0.57551 + 1.0}{j0.1} = -j4.2449 \text{ pu}$$

$$I_{24} = \frac{\Delta V_2 - \Delta V_4}{j0.15} = \frac{-0.54856 + 1.0}{j0.15} = -j3.12933 \text{ pu}$$

$$\Delta V_T = \begin{bmatrix} \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 1} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 2} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 3} \\ \text{αλλαγή τάσης στο ζυγο 4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.57551 \\ -0.53060 \\ -0.54856 \\ -1.00000 \end{bmatrix}$$

Από τις αλλαγές των τάσεων ζυγών παίρνουμε τις αλλαγές των ρευμάτων στις γραμμές, που είναι:

$$I_{12} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_2}{j0.2} = \frac{-0.57551 + 0.53060}{j0.2} = j0.22455 \text{ pu}$$

$$I_{13} = -I_{23} = j0.17964 \text{ pu}$$

$$I_{14} = \frac{\Delta V_1 - \Delta V_4}{j0.1} = \frac{-0.57551 + 1.0}{j0.1} = -j4.2449 \text{ pu}$$

$$I_{24} = \frac{\Delta V_2 - \Delta V_4}{j0.15} = \frac{-0.54856 + 1.0}{j0.15} = -j3.12933 \text{ pu}$$



Υπολογισμός των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων(5)

Ρεύματα και τάσεις μετά το βραχυκύκλωμα.

Με υπέρθεση των μεταβολών των ρευμάτων και τάσεων στις προσφαλματικές τιμές τους παίρνουμε τις τελικές τιμές, που είναι:

$$|V^\sigma_1| = |V^0_1 + \Delta V_1| = |1.0 - 0.57551| = 0.42449 \text{ pu}$$

$$|V^\sigma_2| = |V^0_2 + \Delta V_2| = |1.0 - 0.5306| = 0.4694 \text{ pu}$$

$$|V^\sigma_3| = |V^0_3 + \Delta V_3| = |1.0 - 0.54856| = 0.45144 \text{ pu}$$

$$|V^\sigma_4| = 0 \text{ pu}$$

$$I^\sigma = 7.37409 \text{ pu (ακριβώς)}$$

$$|SCC| = 7.37409 \text{ pu} = 7.37409 * 100 \text{ MVA} = 737.409 \text{ MVA}$$





Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος(1)

Το θεώρημα του Thevenin μας δίνει τις μετασφαλματικές τάσεις V^σ_{bus} με υπέρθεση των προσφαλματικών τάσεων V^0_{bus} και των μεταβολών τους ΔV_T , δηλαδή:

$$V^\sigma_{bus} = V^0_{bus} + \Delta V_T$$

όπου το διάνυσμα V^0_{bus} θεωρείται γνωστό, υπολογισμένο από τη μελέτη ροής φορτίου, που πρέπει οπωσδήποτε να προηγηθεί.

Θα εξετάσουμε τώρα με τι ισούται το **διάνυσμα τάσεων ζυγών του Thevenin** ΔV_T . Στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin έχουμε μόνο στο βραχυκυκλωμένο ζυγό ρεύμα πηγής, το $-I^\sigma$ και αποτέλεσμα αυτού του ρεύματος είναι το διάνυσμα τάσεων ΔV_T

Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος(2)

Αν λοιπόν στο δίκτυο των n -ζυγών υποθέσουμε ένα βραχυκύκλωμα στο ζυγό ν , κάνοντας χρήση των γενικών εξισώσεων ροής ισχύος, μπορούμε να γράψουμε ότι:

$$\Delta V_T = Z_{bus} J_{bus}^\sigma$$

όπου Z_{bus} είναι η γνωστή μας $n \times n$ μήτρα συνθέτων αντιστάσεων των ζυγών για το δίκτυο και:

$$J_{bus}^\sigma = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ -I^\sigma \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix}$$

Άρα:

$$V_{bus}^\sigma = V_{bus}^0 + Z_{bus} J_{bus}^\sigma$$

Αυτή τη διανυσματική εξίσωση τη γράφουμε αναλυτικά και παίρνουμε:

$$V_{1}^\sigma = V_{1}^0 - Z_{1\nu} I^\sigma$$

.....

$$V_{\nu}^\sigma = V_{\nu}^0 - Z_{\nu\nu} I^\sigma$$



Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος(3)

$$\text{Αλλά: } V_{\nu}^{\sigma} = Z^{\sigma} I^{\sigma}$$

όπου Z^{σ} είναι η σύνθετη αντίσταση του βραχυκυκλώματος.

Το δεξιό μέρος αυτής της εξίσωσης το εξισώνουμε με το δεξιό μέρος της νιοστής εξίσωσης, οπότε παίρνουμε:

$$Z^{\sigma} I^{\sigma} = V_{\nu}^0 - Z_{\nu\nu} I^{\sigma} \quad \text{ή} \quad I^{\sigma} = \frac{V_{\nu}^0}{Z^{\sigma} + Z_{\nu\nu}}$$

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει το σημαντικό συμπέρασμα ότι τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας Z_{bus} είναι οι εσωτερικές αντιστάσεις του δικτύου, όπως φαίνονται από τους αντίστοιχους ζυγούς.

Αντικαθιστούμε αυτή την εξίσωση, οπότε παίρνουμε τους πιο κάτω γενικούς τύπους για τον υπολογισμό των τάσεων ζυγών μετά το βραχυκύκλωμα:

$$V_{\mu}^{\sigma} = V_{\mu}^0 - \frac{Z_{\mu\nu}}{Z^{\sigma} + Z_{\nu\nu}} V_{\nu}^0 \quad \text{για } \mu \neq \nu \text{ και } \mu = 1, 2, 3 \dots, \nu$$

$$V_{\nu}^{\sigma} = \frac{Z^{\sigma}}{Z^{\sigma} + Z_{\nu\nu}} V_{\nu}^0 \quad \text{για } \mu = \nu$$



Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος(4)

Για στερεό βραχυκύκλωμα ($Z^\sigma = \mathbf{0}$), οι σχέσεις απλοποιούνται στις:

$$I^\sigma = \frac{V^0_\nu}{Z_{\nu\nu}}$$

$$V^\sigma_\mu = V^0_\mu - \frac{Z_{\mu\nu}}{Z_{\nu\nu}} V^0_\nu \quad \text{για } \mu \neq \nu \text{ και } \mu = 1, 2, 3 \dots, \nu$$

$$V^\sigma_\nu = \mathbf{0}$$

Μετά τον υπολογισμό των μετασφαλματικών τάσεων, ο υπολογισμός του ρεύματος $I^\sigma_{i\mu}$ στη γραμμή που συνδέει τους τυχαίους ζυγούς i και μ , δίδεται από τη σχέση:

$$I^\sigma_{i\mu} = \frac{V^\sigma_i - V^\sigma_\mu}{Z_{i\mu}}$$

όπου $Z_{i\mu}$ είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση της γραμμής και το ρεύμα $I^\sigma_{i\mu}$ ορίζεται θετικό στη διεύθυνση $i \rightarrow \mu$.

Οι μήτρες Z_{bus} και Y_{bus} διαφέρουν από τις αντίστοιχες που χρησιμοποιούμε στη μελέτη ροής φορτίου, γιατί περιλαμβάνουν τις κατάλληλες επαγωγικές αντιστάσεις των σύγχρονων μηχανών και τις ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις των φορτίων.



Συστηματικός υπολογισμός βραχυκυκλώματος(5)

Διάβασε τις τάσεις ζυγών πριν το βραχυκύκλωμα υπολογισμένες με κατάλληλο πρόγραμμα μελέτης ροής φορτίου.

Σχημάτισε την Y_{bus} και υπολόγισε την Z_{bus} .

Υπολόγισε:

- 1. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης από την εξ. 2.36 ή 2.38.*
- 2. Τις τάσεις των ζυγών μετά το βραχυκύκλωμα από την εξ. 2.37 ή 2.38.*
- 3. Τα ρεύματα των γραμμών μετά το βραχυκύκλωμα από την εξ. 2.39.*



Βιβλιογραφία

- Όλα τα σχήματα, οι εικόνες και τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την ενότητα είναι από το βιβλίο «Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ν. Α. Βοβός, Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Εκδόσεις Ζήτη.



Χρηματοδότηση

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

