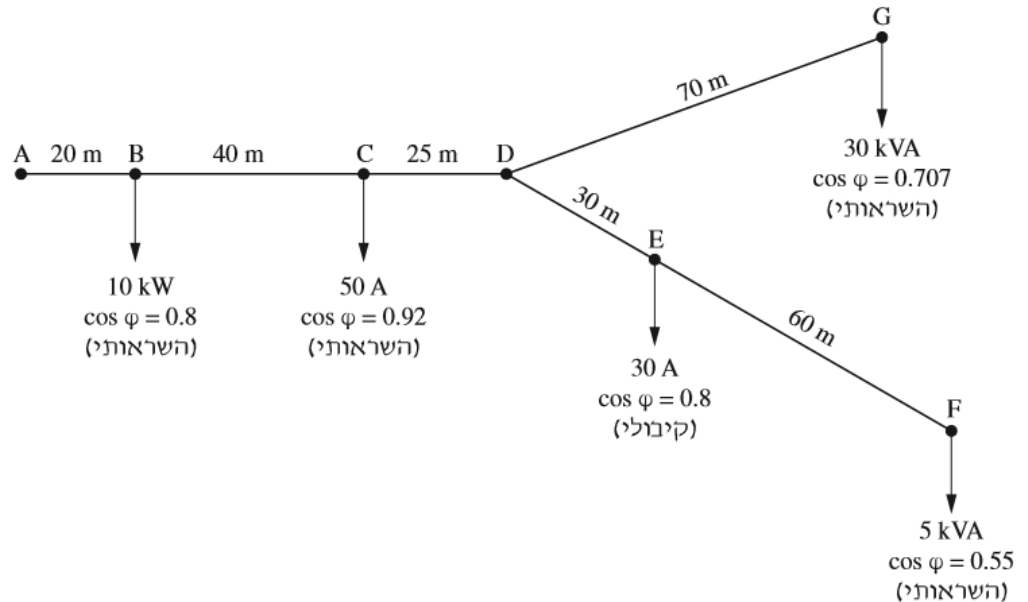


רשתות ובחירת שטח חתך

אביב 2018 שאלה 1:

באיור לשאלה 1 מתוארת רשת תלת-מופעית המוזהנת במתח של $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$, ומזינה עומסים תלת-מופעיים.

מוליכי הרשת עשויים נחושת (נחושת $\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$), וההיגב ההשראותי שלהם ליחידת אורך הוא: $X_0 = 0.3 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega}{\text{m}}$.

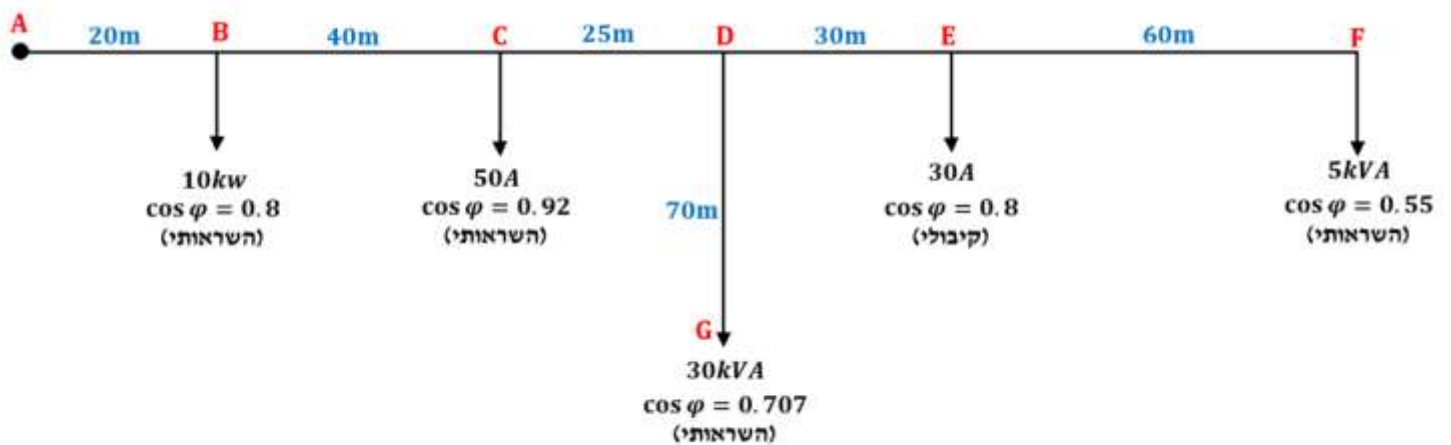


איור לשאלה 1

- א.** חשב את הזרם בכל אחד ממקטעי הרשת (AB, BC, CD, DE, EF, DG).
הצג את ערכי הזרמים במספרים מרוכבים בייצוג קרטזי ובייצוג פולארי.
- הערה:** בחישוב הזרמים התבסס על מתח של 400 V .
- ב.** מפל המתח המרבי המותר ברשת הוא 5%. חשב את שטחי החתך של מוליכי הרשת לפי קריטריון צפיפות זרם אחידה ובהתבסס על זרמי המקטעים שחישבת בתשובתך לסעיף א'.
- הערה:** חישוב המקדם K בקשר $A_k = K \cdot I_k$ יתבסס על מסלול שבו מפל המתח הוא מרבי.
- ג.** משנים את אופי העומס בנקודה E – מקיבולי להשראותי. קבע כיצד ישפיע השינוי על שטחי החתך של מקטעי הרשת. נמק את קביעתך.

(א)

נצייר את הרשת בצורה יותר פשוטה:



נחשב את זרם I_B על פי:

$$I_B = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

מכאן:

$$I_B = \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.8} = 18.04(A)$$

לכן:

$$\bar{I}_B = 18.04 \angle (\cos^{-1} 0.8) = 18.04 \angle -36.87^\circ = (14.43 - j10.82)A$$

נחשב את זרם I_C :

$$\bar{I}_C = 50 \angle -23.07^\circ = (46 - j19.59)A$$

נחשב את זרם I_{D-G} על פי:

$$I_{D-G} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

מכאן:

$$I_{D-G} = \frac{30 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.707} = 61.25(A)$$

לכן:

$$\bar{I}_{D-G} = 61.25 \angle (\cos^{-1} 0.707) = 61.25 \angle -45^\circ = (43.31 - j43.31)A$$

נחשב את זרם I_E :

$$\bar{I}_E = 30 \angle 36.87^\circ = (24 + j18)A$$

נחשב את זרם I_F על פי:

$$I_F = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

מכאן:

$$I_F = \frac{5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.55} = 13.12(A)$$

לכן:

$$\bar{I}_F = 13.12 \angle (\cos^{-1} 0.55) = 13.12 \angle -56.63^\circ = (7.22 - j10.96)A$$

נחשב את זרמי הקטעים על פי קירכהוף:

$$\bar{I}_{E-F} = \bar{I}_F = 13.12 \angle -56.63^\circ = (7.22 - j10.96)A$$

$$\bar{I}_{D-E} = \bar{I}_{E-F} + \bar{I}_E = 13.12 \angle -56.63^\circ + 30 \angle 36.87^\circ = (31.22 + j7.04)A$$

$$\bar{I}_{C-D} = \bar{I}_{D-G} + \bar{I}_{D-E} = 61.25 \angle -45^\circ + 32 \angle 12.71^\circ = (74.53 - j36.27)A$$

$$\bar{I}_{B-C} = \bar{I}_{C-D} + \bar{I}_C = 82.88 \angle -25.95^\circ + 50 \angle -23.07^\circ = (120.53 - j55.86)A$$

$$\bar{I}_{A-B} = \bar{I}_{B-C} + \bar{I}_B = 132.84 \angle -24.86^\circ + 18.04 \angle -36.87^\circ = (134.96 - j66.68)A$$

(ב)

נבדוק את מפל מתח המרבי עבור שני קטעים, קטע $A - G$ וקטע $A - F$, מכיוון שקטע

$A - D$ משותף יש לבדוק רק את הקטעים $D - G$ ו $D - F$.

אנו יודעים כי גודל מפל מתח תלוי באורך הקו ובעוצמת הזרם, ולכן על פי חישובים של סעיף א' ניתן

לראות כי המכפלה של זרם הקו באורכו עבור קטע $D - G$ יותר גדולה מקטע $D - F$, לכן מפל המתח

מרבי הוא על קטע $D - G$.

נחשב את מקדם צפיפות זרם אחידה K עבור קטע $A - G$ על פי:

$$K_{(A-G)} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sum_{k=1}^{k=n} L_K \cdot \cos \varphi_K}{\gamma \cdot \Delta U_a}$$

נחשב את מפל מתח מרבי ממש ΔU_a על פי:

$$\Delta U_{a(A-G)} = \Delta U - \Delta U_r$$

נחשב את מפל מתח מרבי היגבי $\Delta U_{r(A-G)}$ על פי:

$$\Delta U_{r(A-G)} = \sqrt{3} \cdot X_0 \cdot \sum_{k=G}^{k=A} I_r \cdot L_K$$

* כאשר מחשבים את ΔU_r יש להפוך את הסימן של זרם I_r .

$$\Delta U_{r(A-G)} = \sqrt{3} \cdot \frac{0.3}{1000} \cdot [(66.68 \cdot 20) + (55.86 \cdot 40) + (36.27 \cdot 25) + (43.31 \cdot 70)]$$

$$\Delta U_{r(A-G)} = 3.9(V)$$

מכאן:

$$\Delta U_{a(A-G)} = 20 - 3.9 = 16.1(V)$$

נסדר את מקדמי ההספק של הקווים:

$$\cos \varphi_{A-B} = \cos(26.29) = 0.896$$

$$\cos \varphi_{B-C} = \cos(24.86) = 0.907$$

$$\cos \varphi_{C-D} = \cos(25.95) = 0.9$$

$$\cos \varphi_{D-G} = \cos(45) = 0.707$$

מכאן:

$$K_{(A-G)} = \frac{\sqrt{3} \cdot [(20 \cdot 0.896) + (40 \cdot 0.907) + (25 \cdot 0.9) + (70 \cdot 0.707)]}{57 \cdot 16.1}$$

$$K_{(A-G)} = 0.24 \left(\frac{mm^2}{A} \right)$$

נחשב את שטח החתך על פי:

$$A = K \cdot I_K$$

$$A_{(A-B)} = 0.24 \cdot 150.53 = 36.13(mm^2)$$

$$A_{(B-C)} = 0.24 \cdot 132.84 = 31.88(mm^2)$$

$$A_{(C-D)} = 0.24 \cdot 82.88 = 19.89(mm^2)$$

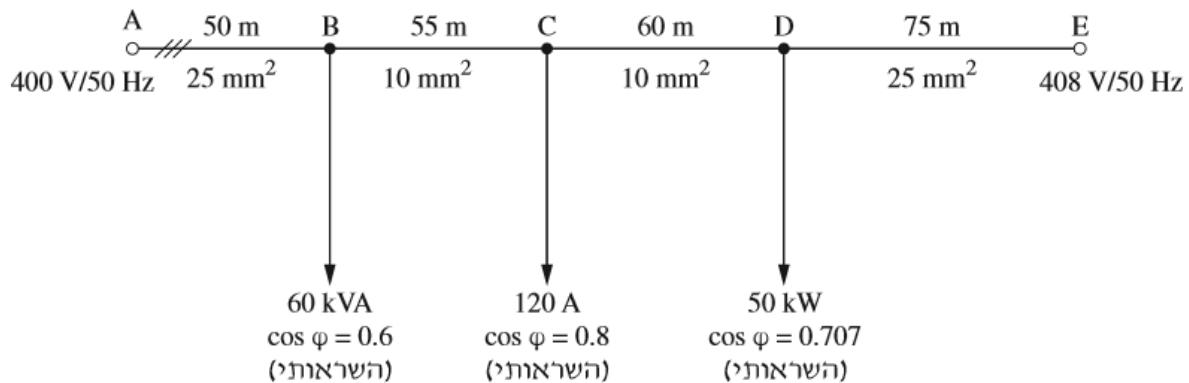
$$A_{(D-G)} = 0.24 \cdot 61.25 = 14.7(mm^2)$$

ג)

שינוי של אופי עומס E מקיבולי להשראי גורם להגדלת זרם I_K , מכאן שטח חתך עבור הקטעים גם כן יגדל.

אביב 2019 שאלה 1:

באיור לשאלה 1 מתואר קו חלוקה תלת-מופעי המוזן משני מקורות מתח שונים ובמופעים זהים. מוליכי הקו עשויים מנחושת ($\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$). שטח החתך שבכל אחד מקטעי הקו נתון באיור לשאלה. הזנה בחישוב את ההיגב ההשראותי של מוליכי הקו. בחישובי הזרמים התבסס על מתח נומינלי של 400 V.



איור לשאלה 1

- א. (5 נק') חשב את עוצמת הזרם הזורם בקו החלוקה כאשר כל העומסים **מנותקים**.
- ב. (5 נק') חשב את עוצמת הזרמים הזורמים בקו החלוקה כאשר כל העומסים **מחוברים והמתחים שווים**.
- ג. (10 נק') קו החלוקה מוזן במתחים **שונים** כמתואר באיור לשאלה. העתק את הקו למחברתך ורשום על כל אחד מקטעי הקו את עוצמת הזרם שזורם בו. רשום את תשובתך כמספר מרוכב.
- ד. (5 נק') מה הנקודה בקו החלוקה שבו המתח הוא המזערי? חשב את ערכו של מתח זה.

פתרון אביב 2019 שאלה 1:

(א)

כאשר כל הצרכנים מנותקים, ברשת בעלת מתחי הזנה שונים זורם $\bar{I}_{\text{משלים}}$ מכיוון המתח הגבוה מבין שני המתחים.

נחשב את $\bar{I}_{\text{משלים}}$ על פי:

$$\bar{I}_{\text{משלים}} = \frac{U_E - U_A}{\sqrt{3} \cdot R_{E-A}}$$

מכיון שבכל קטע שטח חתך שונה, נחשב התנגדות עבור כל קטע בנפרד ונסכום את כל הקטעים, זאת נעשה על פי:

$$R_K = \frac{L}{\gamma \cdot A}$$

מכאן:

$$R_{B-A} = \frac{50}{57 \cdot 25} = 0.035(\Omega)$$

$$R_{C-B} = \frac{55}{57 \cdot 10} = 0.096(\Omega)$$

$$R_{D-C} = \frac{60}{57 \cdot 10} = 0.105(\Omega)$$

$$R_{E-D} = \frac{75}{57 \cdot 25} = 0.053(\Omega)$$

נחשב את ההתנגדות על פי:

$$R_{E-A} = R_{B-A} + R_{C-B} + R_{D-C} + R_{E-D}$$

מכאן:

$$R_{E-A} = 0.035 + 0.096 + 0.105 + 0.053 = 0.289(\Omega)$$

לכן:

$$\bar{I}_{\text{משל}} = 15.98(A)$$

(ב)

נחשב את הזרמים של הצרכנים :

$$I_B = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{60 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 86.6(A)$$

$$\bar{I}_B = 86.6 \angle -53.13^\circ = 51.96 - j69.28(A)$$

$$\bar{I}_C = 120 \angle -36.87^\circ = 96 - j72(A)$$

$$I_D = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.707} = 102.077(A)$$

$$\bar{I}_D = 102.077 \angle -45^\circ = 72.18 - j72.18(A)$$

נחשב את זרם $\bar{I}_{A-B}$ על פי:

$$\bar{I}_{A-B} = \frac{\bar{I}_B \cdot L_{B-E} + \bar{I}_C \cdot L_{C-E} + \bar{I}_D \cdot L_{D-E}}{L_{A-E}}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{A-B} = \frac{86.6 \angle -53.13^\circ \cdot 190 + 120 \angle -36.87^\circ \cdot 135 + 102.077 \angle -45^\circ \cdot 75}{240} = 166.59 \angle -45.05^\circ (A)$$

$$\bar{I}_{A-B} = 166.59 \angle -45.05^\circ = (117.69 - j117.9)A$$

נחשב את זרמי הקטעים על פי קירכהוף:

$$\bar{I}_{B-C} = \bar{I}_{A-B} - \bar{I}_B = 166.59 \angle -45.05^\circ - 86.6 \angle -53.13^\circ = 81.73 \angle -36.485^\circ = (65.71 - j48.6)A$$

$$\bar{I}_{C-D} = \bar{I}_{B-C} - \bar{I}_C = 81.73 \angle -36.485^\circ - 120 \angle -36.87^\circ = (-30.29 + j23.4)A$$

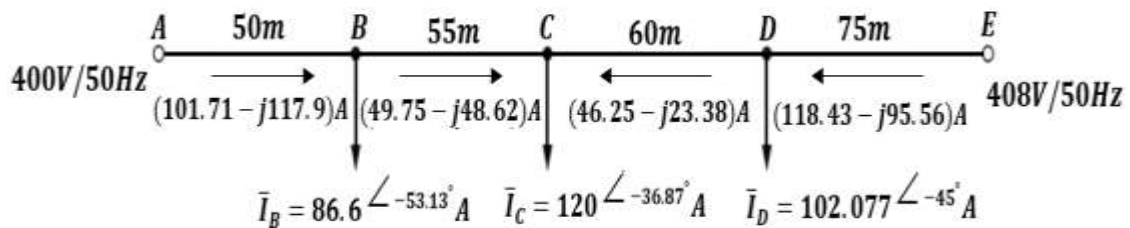
ניתן לראות כי החלק הממשי של הזרם עם סימן שלילי, לכן יש להפוך את כיוון הזרם. מכאן נקבל כי:

$$\bar{I}_{D-C} = \bar{I}_C - \bar{I}_{B-C} = 120 \angle -36.87^\circ - 81.73 \angle -36.485^\circ = 38.28 \angle -37.69^\circ = (30.29 - j23.4)A$$

$$\bar{I}_{E-D} = \bar{I}_{D-C} + \bar{I}_D = 38.28 \angle -37.69^\circ + 102.077 \angle -45^\circ = 147.29 \angle -40.56^\circ = (102.47 - j95.58)A$$

(ג)

נתבונן באיור הבא:



כאשר הרשת מוזנת ממתחים שונים, נחשב את זרם $\bar{I}_{A-B}$ על פי:

$$\bar{I}_{A-B} = \frac{\bar{I}_B \cdot L_{B-E} + \bar{I}_C \cdot L_{C-E} + \bar{I}_D \cdot L_{D-E}}{L_{A-E}} - \bar{I}_{\text{משלים}}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{A-B} = 166.59 \angle -45.05^\circ - 15.98 = 155.71 \angle -49.22^\circ = (101.71 - j117.9)A$$

נחשב את זרמי הקטעים על פי קירכהוף:

$$\bar{I}_{B-C} = \bar{I}_{A-B} - \bar{I}_B = 155.71 \angle -49.22^\circ - 86.6 \angle -53.13^\circ = 69.565 \angle -44.34^\circ = (49.75 - j48.62)A$$

$$\bar{I}_{C-D} = \bar{I}_{B-C} - \bar{I}_C = 69.565 \angle -44.34^\circ - 120 \angle -36.87^\circ = (-46.25 + j23.38)A$$

ניתן לראות כי החלק הממשי של הזרם עם סימן שלילי, לכן יש להפוך את כיוון הזרם.

מכאן נקבל כי:

$$\bar{I}_{D-C} = \bar{I}_C - \bar{I}_{B-C} = 120 \angle -36.87^\circ - 69.565 \angle -44.34^\circ = 51.82 \angle -26.82^\circ = (46.25 - j23.38)A$$

$$\bar{I}_{E-D} = \bar{I}_{D-C} + \bar{I}_D = 51.82 \angle -26.82^\circ + 102.077 \angle -45^\circ = 163.27 \angle -35.91^\circ = (118.43 - j95.56)A$$

ניתן לראות שנקודת השפך היא נקודה C ולכן מתח מזערי מתקבל בנקודה זו.

נחשב את המתח המזערי על פי:

$$U_C = U_A - \Delta U_{A-C}$$

מכוון שניתן להזניח את היגב השראותי, ניתן לומר כי:

$$\Delta U_{A-C} = \Delta U_{a(A-C)} = \frac{\sqrt{3}}{\gamma} \cdot \sum_{k=A}^{k=C} \left(\frac{I_a \cdot L_K}{A_K} \right)$$

מכאן:

$$\Delta U_{a(A-C)} = \frac{\sqrt{3}}{57} \cdot \left[\left(\frac{101.71 \cdot 75}{25} \right) + \left(\frac{49.75 \cdot 55}{10} \right) \right] = 17.59(V)$$

לכן:

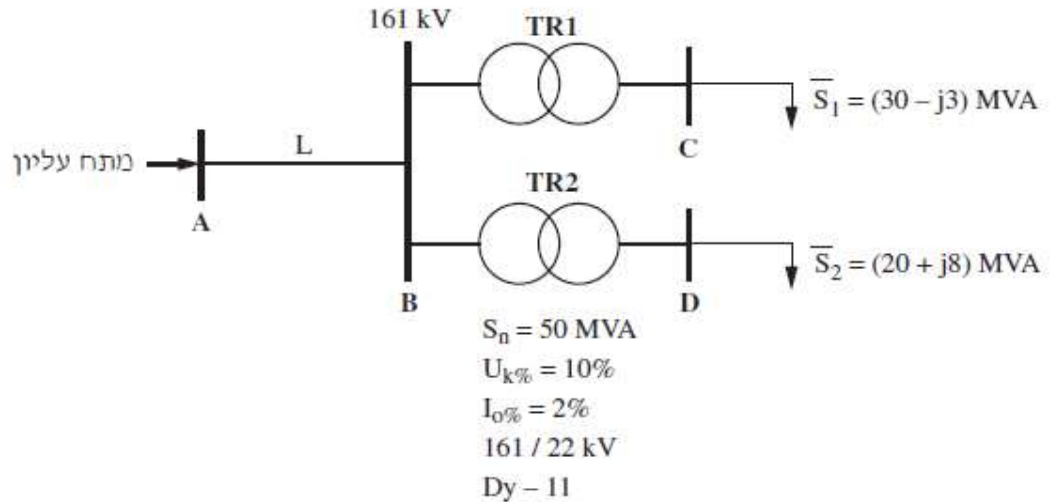
$$U_C = 400 - 17.59 = 382.41(V)$$

$$U_C = 382.41(V)$$

פרמטרים של שנאי

אביב 2015 שאלה 1:

באיור לשאלה 1 נתון תרשים חד־קווי של תחנת השנאה. התחנה כוללת שני שנאים זהים, TR1 ו-TR2, המוזנים במתח עליון באמצעות קו עילי L. מוליכות ענף המיגנוט והתנגדות סלילי השנאי – זניחות.



איור לשאלה 1

- א. חשב את ההספק הפעיל ואת ההספק ההיגבי המוזנים לפסי־הצבירה B. הנה בחישובך כי המתחים בפסי־הצבירה C ו־D הם 22 kV.
 - ב. סרטט מעגל תמורה של הרשת החשמלית מפסי־הצבירה A ועד פסי־הצבירה C ו־D. ציין בסרטוטך את שמות מרכיבי הרשת.
- הערה: יצג בסרטוט רשת עילית במודל π , ושנאי במודל Γ .

פתרון אביב 2015 שאלה 1:

(א)

נחשב את ההספק הפעיל P_B המוזן לפס צבירה B על פי:

$$P_B = P_C + P_D + \Delta P_{TR1} + \Delta P_{TR2}$$

נחשב את ΔP_{TR1} על פי:

$$\Delta P_{TR1} = \Delta P_{FE} + \beta^2 \cdot \Delta P_{CU_n}$$

על פי נתוני התרגיל מוליכות ענף המגנוט והתנגדות סלילי השנאי זניחות, מכאן:

$$\Delta P_{FE} = 0(W)$$

$$\Delta P_{CU_n} = 0(W)$$

מכאן:

$$\Delta P_{TR1} = \Delta P_{TR2} = 0(W)$$

לכן:

$$P_B = 30 \times 10^6 + 20 \times 10^6 + 0 + 0 = 50(MW)$$

$P_B = 50(MW)$

נחשב את ההספק ההיגבי Q_B המוזן לפס צבירה B על פי:

$$Q_B = Q_C + Q_D + \Delta Q_{TR1} + \Delta Q_{TR2}$$

נחשב את ΔQ_{TR1} על פי:

$$\Delta Q_{TR1} = \Delta Q_{FE(TR1)} + \beta^2 \cdot \Delta Q_{CU_n(TR1)}$$

נסדר את S_{L1} :

$$S_{L1} = (30 - j3) = 30.15 \angle -5.71^\circ (MVA)$$

נחשב את מקדם העמסה של שנאי TR_1 על פי:

$$\beta_{TR1} = \frac{S_{L1}}{S_n}$$

מכאן:

$$\beta_{TR1} = \frac{30.15}{50} = 0.603$$

מכוון שהתנגדות ענף המגנוט של השנאי אינסופית והתנגדות סלילי השנאי זניחה,

נחשב את הספק $\Delta Q_{FE(TR1)}$ על פי:

$$\Delta Q_{FE(TR1)} = 3 \cdot I_{0(ph)} \cdot U_{0(ph)}$$

נחשב את זרם הריקס $I_{0(ph)}$ על פי:

$$I_{0(ph)} = I_{0\%} \cdot I_{1n}$$

נחשב את I_{1n} על פי:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$$

* מכון שצד הראשוני של השנאי מחובר בצורת משולש $U_L = U_{(ph)}$

מכאן:

$$I_{1n} = \frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 161 \times 10^3} = 179.3(A)$$

לכן:

$$I_0 = \frac{2}{100} \cdot 179.3 = 3.59(A)$$

נחשב את הספק $\Delta Q_{FE(TR1)}$:

$$\Delta Q_{FE(TR1)} = 3 \cdot \frac{3.59}{\sqrt{3}} \cdot 161 \times 10^3 = j1(MVAR)$$

נחשב את הספק $\Delta Q_{CU(TR1)}$ על פי:

$$\Delta Q_{CU(TR1)} = 3 \cdot I_K^2 \cdot X_K$$

בניסוי קצר:

$$I_K = I_{1n}$$

מכאן:

$$I_K = 179.3(A)$$

נחשב את היגב הקצר X_K על פי:

$$X_K = \frac{U_{K\%} \cdot U_{1n}^2}{100 \cdot S_n}$$

מכאן:

$$X_K = \frac{10 \cdot (161 \times 10^3)^2}{100 \cdot 50 \times 10^6} = 51.84(\Omega)$$

לכן:

$$\Delta Q_{CU(TR1)} = 3 \cdot \left(\frac{179.3}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 51.84 = j1.67(MVAR)$$

נחשב את ΔQ_{TR1} :

$$\Delta Q_{TR1} = \Delta Q_{FE(TR1)} + \beta^2 \cdot \Delta Q_{CU(TR1)}$$

מכאן:

$$\Delta Q_{TR1} = 1 + 0.603^2 \cdot 1.67 = 1.61(MVAR)$$

נחשב את ΔQ_{TR2} על פי:

$$\Delta Q_{TR2} = \Delta Q_{FE(TR2)} + \beta^2 \cdot \Delta Q_{CU_n(TR2)}$$

מכיוון שנתוני השנאים זהים, ניתן לרשום כי:

$$\Delta Q_{FE(TR1)} = \Delta Q_{FE(TR2)} ; \Delta Q_{CU_n(TR1)} = \Delta Q_{CU_n(TR2)}$$

נסדר את S_{L2} :

$$S_{L2} = (20 + j8) = 21.54 \angle 21.8^\circ (MVA)$$

נחשב את מקדם העמסה של שנאי TR_2 על פי:

$$\beta_{TR2} = \frac{S_{L2}}{S_n}$$

מכאן:

$$\beta_{TR2} = \frac{21.54}{50} = 0.43$$

לכן:

$$\Delta Q_{TR2} = 1 + 0.43^2 \cdot 1.67 = 1.31 (MVAR)$$

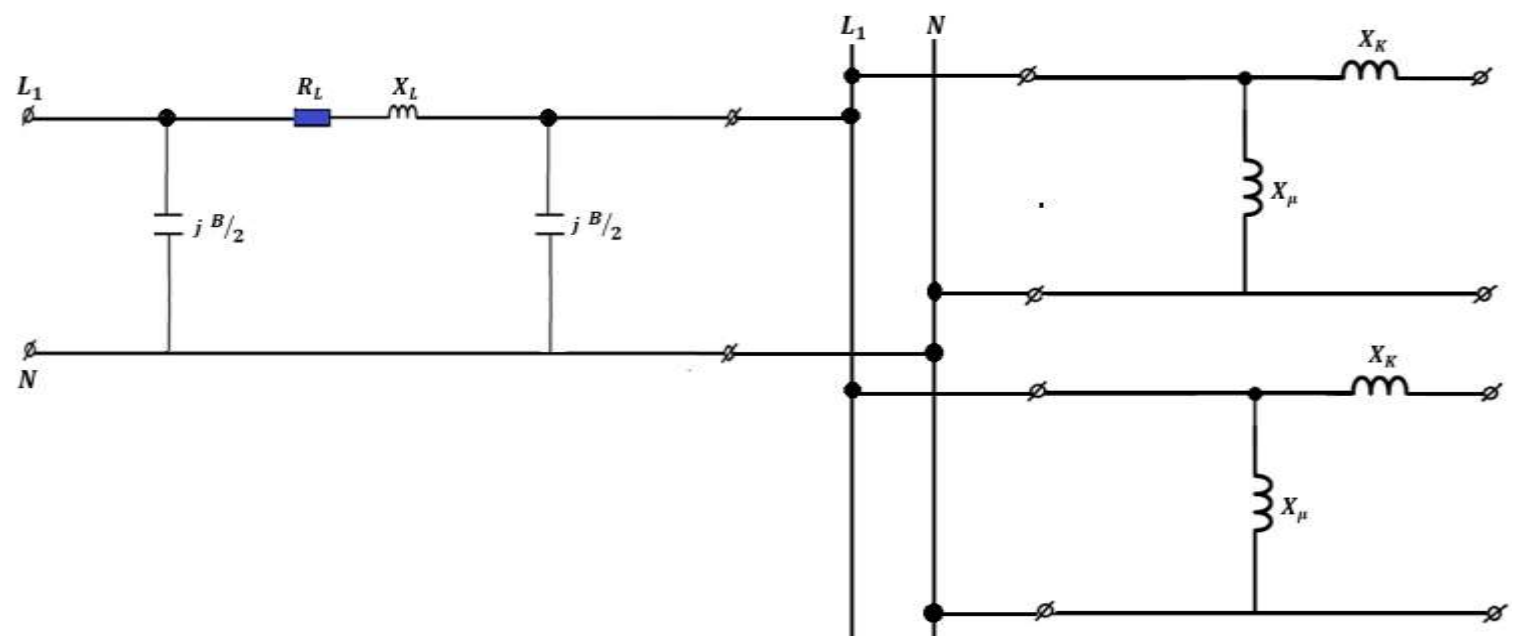
נחשב את ההספק ההיגבי Q_B המוזן לפס צבירה B על פי:

$$Q_B = -3 + 8 + 1.61 + 1.31 = 7.92 (MVAR)$$

$$Q_B = 7.92 (MVAR)$$

(ג)

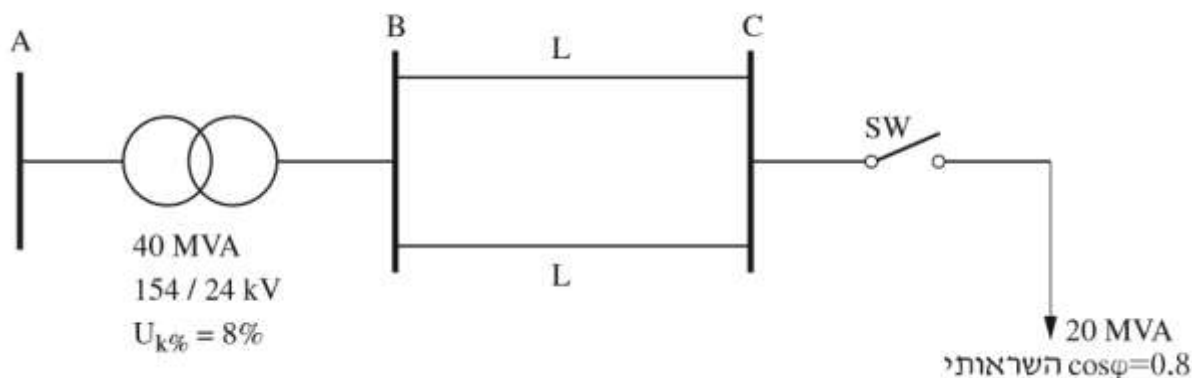
נשרטט מעגל תמורה עבור פאזה אחת



אביב 2018 שאלה 2

באיור לשאלה 2 נתון תרשים חד-קווי של רשת תלת-מופעית, המזינה עומס באמצעות שני קווי הולכה (L) שאורכם זהה.

נתוניו של קו ההולכה L : $240/40 \text{ mm}^2$ Al-Fe למופע $D = 1 \text{ m}$



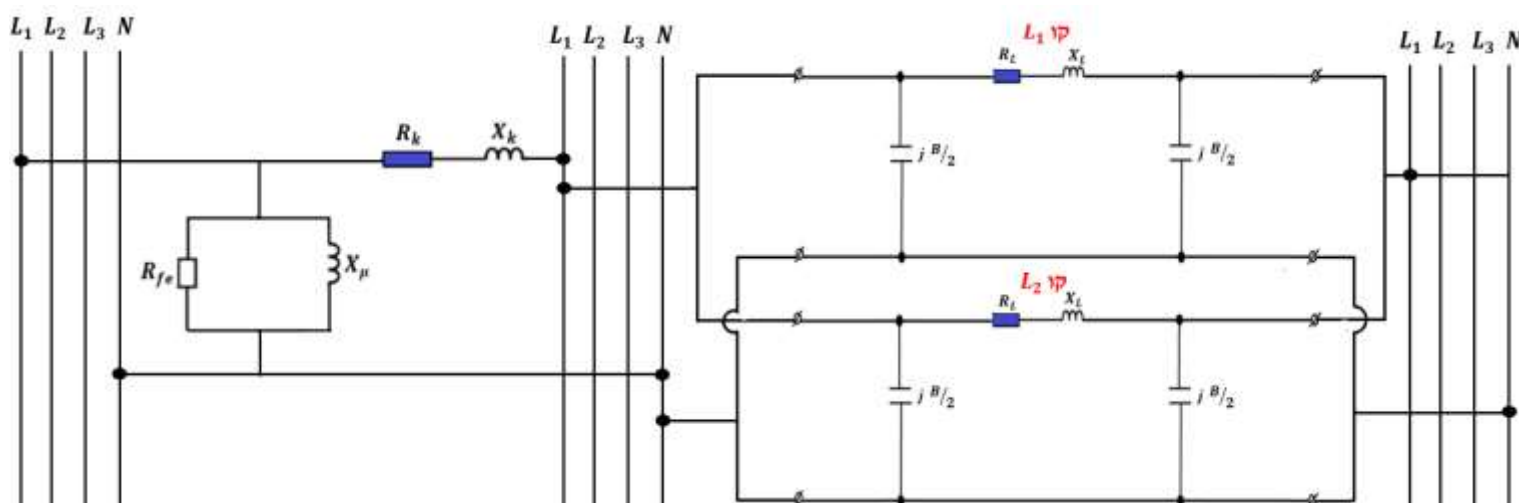
איור לשאלה 2

- א. סרטט במחברתך מעגל תמורה של הרשת החשמלית מפסי-הצבירה A עד פסי-הצבירה C. יצג את השנאי על-ידי מעגל תמורה מסוג Γ ואת מערכת הקווים (בין פסי-הצבירה B ו-C) על-ידי מעגל תמורה מסוג Π .
- ב. כאשר הקו אינו מועמס (המפסק SW פתוח), הפסדי ההספק הכוללים במערכת הקווים (בין פסי-הצבירה B ו-C) הם 60 kVA. חשב את אורכו של קו ההולכה L. הנח בחישובך שפרמטרי הרוחב הם קיבוליים בלבד.
- ג. חשב את מקדם ההספק בנקודת ההזנה לפסי-הצבירה B כאשר המפסק SW סגור. בחישובך הנח שהמתח בפסי-הצבירה C הוא 24 kV.

פתרון אביב 2018 שאלה 2

(א)

באיור הבא ניתן לראות את מעגל התמורה של השנאי והקווים.



(ב)

מכוון שהקו אינו מועמס והמספק פתוח, כל ההפסדים בקו הם קיבוליים, מכאן:

$$\Delta S_{B-C} = \Delta Q_{C(B-C)}$$

מכוון ששני הקווים במקביל, ניתן לומר כי:

$$\Delta Q_{C(B-C)} = 2 \cdot (U^2 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot L) \longrightarrow L = \frac{\Delta Q_{C(B-C)}}{2 \cdot U^2 \cdot \omega \cdot C_0}$$

על פי נתוני התרגיל וטבלה שבעמוד 10 שבדף נוסחאון ניתן לראות כי:

I	D _m [cm]									R ₀	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
[A]	X ₀ [Ω/km]									[Ω/km]	[mm]	[mm ²]
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

על פי הטבלה ניתן לראות כי:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{21.7}{2} = 10.85(mm) = 1.085(cm)$$

$$R_0 = 0.121 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

$$X_0 = 0.299 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

נחשב את קיבול קו עילי ליחידת אורך C_0 על פי נוסחה שבעמוד 6 בדף נוסחאון:

$$C_0 = \frac{0.0242}{\log \frac{D_m}{r}}$$

מכאן:

$$C_0 = \frac{0.0242}{\log \frac{100}{1.085}} = 0.0123 \left(\frac{\mu F}{km} \right) = 12.3 \times 10^{-9} \left(\frac{F}{km} \right)$$

לכן:

$$L = \frac{60 \times 10^3}{2 \cdot (24 \times 10^3)^2 \cdot 314.16 \cdot 12.3 \times 10^{-9}} = 13.48(km)$$

$$L = 13.48(km)$$

(ג)

נחשב את ההספק $\bar{S}_B$ על פי:

$$\bar{S}_B = \bar{S}_{Load} + \Delta \bar{S}_{B-C}$$

נחשב את איבודי ההספק $\Delta \bar{S}_{B-C}$ על פי:

$$\Delta \bar{S}_{B-C} = \Delta P_{B-C} + j(\Delta Q_{L(B-C)} - \Delta Q_{C(B-C)})$$

נחשב את זרם הקווי I_{B-C} על פי:

$$I_{B-C} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

מכאן:

$$I_{B-C} = \frac{20 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 24 \times 10^3} = 481.13(A)$$

נחשב את ΔP_{B-C} על פי:

$$\Delta P_{B-C} = 3 \cdot \frac{I_{B-C}^2 \cdot R_0 \cdot L}{2}$$

מכאן:

$$\Delta P_{B-C} = 3 \cdot \frac{481.13^2 \cdot 0.121 \cdot 13.5}{2} = 0.567(MW)$$

נחשב את $\Delta Q_{L(B-C)}$ על פי:

$$\Delta Q_{L(B-C)} = 3 \cdot \frac{I_{B-C}^2 \cdot X_0 \cdot L}{2}$$

מכאן:

$$\Delta Q_{L(B-C)} = 3 \cdot \frac{481.13^2 \cdot 0.299 \cdot 13.5}{2} = 1.4(MVAR)$$

לכן:

$$\Delta \bar{S}_{B-C} = 0.567 + j(1.4 - 0.06) = 1.455 \angle 67.07^\circ (MVA)$$

נחשב את ההספק המלא בפס צבירה B :

$$\bar{S}_B = 20 \angle 36.87^\circ + 1.455 \angle 67.07^\circ = 21.27 \angle 38.84^\circ (MVA)$$

לכן:

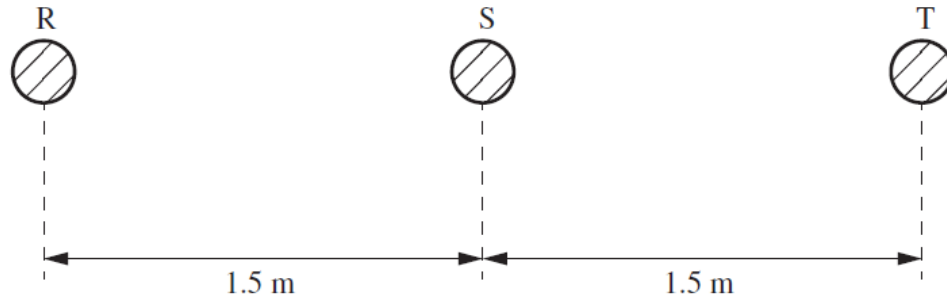
$$\cos \varphi_B = \cos(38.84) = 0.778$$

$\cos \varphi_B = 0.778$

הפסדי קורונה ופרמטרים של קו

אביב 2017 שאלה 2:

באיור לשאלה 2 מתואר סידור המוליכים בקו עילי תלת מופעי המוזן במתח נקוב של 120 kV. מוליכי הקו עשויים אלומיניום-ברזל (Al - Fe), הם שזורים וגלויים, ומועבר בהם הספק של 80 MVA במקדם הספק 0.9 השראותי. טמפרטורת הסביבה היא 20°C ומקדם מבנה המוליכים הוא $m_1 = 0.7$.



איור לשאלה 2

- א. 1. קבע את שטח החתך של מוליכי הקו.
2. נתון כי האוויר לח, ולחץ האוויר הוא 74 cm Hg. הראה, באמצעות חישוב, כי בקו מתקיימת תופעת הקורונה.
- ב. חשב את הפסדי הקורונה לק"מ בקו.
- ג. נתון כי אורך הקו הוא 150 km ושהמתח השלוב בתחילת הקו הוא 120 kV. חשב עד איזה מרחק מתחילת הקו מתקיימת תופעת הקורונה במופע R.

פתרון אביב 2017 שאלה 2:

(א)

1.

נחשב את זרם הרשת על פי:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

מכאן:

$$I = \frac{80 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 120 \times 10^3} = 384.9(A)$$

על פי טבלה עליונה שבנוסחאון עמוד 10 נבחר שטח חתך של $150/25(mm^2)$ עבור זרם של 400(A).

(ב)

תופעת קורונה מתקיימת כאשר:

$$U_{KR(ph)} < U_{(ph)}$$

נחשב את מתח קורונה על פי נוסחה שבעמוד 13:

$$U_{KR} = \sqrt{3} \cdot 21.1 \cdot r \cdot 2.3 \log \frac{D_m}{r} \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot \delta$$

על פי טבלה שבנוסחאון עמוד 10 קוטר המוליך $d = 17.3 \text{ mm}$.

מכאן:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{17.3}{2} = 8.65(\text{mm}) = 0.865(\text{cm})$$

מכוון שמוליכי הרשת מסודרים אופקית, על פי נוסחה שבעמוד 6 בדף הנוסחאון:

$$D_m = X \cdot \sqrt[3]{2}$$

מכאן:

$$D_m = 150 \cdot \sqrt[3]{2} = 189(\text{cm})$$

על פי נתוני התרגיל:

$$m_1 = 0.7$$

מכוון שנתון כי האוויר לח, מניחים כי:

$$m_2 = 0.9$$

נחשב את δ על פי:

$$\delta = \frac{3.92 \cdot b}{273 + t}$$

מכאן:

$$\delta = \frac{3.92 \cdot 74}{273 + 20} = 0.99$$

לכן:

$$U_{KR} = \sqrt{3} \cdot 21.1 \cdot 0.865 \cdot 2.3 \log \frac{189}{0.865} \cdot 0.7 \cdot 0.9 \cdot 0.99 = 106.09(\text{kV})$$

נחשב את $U_{KR(ph)}$ על פי:

$$U_{KR(ph)} = \frac{U_{KR}}{\sqrt{3}}$$

מכאן:

$$U_{KR(ph)} = \frac{106.09}{\sqrt{3}} = 61.25(kV)$$

על פי דף נוסחאון עמוד 13 שינויים של מתח קורונה מופעי עלינו להוסיף 6% מהמתח שחושב למופעים
R ו T ולהוריד 4% למופע S.

מכאן:

$$U_{KR(R)} = U_{KR(T)} = 1.06 \cdot 61.25 = 64.93(kV)$$

$$U_{KR(S)} = 0.96 \cdot 61.25 = 58.8(kV)$$

נחשב את מתח המופעי:

$$U_{(ph)} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

מכאן:

$$U_{(ph)} = \frac{120 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 69.28(kV)$$

נבדוק את קיום תופעת קורונה עבור כל אחת מהמופעים:

$$U_{KR(R)} < U_{(ph)}$$

$$U_{KR(S)} < U_{(ph)}$$

$$U_{KR(T)} < U_{(ph)}$$

ניתן לראות שרק עבור כל המופעים מתקיימת תופעת קורונה.

ג)

נחשב את הפסדי קורונה עבור מופע R ו T על פי:

$$\Delta P_{OKR(R)} = \Delta P_{OKR(T)} = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D_m}} \cdot (U_{O(R)} - U_{OKR(R)})^2$$

מכאן:

$$\Delta P_{OKR(R)} = \frac{0.18}{0.99} \sqrt{\frac{0.865}{189}} \cdot (69.28 - 64.93)^2 = 0.23 \left(\frac{kW}{km} \right)$$

$$\Delta P_{OKR(R)} = \Delta P_{OKR(T)} = 0.23 \left(\frac{kW}{km} \right)$$

נחשב את הפסדי קורונה עבור מופע S על פי:

$$\Delta P_{OKR(S)} = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D_m}} \cdot (U_{O(S)} - U_{OKR(S)})^2$$

מכאן:

$$\Delta P_{OKR(S)} = \frac{0.18}{0.99} \sqrt{\frac{0.865}{189}} \cdot (69.28 - 58.8)^2 = 1.35 \left(\frac{kW}{km} \right)$$

$$\Delta P_{OKR(S)} = 1.35 \left(\frac{kW}{km} \right)$$

(ד)

על פי טבלה שבנוסחאון עמוד 10:

$$R_0 = 0.194 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

נחשב את היגב הקו ליחידת אורך X_0 על פי:

$$X_0 = 0.144 \cdot \log \frac{D_m}{r} + 0.016$$

מכאן:

$$X_0 = 0.144 \cdot \log \frac{189}{0.865} + 0.016 = 0.35 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

$$X_0 = 0.35 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

נסדר את זרם קו $\bar{I}_L$:

$$\bar{I}_L = 384.9 \angle -25.84^\circ = (346.42 - j167.76)A$$

אנו יודעים כי:

$$U_{KR(R)} = U_{ph(R)} - \Delta U \longrightarrow \Delta U = U_{ph(R)} - U_{KR(R)}$$

מכאן:

$$\Delta U = 69.28 \times 10^3 - 64.94 \times 10^3 = 4.34(kV)$$

כמו כן:

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r$$

את ΔU_a נחשב על פי:

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{\gamma \cdot A} \cdot I_a \cdot L_K$$

מכאן:

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}}{35 \cdot 150} \cdot (346.42 \cdot L) = 0.114L \text{ (V)}$$

את ΔU_r נחשב על פי:

$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot X_0 \cdot I_X \cdot L_K$$

מכאן:

$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot \frac{0.35}{1000} \cdot (167.76 \cdot L) = 0.1L \text{ (V)}$$

לכן:

$$0.114 \cdot L + 0.1 \cdot L = 4.34 \times 10^3$$

$$L = \frac{4.34 \times 10^3}{0.214} = 20.28 \times 10^3 \text{ (m)} = 20.28 \text{ (km)}$$

עד מרחק של 20.28(km) מתחילת הקו מתקיימת תופעת קורונה.

אביב 2019 שאלה 2:

להלן הנתונים של קו תמסורת אופקי עשוי מחמרן-פלדה:

- | | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| 70 km | - אורך קו התמסורת: |
| 120/21 mm ² | - שטח החתך של מוליכי קו התמסורת: |
| D _m = 3 m | - המרחק הממוצע בין מוליכי המופעים: |
| 115 kV | - המתח השלוב על פני העומס: |
| f = 50 Hz | - תדר הרשת: |
| 55 MVA , cos φ = 0.8 (השראותי) | - הספק העומס: |

הערה: הזנח בחישוביך את תופעת קורונה.

- (10 נק') א. (5 נק') 1. חשב את ערכי הפרמטרים של מעגל תמורה מסוג π של קו התמסורת.
- (5 נק') 2. סרטט במחברתך את מעגל התמורה. ציין על-גבי הסרטוט את הערכים שחישבת.
- (10 נק') ב. חשב את מתח ההזנה של קו התמסורת.
- (5 נק') ג. חשב את הזרם הזורם בקו התמסורת ואת מקדם ההספק ביציאה מהמקור.

(א)

1.

נתון כי:

$$A = 120/21(mm^2)$$

$$D_m = 3m = 300(cm)$$

נתבונן בטבלה שבעמוד 10 מתוך דף נוסחאון:

I [A]	D _m [cm]									R ₀ [Ω/km]	קוטר [mm]	שטח חתך [mm ²]
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
	X ₀ [Ω/km]											
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

על פי טבלה זו ניתן לקבל מספר נתונים:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{15.7}{2} = 7.85(mm) = 0.785(cm)$$

$$R_0 = 0.234 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

$$X_0 = 0.388 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

נחשב את התנגדות האומית של הקו על פי:

$$R_L = R_0 \cdot l$$

מכאן:

$$R_L = 0.234 \cdot 70 = 16.38(\Omega)$$

$$R_L = 16.38(\Omega)$$

נחשב את היגב השראי של הקו על פי:

$$X_L = X_0 \cdot l$$

מכאן:

$$X_L = 0.388 \cdot 70 = 27.16(\Omega)$$

$$X_L = 27.16(\Omega)$$

נחשב את המוליכות (מתירות) קיבולית של הקו על פי:

$$B = \omega \cdot C$$

נחשב את קיבול קו עילי ליחידת אורך C_0 על פי:

$$C_0 = \frac{0.0242}{\log \frac{D_m}{r}}$$

מכאן:

$$C_0 = \frac{0.0242}{\log \frac{300}{0.785}} = 9.37 \times 10^{-3} \left(\frac{\mu F}{km} \right)$$

$$C = C_0 \cdot L = 9.37 \times 10^{-3} \cdot 70 = 0.656(\mu F)$$

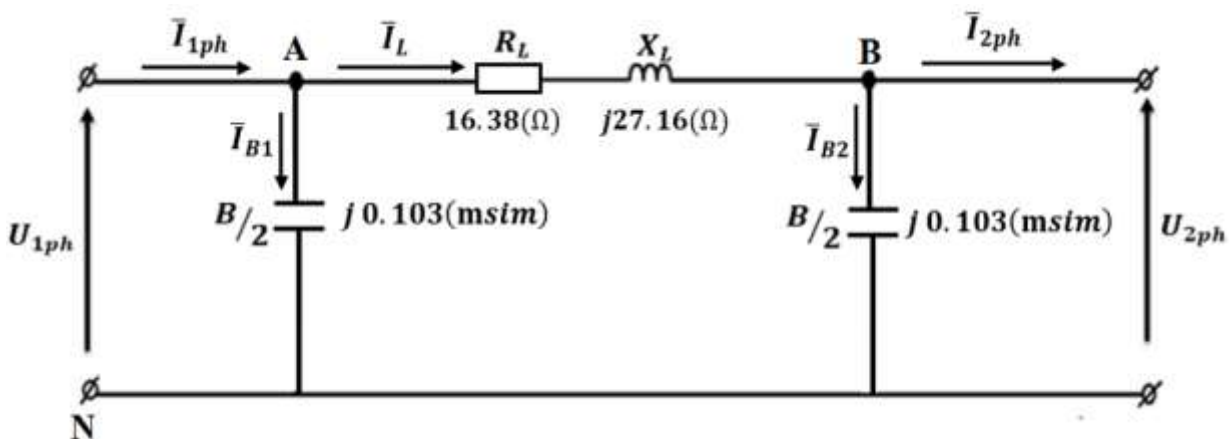
לכן:

$$\frac{B}{2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}{2} = 50 \cdot \pi \cdot 0.656 \cdot 10^{-6} = j0.103(msim)$$

$$\frac{B}{2} = j0.103(msim)$$

2.

מכוון שלא נתון על תופעת קורונה, מעגל תמורה מודל π של קו יראה כך:



ב.

נחשב את $\bar{I}_{2(ph)}$ על פי:

$$\bar{I}_{2(ph)} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{2(ph)} = \frac{55 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 115 \times 10^3} = 276.12 \angle -36.87^\circ (A)$$

נחשב את $\bar{U}_{2(ph)}$ על פי:

$$\bar{U}_{2(ph)} = \frac{\bar{U}_L}{\sqrt{3}}$$

מכאן:

$$\bar{U}_{2(ph)} = \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 66.4 \angle 0^\circ (kV)$$

נחשב את $\bar{I}_{B2}$ על פי:

$$\bar{I}_{B2} = \bar{U}_{2(ph)} \cdot j \frac{B}{2}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{B2} = 66.4 \times 10^3 \angle 0^\circ \cdot 0.103 \times 10^{-3} \angle 90^\circ = 6.84 \angle 90^\circ (A)$$

נחשב את $\bar{I}_{L(A-B)}$ על פי:

$$\bar{I}_{L(A-B)} = \bar{I}_{B2} + \bar{I}_{2(ph)}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{L(A-B)} = 6.84 \angle 90^\circ + 276.12 \angle -36.87^\circ = 272.05 \angle -35.72^\circ (A)$$

נחשב את $\bar{U}_{L(A-B)}$ על פי:

$$\bar{U}_{L(A-B)} = \bar{I}_{L(A-B)} \cdot Z_{L(A-B)}$$

מכאן:

$$\bar{U}_{L(A-B)} = 272.05 \angle -35.72^\circ \cdot (16.38 + j27.16) = 8.628 \angle 23.186^\circ (kV)$$

נחשב את מתח הזנה $\bar{U}_{1(ph)}$ על פי:

$$\bar{U}_{1(ph)} = \bar{U}_{B1} = \bar{U}_{L(A-B)} + \bar{U}_{2(ph)}$$

מכאן:

$$\bar{U}_{1(ph)} = \bar{U}_{B1} = 8.628 \times 10^3 \angle 23.186^\circ + 66.4 \times 10^3 \angle 0^\circ = 74.409 \angle 2.617^\circ (kV)$$

$$\bar{U}_{1(ph)} = 74.409 \angle 2.617^\circ (kV)$$

(ג)

נחשב את הזרם ביציאה מהמקור על פי:

$$\bar{I}_{1(ph)} = \bar{I}_{B1} + \bar{I}_{L(A-B)}$$

נחשב את $\bar{I}_{B1}$ על פי:

$$\bar{I}_{B1} = \bar{U}_{B1} \cdot j \frac{B}{2}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{B1} = 74.409 \times 10^3 \angle 2.617^\circ \cdot 0.103 \times 10^{-3} \angle 90^\circ = 7.66 \angle 92.617^\circ (A)$$

לכן:

$$\bar{I}_{1(ph)} = 7.66 \angle 92.617^\circ + 272.05 \angle -35.72^\circ = 267.37 \angle -34.43^\circ (A)$$

$$\bar{I}_{1(ph)} = 267.37 \angle -34.43^\circ (A)$$

נחשב את מקדם ההספק:

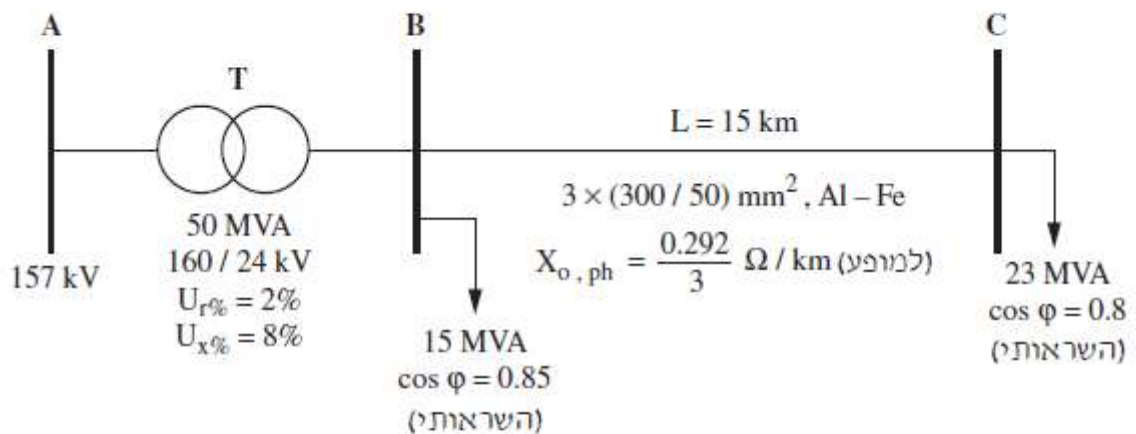
$$\cos \varphi = \cos(34.43) = 0.82$$

$$\cos \varphi = 0.82$$

ויסות מתח

אביב 2012 שאלה 1:

באיור לשאלה 1 נתונה רשת תלת־מופעית. השנאי T בעל דרגות ויסות בצד המתח הגבוה, ששיעור כל אחת מהן הוא 1.5%. המתח בפסי־הצבירה C הוא 22 kV. כל מופע בקו ההובלה L כולל שלושה מוליכים.



איור לשאלה 1

- א. חשב את המתח בפסי־הצבירה B.
- ב. חשב את מספר הדרגות הדרושות לוויסות המתח, על־מנת להבטיח מתח של 22 kV בפסי־הצבירה C (אם מספר הדרגות המחושב אינו מספר שלם – יש לעגלו כלפי מעלה לערך השלם הבא).

פתרון אביב 2012 שאלה 1:

(א)

נחשב את מפל המתח ΔU_{B-C} על פי:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{P_C \cdot R_L + Q_C \cdot X_L}{U_C}$$

על פי נתוני התרגיל:

$$\bar{S}_C = 23 \angle 36.87^\circ = (18.4 + j13.8) \text{ MVA}$$

מכאן:

$$P_C = 18.4 \text{ (MW)}$$

$$Q_C = 13.8 \text{ (MVAR)}$$

מכוון שנתון כי הקו עשוי מ ($Al - Fe$) נפנה לטבלה העליונה שבדף הנוסחאון בעמוד 10, נבחר את R_0 על

פי שטח חתך הנתון בתרגיל ($A = 300/50mm^2$).

I	D _m [cm]									R ₀	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
	X ₀ [Ω/km]											
[A]										[Ω/km]	[mm]	[mm ²]
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

ניתן לראות כי:

$$R_0 = 0.097 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

מכוון שישנם 3 מוליכים במקביל נחשב את R_L על פי:

$$R_L = \frac{R_0}{3} \cdot L$$

מכאן:

$$R_L = \frac{0.097}{3} \cdot 15 = 0.485(\Omega)$$

נחשב את X_L על פי:

$$X_L = \frac{X_0}{3} \cdot L$$

מכאן:

$$X_L = \frac{0.292}{3} \cdot 15 = 1.46(\Omega)$$

לכן:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{18.4 \times 10^6 \cdot 0.485 + 13.8 \times 10^6 \cdot 1.46}{22 \times 10^3} = 1.32(kV)$$

נחשב את מפל המתח על השנאי ΔU_T על פי:

$$\Delta U_T = \frac{P_{B(total)} \cdot R_T + Q_{B(total)} \cdot X_T}{U_{2n}}$$

על פי נתוני התרגיל:

$$\bar{S}_B = 15 \angle 31.79^\circ = (12.75 + j7.9) MVA$$

מכאן:

$$P_B = 12.75 (MW)$$

$$Q_B = 7.9 (MVAR)$$

נחשב את הספק $P_{B(total)}$ על פי:

$$P_{B(total)} = P_B + P_C$$

מכאן:

$$P_{B(total)} = 12.75 + 18.4 = 31.15 (MW)$$

נחשב את הספק $Q_{B(total)}$ על פי:

$$Q_{B(total)} = Q_B + Q_C$$

מכאן:

$$Q_{B(total)} = 7.9 + 13.8 = 21.7 (MVAR)$$

נחשב את R_T של השנאי על פי:

$$R_T = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

מכאן:

$$R_T = \frac{2 \cdot (24 \times 10^3)^2}{100 \cdot 50 \times 10^6} = 0.23 (\Omega)$$

נחשב את X_T של השנאי על פי:

$$X_T = \frac{U_{x\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

מכאן:

$$X_T = \frac{8 \cdot (24 \times 10^3)^2}{100 \cdot 50 \times 10^6} = 0.92 (\Omega)$$

נחשב את ΔU_T :

$$\Delta U_T = \frac{31.15 \times 10^6 \cdot 0.23 + 21.7 \times 10^6 \cdot 0.92}{24 \times 10^3} = 1.13(kV)$$

נחשב את המתח בפס צבירה B על פי:

$$U_B = U_C + \Delta U_{B-C} + \Delta U_T$$

מכאן:

$$U_B = 22 + 1.32 + 1.13 = 24.45(kV)$$

$$U_B = 24.45(kV)$$

(ב)

מכוון שנתון כי משנה דרגות נמצא בצד מתח הגבוה של השנאי, נבצע שיקוף למתח

U_B על פי:

$$U_B' = U_B \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)$$

מכאן:

$$U_B' = 24.45 \cdot \left(\frac{160}{24} \right) = 163(kV)$$

נמצא את הפרש המתח (X) על פי:

$$X = |U_B' - U_A|$$

מכאן:

$$X = |163 - 157| = 6(kV)$$

נחשב את $X\%$ על פי:

$$X\% = \frac{X}{U_{1n}} \cdot 100$$

מכאן:

$$X\% = \frac{6}{160} \cdot 100 = 3.75$$

נחשב את מספר הדרגות על פי:

$$n = \frac{X\%}{a\%}$$

מכאן:

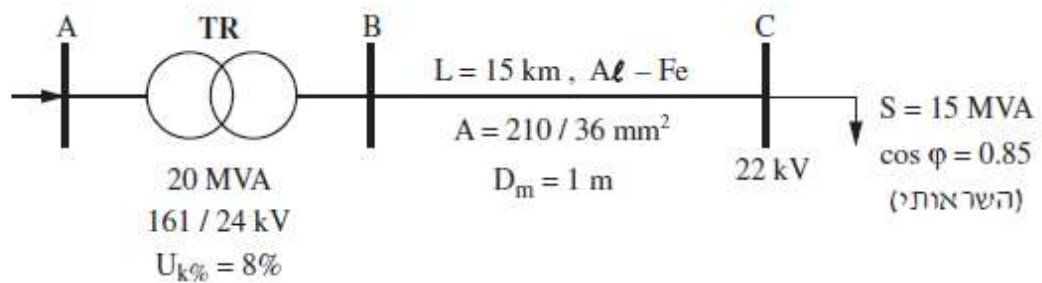
$$n = \frac{3.75}{1.5} = 2.5$$

$$n = 3$$

מכיון ש $U_{2n} < U_B$, יש להוריד דרגות בצד הראשוני של השנאי, מכאן יש להוריד 3 דרגות כלפי מטה.

אביב 2015 שאלה 4:

באיור לשאלה 4 מתוארות תחנת משנה ורשת חלוקה 24 kV. השנאי TR בעל מספר דרגות לוויסות מתח בצד הראשוני שלו. כל דרגה מאפשרת ויסות של 1.5% מהמתח הנקוב.



איור לשאלה 4

- א. חשב את המתח הנדרש בפסי-הצבירה B כדי להבטיח שהמתח בפסי-הצבירה C יהיה 22 kV.
- ב. חשב את מספר הדרגות המזערי (המינימלי) הדרוש לוויסות המתח, כדי להבטיח מתח של 22 kV בפסי-הצבירה C.

(א)

נחשב את מפל המתח ΔU_{B-C} על פי:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{P_C \cdot R_L + Q_C \cdot X_L}{U_C}$$

על פי נתוני התרגיל:

$$\bar{S}_C = 15 \angle 31.79^\circ = (12.75 + j7.9) \text{ MVA}$$

מכאן:

$$P_C = 12.75 \text{ (MW)}$$

$$Q_C = 7.9 \text{ (MVAR)}$$

מכוון שנתון כי הקו עשוי מ ($Al - Fe$) נפנה לטבלה העליונה שבדף הנוסחאון בעמוד 10, נבחר את R_0 ו X_0 על פי שטח חתך הנתון בתרגיל ($A = 210/36 \text{ mm}^2$) וכן על פי מרחק ממוצע בין המוליכים ($D_m = 100 \text{ cm}$).

I	D _m [cm]									R ₀	קוטר	שטח חתך
	56	100	200	300	400	500	600	700	1000			
[A]	X ₀ [Ω/km]									[Ω/km]	[mm]	[mm ²]
90	0.351	0.386	0.429	0.455	0.473	0.487	0.498	0.508	0.530	1.875	5.4	16/2.5
125	0.336	0.371	0.415	0.440	0.458	0.472	0.484	0.493	0.515	1.205	6.8	25/4
145	0.325	0.361	0.404	0.429	0.447	0.461	0.473	0.482	0.505	0.837	8.1	35/6
170	0.315	0.350	0.393	0.419	0.437	0.451	0.462	0.472	0.494	0.594	9.6	50/8
235	0.303	0.338	0.381	0.407	0.425	0.439	0.450	0.460	0.482	0.434	11.6	70/12
290	0.294	0.329	0.372	0.398	0.416	0.430	0.441	0.451	0.473	0.319	13.4	95/15
345	0.284	0.319	0.362	0.388	0.406	0.420	0.431	0.441	0.463	0.234	15.7	120/21
355	0.282	0.318	0.361	0.386	0.404	0.418	0.430	0.439	0.462	0.233	16.1	125/29
400	0.278	0.313	0.356	0.382	0.400	0.414	0.425	0.435	0.457	0.194	17.3	150/25
440	0.272	0.308	0.351	0.376	0.394	0.408	0.420	0.429	0.452	0.169	18.9	170/40
455	0.271	0.307	0.350	0.375	0.393	0.407	0.419	0.428	0.451	0.156	19.2	185/32
490	0.267	0.302	0.346	0.371	0.389	0.403	0.415	0.424	0.446	0.137	20.5	210/36
505	0.266	0.301	0.344	0.370	0.388	0.402	0.413	0.423	0.445	0.137	21.0	210/50
530	0.263	0.299	0.342	0.368	0.386	0.400	0.411	0.421	0.443	0.121	21.7	240/40
615	0.257	0.292	0.335	0.361	0.379	0.393	0.404	0.414	0.436	0.097	24.2	300/50
630	0.251	0.286	0.330	0.355	0.373	0.387	0.398	0.408	0.430	0.095	26.6	310/100
680	0.247	0.283	0.326	0.351	0.369	0.383	0.395	0.404	0.427	0.085	28.1	340/110

ניתן לראות כי:

$$R_0 = 0.137 \left(\frac{\Omega}{km} \right); X_0 = 0.302 \left(\frac{\Omega}{km} \right)$$

נחשב את R_L על פי:

$$R_L = R_0 \cdot L$$

מכאן:

$$R_L = 0.137 \cdot 15 = 2.1 (\Omega)$$

נחשב את X_L על פי:

$$X_L = X_0 \cdot L$$

מכאן:

$$X_L = 0.302 \cdot 15 = 4.53(\Omega)$$

לכן:

$$\Delta U_{B-C} = \frac{12.75 \times 10^6 \cdot 2.1 + 7.9 \times 10^6 \cdot 4.53}{22 \times 10^3} = 2.84(kV)$$

נחשב את מפל המתח על השנאי ΔU_T על פי:

$$\Delta U_T = \frac{P_B \cdot R_T + Q_B \cdot X_T}{U_{2n}}$$

מכוון שנתון רק $U_{k\%}$ של השנאי ואין שום נתון שבעזרתו ניתן לחשב את $U_{r\%}$, ניתן לרשום כי $U_{k\%} = 8\%$, $U_{x\%} = 0$ כלומר $U_{r\%} = 0$, מכאן $R_T = 0$.

נחשב את X_T של השנאי על פי:

$$X_T = \frac{U_{x\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

מכאן:

$$X_T = \frac{8 \cdot (24 \times 10^3)^2}{100 \cdot 20 \times 10^6} = 2.304 (\Omega)$$

נחשב את ΔU_T :

$$\Delta U_T = \frac{7.9 \times 10^6 \cdot 2.304}{24 \times 10^3} = 0.76(kV)$$

נחשב את המתח בפס צבירה B על פי:

$$U_B = U_C + \Delta U_{B-C} + \Delta U_T$$

מכאן:

$$U_B = 22 + 2.84 + 0.76 = 25.6(kV)$$

$U_B = 25.6(kV)$

(ב)

מכוון שנתון כי משנה דרגות נמצא בצד הראשוני של השנאי, נבצע שיקוף למתח

U_B על פי:

$$U_B' = U_B \cdot \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)$$

מכאן:

$$U_B' = 25.6 \cdot \left(\frac{161}{24}\right) = 171.73(kV)$$

נמצא את הפרש המתח (X) על פי:

$$X = |U_B' - U_A|$$

מכאן:

$$X = |171.73 - 161| = 10.73(kV)$$

נחשב את $X\%$ על פי:

$$X\% = \frac{X}{U_{1n}} \cdot 100$$

מכאן:

$$X\% = \frac{10.73}{161} \cdot 100 = 6.67$$

נחשב את מספר הדרגות על פי:

$$n = \frac{X\%}{a\%}$$

מכאן:

$$n = \frac{6.67}{1.5} = 4.44$$

$n = 5$

שיטות טיפול בנקודת האפס

אביב 2016 שאלה 3:

ברשת תלת-מופעית המוזנת במתח גבוה של $22 \text{ kV}/50 \text{ Hz}$, נקודת האפס מוארכת דרך סליל כיבוי (סליל פטרסון).

במקרה של קצר חד-מופעי בין מופע T לאדמה, זורם זרם קיבולי שערכו $I_c = 30 \angle 120^\circ \text{ A}$.

השראות סליל הכיבוי מכוילת לקיזוז מלא של הזרם הקיבולי.

נתון כי המתח במופע R במצב תקין הוא: $\bar{U}_R = \frac{22}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ \text{ kV}$.

א. 1. חשב את ערכו של הזרם בסליל הכיבוי כאשר מתרחש קצר חד-מופעי בין מופע T לאדמה. רשום את ערכו בייצוג פולארי.

2. חשב את ההשראות של סליל הכיבוי.

ב. חשב את זרם הזליגה הקיבולי ממופע R לאדמה כאשר הרשת פועלת בצורה תקינה. רשום את ערכו בייצוג פולארי.

ג. סרטט במחברתך דיאגרמה פאזורית של המתחים ברשת כאשר מתרחש קצר בין מופע T לאדמה.

פתרון אביב 2016 שאלה 3:

נתונים:

$$U_L = 22 \text{ kV}$$

$$\bar{I}_{KC} = 30 \angle 120^\circ (\text{A})$$

$$\bar{U}_R = \frac{22}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ (\text{kV})$$

(א)

1.

כאשר ישנו קיזוז מלא, ערכו של $\bar{I}_L$ צריך להיות בגודל של $\bar{I}_{KC}$ אך בזווית 180° ממנו.

מכאן:

$$\bar{I}_L = 30 \angle 120^\circ - 180^\circ = 30 \angle -60^\circ (\text{A})$$

$$\bar{I}_L = 30 \angle -60^\circ (\text{A})$$

בדיקה:

$$\bar{I}_K = \bar{I}_{KC} + \bar{I}_{KL}$$

$$\bar{I}_K = 30 \angle 120^\circ + 30 \angle -60^\circ = 0(A) \quad \checkmark$$

2.

את השראות הסליל נחשב על פי:

$$L = \frac{U_{PH}}{2\pi \cdot f \cdot I_{KL}}$$

מכאן:

$$L = \frac{\left(\frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{100\pi \cdot 30} = 1.35(Hy)$$

$L = 1.35(Hy)$

(ב)

נחשב את זרם הזליגה בפאזה R על פי:

$$I_{C(R)} = \frac{\bar{I}_{KC}}{3}$$

מכאן:

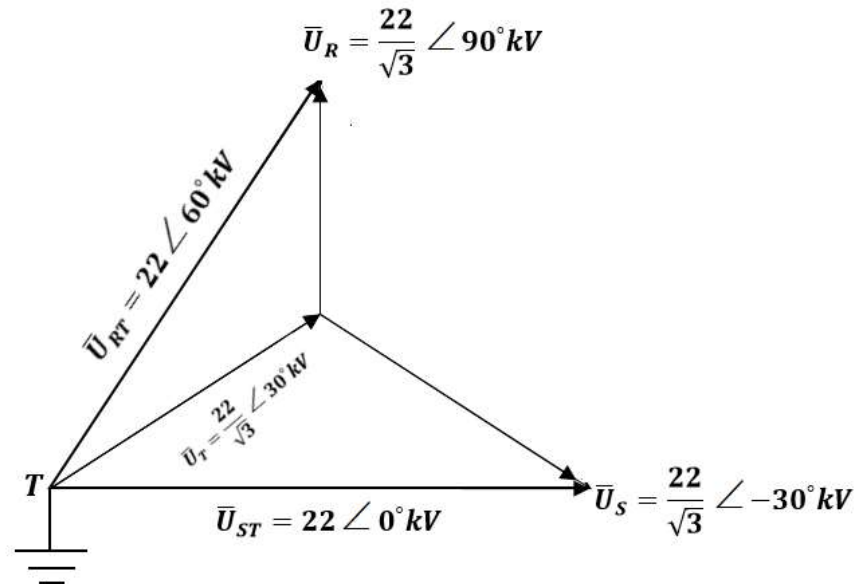
$$I_{C(R)} = \frac{30}{3} = 10(A)$$

מכוון שאופי הזרם קיבולי, הזרם מקדים את המתח ב 90° , מכאן:

$$I_{C(R)} = 10 \angle 90^\circ + 90^\circ = 10 \angle 180^\circ(A)$$

$I_{C(R)} = 10 \angle 180^\circ(A)$

בזמן קצר בפאזה T דיאגרמה פאזורית של מתחים תיראה כך:



אביב 2017 שאלה 4:

בקו הזנה עילי תלת־מופעי 22 kV/50 Hz מועבר הספק של 40 MW במקדם הספק 0.85 השראותי. השנאי המזין את קו ההזנה, מחובר בחיבור D/y ונקודת האפס מוארקה באמצעות סליל פטרסון.

נתוני קו ההזנה:

- אורך הקו: 5 km
 - ההתנגדות הסגולית של מוליך ליחידת אורך: $0.015 \Omega/\text{km}$
 - ההיגב ההשראותי של מוליך ליחידת אורך: $0.4 \Omega/\text{km}$
 - קיבול הקו ליחידת אורך: $100 \frac{\text{nF}}{\text{km}}$
- א. 1. חשב את ערכי פרמטרי האורך והרוחב של מעגל תמורה מופעי מסוג T של קו ההזנה. בחישובך הזנח את תופעת הקורונה.
2. סרטט את מעגל התמורה הנ"ל, וציין על-גבי הסרטוט את הערכים שחישבת.
- ב. חשב את הפסדי ההספק הממשיים וההיגביים בקו ההזנה.
- ג. 1. חשב מהו המתח על סליל פטרסון **לפני התרחשות** קצר חד־מופעי לאדמה בקו, ובזמן **התרחשות** הקצר.
2. בזמן שמתרחש בקו קצר חד־מופעי לאדמה, זרם הקצר השקול מתאפס. חשב את ההשראות של סליל פטרסון.

(א)

1.

נחשב את התנגדות האוהמית של הקו על פי:

$$R_L = R_0 \cdot l$$

מכאן:

$$R_L = 0.015 \cdot 5 = 0.075(\Omega)$$

לכן:

$$R_L/2 = 0.0375(\Omega)$$

נחשב את היגב השראותי של הקו על פי:

$$X_L = X_0 \cdot l$$

מכאן:

$$X_L = 0.4 \cdot 5 = 2(\Omega)$$

לכן:

$$X_L/2 = 1(\Omega)$$

נחשב את מוליכות הקיבולית של הקו על פי:

$$B = \frac{1}{X_C} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \cdot l$$

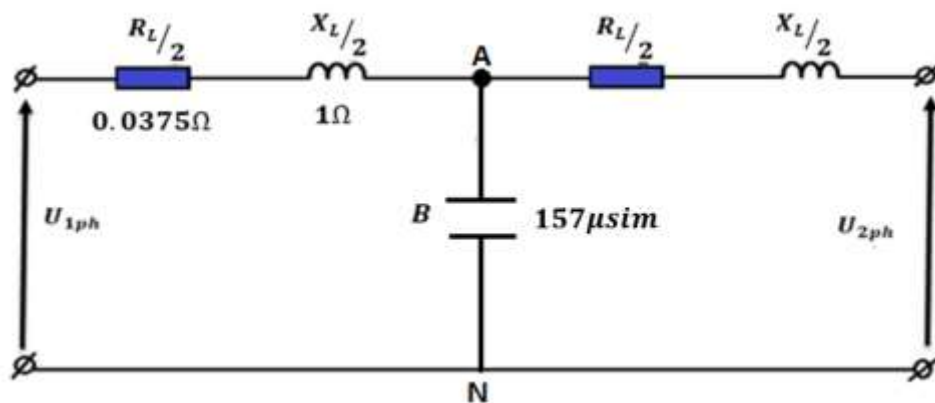
מכאן:

$$B = 100 \cdot \pi \cdot 100 \times 10^{-9} \cdot 5 = 157 \times 10^{-6}(sim) = 157(\mu sim)$$

$$B = 157(\mu sim)$$

2.

מעגל התמרה יראה כך:



(ב)

נחשב את זרם הקו על פי:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi}$$

מכאן:

$$I_L = \frac{40 \times 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \times 10^3 \cdot 0.85} = 1235(A)$$

נחשב את ההפסדים הממשיים בקו על פי:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R_L$$

מכאן:

$$\Delta P = 3 \cdot 1235^2 \cdot 0.075 = 343.16(kW)$$

$$\Delta P = 343.16(kW)$$

נחשב הפסדי הספק היגבי (השראותי) בקו על פי:

$$\Delta Q_L = 3 \cdot I^2 \cdot X_L$$

מכאן:

$$\Delta Q_L = 3 \cdot 1235^2 \cdot 2 = 9.15(MVAR)$$

$$\Delta Q_L = 9.15(MVAR)$$

נחשב הפסדי הספק היגבי (קיבולי) בקו על פי:

$$\Delta Q_C = \frac{3 \cdot U_{cph}^2}{X_C} = 3 \cdot U_{cph}^2 \cdot B$$

מכאן:

$$\Delta Q_C = 3 \cdot \left(\frac{22 \times 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 157 \times 10^{-6} = 0.76(MVAR)$$

$$\Delta Q_C = 0.76(MVAR)$$

(ג)

1.

המתח על סליל פטרסון לפני התרחשות קצר חד-מופעי לאדמה בקו לאדמה שווה לאפס, כלומר:

$$U_0 = 0(V)$$

בזמן התרחשות הקצר, מתח על סליל פטרסון עולה למתח מופעי, כלומר:

$$U_0 = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

מכאן:

$$U_0 = \frac{22 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 12.7(kV)$$

$$U_0 = 12.7(kV)$$

2.

נחשב את זרם המופעי לפני תקלה על פי:

$$I_{Cph} = \frac{U_{ph}}{X_C} = U_{ph} \cdot B$$

מכאן:

$$I_{Cph} = \frac{22 \times 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 157 \times 10^{-6} = 2(A)$$

נחשב את $\bar{I}_{KC}$ על פי:

$$\bar{I}_{KC} = 3 \cdot I_{Cph}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{KC} = 3 \cdot 2 = 6(A)$$

על פי נתוני התרגיל:

$$\bar{I}_{KC} = \bar{I}_{KL} = 6(A)$$

נחשב את השראות סליל הכיבוי על פי:

$$L = \frac{U_{ph}}{2\pi \cdot f \cdot I_{KL}}$$

מכאן:

$$L = \frac{\left(\frac{22 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{100\pi \cdot 6} = 66.505(Hy)$$

אביב 2019 שאלה 3:

בקו חלוקה עילי במתח גבוה $33 \text{ kV} / 50 \text{ Hz}$ נקודת הכוכב מוארקת דרך סליל כיבוי. נתוני הרשת:

- אורך קו החלוקה: 125 km
- מוליכי קו החלוקה עשויים מחמרן-פלדה
- שטח החתך של כל אחד ממוליכי קו החלוקה: 150 mm^2
- ההיגב ההשראותי של כל מוליך ליחידת אורך: $0.3 \text{ } \Omega/\text{km}$
- קיבול הקו ליחידת אורך: $9.5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{F}/\text{km}$

מתרחש קצר חד-מופעי לאדמה במופע L_1 .

המתח המופעי: $V_{L_1} = V_{ph} \sin \omega t$. ערכו של הזרם בנקודת הקצר הוא 12 A והוא בעל אופי השראותי.

(15 נק') א. חשב את השראות סליל הכיבוי.

(10 נק') ב. משטר נקודת האפס של רשתות מתח גבוה נעשה באחת מבין השיטות האלה:

1. נקודת האפס מוארקת ישירות.

2. נקודת האפס מוארקת דרך סליל כיבוי.

ציין איזה מבין סוגי ההגנות שלהלן מתאים לכל אחת מהשיטות שצוינו:

- הגנת זרם פחת

- הגנה ווטמטרית

נמק את תשובתך ובסס אותה על עקרון הפעולה של סוג ההגנה.

פתרון אביב 2019 שאלה 3:

(א)

נחשב את המוליכות הקיבולית של הקו על פי:

$$B = \frac{1}{X_C} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \cdot l$$

מכאן:

$$B = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 9.5 \times 10^{-9} \cdot 125 = 373.06 (\mu\text{sim})$$

נחשב את הזרם הקיבולי של הפאזה על פי:

$$I_{Cph} = U_{ph} \cdot B$$

מכאן:

$$I_{Cph} = \frac{33 \times 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 373.06 \times 10^{-6} = 7.11 (\text{A})$$

בזמן קצר חד מופעי לאדמה:

$$\bar{I}_{KC} = 3 \cdot I_{Cph}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{KC} = 3 \cdot 7.11 = 21.32(A)$$

אנו יודעים כי:

$$\bar{I}_K = \bar{I}_{KC} + \bar{I}_{KL} \longrightarrow \bar{I}_{KL} = \bar{I}_K - \bar{I}_{KC}$$

מכאן:

$$\bar{I}_{KL} = -j12 - j21.32 = -j33.32(A)$$

נחשב את היגב השראי של הסליל על פי:

$$X_L = \frac{U_{ph}}{\bar{I}_{KL}}$$

מכאן:

$$X_L = \frac{33 \cdot 10^3}{\frac{\sqrt{3}}{33.32}} = 571.805(\Omega)$$

נחלץ את השראות הסליל (שינוי נושא נוסחה) מתוך הנוסחה של היגב השראי ונקבל:

$$X_L = \omega \cdot L \longrightarrow L = \frac{X_L}{\omega}$$

מכאן:

$$L = \frac{571.805}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1.82(Hy)$$

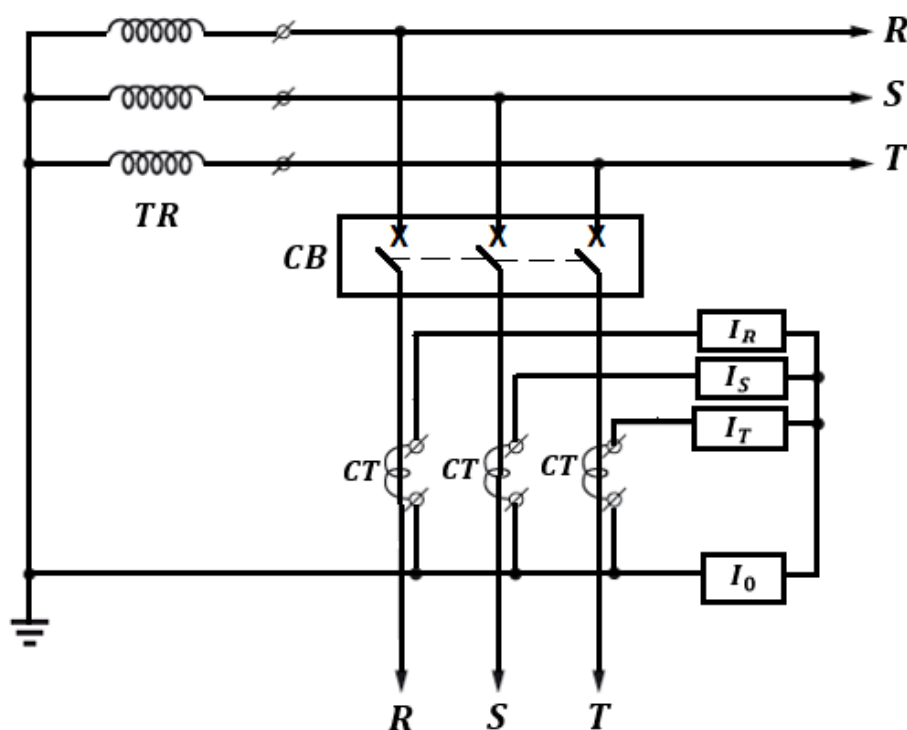
$L = 1.82(Hy)$

(ב)

הגנת זרם פחת מתאימה כאשר נקודת האפס מוארקת ישירות.

הגנה זו הגנה עיקרית בעת קצרים לאדמה וזאת כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת ישירות או דרך נגד. לא ניתן ליישם הגנה זו כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת דרך סליל כיבוי מכוון שקיים חוסר איזון במשטר עבודה תקין של הרשת. הגנה זו מיושמת באמצעות שלושה משני זרם (אחד בכל פאזה) וכוללת בתוכה את היחידה המידית והמושהית. ממסרים בהגנה זו בעלי רגישות גבוהה יותר לזרמי קצר לאדמה ולכן זמן תגובה של הגנה זו מהיר יותר.

באיור הבא ניתן לראות תיאור עקרוני של ההגנה לזרם פחת:



הגנת ווטמטרית מתאימה כאשר נקודת האפס מוארקת דרך סליל כיבוי.

כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת דרך סליל כיבוי, בעת קצר חד מופעי לאדמה ערכו של זרם הקצר נמוך מאוד והוא בעל אופי קיבולי. ההגנה שיכולה לזהות קצר זה היא הגנה ווטמטרית וזאת עקב רגישותה הגבוהה. הגנה זו מספקת סלקטיביות גבוהה ובכך גורמת להפסקת מעגל הפגוע בלבד. בעת קצר חד פאזי לאדמה מופיע מתח פאזי על הדקי סליל הכיבוי L . כאשר הופיע מתח על סליל כיבוי L השווה בערכו למתח הפאזי של הרשת, מתח זה גורם להופעת מתחים בליפופים המשניים של סליל הכיבוי (L_2, L_1) . כתוצאה מיחס הליפופים על סליל L_1 מתפתח מתח של $500(V)$ ועל סליל L_2 $110(V)$. מתח של $110(V)$ נועד להפעיל את סליל המתח של הממסר הוטרטרי.

אם זרם השראי $\bar{I}_L$ הזורם דרך סליל הכיבוי בעת קצר חד פאזי לא הביא להקטנת זרם קצר קיבולי ולכיבוי הקשת, נסגר מגען C_1 המחבר בטור את הנגד R לסליל L_1 . כתוצאה מהופעת מתח על סליל L_1 והתנגדות הנגד נוצר זרם אקטיבי שזורם במעגל הקצר דרך סליל הכיבוי לאדמה, למקום הקצר ומשם דרך מוליכי הרשת בחזרה לכיוון השנאי וזאת לשם זיהוי הקו הנפגע. זרם תקלה זה עובר השנאה באמצעות משנה זרם ומגיע לממסר הוטרטרי. ממסר הוטרטרי מבצע מדידה של הספק החשמלי על ידי הכפלה של מתח $110(V)$ המגיע מסליל L_2 וזרם התקלה שעבר השנאה, במידה וההספק המתקבל (הספק המצוי) שונה מההספק שכויל מראש (הספק הרצוי), הממסר מזהה כי ישנו אי איזון בין שלושת הפאזות ומתרגם זאת כתקלה. באותו רגע הממסר נותן פקודה למפסק זרם CB להפסיק את המעגל.

באיור הבא ניתן לראות את ההגנה

