

Νικόλαος Α. Βοβός

Καθ. Πανεπιστημίου

Πανεπιστήμιο Πατρών

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ & ΛΥΣΕΙΣ



ISBN 978-960-456-258-9

© Copyright: Βοβός Α. Νικόλαος, Εκδόσεις Ζήτη, Ιανουάριος 2011

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού νόμου (Ν.2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής άδειας του εκδότη και συγγραφέα κατά οποιοδήποτε τρόπο ή μέσο αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική ή άλλη) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.

Φωτοστοιχειοθεσία Π. ΖΗΤΗ & Σια ΟΕ

Εκτύπωση 18^ο χλμ Θεσσαλονίκης - Περαιάς
Βιβλιοδεσία Τ.Θ. 4171 • Περαιά Θεσσαλονίκης • Τ.Κ. 570 19
Τηλ.: 2392 072.222 - Fax: 2392 072.229 • e-mail: info@ziti.gr



www.ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΔΙΑΘΕΣΗ:

Αρμενοπούλου 27 - 546 35 Θεσσαλονίκη • Τηλ.: 2310 203.720 • Fax 2310 211.305
e-mail: sales@ziti.gr

ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ ΑΘΗΝΩΝ - ΕΝΩΣΗ ΕΚΔΟΤΩΝ ΒΙΒΛΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ:

Στοά του Βιβλίου (Πεσμαζόγλου 5) - 105 64 ΑΘΗΝΑ • Τηλ.-Fax: 210 3211.097

ΑΠΟΘΗΚΗ ΑΘΗΝΩΝ - ΠΩΛΗΣΗ ΧΟΝΔΡΙΚΗ:

Ασκληπιού 60 - Εξάρχεια 114 71, Αθήνα • Τηλ.-Fax: 210 3816.650 • e-mail: athina@ziti.gr

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΒΙΒΛΙΟΠΩΛΕΙΟ: www.ziti.gr

Πρόλογος

Το παρόν βοήθημα είναι ένα απαραίτητο συμπλήρωμα στην κατανόηση των θεμάτων, που σχετίζονται με την Ανάλυση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ).

Οι εκφωνήσεις των προβλημάτων του βοηθήματος περιλαμβάνονται και στα αντίστοιχα κεφάλαια του ομότιτλου βιβλίου, στο οποίο αναπτύσσεται και η απαραίτητη θεωρία για την επίλυσή τους. Εν τούτοις το βοήθημα, επειδή περιλαμβάνει τις εκφωνήσεις και τις λύσεις των προβλημάτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτοδύναμα από όλους τους φοιτητές των Τμημάτων Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, καθώς και νέους και έμπειρους ηλεκτρολόγους μηχανικούς.

Τα προβλήματα που επιλύονται, έχουν επιλεγεί, ώστε να διευκρινίζουν τα σημαντικά θέματα που ανακύπτουν κατά την λύση των δύσκολων προβλημάτων των ΣΗΕ.

Στόχος του βοηθήματος είναι να μεταδώσει στο μηχανικό τη μεθοδολογία σκέψης για την επίλυση των προβλημάτων με παραδοσιακές και σύγχρονες μεθόδους. Παρόλο που παρόμοιες εκδόσεις με το παρόν βοήθημα δεν είναι συχνές στην Ελληνική και Διεθνή αγορά, θεωρώ εξαιρετικά πολύτιμη τη συνεισφορά του στην πληρότητα της κατανόησης των θεωρητικών γνώσεων.

Πάτρα, Ιανουάριος 2011

Καθηγητής Ν. Α. Βοβός

Περιεχόμενα

Προβλήματα και Λύσεις

Κεφάλαιο 5:

Κυματικά Φαινόμενα και Ανάλυση Συμμετρικών Βραχυκυκλωμάτων.....7

Κεφάλαιο 6:

Συμμετρικές Συνιστώσες και Ακολουθιακά Δίκτυα..... 27

Κεφάλαιο 7:

Ασύμμετρα Βραχυκυκλώματα..... 39

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΛΥΣΕΙΣ

5^ο Κεφάλαιο

ΚΥΜΑΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

5.1 Κατασκευάστε το δικτυωτό (lattice) διάγραμμα για το ρεύμα και σχεδιάστε το ρεύμα συναρτήσεως του χρόνου στην αρχή της γραμμής του Παραδείγματος 5.1, όταν η γραμμή τερματίζεται σε:

- Ανοικτοκύκλωμα,
- Βραχυκύκλωμα.

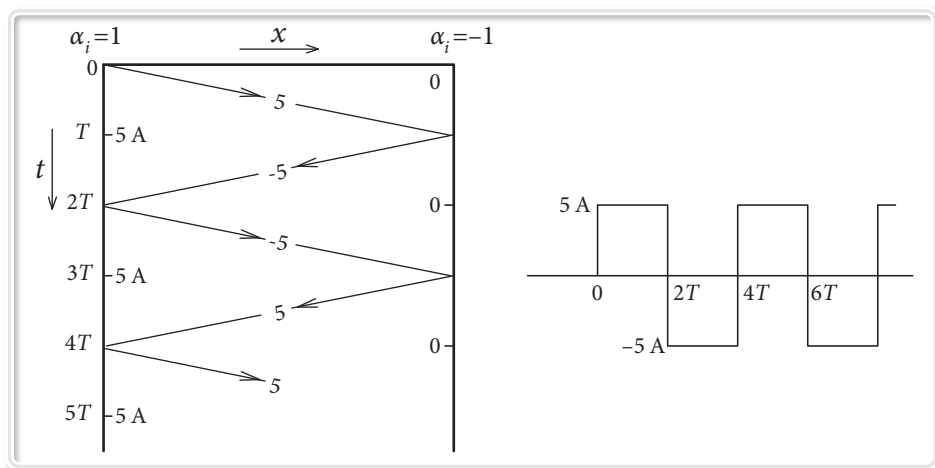
Λύση:

α) Για $R = \infty$ έχουμε για το ρεύμα:

$$a_i = -\frac{R - R_W}{R + R_W} = -\frac{1 - \frac{R_W}{R}}{1 + \frac{R_W}{R}} = -1 \quad \text{για το τέλος της γραμμής}$$

$$a_i = -\frac{0 - R_W}{0 + R_W} = +1 \quad \text{για την αρχή της γραμμής}$$

$$\text{Αρχικά: } i_1 = \frac{u_1}{R_W} = \frac{200}{40} = 5 \text{ A}$$

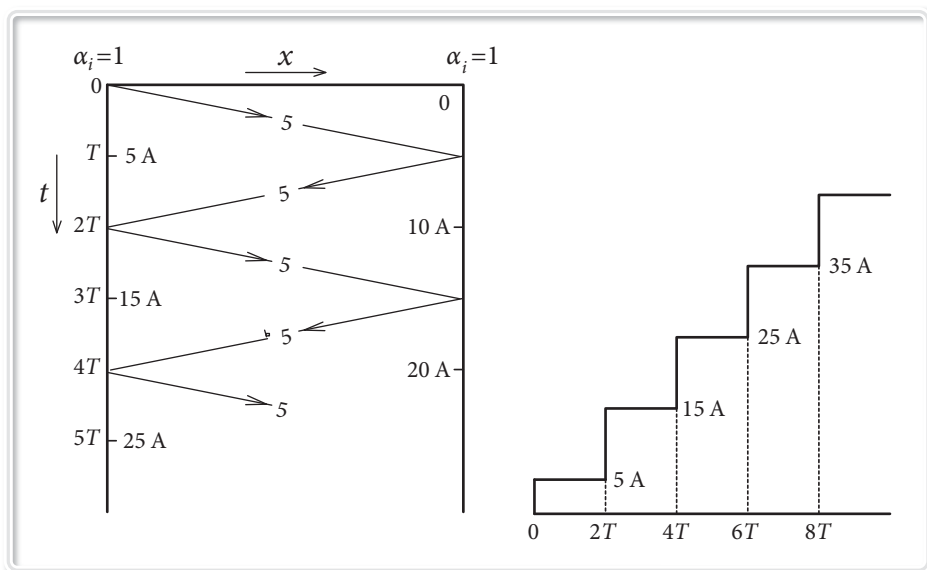


β) Για $R=0$ έχουμε για το ρεύμα:

$$a_i = -\frac{0 - R_W}{0 + R_W} = 1 \quad \text{για το τέλος της γραμμής}$$

$$a_i = -\frac{0 - R_W}{0 + R_W} = 1 \quad \text{για την αρχή της γραμμής}$$

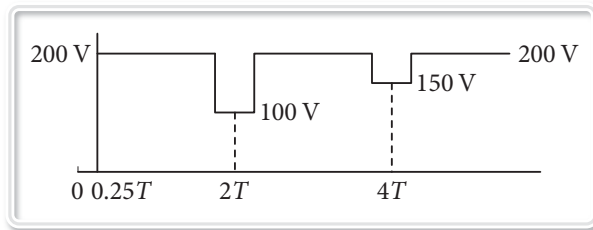
$$\text{Αρχικά: } i_1 = \frac{200}{40} = 5 \text{ A}$$



5.2 Σχεδιάστε την τάση συναρτήσει του χρόνου για τη γραμμή του Παραδείγματος 5.1 στο σημείο που απέχει από την αρχή της γραμμής $\frac{1}{4}$ του μήκους της γραμμής, όταν η γραμμή τερματίζεται με την αντίσταση $R = 13.33 \Omega$.

Λύση:

Θεωρούμε μια κατακόρυφη γραμμή σε μία απόσταση $\frac{1}{4}$ του μήκους της γραμμής από την αρχή, στο Σχ. 5.4β. Αυτή τέμνει τις πλάγιες γραμμές στους χρόνους $t=0.25T, 1.75T, 2.25T, 3.75T, 4.25T$ κ.λ.π. Οι αλλαγές της τάσης γίνονται αυτούς τους χρόνους σ' αυτό το σημείο. Το άθροισμα της προσπίπτουσας και της ανακλώμενης τάσης δίνεται από τις τιμές μεταξύ των πλαγίων γραμμών στο δεξιό άξονα, που προσδιορίζουν τις τιμές του διαγράμματος που ακολουθεί.



5.3 Να λύσετε το Παράδειγμα 5.1β όταν σε σειρά με την πηγή υπάρχει μια αντίσταση 60Ω .

Λύση:

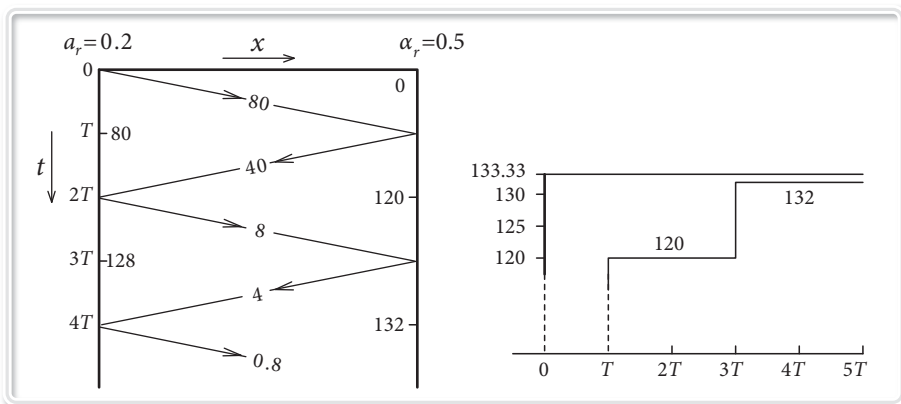
Συντελεστές ανάκλασης για την τάση:

$$a_r = \frac{60 - 40}{60 + 40} = 0.2 \quad \text{για την αρχή της γραμμής}$$

$$a_r = \frac{120 - 40}{120 + 40} = 0.5 \quad \text{για το τέλος της γραμμής}$$

Η αρχική τάση που εφαρμόζεται στη γραμμή είναι:

$$\frac{40}{40 + 60} 200 = 80 \text{ V}$$



Η τελική τάση στο τέλος της γραμμής:

$$\frac{120}{120 + 60} 200 = 133.33 \text{ V}$$

- 5.4 Μια εναέρια γραμμή με $R_w = 400\Omega$ συνδέεται με ένα υπόγειο καλώδιο με $R_w = 50\Omega$, που στο τέλος του είναι ανοικτοκυκλωμένο (υποθέτουμε μηδενικές απώλειες). Μια τάση ΣΡ, 120 V εφαρμόζεται στη γραμμή. Να υπολογίσετε:
- Την τάση στην ένωση γραμμής-καλωδίου αμέσως μετά την άφιξη του προσπίπτοντος κύματος.
 - Την τάση στο τέλος του καλωδίου αμέσως μετά την άφιξη του πρώτου κύματος τάσης.

Λύση:

- α) Στο τέλος της εναέριας γραμμής:

$$a_r = \frac{50 - 400}{50 + 400} = -0.777$$

και η τάση στην ένωση είναι:

$$120 - 0.777 \times 120 = 26.76 \text{ V}$$

που είναι η ανακλώμενη κυματική τάση, που ταξιδεύει κατά μήκος του καλωδίου.

- β) Στο τέλος του καλωδίου $a_r = 1$ και:

$$u_r = 26.76 + 26.76 = 53.52 \text{ V}$$

- 5.5 Ένας διακόπτης 69 kV, 1200 A έχει ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης 19 kA και ονομαστική μέγιστη τάση 72.5 kV. Υπολογίστε τη μέγιστη συμμετρική ικανότητα διακοπής ρεύματος του διακόπτη και εξηγήστε τη σημασία της για μικρότερες τάσεις λειτουργίας, αν ο διακόπτης έχει συντελεστή εύρους τάσης $K = 1.21$. (Ορίζεται: $K = \text{ονομαστική μέγιστη τάση} / \text{ελάχιστη τάση λειτουργίας}$ και η ελάχιστη τάση λειτουργίας προσδιορίζει τη μέγιστη συμμετρική ικανότητα διακοπής ρεύματος του διακόπτη. Για ονομαστική μέγιστη τάση ο διακόπτης πρέπει να μπορεί να διακόψει το ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης).

Λύση:

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας $V_{ελ}$ είναι:

$$V_{ελ} = \frac{\text{ονομαστική μέγιστη τάση}}{K} = \frac{72.5}{1.21} = 59.917 \text{ KV}$$

και το μέγιστο συμμετρικό ρεύμα διακοπής $I_{\mu\epsilon\gamma}$ προκύπτει από τη σχέση:

$$V_{\mu\epsilon\gamma} \times I_{\beta\rho.ov} = V_{\epsilon\lambda} \times I_{\mu\epsilon\gamma} \Rightarrow I_{\mu\epsilon\gamma} = \frac{V_{\mu\epsilon\gamma}}{V_{\epsilon\lambda}} I_{\beta\rho.ov} = K \times I_{\beta\rho.ov} = 1.21 \times 19 = 22.99 \text{ kA}$$

Το ρεύμα αυτό δεν πρέπει να ξεπερνάτε ποτέ, ακόμη και όταν $V < V_{\epsilon\lambda}$.

Ο διακόπτης δεν πρέπει να προσπαθήσει να διακόψει ρεύμα μεγαλύτερο από 22.99 kA και το εύρος τάσης λειτουργίας είναι 72.5-59.917 kV. Για τάση λειτουργίας π.χ. 65 kV το επιτρεπόμενο συμμετρικό ρεύμα βραχυκύκλωσης μπορεί να ξεπερνά τα 19 kA (είναι πάντοτε μικρότερο από 22.99 kA) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{\mu\epsilon\gamma} \times I_{\beta\rho.ov} = V \times I_{\epsilon\pi} \Rightarrow I_{\epsilon\pi} = \frac{V_{\mu\epsilon\gamma}}{V} I_{\beta\rho.ov} = \frac{72.5}{65} \times 19 = 21.19 \text{ kA}$$

5.6 Μια τάση με ενεργό τιμή (rms) 220 V, 50 Hz εφαρμόζεται σε ένα RL κύκλωμα με το κλείσιμο ενός διακόπτη. Αν $R = 18 \Omega$ και $L = 0.15 \text{ H}$ υπολογίστε:

- α)** Τη συνιστώσα ΣΡ με το κλείσιμο του διακόπτη, αν η στιγμιαία τιμή της τάσης είναι 100 V εκείνη τη στιγμή.
- β)** Τη στιγμιαία τιμή της τάσης, που θα δημιουργούσε τη μέγιστη συνιστώσα ΣΡ.
- γ)** Τη στιγμιαία τιμή της τάσης, που δεν θα δημιουργούσε συνιστώσα ΣΡ.
- δ)** Αν η τάση είναι μηδέν την ώρα που κλείνει ο διακόπτης, το στιγμιαίο ρεύμα 0.5, 1.5 και 5.5 κύκλους αργότερα.

Λύση:

α) $u = V_m \sin(\omega t + a)$

Για $t=0: 100 = \sqrt{2} \times 220 \sin a \Rightarrow a = 18.748^\circ$ ή 161.252°

$$Z = R + j\omega L = 18 + j2 \times \pi \times 50 \times 0.15 = 18 + j47.124 = 50.445 / \underline{69.094^\circ}$$

Για $t=0: i_{dc} = -\frac{\sqrt{2} \times 220}{50.445} \sin(18.748^\circ - 69.094^\circ) = 4.748 \text{ A}$

ή $i_{dc} = -\frac{\sqrt{2} \times 220}{50.445} \sin(161.252^\circ - 69.094^\circ) = -6.163 \text{ A}$

β) Μέγιστη συνιστώσα ΣΡ έχουμε όταν

$$a - \theta = \pm 90 \Rightarrow a = 159.094^\circ \text{ ή } a = -20.906^\circ,$$

$$\text{οπότε: } u = \sqrt{2} \times 220 \times \sin(159.094^\circ) = -\sqrt{2} \times 220 \times \sin(-20.906^\circ).$$

$$\text{Άρα: } u = \pm 111.021 \text{ V}$$

γ) Μηδενική συνιστώσα ΣΡ έχουμε όταν $a - \theta = 0^\circ$ ή 180° , δηλαδή όταν

$$a = 69.094^\circ \text{ ή } a = 249.094^\circ,$$

$$\text{οπότε: } u = \sqrt{2} \times 220 \times \sin(69.094^\circ) = -\sqrt{2} \times 220 \times \sin(249.094^\circ)$$

$$\text{Άρα: } u = \pm 290.644 \text{ V}$$

δ) Αν για $t = 0$ έχουμε $u = 0$, έχουμε $a = 0^\circ$.

0.5 κύκλους αργότερα έχουμε $\omega t = \pi$. Άρα:

$$t = \frac{\pi}{2\pi f} = \frac{1}{2 \times 50} = 0.01 \text{ s}$$

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

$$= \frac{\sqrt{2} \times 220}{50.445} \left[\sin(180^\circ - 69.094^\circ) - e^{-\frac{18}{0.15} \times 0.01} \sin(-69.094^\circ) \right] = 7.497 \text{ A}$$

1.5 κύκλους αργότερα $\omega t = 3\pi \Rightarrow t = 0.03 \text{ s}$. Άρα:

$$i = \frac{\sqrt{2} \times 220}{50.445} \left[\sin(3 \times 180^\circ - 69.094^\circ) - e^{-\frac{18}{0.15} \times 0.03} \sin(-69.094^\circ) \right] = 5.919 \text{ A}$$

5.5 κύκλους αργότερα $\omega t = 11\pi \Rightarrow t = 0.11 \text{ s}$. Άρα:

$$i = \frac{\sqrt{2} \times 220}{50.445} \left[\sin(11 \times 180^\circ - 69.094^\circ) - e^{-\frac{18}{0.15} \times 0.11} \sin(-69.094^\circ) \right] = 5.762 \text{ A}$$

Σημειώνουμε ότι $5 \times$ χρονική σταθερά $= 0.04166 \text{ s}$ και επομένως 0.11 s αργότερα (5.5 κύκλους) η συνιστώσα ΣΡ έχει πρακτικά μηδενισθεί.

- 5.7** Μια γεννήτρια 7.5 MVA, 6.9 kV με $X_d''=9\%$, $X_d'=15\%$ και $X_d=100\%$ συνδέεται μέσω διακόπτη 5 κύκλων με μετασχηματιστή. Η γεννήτρια λειτουργεί εν κενώ και με την ονομαστική της τάση, όταν συμβαίνει στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα μεταξύ διακόπτη και μετασχηματιστή. Να υπολογίσετε:
- α)** Το ρεύμα βραχυκύκλωσης μόνιμης κατάστασης στο διακόπτη.
 - β)** Το αρχικό συμμετρικό (rms) ρεύμα στο διακόπτη.
 - γ)** Τη μέγιστη δυνατή συνιστώσα ΣΡ του ρεύματος βραχυκύκλωσης στο διακόπτη.
 - δ)** Την απαιτούμενη ονομαστική στιγμιαία ένταση του ρεύματος στο διακόπτη.
 - ε)** Το ρεύμα που πρέπει να διακόψει ο διακόπτης.
 - στ)** Τα MVA που πρέπει να διακοπούν.

Λύση:

Η βάση του ρεύματος είναι:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b} = \frac{7.5}{\sqrt{3} \times 6.9} \text{ kA} = 0.62755 \text{ kA}$$

$$\alpha) \quad I^\sigma = \frac{V^\circ}{jX_d} = \frac{1}{j1} = -j \text{ pu} \Rightarrow I^\sigma = 0.62755 \text{ kA}$$

$$\beta) \quad I'' = \frac{V^\circ}{jX_d''} = \frac{1}{j0.09} = -j11.11 \text{ pu} \Rightarrow I'' = 6.97278 \text{ kA}$$

$$\gamma) \quad I_m^{\sigma\rho} = \sqrt{2}I'' = \sqrt{2} \times 6.97278 = 9.861 \text{ kA}$$

$$\delta) \quad 1.6 \times I'' = 11.15645 \text{ kA}$$

ε) Για διακόπτη 5 κύκλων η συνιστώσα ΣΡ λαμβάνεται υπόψη μ' ένα συντελεστή 1.1. Άρα:

$$I_\delta = 1.1 \times I'' = 1.1 \times 6.97278 = 7.67 \text{ kA}$$

στ) Ο υπολογισμός γίνεται με χρήση του I_δ .

$$|SCC| = \sqrt{3} \times 6.9 \times 7.67 = 91.665 \text{ MVA}$$