

המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר

מתקני חשמל חשמלאי מוסמך

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים
2013

דרך הטייסים 28, ת.ד. 62137, תל-אביב 61620, טל: 03-6302333, פקס: 03-6311153

28 DERECH HATAYASIM STR. P.O.Box 62137, TEL-AVIV 61620; Tel: 972-3-6302333

כתובת אינטרנט: <http://s.ort.org.il>

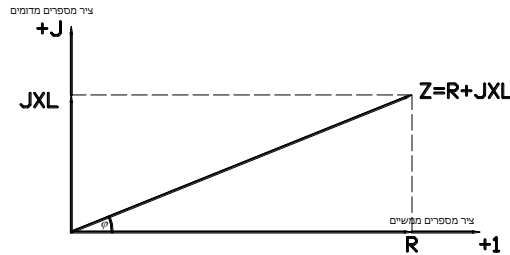
אורט ישראל- חברה לתועלת הציבור חל"צ / 174

תוכן עניינים:

מבוא	עמ' 3
פרק 1- איבודי הספק	עמ' 4-14
פרק 2- מפלי מתח	עמ' 15-30
פרק 3- שיפור גורם ההספק	עמ' 31-33
פרק 4- הארקות והגנות בפני התחשמלות	עמ' 34-40
פרק 5- הגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר	עמ' 41-47
פרק 6- שרטוט סכמתי חשמלי	עמ' 48-54
פרק 7- תכנון דירת מגורים	עמ' 55-56
פרק 8- תכנון בית מלאכה ובתי עסק	עמ' 57-62
פרק 9- משק החשמל בישראל	עמ' 63-64
פרק 10- תאורה	עמ' 65-81
פרק 11- שערים לוגיים ודיאגראמת סולם	עמ' 82-84

מבוא-זרמים והספקים בזרם חילופין

באופן כללי צרכן הזרם חילופין מאופיין ע"י העכבה Z. העכבה בנויה מ-2 רכיבים:
 הרכיב האפקטיבי R הוא התנגדות האומית הנובעת מהתנגדותם האומית של מוליכי הצרכן
 הרכיב הראקטיבי X הוא ההיגב שמבטא את השפעות השדות המגנטי והחשמלי המופיעים בצרכן.
 ההיגב X יכול להיות אחד מ-2 הסוגים הבאים:
 א. היגב השראי X_L לצרכנים הכוללים סלילים אשר אוגרים בתוכם שדה מגנטי.
 ב. היגב קיבולי X_C לצרכנים הכוללים קבלים אשר אוגרים בתוכם שדה חשמלי.
 חיבור בין האפקטיבי והראקטיבי הינו מספר מרוכב וניתן להציגו בדיאגרמות הוקטוריות הבאות:
 עבור צרכן בעל אופי השראי-



מקובל לרשום את ההיגב השראי עם סימן "+".
 זווית העכבה φ מתקבלת לפי הביטויים:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R}{Z} \right)$$

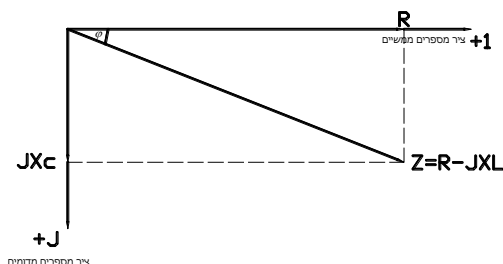
$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{XL}{Z} \right)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{XL}{R} \right)$$

מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו:

$$R + jXL = Z^{\angle +\varphi}$$

עבור צרכן בעל אופי קיבולי-



מקובל לרשום את ההיגב הקיבולי עם סימן "-".
 זווית העכבה φ מתקבלת לפי הביטויים:

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{R}{Z} \right)$$

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{-XC}{Z} \right)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{-XC}{R} \right)$$

מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו:

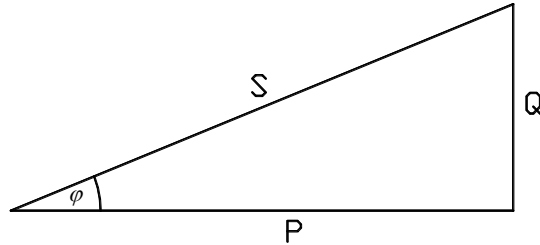
$$R - jXC = Z^{\angle -\varphi}$$

פרק 1-איבודי הספק

רשתות חשמל היא מערכת הולכת אנרגיה חשמלית. איבודי הספק נגרמים כתוצאה מהתנגדות המוליכים וכתוצאה מכך חלק מהאנרגיה המועברת מתבזזת והופכת לחום.

מבוא

משולש הספקים



$$P = S * \cos \varphi$$

$$Q = S * \sin \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

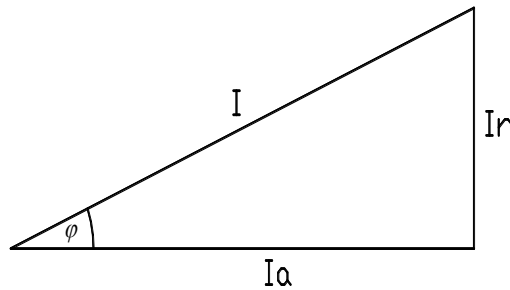
$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

משולש הזרמים



$$Ia = I * \cos \varphi$$

$$Ir = I * \sin \varphi$$

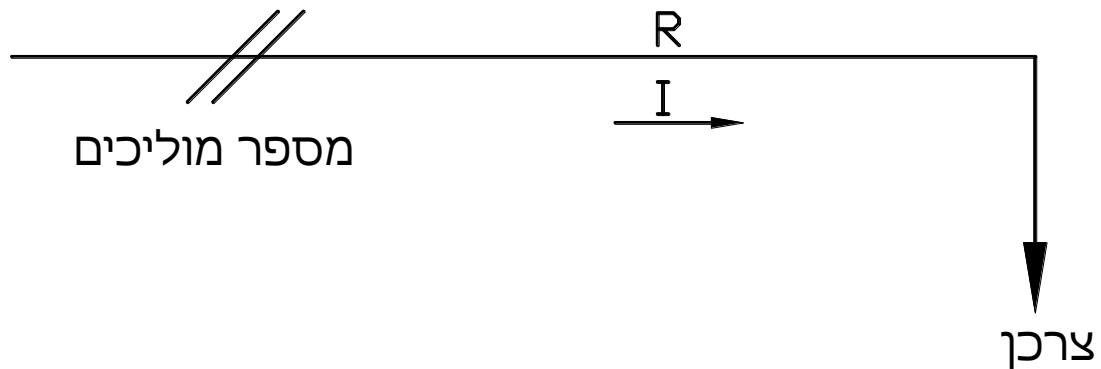
$$\cos \varphi = \frac{Ia}{I}$$

$$\sin \varphi = \frac{Ir}{I}$$

$$\tan \varphi = \frac{Ir}{Ia}$$

$$I^2 = Ia^2 + Ir^2$$

$$I = \sqrt{Ia^2 + Ir^2}$$



$$\Delta P = I^2 * R [W]$$

$$R = \frac{\rho * l}{A} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$\Delta P = \frac{2\rho}{A} * I^2 * l [W]$$

כאשר:

ΔP - איבודי הספק

I - זרם בקו

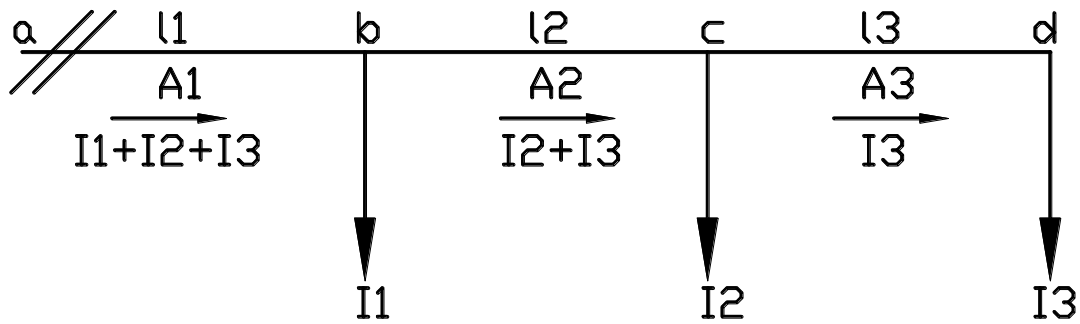
ρ - התנגדות סגולית של חומר המוליך:

$$\rho_{Cu} = \frac{1}{48} \div \frac{1}{60} \text{ נחושת}$$

$$\rho_{Al} = \frac{1}{34} \div \frac{1}{36} \text{ אלומיניום}$$

l - המרחק מהמקור ועד לצרכן (m).

A - שטח החתך של המוליך (mm^2).



$$I_{cd} = I_3$$

$$I_{bc} = I_2 + I_3$$

$$I_{ab} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\Delta P_{cd} = \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd}^2 * l_3$$

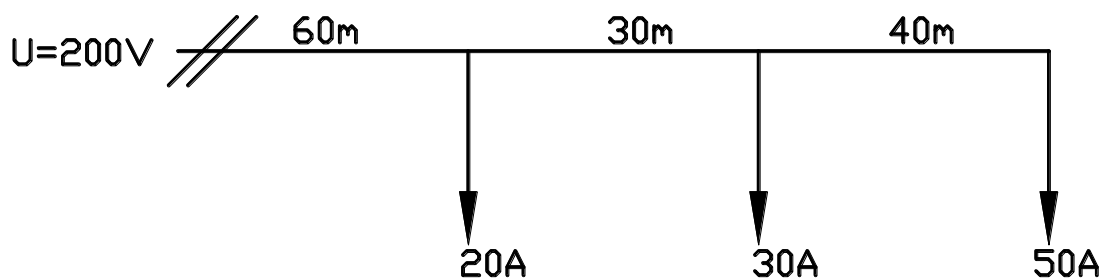
$$\Delta P_{bc} = \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc}^2 * l_2$$

$$\Delta P_{ab} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

$$\Delta P_{max} = \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd}$$

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת חשמל במתח ישר המתוארת באיור הבא:

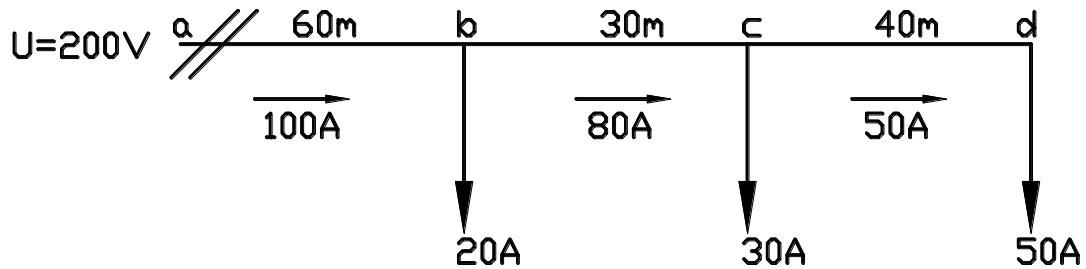


נתון:

$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$A = 10 [mm^2]$$

מה איבוד ההספק המקסימאלי ברשת?
האם הרשת כלכלית?



$$\Delta P_{max} = \frac{2 \cdot \rho_1}{A_1} \cdot I_{ab}^2 \cdot l_1 + \frac{2 \cdot \rho_2}{A_2} \cdot I_{bc}^2 \cdot l_2 + \frac{2 \cdot \rho_3}{A_3} \cdot I_{cd}^2 \cdot l_3$$

כאשר סוג החומר וחתך המוליכים אחידים ניתן מבחינה מתמטית להוציא גורם משותף ולכן:

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A} \cdot \sum I^2 \cdot l = \frac{2\rho}{A} \cdot (I_{ab}^2 \cdot l_1 + I_{bc}^2 \cdot l_2 + I_{cd}^2 \cdot l_3)$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2}{10} \cdot \frac{1}{57} \cdot (100^2 \cdot 60 + 80^2 \cdot 30 + 50^2 \cdot 40) = 3129.82W$$

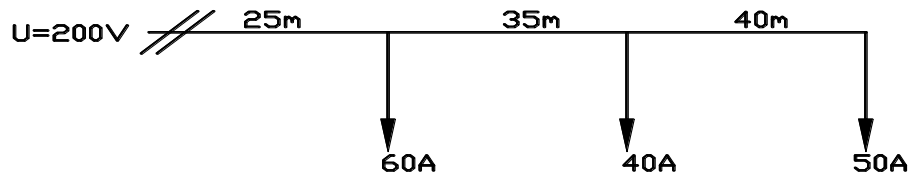
$$\Delta P_{max}\% = \frac{\Delta P_{max}}{P_n} \cdot 100$$

$$P_n = U_n \cdot I_n = 200 \cdot 100 = 20KW$$

$$\Delta P_{max}\% = \frac{3129.82}{20 \cdot 10^3} \cdot 100 = 15.649\%$$

רשת כלכלית מוגדרת כרשת שאיבודי ההספק המקסימאליים בה לא עולה מעל 10%.

רשת זו אינה רשת כלכלית ועל מנת לפתור בעיה זו אחת הדרכים להגדיל את שטח החתך של המוליכים.

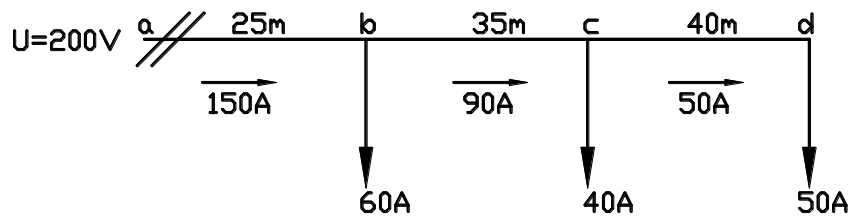


נתון:

$$\rho = \frac{1}{34} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

- חשב שטח חתך אחיד לרשת עבור איבודי הספק מקסימאליים של 6%.
- בחר שטח חתך מסחרי וחשב את איבודי ההספק מקסימאליים באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2



א.

$$P_n = U_n * I_n = 200 * 150 = 30KW$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta P\% * P_n}{100} = \frac{6 * 30 * 10^3}{100} = 1800W$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A} * \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta P_{max}} * \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{2}{1800 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 30.91mm^2$$

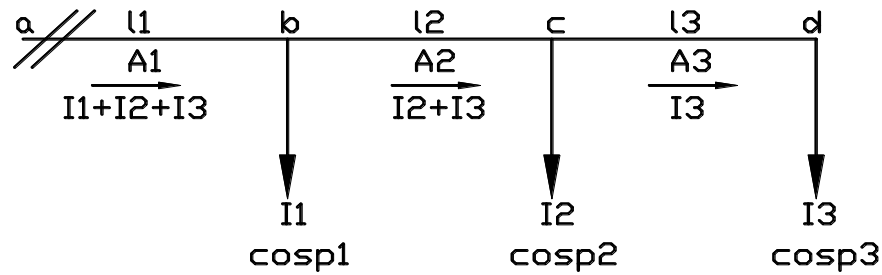
ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A} * \sum I^2 * l$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2}{35 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 1589.81W$$

$$\Delta P_{max}\% = \frac{\Delta P_{max}}{P_n} * 100 = \frac{1589.81}{30 * 10^3} * 100 = 5.3\%$$



$$\vec{I}_{cd} = \vec{I}_3$$

$$\vec{I}_{bc} = \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

$$\vec{I}_{ab} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

$$\Delta P_{cd} = \Delta P_{cd} = \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd}^2 * l_3$$

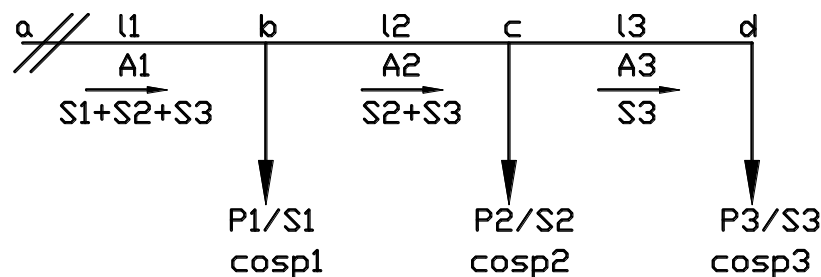
$$\Delta P_{bc} = \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc}^2 * l_2$$

$$\Delta P_{ab} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

$$\Delta P_{max} = \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd}$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A} * \sum I^2 * l$$



$$S = U * I$$

$$P = U * I * \cos \rho$$

$$Q = U * I * \sin \rho$$

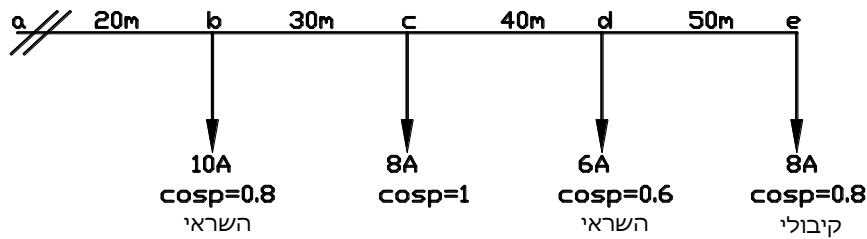
$$I = \frac{S}{U} \quad \text{מכיוון ש-}$$

$$I^2 = \frac{S^2}{U^2} \quad \text{לכן-}$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A * U^2} * \sum S^2 * l$$

תרגיל דוגמא 1

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

$$\rho = \frac{1}{34} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$\Delta P_{max} = 1.2\%$$

$$U = 250V$$

א. חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת

ב. חשב את שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת עבור איבודי הספק מקסימאליים של 1.2%.

ג. קבע שטח חתך מסחרי וחשב לפיו את איבודי ההספק בקטע bc ואת סכום איבודי ההספק ברשת.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

$$\vec{I_e} = (6.4 - j4.8) A$$

$$\vec{I_d} = (3.6 + j4.8) A$$

$$\vec{I_c} = (8 + j0) A$$

$$\vec{I_b} = (8 + j6) A$$

$$\vec{I_{de}} = \vec{I_e} = (6.4 - j4.8) = \sqrt{6.4^2 + 4.8^2} = 8A$$

$$\vec{I_{cd}} = \vec{I_d} + \vec{I_{de}} = (3.6 + j4.8) + (6.4 + j4.8) = (10 + j0) = \sqrt{10^2 + 0^2} = 10 A$$

$$\vec{I_{bc}} = \vec{I_c} + \vec{I_{cd}} = (8 + j0) + (10 + j0) = (18 + j0) = \sqrt{18^2 + 0^2} = 18 A$$

$$\vec{I_{ab}} = \vec{I_b} + \vec{I_{bc}} = (8 + j6) + (18 + j0) = (26 + j6) = \sqrt{26^2 + 6^2} = 26.683A$$

ב.

$$P_n = U_n * I_a = 250 * 26 = 6500W$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta P\%}{100} * P_n = \frac{1.2}{100} * 6500 = 78W$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta P_{max}} * \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{2}{78 * 34} * (26.683^2 * 20 + 18^2 * 30 + 10^2 * 40 + 8^2 * 50) = 23.5mm^2$$

ג. נבחר שטח חתך מסחרי של $25mm^2$.

$$\Delta P_{bc} = \frac{2\rho}{A} * I_{bc}^2 * l_{bc} = \frac{2}{25 * 34} * 18^2 * 30 = 22.78W$$

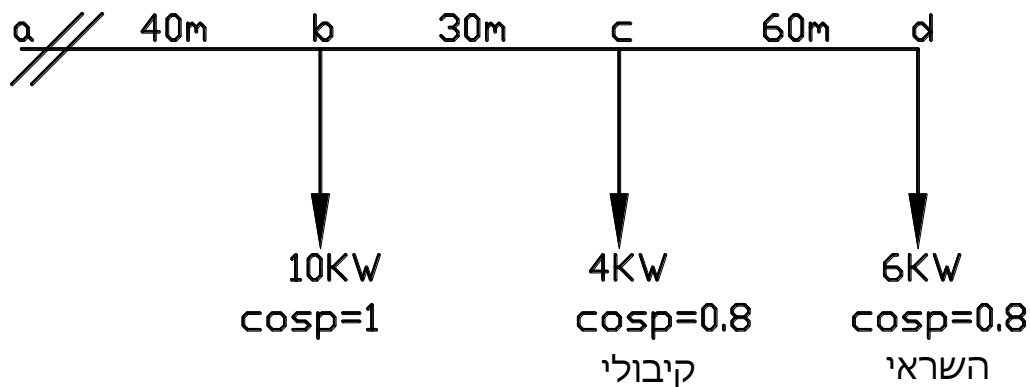
$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A} * \sum I^2 * l =$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2}{25 * 34} * (26.683^2 * 20 + 18^2 * 30 + 10^2 * 40 + 8^2 * 50)$$

$$\Delta P_{max} = 73.317W$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

$$\rho = \frac{1}{56} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$\Delta P_{max} = 5\%$$

$$U = 250V$$

א. חשב את שטח האחיד והמסחרי של הרשת

ב. חשב את הפסדי ההספק ברשת באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

$$Q = P * \tan \varphi$$

$$S_d = (6 + j4.5)KVA$$

$$S_c = (4 - j3)KVA$$

$$S_b = (10 + j0)KVA$$

$$S_{cd} = S_d = (6 + j4.5) = \sqrt{6^2 + 4.5^2} = 7.5KVA$$

$$S_{bc} = S_c + S_{cd} = (4 - j3) + (6 + j4.5) = (10 + j1.5) = \sqrt{10^2 + 1.5^2} = 10.112KVA$$

$$S_{ab} = S_b + S_{bc} = (10 + j0) + (10 + j1.5) = (20 + j1.5) = \sqrt{20^2 + 1.5^2} = 20.056KVA$$

$$\Delta P_{max} = \frac{P_n * \Delta P\%}{100} = \frac{(10 + 4 + 6) * 10^3 * 5}{100} = 1000W$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta P_{max} * U^2} * \sum S^2 * l$$

$$A = \frac{2}{1000 * 56 * 250^2} * (20.056^2 * 40 + 10.112^2 * 30 + 7.5^2 * 60) * 10^6 = 12.876mm^2$$

נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$.

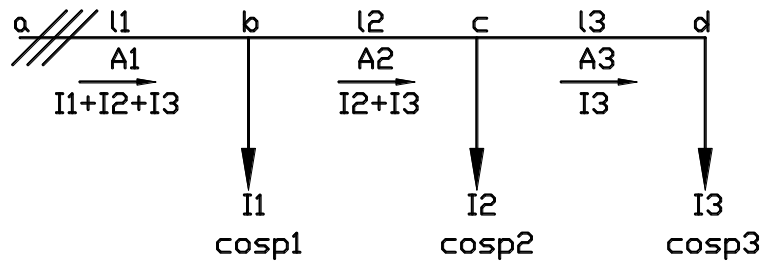
ב.

$$\Delta P_{max} = \frac{2\rho}{A * U^2} * \sum S^2 * l$$

$$\Delta P_{max} = \frac{2}{16*56*250^2} * (20.056^2 * 40 + 10.112^2 * 30 + 7.5^2 * 60) * 10^6 = 804.725W$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P_{max}}{P_n} * 100 = \frac{804.725}{(10 + 4 + 6) * 10^3} * 100 = 4.024\%$$

רשת תלת פאזית במתח חילופין



$$\vec{I}_{cd} = \vec{I}_3$$

$$\vec{I}_{bc} = \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

$$\vec{I}_{ab} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

$$\Delta P_{cd} = \Delta P_{cd} = \frac{3 * \rho_3}{A_3} * I_{cd}^2 * l_3$$

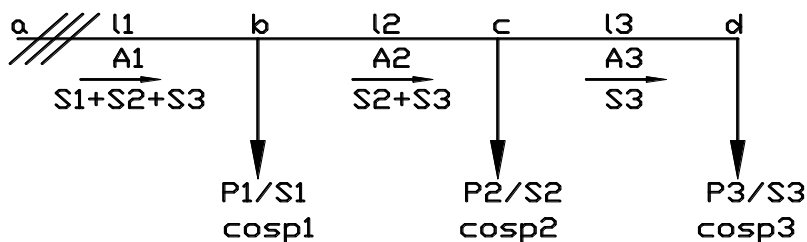
$$\Delta P_{bc} = \frac{3 * \rho_2}{A_2} * I_{bc}^2 * l_2$$

$$\Delta P_{ab} = \frac{3 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

$$\Delta P_{max} = \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd}$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

$$\Delta P_{max} = \frac{3\rho}{A} * \sum I^2 * l$$



$$S = \sqrt{3} * U * I$$

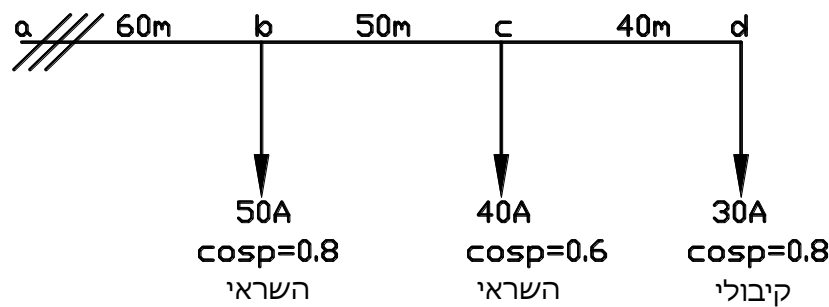
$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos p$$

$$Q = \sqrt{3} * U * I * \sin p$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\rho}{A * U^2} * \sum S^2 * l$$

תרגיל דוגמא 1

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

$$\rho = \frac{1}{56} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$UL = 400V$$

- חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת.
- חשב את שטח החתך האחיד עבור הפסד הספק מקסימאלי מותר של 4%.
- קבע שטח חתך מסחרי וחשב את איבוד הספק מקסימאלי של הרשת באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

$$\vec{I_d} = (24 - j18) A$$

$$\vec{I_c} = (24 + j32) A$$

$$\vec{I_b} = (40 + j30) A$$

$$\vec{I_{cd}} = \vec{I_d} = (24 - j18) = \sqrt{24^2 + 18^2} = 30 A$$

$$\vec{I_{bc}} = \vec{I_c} + \vec{I_{cd}} = (24 + j32) + (24 - j18) = (48 + j14) = \sqrt{48^2 + 14^2} = 50 A$$

$$\vec{I_{ab}} = \vec{I_b} + \vec{I_{bc}} = (40 + j30) + (48 + j14) = (88 + j44) = \sqrt{88^2 + 44^2} = 98.387 A$$

ב.

$$P_n = \sqrt{3} * UL * I_a(ab) = \sqrt{3} * 400 * 88 = 60.938 KW$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta P\%}{100} * P_n = \frac{4}{100} * 60.938 * 10^3 = 2437.52 W$$

$$A = \frac{3\rho}{\Delta P_{max}} * \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{3}{2437.52 * 56} * (98.387^2 * 60 + 50^2 * 50 + 30^2 * 40) = 16.303 mm^2$$

ג.

נבחר שטח חתך מסחרי 25mm².

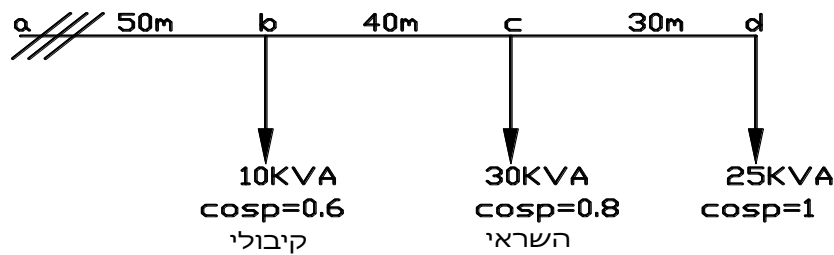
$$\Delta P_{max} = \frac{3\rho}{A} * \sum I^2 * l$$

$$\Delta P_{max} = \frac{3}{25 * 56} * (98.387^2 * 60 + 50^2 * 50 + 30^2 * 40) = 1589.57 W$$

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P_{max}}{P_n} * 100 = \frac{1589.57}{60.939 * 10^3} * 100 = 2.6\%$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

$$U_L = 400V$$

- חשב את הזרם בכל קטע.
- חשב את שטח החתך האחיד בדרוש עבור איבוד הספק מרבי של 1.5%.
- בחר שטח חתך מסחרי וחשב את איבודי ההספק בקטע bc.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

$$S_d = (25 + j0)KVA$$

$$S_c = (24 + j18)KVA$$

$$S_b = (6 - j8)KVA$$

$$S_{cd} = S_d = (25 + j0) = \sqrt{25^2 + 0^2} = 25KVA$$

$$S_{bc} = S_c + S_{cd} = (24 + j18) + (25 + j0) = (49 + j18) = \sqrt{49^2 + 18^2} = 52.202KVA$$

$$S_{ab} = S_b + S_{bc} = (6 - j8) + (49 + j18) = (55 + j10) = \sqrt{55^2 + 10^2} = 55.902KVA$$

ב.

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta P\%}{100} * P_n = \frac{1.5}{100} * 55 * 10^3 = 825W$$

$$A = \frac{\rho}{\Delta P_{max} * U^2} * \sum S^2 * l$$

$$A = \frac{1}{825 * 400^2 * 57} * 10^6 (55.902^2 * 50 + 52.202^2 * 40 + 25^2 * 30) = 37.746mm^2$$

ד.

נבחר שטח חתך מסחרי 50mm².

$$\Delta P_{bc} = \frac{\rho}{A * U^2} * S_{bc}^2 * l_{bc} =$$

$$\Delta P_{bc} = \frac{1}{50 * 400^2 * 57} * (52.202 * 10^3)^2 * 40 = 239.039W$$

פרק 2- מפלי מתח

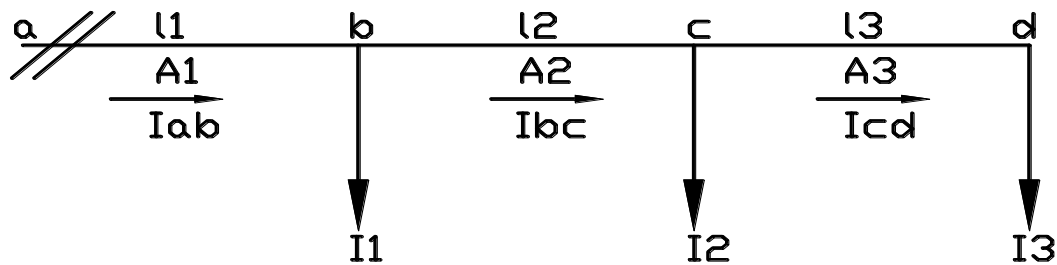
רשתות מתח ישר

מפל מתח המתפתח על מוליכי הרשת מוגדר ΔU .

$$\Delta U = I l * R l$$

$$R l = \frac{2 \rho * l}{A}$$

$$\Delta U = \frac{2 \rho}{A} * I * l$$



$$\Delta U_{ab} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab} * l_1$$

$$\Delta U_{bc} = \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc} * l_2$$

$$\Delta U_{cd} = \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd} * l_3$$

$$U_b = U_a - \Delta U_{ab}$$

$$U_c = U_b - \Delta U_{bc} = U_a - (\Delta U_{ab} + \Delta U_{bc})$$

$$U_d = U_c - \Delta U_{cd} = U_a - (\Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd})$$

המשמעות היא: הצרן הרחוק ביותר מהמקור מקבל את מתח הנמוך ביותר.

$$\Delta U_{max} = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd}$$

$$\Delta U_{max} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab} * l_1 + \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc} * l_2 + \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd} * l_3$$

כאשר סוג חומר ושטח החתך אחידים:

$$\Delta U_{max} = \frac{2 \rho}{A} * \sum I * l$$

$$\Delta U_{max} \% = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} * 100$$

תרגיל דוגמא 1

קורס- מתקני חשמל והספק-חשמלאי מוסמך

נתון צרכן הצורך 30A מתח המקור 115V הצרכן מרוחק 40 מ' מהמקור. מפל המתח

$$\rho = \frac{1}{58} \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right] \text{ נתון כי } 3\% \text{ המקסימאלי המותר הוא}$$

א. חשב את שטח החתך של המוליך.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח על הצרכן.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U_{max\%} * U_n}{100} = \frac{3 * 115}{100} = 3.45V$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_{max}} * I * l = \frac{2}{3.45 * 58} * 30 * 40 = 11.99mm^2$$

ב.

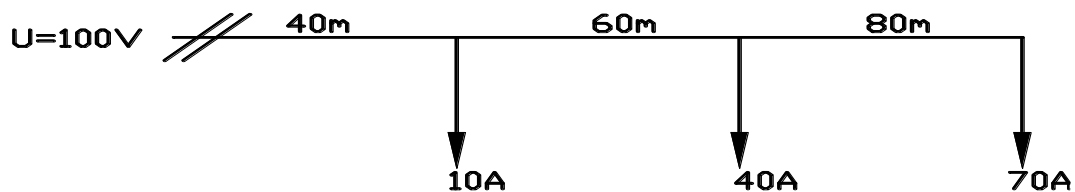
נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$

$$\Delta U_{max}' = \frac{2\rho}{A'} * I * l = \frac{2}{16 * 58} * 30 * 40 = 2.586V$$

$$U(\text{צרכן}) = U(\text{מקור}) - \Delta U_{max}' = 115 - 2.586 = 112.414V$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



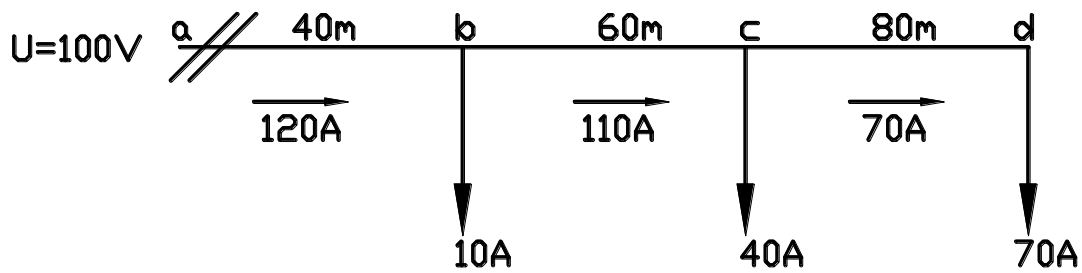
$$\rho = \frac{1}{34} \text{ נתון כי}$$

א. חשב שטח אחיד לרשת עבור מפל מתח של 4%.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח הנופל על צרכן c.

ג. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2



א.

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U_{max\%} * U_n}{100} = \frac{4 * 100}{100} = 4V$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_{max}} * \sum I * l = \frac{2}{4 * 34} * (120 * 40 + 110 * 60 + 70 * 80) =$$

$$A = 250mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $2 \times 150 mm^2$.

$$\Delta U_{ac} = \frac{2\rho}{A} * (I_{ab} * l_{ab} + I_{bc} * l_{bc}) = \frac{2}{34 * 2 * 150} * (120 * 40 + 110 * 60) =$$

$$\Delta U_{ac} = 2.33V$$

$$U_c = U_a - \Delta U_{ac} = 100 - 2.33 = 97.77V$$

ג.

$$\Delta U_{max} = \frac{2\rho}{A} * \sum I * l = \frac{2}{34 * 2 * 150} * (120 * 40 + 110 * 60 + 78 * 80) =$$

$$\Delta U_{max} = 3.33V$$

$$\Delta U_{max\%} = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} * 100 = \frac{3.33}{100} * 100 = 3.33\%$$

רשת מתח חילופין חד פאזי

$$\Delta U_{max} = \Delta U_a + \Delta U_r$$

$$\Delta U_a = \Delta U - \Delta U_r$$

$$\Delta U_a = R_o * I_a * l = \frac{2\rho}{A} * I_a * l$$

$$\Delta U_r = X_o * I_r * l$$

$$\Delta U_{max} = \frac{2\rho}{A} * I_a * l + X_o * I_r * l$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_a} * \sum I_a * l$$

$$I_a = I * \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{U * \cos \varphi}$$

$$I_a = \frac{P}{U}$$

$$I_r = I * \sin \varphi$$

$$I = \frac{Q}{\sin \varphi}$$

$$I_r = \frac{Q}{U}$$

$$\Delta U_{max} = \frac{2\rho}{A} * \frac{P}{U} * l + \frac{X_o}{U} * Q * l$$

$$S \cos \varphi = P + JQ$$

$$S = U * I$$

כאשר:

$$R_o = R_o * l \left[\frac{\Omega}{Km} \right] \text{ - התנגדות המוליך ליחידת אורך-}$$

$$X_o = X_o * l \left[\frac{\Omega}{Km} \right] \text{ - היגב המוליך ליחידת אורך-}$$

$$I_a \text{ - זרם דרך המרכיב הממשי של המוליך- } [A]$$

$$I_r \text{ - זרם דרך המרכיב ההיגבי של המוליך- } [A]$$

$$P \text{ - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן- } [W]$$

$$Q \text{ - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן- } [VAr]$$

$$S \text{ - ההספק המדומה המתפתח בצרכן- } [VA]$$

תרגיל דוגמא 1

נתון צרכן חד פאזי בעל הנתונים הבאים: $100A$, $\cos \varphi = 0.8$

מחובר למקור מתח של $200V$ באמצעות כבל בעל הנתונים הבאים:

$$L=100m, \rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right], X_o=0.1 \frac{\Omega}{Km}$$

א. חשב מה שטח החתך הדרוש למוליך עבור מפל מתח מקסימאלי של 3%.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב עבורו את המתח הנופל על הצרכן.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

$$I_a = I * \cos \varphi = 100 * \cos 36.87 = 80A$$

$$I_r = I * \sin \varphi = 100 * \sin 36.87 = 60A$$

$$\vec{I} = (80 + j60)A$$

$$\Delta U_r = X_o * I_r * l = \frac{0.1}{1000} * 60 * 100 = 0.6V$$

$$\Delta U = \frac{\Delta U\% * U_n}{100} = \frac{3 * 200}{100} = 6V$$

$$\Delta U_a = \Delta U - \Delta U_r = 6 - 0.6 = 5.4V$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_a} * I_a * l = \frac{2}{5.4 * 57} * 80 * 100 = 51.98mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $70mm^2$.

$$\Delta U_{max} = \frac{2\rho}{A} * I_a * l + X_o * I_r * l =$$

$$\Delta U_{max} = \frac{2}{70 * 57} * 80 * 100 + \frac{0.1}{1000} * 60 * 100 = 4.5V$$

$$U(\text{צרכן}) = U(\text{מקור}) - \Delta U_{max} = 200 - 4.5 = 195.5V$$

תרגיל דוגמא 2

רשת חד פאזית מספקת לצרכן של $15KW$ בגורם הספק של 0.8 השראתי. המתח הנמדד על פני הצרכן הוא $220V$. התנגדות האומית של הרשת עד לצרכן הוא 0.04Ω . ואילו ההיגב ההשראתי של הרשת עד לצרכן הוא 0.15Ω . חשב את מתח המקור.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

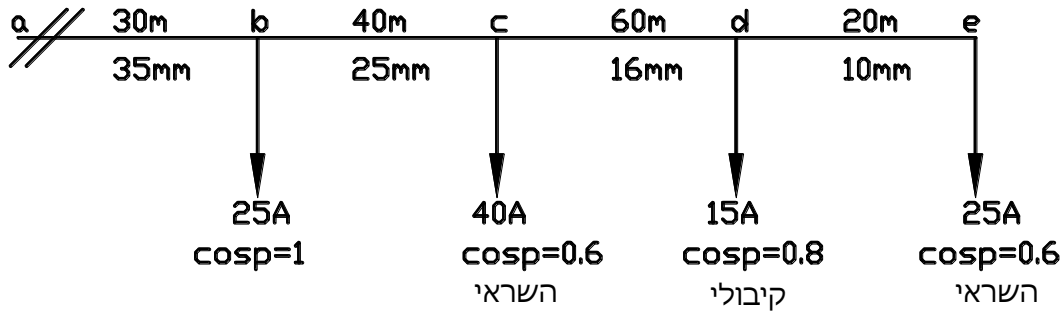
$$I_L = \frac{PL}{U_L * \cos \varphi} = \frac{15 * 10^3}{220 * 0.8} = 85.227 \angle 36.87^\circ A = (68.182 + j51.136)A$$

$$\Delta U_{max} = R * I_a * + X * I_r * =$$

$$\Delta U_{max} = 0.04 * 68.182 + 0.15 * 51.136 = 10.4V$$

$$U(\text{מקור}) = U(\text{צרכן}) + \Delta U_{max} = 220 + 10.4 = 230.4V$$

תרגיל דוגמא 3



נתון כי:

$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$Xo = 0.2 \left[\frac{\Omega}{\text{Km}} \right]$$

$$Un = 200V$$

א. חשב את המתח הנופל על הצרכנים.

ב. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

א.

$$I_e = (12 + j16)A$$

$$I_d = (12 - j9)A$$

$$I_c = (24 + j32)A$$

$$I_b = (25 + j0)A$$

$$I_{de} = I_e = (12 + j16)A$$

$$I_{cd} = I_d + I_{de} = (12 - j9) + (12 + j16) = (24 + j7)A$$

$$I_{bc} = I_c + I_{cd} = (24 + j32) + (12 + j7) = (48 + j39)A$$

$$I_{ab} = I_b + I_{bc} = (25 + j0) + (48 + j39) = (73 + j39)A$$

$$\Delta U_{ab} = \frac{2\rho}{A_{ab}} * I_a(ab) * l_{ab} + Xo * I_r(ab) * l_{ab} =$$

$$\Delta U_{ab} = \frac{2}{35 * 57} * 73 * 30 + \frac{0.2}{1000} * 39 * 30 = 2.43V$$

$$U_b = Un - \Delta U_{ab} = 200 - 2.43 = 197.57V$$

$$\Delta U_{bc} = \frac{2\rho}{A_{bc}} * I_a(bc) * l_{bc} + Xo * I_r(bc) * l_{bc} =$$

$$\Delta U_{bc} = \frac{2}{25 * 57} * 48 * 40 + \frac{0.2}{1000} * 39 * 40 = 3V$$

$$U_c = U_b - \Delta U_{bc} = 197.57 - 3 = 194.57V$$

$$\Delta U_{cd} = \frac{2\rho}{A_{cd}} * I_a(cd) * l_{cd} + Xo * I_r(cd) * l_{cd} =$$

$$\Delta U_{cd} = \frac{2}{16 * 57} * 24 * 60 + \frac{0.2}{1000} * 7 * 60 = 3.24V$$

$$U_d = U_c - \Delta U_{cd} = 194.57 - 3.24 = 191.33V$$

$$\Delta U_{de} = \frac{2\rho}{A_{de}} * I_a(de) * l_{de} + X_o * I_r(de) * l_{de} =$$

$$\Delta U_{de} = \frac{2}{10 * 57} * 12 * 20 + \frac{0.2}{1000} * 16 * 20 = 0.906V$$

$$U_e = U_d - \Delta U_{de} = 191.33 - 0.906 = 190.42V$$

ב.

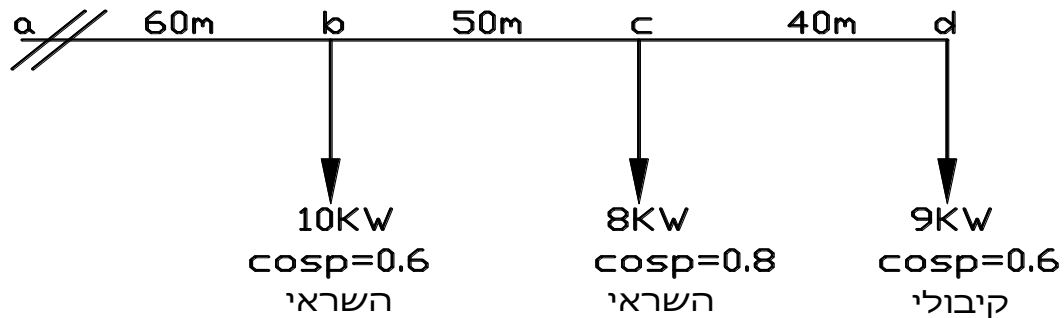
$$\Delta U_{max} = \sum \Delta U = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{de} =$$

$$\Delta U_{max} = 2.43 + 3 + 3.24 + 0.906 = 9.576$$

$$\Delta U_{max}\% = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} * 100 = \frac{9.576}{200} * 100 = 4.79\%$$

תרגיל דוגמא 4

נתונה הרשת הבאה:



נתון כי:

$$\rho = \frac{1}{58} \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$X_0 = 0.35 \left[\frac{\Omega}{\text{Km}} \right]$$

$$U_n = 240V$$

א. חשב שטח חתך אחיד לרשת עבור מפל מתח של 5%.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח של הצרכן C ואת מפל המתח בקטע bc.

פתרון לתרגיל דוגמא 4

א.

$$S_d = (9 - j12) \text{KVA}$$

$$S_c = (8 + j6) \text{KVA}$$

$$S_b = (10 + j13.33) \text{KVA}$$

$$S_{dc} = S_d = (9 - j12) \text{KVA}$$

$$S_{bc} = S_c + S_{dc} = (8 + j6) + (9 - j12) = (17 - j6) \text{KVA}$$

$$S_{ab} = S_b + S_{bc} = (10 + j13.33) + (17 - j6) = (27 + j7.33) \text{KVA}$$

ב.

$$\Delta U_r = \frac{X_0}{U} * \sum Q * l =$$

$$\Delta U_r = \frac{0.35}{1000 * 240} * 10^3 * (7.33 * 60 - 6 * 50 - 12 * 40) = -0.5V$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U_{max\%}}{100} * U_n = \frac{4}{100} * 240 = 12V$$

$$\Delta U_a = \Delta U_{max} - \Delta U_r = 12 + 0.5 = 12.5V$$

$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_a * U} * \sum P * l =$$

$$A = \frac{2}{12.5 * 58 * 240} * 10^3 * (27 * 60 + 17 * 50 + 9 * 40) = 32.54 \text{mm}^2$$

ג.נבחר שטח חתך מסחרי של $.35mm^2$

$$\Delta U(ac) = \frac{2\rho}{A * U} * (Pab * lab + Pbc * lbc) + \frac{Xo}{U} * (Qab * lab + Qbc * lbc) =$$

$$\Delta U(ac) = \frac{2}{35 * 58 * 240} * 10^3 * (27 * 60 + 17 * 50) + \frac{0.35}{1000 * 240} * 10^3 * (7.33 * 60 - 6 * 50)$$

$$\Delta U(ac) = 10.34V$$

$$Uc = Un - \Delta U(ac) = 240 - 10.34 = 229.66V$$

$$\Delta U(cd) = \frac{2\rho}{A * U} * (Pcd * lcd) + \frac{Xo}{U} * (Qcd * lcd) =$$

$$\Delta U(cd) = \frac{2}{35 * 58 * 240} * 9 * 10^3 * 40 + \frac{0.35}{1000 * 240} * (-12) * 10^3 * 40 = 0.777V$$

רשת מתח חילופין תלת פאזית

$$\Delta U_{max} = \Delta U_a + \Delta U_r$$

$$\Delta U_a = \Delta U - \Delta U_r$$

$$\Delta U_a = \sqrt{3} * R_o * I_a * l = \frac{\sqrt{3}\rho}{A} * I_a * l$$

$$\Delta U_r = \sqrt{3} * X_o * I_r * l$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\sqrt{3}\rho}{A} * I_a * l + \sqrt{3} * X_o * I_r * l$$

$$A = \frac{\sqrt{3}\rho}{\Delta U_a} * \sum I_a * l$$

$$I_a = I * \cos \varphi$$

$$I = \frac{P}{U_n * \sqrt{3} * \cos \varphi}$$

$$I_a = \frac{P}{U_n * \sqrt{3}}$$

$$I_r = I * \sin \varphi$$

$$I = \frac{Q}{U_n * \sqrt{3} * \sin \varphi}$$

$$I_r = \frac{Q}{U_n * \sqrt{3}}$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\rho}{A * U_n} * P * l + \frac{X_o}{U_n} * Q * l$$

$$\Delta U_a = \frac{\rho}{A * U_n} * P * l$$

$$\Delta U_r = \frac{X_o}{U_n} * Q * l$$

$$S = \sqrt{3} * U * I$$

כאשר:

$$R = R_o * l \left[\frac{\Omega}{Km} \right] \text{ - התנגדות המוליך ליחידת אורך-}$$

$$X = X_o * l \left[\frac{\Omega}{Km} \right] \text{ - היגב המוליך ליחידת אורך-}$$

$$I_a \text{ - זרם דרך המרכיב הממשי של המוליך-} [A]$$

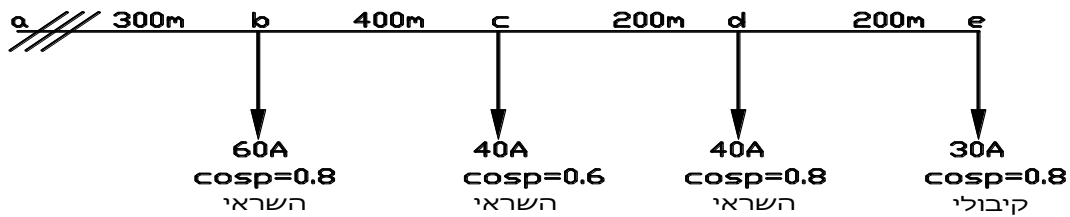
$$I_r \text{ - זרם דרך המרכיב ההיגבי של המוליך-} [A]$$

$$P \text{ - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן-} [W]$$

$$Q \text{ - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן-} [VAr]$$

$$S \text{ - ההספק המדומה המתפתח בצרכן-} [VA]$$

תרגיל דוגמא 1



נתון כי:

$$\rho = 0.0175 \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$$

$$U_n = 400V$$

א. חשב שטח חתך אחיד לרשת עבור מפל מתח של 5%.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח של הצרן e.

פתרון תרגיל דוגמא 1

א.

$$\vec{I}_e = (24 - j18)A$$

$$\vec{I}_d = (32 + j24)A$$

$$\vec{I}_c = (24 + j32)A$$

$$\vec{I}_b = (48 + j36)A$$

$$\vec{I}_{de} = \vec{I}_e = (24 - j18)A$$

$$\vec{I}_{cd} = \vec{I}_d + \vec{I}_{de} = (32 + j24) + (24 - j18) = (56 + j6)A$$

$$\vec{I}_{bc} = \vec{I}_c + \vec{I}_{cd} = (24 + j32) + (56 + j6) = (80 + j38)A$$

$$\vec{I}_{ab} = \vec{I}_b + \vec{I}_{bc} = (48 + j36) + (80 + j38) = (128 + j74)A$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U\%}{100} * U_n = \frac{5}{100} * 400 = 20V$$

בהנחה ש- $X_0=0$ (לא נתון).

$$\Delta U_{max} = \Delta U_a = 20V$$

$$A = \frac{\sqrt{3}\rho}{\Delta U_a} * \sum I_a * l$$

$$A = \frac{\sqrt{3} * 0.0175}{20} * (128 * 300 + 80 * 400 + 56 * 200 + 24 * 200) = 130.943 \text{mm}^2$$

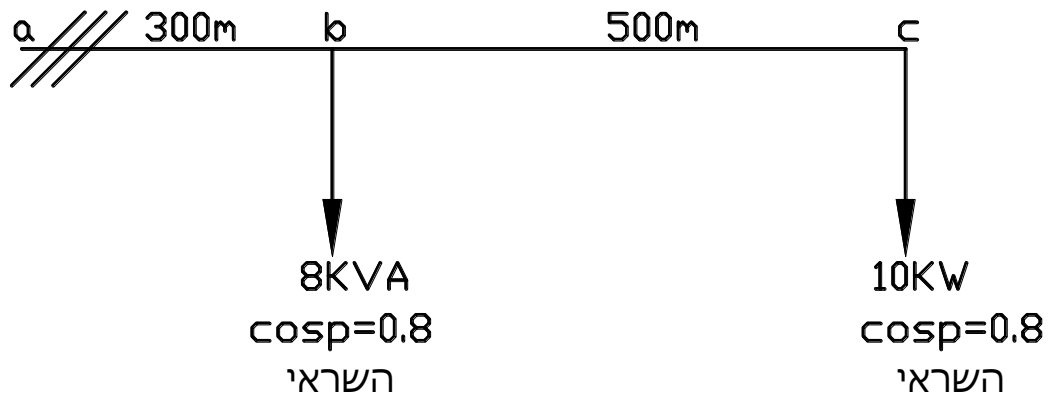
ב.בנחר שטח חתך מסחרי של 150mm^2 .

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3}\rho}{A} * \sum I_a * l$$

$$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3} * 0.0175}{150} * (128 * 300 + 80 * 400 + 56 * 200 + 24 * 200) = 17.459V$$

$$U_e = U_n - \Delta U_a = 400 - 17.459 = 382.541V$$

תרגיל דוגמא 2



נתון כי: המוליכות הסגולית של המוליכים $g = 56 \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right]$

מתח המקור 400V

$$X_o = 0.35 \frac{\Omega}{km}$$

חשב: את השטח החתך המסחרי המותר כך שמפל המתח המותר לא יעלה על 3%.

פתרון תרגיל דוגמא 2

$$\vec{S_c} = \frac{P_c}{\cos \phi_c} = \frac{10 \cdot 10^3}{0.8} = 12.5 KVA = (10 + j7.5) KVA$$

$$\vec{S_b} = 8 KVA = (6.4 + j4.8) KVA$$

$$\vec{S_{bc}} = \vec{S_c} = (10 + j7.5) KVA$$

$$\vec{S_{ab}} = \vec{S_b} + \vec{S_{bc}} = (6.4 + j4.8) + (10 + j7.5) = (16.4 + j12.3) KVA$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U\%}{100} \cdot U_n = \frac{3}{100} \cdot 400 = 12V$$

$$\Delta U_r = \frac{X_o}{U_n} \cdot \sum Q \cdot l = \frac{X_o}{U_n} \cdot (Q_{ab} \cdot l_{ab} + Q_{bc} \cdot l_{bc}) =$$

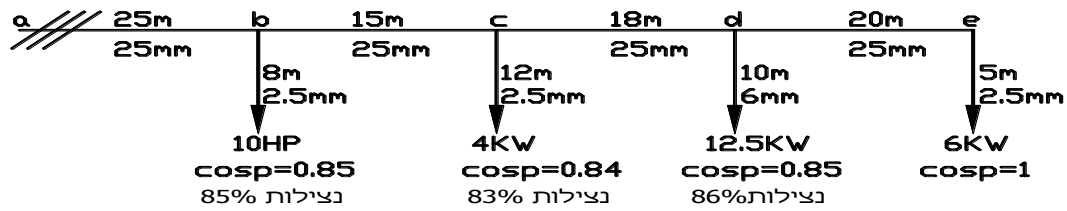
$$\Delta U_r = \frac{0.35}{1000 \cdot 400} \cdot 10^3 \cdot (12.3 \cdot 300 + 7.5 \cdot 500) = 6.51V$$

$$\Delta U_a = \Delta U_{max} - \Delta U_r = 12 - 6.51 = 5.59V$$

$$A = \frac{\rho}{\Delta U_a \cdot U_n} \cdot \sum P \cdot l = \frac{\rho}{\Delta U_a \cdot U_n} \cdot (P_{ab} \cdot l_{ab} + P_{bc} \cdot l_{bc}) =$$

$$A = \frac{1}{56 \cdot 5.59 \cdot 400} \cdot 10^3 \cdot (16.4 \cdot 300 + 10 \cdot 500) = 79.223 mm^2$$

נבחר בשטח חתך מסחרי של 95mm².



הקו התלת מופעי המתואר בתרשים מזין שלושה מנועים ותנור תלת מופעי

נתון כי: הקו עשוי ממוליכי אלומיניום $\rho = \frac{1}{34} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]$ ניתן להזניח את ההשראות בקו.

חשב: את הפסדי המתח עבור כל אחד מהצרכנים.

פתרון תרגיל דוגמא 3

$$P1 = \frac{Pb}{\eta b} = \frac{10 * 736}{0.84} = 8761.90W$$

$$P2 = \frac{Pc}{\eta c} = \frac{4000}{0.83} = 4819.28W$$

$$P3 = \frac{Pd}{\eta d} = \frac{12500}{0.86} = 14534.9W$$

$$P4 = \frac{Pe}{\eta e} = \frac{6000}{1} = 6000W$$

$$Pde = P4 = 6000W$$

$$Pcd = P3 + Pde = 14534.9 + 6000 = 20534.9W$$

$$Pbc = P2 + Pcd = 4819.28 + 20534.9 = 25354.2W$$

$$Pab = P1 + Pbc = 8761.9 + 25354.2 = 34116.1W$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\rho}{A * Un} * \sum P * l + \frac{Xo}{Un} * \sum Q * l$$

$$\Delta U(a-1) = \Delta Uab + \Delta U1 = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{Pab * lab}{Aab} + \frac{P1 * l1}{A1} \right)$$

$$\Delta U(a-1) = \frac{1}{34 * 400} * \left(\frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{8761.9 * 8}{2.5} \right) = 4.57V$$

$$\Delta U(a-2) = \Delta Uab + \Delta Ubc + \Delta U2 = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{Pab * lab}{Aab} + \frac{Pbc * lbc}{Abc} + \frac{P2 * l2}{A2} \right)$$

$$\Delta U(a-2) = \frac{1}{34 * 400} * \left(\frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{4819.28 * 12}{2.5} \right) = 5.32V$$

$$\Delta U(a-3) = \Delta Uab + \Delta Ubc + \Delta Ucd + \Delta U3$$

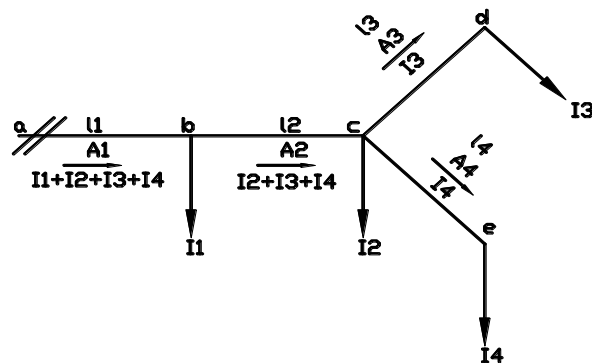
$$\Delta U(a-3) = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{Pab * lab}{Aab} + \frac{Pbc * lbc}{Abc} + \frac{Pcd * lcd}{Acd} + \frac{P3 * l3}{A3} \right)$$

$$\Delta U(a-3) = \frac{1}{34 * 400} * \left(\frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{14534.9 * 10}{6} \right) = 6.49V$$

$$\Delta U(a-4) = \Delta Uab + \Delta Ubc + \Delta Ucd + \Delta Ude + \Delta U4$$

$$\Delta U(a-4) = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{Pab * lab}{Aab} + \frac{Pbc * lbc}{Abc} + \frac{Pcd * lcd}{Acd} + \frac{Pde * lde}{Ade} + \frac{P4 * l4}{A4} \right)$$

$$\Delta U(a-4) = \frac{1}{34 * 400} * \left(\frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{6000 * 20}{25} + \frac{6000 * 5}{2.5} \right) = 5.95V$$

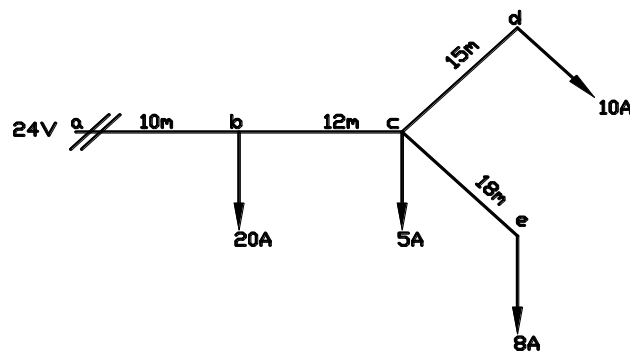


$$\Delta U_{max}(ad) = \frac{2\rho}{A(ad)} * \sum (I(ad) * l(ad))$$

$$\Delta U_{max}(ae) = \frac{2\rho}{A(ae)} * \sum (I(ae) * l(ae))$$

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מבניהם.

תרגיל דוגמא



$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right] \text{ נתון כי:}$$

חשב מהו שטח החתך המסחרי האחיד של הרשת למפל מתח מקסימאלי של 3%.

פתרון לתרגיל דוגמא

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U\%}{100} * U_n = \frac{3}{100} * 24 = 0.72V$$

$$I_{cd} = I_d = 10A$$

$$I_{ce} = I_e = 8A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_{ce} + I_c = 10 + 8 + 5 = 23A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = 23 + 20 = 43A$$

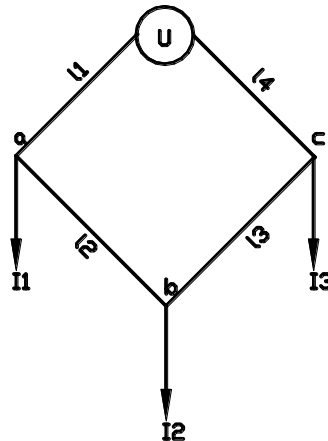
$$A = \frac{2\rho}{\Delta U_{max}} * \sum I * l$$

$$A(ad) = \frac{2}{0.72 * 57} * (43 * 10 + 23 * 12 + 10 * 15) = 41.715 mm^2$$

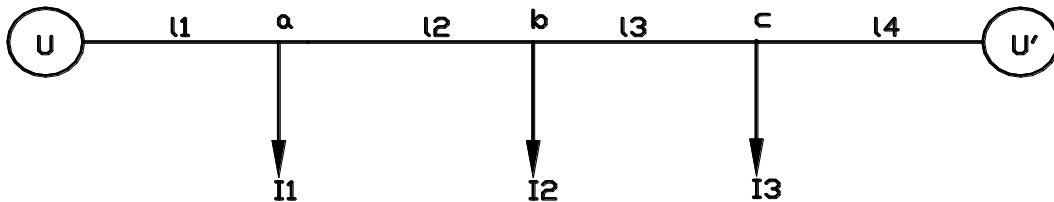
$$A(ae) = \frac{2}{0.72 * 57} * (43 * 10 + 23 * 12 + 8 * 18) = 41.423 mm^2$$

על פי החישוב ניתן לראות כי שטח הגדול האחיד של קטע רשת ad הוא גדול יותר ולפיכך יקבע שטח החתך האחיד של הרשת. נבחר שטח חתך מסחרי של $50 mm^2$.

רשת טבעתית או רשת עם 2 מקורות שווים



שלב ראשון- יש לפתוח את הרשת הטבעתית כמו רשת בעלת 2 מקורות שווים



שלב שני- לחשב את הזרם שיוצא מכל מקור עבור כל קטע בהתאם החלק היחסי של אורך הקווים בקטעים השונים בהתאם לביטויים המתמטיים הבאים.

$$I_u = \frac{I_3 * l_4 + I_2 * (l_3 + l_4) + I_1 * (l_2 + l_3 + l_4)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

$$I_{u'} = \frac{I_1 * l_1 + I_2 * (l_1 + l_2) + I_3 * (l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

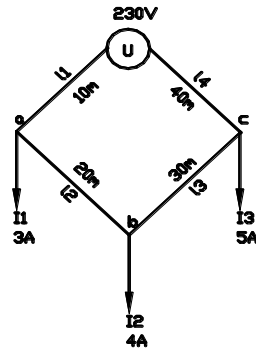
שלב שלישי- לקבוע את כיווני הזרמים היוצאים מהמקורות באופן שרירותי ולחשב את הזרמים בקטעים השונים עלפי קירכהוף זרם שסימנו שלילי יש לשנות את כיוונו.

$$I_{ab} = I_u - I_1$$

$$I_{bc} = I_{ab} - I_2$$

$$I_{cu'} = I_{bc} - I_3$$

שלב רביעי- יש למצוא את נקודת השפך ברשת. נקודת השפך היא נקודת מפגש הזרמים ברשת בנקודה זו מפל המתח הוא מקסימאלי. ברשת בעלת מקורות שווים מפל המתח מ-2 הכיוונים חייב להיות שווה. לאחר מציאת נקודת השפך ניתן לחשב את שטח החתך בעזרת הנוסחאות הרגילות מאחד המקורות ועד לנקודת השפך באופן שרירותי.

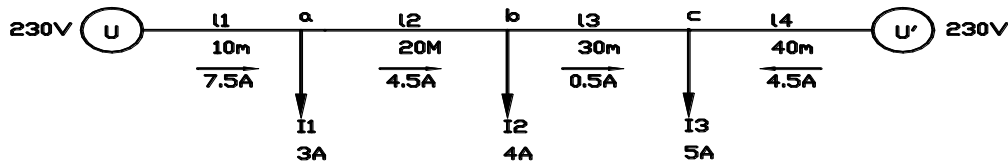


$$\rho = \frac{1}{58} \left[\frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right] \quad \text{נתון כי:}$$

$$A = 4 \text{ mm}^2$$

חשב ומצא את הנקודה ברשת שבה המתח הוא מינימלי.

פתרון לתרגיל דוגמא



$$I_u = \frac{I_3 * l_4 + I_2 * (l_3 + l_4) + I_1 * (l_2 + l_3 + l_4)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

$$I_u = \frac{5 * 40 + 4 * (30 + 40) + 3 * (20 + 30 + 40)}{10 + 20 + 30 + 40} = 7.5A$$

$$I_{u'} = \frac{I_1 * l_1 + I_2 * (l_1 + l_2) + I_3 * (l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

$$I_{u'} = \frac{3 * 10 + 4 * (10 + 20) + 5 * (10 + 20 + 30)}{10 + 20 + 30 + 40} = 4.5A$$

$$I_{ab} = I_u - I_1 = 7.5 - 3 = 4.5A$$

$$I_{bc} = I_{ab} - I_2 = 4.5 - 4 = 0.5A$$

$$I_{cu'} = I_{bc} - I_3 = 0.5 - 5 = -4.5A$$

הסימן השלילי מעיד כי בקטע זה כיוון הזרם הפוך.

מפגש הזרמים מתבצע הנקודה C ולכן נקודה זו היא נקודת השפך שבו מפל המתח הוא

מקסימאלי ניתן לחשב זאת ב-2 אפשרויות:

אפשרות 1-

$$\Delta U_{u'c} = \frac{2\rho}{A} * I_{u'} * l_4 = \frac{2}{4 * 58} * 4.5 * 40 = 1.55V$$

אפשרות 2-

$$\Delta U_{uc} = \frac{2\rho}{A} * I_u * l_1 + I_{ab} * l_2 + I_{bc} * l_3 =$$

$$\Delta U_{uc} = \frac{2}{4 * 58} * 7.5 * 10 + 4.5 * 20 + 0.5 * 30 = 1.55V$$

המתח בנקודה השפך-

$$U_c = U - \Delta U_{uc} = 230 - 1.55 = 228.45$$

פרק 3- שיפור גורם ההספק

לפי נוסחת ההספק המושקע $P = UL * I * \cos\phi$ ברור כי ככל שגורם הספק יהיה קטן יהיה דרוש זרם גדול יותר כדי לספק לצרכן את אותו ההספק (בתנאי שהמתח על הדקי הצרכן אינו משתנה).

יתכן מצב בו משתנים תנאי העבודה של הצרכן השראתי וגורם ההספק שלו קטן (כדוגמה שהמנוע לא עובד בעומס הנקוב שלו או שעובד בריקם). כתוצאה מכך הזרם בצרכן עולה וגורם לכך שההפסדים בהתנגדות האומית של הקווים גדלים כיוון שהם תלויים בעוצמת הזרם בריבוע לפי הנוסחה $\Delta P = r * I^2$. בשל עליית הזרם יתכן כי מוליכי הרשת השנאים והגנרטורים לא יעמדו בתנאים אלה כיוון שהספקם המדומה שלהם עלה לפי הנוסחה $S = U * I$ והגדלתם יגרום לייקור הרשת.

החוק מחייב להתקין במתקן אמצעי שיפור גורם ההספק עבור צרכנים השראתיים עד רמה של 0.92.

הדרכים הטבעיות לשיפור גורם ההספק:

א. להתאים את הצרכנים לצריכה הממשית שלהם כדי שהם יעבדו בעומס הנקוב המלא שלהם.

ב. למנוע מצב בו מנועים אסינכרוניים עובדים בריקם.

ג. שימוש במנועים או בציוד משופרים בעלי גורם הספק גבוה.

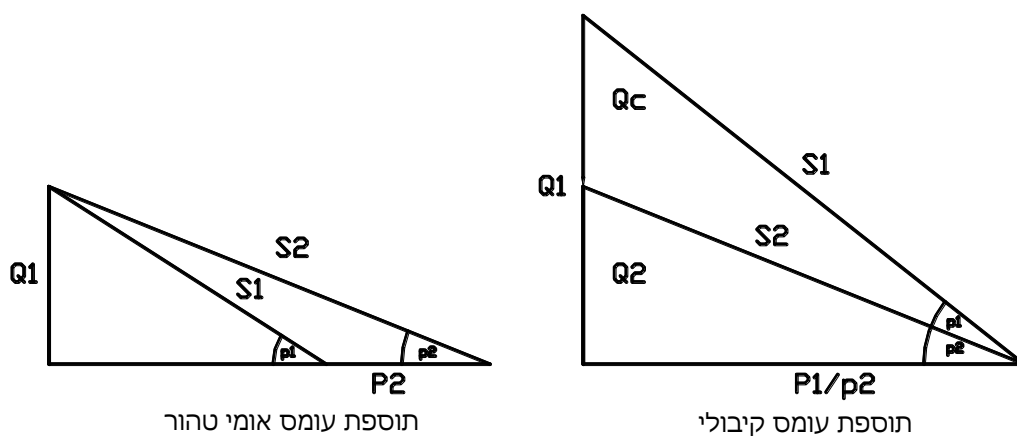
הדרכים המלאכותיות לשיפור גורם ההספק:

א. התקנת סוללות קבלים לעומסים השראתיים בצורה יחידנית ז"א במקביל לכל צרכן וצרכן.

ב. התקנת סוללות קבלים לעומסים השראתיים בצורה קבוצתית ז"א באמצעות בקר הדוגם את גורם ההספק הכללי במתקן מחבר או מנתק סוללות קבלים בהתאם לערך של גורם ההספק.

ג. חיבור עומסים אומים טהורים הגורמים להגדלת ההספק הממשי ובכך משפרים את גורם ההספק.

ד. חיבור מנוע סינכרוני העובד בריקם במקביל לצרכנים השראתיים הגורם להגדלת ההיגב הקיבולי במתקן ובכך גורם לשיפור גורם ההספק במתקן.



נוסחאות:

$$Q_c = P(\tan \rho_{\text{קיים}} - \tan \rho_{\text{רצוי}})$$

ברשת חד פאזית:

$$C = \frac{Q_c}{U^2 * 2\pi f}$$

ברשת תלת פאזית:

בחיבור כבלים משולש-

$$C = \frac{Q_c}{U^2 * 6\pi f}$$

בחיבור קבלים בכוכב-

$$C = \frac{Q_c}{U^2 * 2\pi f}$$

תרגיל דוגמא 1

חשב את ערך הקבל ב- μF המשפר את מקדם ההספק של נורת נתרן לחץ גבוה בעלת הספק של 400W מ-0.45 ל-0.92 כאשר מתח הרשת 230V/50Hz.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

$$\tan \rho_{\text{קיים}} = \tan(\cos^{-1} 0.45) = 1.9845$$

$$\tan \rho_{\text{רצוי}} = \tan(\cos^{-1} 0.92) = 0.426$$

$$Q_c = P(\tan \rho_{\text{קיים}} - \tan \rho_{\text{רצוי}}) = 400(1.9845 - 0.426) = 623.4 \text{VAR}$$

$$C = \frac{Q_c}{U^2 * 2\pi f} = \frac{623.4}{230^2 * 2\pi * 50} = 37.5 \mu F$$

תרגיל דוגמא 2

במתקן חשמלי מחוברים במקביל 2 מנועים האחד צורך הספק של 7KW בעל מקדם הספק של 0.75 והמנוע השני צורך הספק של 5KW בעל מקדם הספק של 0.6. חשב את הספק בקבל שיש לחבר במקביל ל-2 המנועים על מנת לשפר את מקדם ההספק ל-0.95.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

$$P_1 = 7 \text{KW}$$

$$Q_1 = P_1 * \tan \rho_1 = 7 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.75) = 6.173 \text{KVAr}$$

$$P_2 = 5 \text{KW}$$

$$Q_2 = P_2 * \tan \rho_2 = 5 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.6) = 6.667 \text{KVAr}$$

$$ST = S_1 + S_2 = (P_1 + jQ_1) + (P_2 + jQ_2)$$

$$ST = [(7 + j6.173) + (5 + j6.667)] * 10^3 = (12 + j12.84) \text{KVA}$$

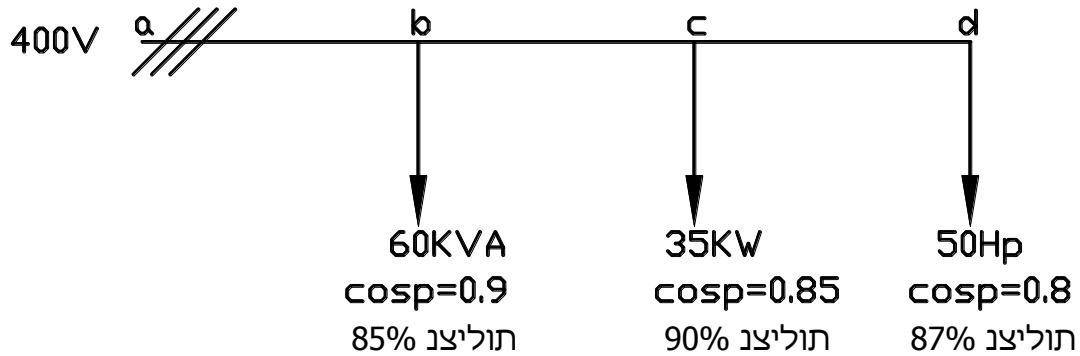
$$\tan \rho_{\text{קיים}} = \frac{QT}{PT} = \frac{12.84 * 10^3}{12 * 10^3} = 1.07$$

$$\tan \rho_{\text{רצוי}} = \tan(\cos^{-1} 0.95) = 0.3287$$

$$Q_c = P(\tan \rho_{\text{קיים}} - \tan \rho_{\text{רצוי}}) = 12 * 10^3(1.07 - 0.3287) = 8.895 \text{KVAr}$$

תרגיל דוגמא 3

נתונה רשת תלת מופעית המזינה בית מלאכה עם צרכנים השראתים כמתואר בתרשים



חשב: א. מקדם ההספק של הרשת הנתונה.

ב. הספק סוללת הקבלים הדרושה לשיפור מקדם ההספק הכללי ל-0.92.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

א.

$$P_d = \frac{P_d'}{\eta_d} = \frac{50 * 736}{0.87} = 42.299KW$$

$$P_c = \frac{P_c'}{\eta_c} = \frac{35 * 10^3}{0.9} = 38.889KW$$

$$P_b = \frac{S_b' * \cos \rho_b}{\eta_b} = \frac{60 * 10^3 * 0.9}{0.85} = 63.529KW$$

$$Q_d = P_d * \tan \rho_d = 42.299 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.8) = 31.724KVar$$

$$Q_c = P_c * \tan \rho_c = 38.889 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.85) = 24.101KVar$$

$$Q_b = P_b * \tan \rho_b = 63.529 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.9) = 30.769KVar$$

$$ST = (P_d + jQ_d) + (P_c + jQ_c) + (P_b + jQ_b)$$

$$ST = [(42.299 + j31.724) + (38.889 + j24.101) + (63.529 + j30.769)] * 10^3$$

$$ST = (144.717 + j86.594)KVar$$

$$\tan \rho_{\text{ק"י}} = \frac{QT}{PT} = \frac{86.594 * 10^3}{144.717 * 10^3} = 0.5984$$

$$\rho = \tan^{-1} 0.5984 = 30.8963^\circ$$

$$\cos \rho_{\text{ק"י}} = \cos 30.8963 = 0.858$$

ב.

$$\tan \rho_{\text{רצוי}} = \tan(\cos^{-1} 0.92) = 0.426$$

$$Q_c = P(\tan \rho_{\text{ק"י}} - \tan \rho_{\text{רצוי}}) = 144.717 * 10^3(0.5984 - 0.426) = 24.949KVar$$

נבחר בסוללת הקבלים הקרובה ביותר 25KVar.

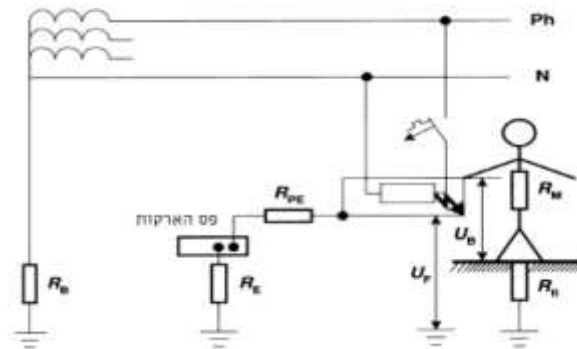
פרק 4-הארקות והגנות בפני התחשמלות

מתח תקלה:

מתח המופיע בזמן שקיים ליקויי בבידוד בין הגוף המחושמל לבין אלקטרודת הארקה המקומית, בעלת פוטנציאל שאינו משתנה עקב התקלה. מתח תקלה תלוי במתקן החשמל: סוג ההגנה בפני חשמול, התנגדות המוליכים והאלקטרודות וכו' במקרה של קצר ערכו של מתח התקלה כמעט שווה למתח המופע.

מתח מגע:

מתח המופיע על גוף האדם אשר נוגע בו זמנית בשתי נקודות בעלות הפרש פוטנציאליים. מתח המגע תלוי במתקן החשמל ובהתנגדות גוף האדם והרצפה.



כאשר:

R_B - התנגדות הארקה שיטה.

R_E - התנגדות אלקטרודת הארקה.

R_{PE} - התנגדות מוליך הארקה.

R_M - התנגדות גוף האדם.

R_{fl} - התנגדות הרצפה.

U_F - מתח תקלה.

U_B - מתח מגע.

התחשמלות היא מעבר של זרם מעל רמה מסוימת דרך גוף האדם. עוצמת זרם החשמול תלויה במתח המגע ובהתנגדות גוף האדם, אך התנגדות גוף האדם אינו ערך קבוע ומשתנה כפונקציה של מתח המגע.

הטבלה הבאה מציגה עבור כל אחד ממתחי המגע הצפויים במתח נמוך את עכבת גוף האדם המתאימה, ואת זרם החשמול המותר שעדין לא יגרום להיווצרות תופעות פיזיקאליות מזיקות לגוף האדם :

משך הזמן המותר (s)	זרם חישמול (mA)	עכבת הגוף (Ω)	מתח מגע צפוי (V)
עד 5 שניות	-	-	25
עד 5 שניות	29	1725	50
0.60	46	1625	75
0.45	56	1610	90
0.36	72	1535	110
0.27	102	1475	150
0.17	167	1375	230
0.12	204	1370	280
0.08	256	1369	350
0.08	368	1360	500

ההנחה בתקנות החשמל היא שמתח המגע המרבי הצפוי בחישמול הוא עד 50V, לכן משך זמן החישמול המרבי המותר הוא 5 שניות.

נזקי התחשמלות: התכווצויות בלתי רצוניות של שרירים.

פגיעה במערכת העצבים.

כוויות.

מוות.

רמת הנזק מושפעת מהעוצמת ומשך הזמן של הזרם הזורם דרך גוף האדם.

לפי סטטיסטיקה שנערכה נקבע כי זרם העולה על 30mA במשך לפחות 5sec גורם לנזק בלתי הפיך לגוף האדם.

לשם כך אנו זקוקים להגנות להגנה בפני התחשמלות.

אמצעי הגנה בפני חשמול

אמצעי הגנה בפני חשמול המותרים לשימוש במדינת ישראל הם:

1. הארכת הגנה.
2. איפוס.
3. הפרד מגן.
4. זינה צפה.
5. מפסק מגן.
6. בידוד מגן.
7. מתח נמוך מאוד.

מטרות מערכת הארקה:

- א. בטיחות חשמלית- מניעת עליית מתחי מגע, והפרש פוטנציאלים בין חלקים מתכתיים מעל הערכים הבטיחותיים בזמן קצר.
- ב. הגנה בפני זרמי יתר- יצירת מסלול לזרמי קצר (לולאת התקלה) עם התנגדות נמוכה כדי להבטיח ניתוק אוטומטי של מעגל שיש בו תקלה ע"י המאבטח.
- ג. הגנה בפני ברקים- ביצוע מעגל לזרם הברק עם מוליכות טובה בין קולטי ברקים לבין מערכת הארקה.
- ד. הגנה על ציוד אלקטרוני רגיש- חיבור להארקה של סיכוך מעגלים רגישים לשדות אלקטרומגנטיים והתקנת פסי הארקה מיוחדים בתוך הציוד המהווים נקודת יחוס בעלת פוטנציאל קבוע.

1. הארכת הגנה

הרעיון בהארקת ההגנה ליצור מסלול חלופי לזרם התקלה. מסלול זה צריך להיות בעל התנגדות נמוכה מאוד ביחס להתנגדות גוף האדם (שנקבע סטטיסטית ל-1000Ω) כך שבעת תקלה רוב הזרם יעבור במסלול זה ולא דרך גוף האדם. להתנגדות הנמוכה של מסלול התקלה יש חשיבות נוספת והיא להפעיל את ההגנות במהירות וזאת כתוצאה מזרם קצר גבוה העובר במסלול התקלה. מסלול התקלה הוא ממקור המתח למתקן דרך הגוף התקול וחזרה למקור. מקור מתח למתקן הוא השנאי. הצד השניוני של השנאי מחובר בצורת כוכב ונקודת הכוכב של השנאי מחוברת לאדמה באמצעות אלקטרודה. חיבור זה נקרא הארכת שיטה. להארקת השיטה 2 תפקידים:

1. לאפשר את מסלול התקלה של זרם הקצר.
2. כאשר העומסים במתקן אינן סימטריות בין הפאזות השונות קיימת תזוזת בנקודת האפס במתקן כך שנוצר מצב שבו המתחים בין הפאזות לבין האפס במתקן אינו נשמר ותפקיד הארקת השיטה לדאוג לייצוב המתח במתקן בכך דואגת שהמתח על

כל צרכן במתקן נשמר המתח הנומינאלי של השנאי. באופן מעשי הארקת השיטה מבוצעת בשנאי וכן על מוליך האפס לאורך הרשת. לכל גוף מתכתי במתקן יש צורך לחבר מוליך הארקה כדי לאפשר את מסלול התקלה. מוליך הארקה זה מחובר דרך פס השוואת פוטנציאלים באמצעות אלקטרודה לאדמה. בזמן תקלה המתח מהשנאי דרך מוליך המופע מופיע על גוף הצרכן. מכיוון שגוף הצרכן מחובר לאדמה נוצר זרם תקלה זרם זה דרך מסת האדמה חוזר לשנאי לנקודת הכוכב. כתוצאה מהתנגדות הנמוכה של מסלול התקלה מתפתח זרם תקלה גבוה הגורם בזמן קצר מאוד להפעלת ההגנות ובכך לגרום לניתוק המתח לצרכן התקול. בעבר השתמשו הצנרת המים המתכתית במתקן כאלקטרודה לחיבור מוליכי הארקה של המתקן לאדמה כיוון שצנרת זו טמונה באדמה ויתרונה הגדול בעצם קיומה ובך היא הבטיחה מסלול תקלה לאדמה צורה זולה. עם השנים החלו להשתמש בצנרת מחומרים בעלי הולכה חשמלית גרועה (כדוגמת צנרת פלסטיק) וכתוצאה מכך פגעו באיכות הארקה הגנה. כדי לפתור בעיה זו מצאו פיתרון מעשי וזול וזאת להשתמש בברזלי הזיון של הבניין כאלקטרודה לחיבור לאדמה. פתרון זה נקרא הארקת יסוד והוגדרו בחוק החשמל קובץ של תקנות עבור חיבור זה. הארקת יסוד- מטרתה לבנות רצף חשמלי בין המבנה לאדמה בעל התנגדות נמוכה שאינו עולה על 5Ω .

הארקת היסוד בנויה מ-3 חלקים עיקריים:

1. אלקטרודת הארקת היסוד- הם בעצם ברזלי הזיון הנמצאים בכלונסאות המבנה לפי המתואר בתקנות החוק החשמל.
2. טבעת הגישור- חיבור (כדוגמה באמצעות ריתוך) של ברזלי הזיון כלפי עצמם וכלפי אלקטרודת היסוד, וזאת בתנאים העיקריים הבאים:
 - א. יש להבטיח פחות מ-10 מ' מכל נקודה בתווך לטבעת הגישור.
 - ב. יש להוציא 5 יציאות מטבעת הגישור 1 לכל כיווני 4 רוחות השמים ו-1 לפס השוואת הפוטנציאליים.

3. פס השוואת הפוטנציאליים- פס נחושת מלבני בהתאם לתקנה בחוק החשמל ומטרתו אמצעי חיבור בין כל חלקי המתכת במבנה לצורך השוואת הפוטנציאל שלהם לאדמה.

2. שיטת האיפוס

כפי שהוסבר השימוש בהארקת ההגנה מותנה בכך שלולאת התקלה תהיה נמוכה מאוד והיא תלויה גם בגודל המפסק הראשי של המתקן. כך שככל שהמפסק הראשי גדול יותר התנגדות לולאת התקלה צריכה להיות נמוכה יותר לאפשר את הפעלת ההגנות בזמן. ובנוסף התנגדות לולאת התקלה מושפעת גם מסוג צפיפות ורמת הלחות של הקרקע עצמה. באופן מעשי לעיתים יש קושי רב בהשגת רמת התנגדות תקינה של לולאת התקלה. הפתרון הפשוט והזול להתגבר על כך הוא שיטת האיפוס ובאופן מעשי יש לחבר את מוליך האפס הראשי של המתקן לפס השוואת הפוטנציאליים ובכך לרתום את מוליך האפס למסלול לולאת התקלה ובכל לשמור על רמת התנגדות נמוכה המבוססת על רצף התנגדות מוליכים בלבד שהם כידוע נמוכות מאוד ובכך שיתפתח זרם קצר גבוה שיבטיח את הפעלת ההגנות של המעגל. חסרונה של שיטה זו בשימוש במוליך האפס של בעל הרשת ואין באפשרותנו להבטיח את שלמותו בכל עת. כך שעם קריעתו לא נדע כי נחשפנו לסכנת התחשמלות. ולכן החוק מחייב ששימוש בשיטת האיפוס היא בנוסף להארקת ההגנה וזאת בתנאים הבאים:

- א. התנגדות הארקת ההגנה (בלבד ללא שיטת האיפוס) לא תעלה על 20Ω .
- ב. באישור בעל הרשת (לדוגמה ח"ח) אשר מבטיח חתך מתאים למוליך האפס.

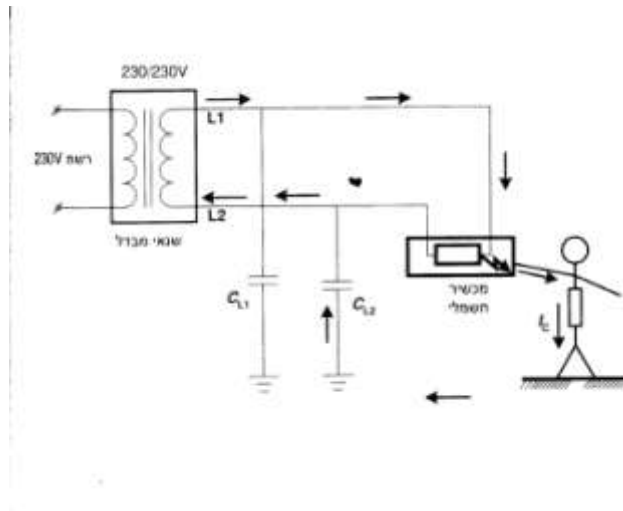
קורס- מתקני חשמל והספק-חשמלאי מוסמך

- ג. קיימת במתקן השוואת פוטנציאליים של כל חלקי המתכת .
ד. חיבור שיטת האיפוס בהתאם לתקנות.

3. הפרד מגן

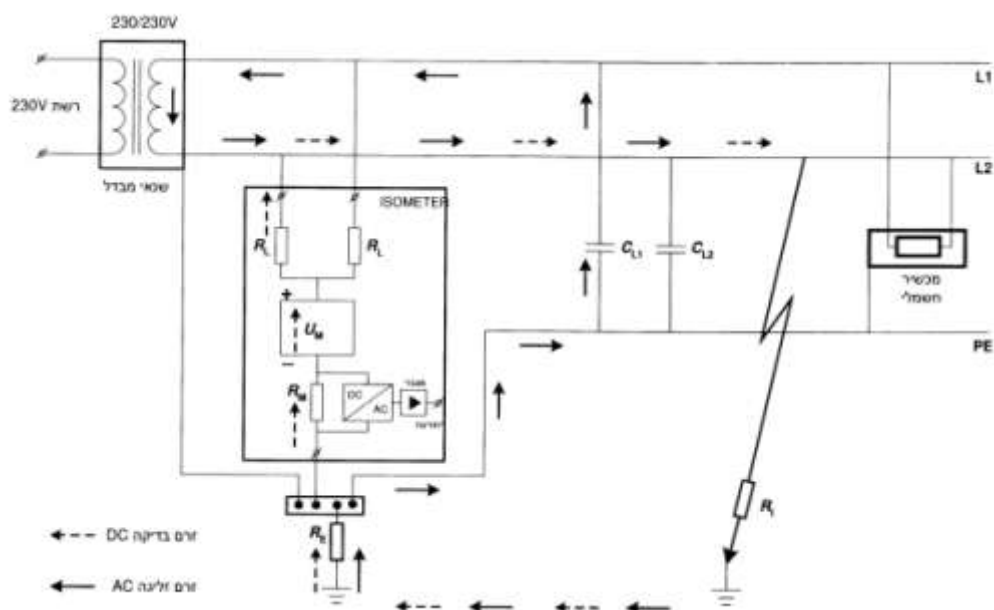
הרעיון בשיטה זו למנוע אפשרות של סגירת מעגל תקלה דרך האדמה ע"י הפרדת הצרכן מהארקת השיטה. התנאים בשימוש בשיטה זו הם:

- א. שימוש בשנאי מבדל
ב. אין לבצע הארקת הגנה ושיטה במוצא השנאי.
ג. בשימוש בשיטה זו אסור שהשנאי יזין יותר ממכשיר אחד
ד. המתח בסליל השנאי לא יעלה 500V
ה. בשימוש בשיטה זו יש צורך לשמור על קיבוליות נמוכה מאוד ולכן אורך הקו מהשנאי לא יעלה על 500 מ'.



4. זינה צפה

עקרון של שיטה זו כמו בשיטת הפרד מגן מבוססת על הספקה ממקור ללא הארקת שיטה בשימוש בשנאי מבדל. אך שיטה זו אינה מגבילה את מספר הצרכנים המחוברים לשנאי ובתנאי שהשנאי מתאים לעומס הנדרש.



כל הגופים המתכתיים מגושרים בניהם באמצעות מוליך ההגנה PE אשר מאורק לאלקטרודה הארקה או לפס השוואת הפוטנציאלים. הודות להיעדרות הארקה שיטה, לא נוצר מעגל לולאת תקלה במקרה של ליקוי בבידוד, אך מופיע זרם קיבולי לאדמה. לדוגמא-אם מתרחש ליקוי בבידוד מוליך מופע L2, הזרם יזרום מהשנאי דרך האדמה למוליך ההגנה PE ודרך קיבוליות הרשת CL1 ובחזרה לשנאי. זרם הזליגה זה יכול לגרום להיווצרות מתח תקלה השווה למפל המתח על ההתנגדות בין הארקה לבין המסה הכללית של האדמה RE. המשגוח מצויד במקור מתח UM אשר במקרה של תקלה בבידוד יגרום לזרימת זרם DC דרך מוליך הרשת L2, האדמה, התנגדות הארקה ובחזרה למשגוח. על הנגד RM ייווצר מפל מתח, שערכו תלוי בהתנגדות הבידוד RI- ככל שהתנגדות הבידוד נמוכה יותר כך המתח על נגד RM יהיה גדול יותר. תפקיד המשגוח הוא להתריע כאשר התנגדות הבידוד יורדת מתחת לערך מסוים.

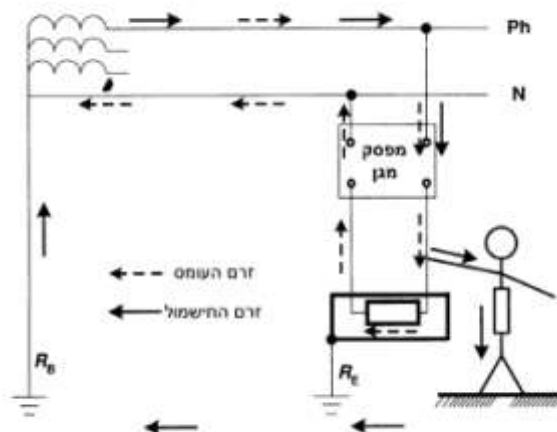
הסכנות בשימוש בשיטה זו הם:

- א. יש צורך בייצוב מתח (כיוון שאין הארקה שיטה).
- ב. ברגע שיש יותר מתקלה אחת בו זמנית יש סכנת התחשמלות.
- ג. תקלות מסוימות בצרכן לא תפעיל את ההגנות ולא יהיה ניתן לדעת על קיומה של התקלה.

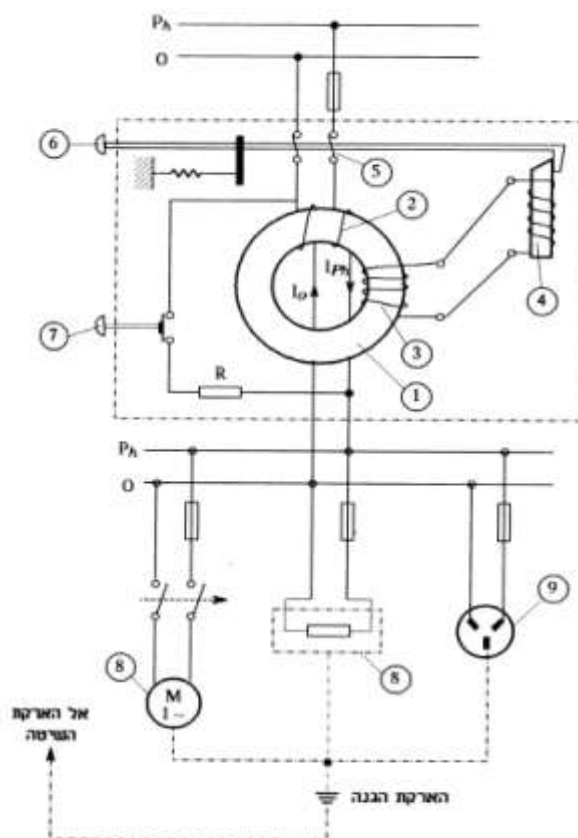
התנאים לשימוש בשיטה זו הם:

- א. שימוש באזור מוגבל תחת השגחה רצופה של חשמלאי מורשה.
 - ב. שימוש בצויד עזר המתריע בעת הופעת תקלה כגון "משגוח".
- שיטה זו נפוצה בשימוש בהם נדרשת אמינות הספקה גבוהה כגון חדרי ניתוח ועוד.

5. מפסק מגן בפני זרם דלף (ממסר פחת)



עיקרון פעולת ממסר הפחת כמתואר באיור הבא:



פתרון

- (1) שנאי איזון
- (2) ליפוף ראשוני
- (3) ליפוף משני
- (4) התקן שחרור
- (5) מפסק
- (6) לחצן החיבור
- (7) לחצן בדיקה
- (8) גופים מתכתיים מוגנים
- (9) בית תקע עם נקודות הארקה

$$I_{ph} = I_0$$

במצב תקין $I_{ph} = I_0$. בליפוף המשני מושרה מתח רק במקרה של אי איזון הזרמים העוברים דרך השנאי. כלומר, כשקיים קצר לאדמה או זרם פחת מבידוד פגום (זרם דליפה) במעגל מוגן. המתח המשני מזרים זרם דרך סליל ההתקן האלקטרומגנטי, מפעיל את האלקטרומגנט והמעגל נפתח. רגישותו הגבוהה ($15 + 30mA$) וזמן פעולתו האפסי מעניקים לו יתרון עצום בהגנה נגד התחשמלות במתקנים ביתיים.

יש לציין כי ממסר הפחת מזהה זרמי זליגה בלבד ולא זרמי קצר כאשר זרם הזליגה גדול יותר מהרגישות של הממסר, ממסר הפחת מנתק את המעגל.

ברוב המקרים זרמי הזליגה נגרמים מתקלות בבידוד במתקן כלומר תקלות שיש בצידן סכנת התחשמלות, אך בפועל קיימים מכשירים רבים שיש להן זליגה טבעית שיגרמו להפעלת ממסר הפחת גם ללא תקלה.

ממסר פחת מיוצר ברמות רגשיות שונות כדוגמא: 10mA, 30mA, 300mA, 500mA, 1A, 3A, שמיועדים לזרמים נומינליים שונים כדוגמא: 25A, 40A, 63A, 80A וכו'. הערך הנומינלי מגדיר את הזרם המרבי שניתן להעביר דרך ממסר הפחת מבלי שיינזק.

הערות להתקנת ממסר הפחת:

- א. במתקן ביתי יש חובה להתקנת ממסר פחת על כל המעגלים.
- ב. במתקנים שאינם ביתיים התקנת ממסרי הפחת נתונה לשיקול דעתו של המתכנן השיקולים להתקנת ממסר פחת הם:
 1. מה הסיכוי להתחשמלות בהתאם ליעוד המתקן והמשתמש.
 2. מה הסיכוי שבמעגל קיימת זליגה טבעית.
 - ג. ניתן אומנם במצבים אלו להשתמש בממסר פחת בעל רגישות נמוכה יותר אומנם פחת זה אינו מגן בפני התחשמלות אך הוא יתריע בפני תקלות העלולות לגרום להתחשמלות.
 - ד. יש להקפיד שהזרם הנומינלי של ממסר הפחת יהיה שווה או גדול מהזרם הנומינלי של ההגנה שמעליו.
 - ה. בהתאם לתקנות בחוק החשמל.
6. בידוד מגן
מטרת השיטה למנוע הופעתו של מתח על חלק נגיש של גוף המכשיר גם בזמן תקלה בו. בשיטה זו משתמשים חשמליים בעלי בידוד כפול. ובכשירים אלו יש איסור לחבר הארקה על מנת למנוע העברת פוטנציאל באמצעות מוליך הארקה.
7. מתח נמוך מאוד
מטרת השיטה למנוע הופעת מתח העולה על 50V.
בשיטה זו נמנעת היווצרות מתח מגע הגדול מ-50V. ובהיעדרות הארקות שיטה נמנעת סגירת לולאת תקלה.

פרק 5-הגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר

סוגי הגנות

קיימים 3 סוגים עיקריים של מאבטחים:

א. נתיכים

ב. מפסקי זרם אוטומטים זעירים (מא"ז) בלתי מתכווננים.

ג. מפסקי זרם אוטומטים מתכווננים (מאמ"ת).

תפקיד המאבטח להגן על המוליך בפני העמסת זרם יתר ובפני זרם קצר.

קיים קשר ישיר בין גודל הזרם הצפוי במוליך לבין גודל המאבטח וכן שטח החתך של המוליך.

תמיד צריך להתקיים 2 התנאים הבאים:

א.

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

ב. עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L

$$I_2 \leq 1.45I_z$$

עבור מא"זים בעלי אופיין B,C,

$$I_2 \leq 1.3I_z$$

עבור מאמ"תים

$$I_2 \leq 1.1I_z$$

כאשר:

I_b - הזרם הצפוי במוליך.

I_n - הערך הנומינאלי של המאבטח.

I_z - הזרם המרבי שמותר להעביר במוליך.

I_2 - זרם הבדיקה הגבוה של המאבטח שהוא נתון יצרן:

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L $I_2 = 1.6I_n$

עבור מא"זים בעלי אופיין B,C, $I_2 = 1.45I_n$

עבור מאמ"תים $I_2 = 1.15I_n$

אם נאחד את דרישות התקנות עם הגדרות התקנים נקבל יחס פשוט בין גודל המאבטח לבין הזרם המתמיד המרבי במוליך:

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L

$$1.6I_n \leq 1.45I_z$$

$$\frac{1.6I_n}{1.45} \leq I_z$$

$$1.10I_n \leq I_z$$

עבור מא"זים בעלי אופיין B,C,

$$1.45I_n \leq 1.3I_z$$

$$\frac{1.45I_n}{1.3} \leq I_z$$

$$1.12I_n \leq I_z$$

עבור מאמ"תים

$$1.15I_n \leq 1.1I_z$$

$$\frac{1.15I_n}{1.1} \leq I_z$$

$$1.05I_n \leq I_z$$

ניתן לסכם את התנאים בצורה הבאה:

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z$

תנאי שני: $1.103I_n \leq I_z$

עבור מא"זים בעל אופיין B,C:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z$

תנאי שני: $1.115I_n \leq I_z$

עבור מאמ"תים:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z$

תנאי שני: $1.045I_n \leq I_z$

זרם יתר- הוא זרם העולה במקצת על הזרם הנומינאלי נגרם כתוצאה מתקלה או כתוצאה מהעמסת יתר. זרם יתר יכול גם להתרחש במצב עבודה תקין כך לזמן קצר מאוד. ההגנה בפני זרמי יתר מבוססת על עקרון הגנה תרמית.

זרם קצר- הוא זרם שמתרחש בחיבור בין מוליכים כתוצאה מתקלה, זרם זה גבוה מאוד ויכול להגיע גם לערכים של $I_k = 10I_n$. ההגנה בפני זרמי קצר מבוססת על עקרון הגנה מגנטית.

קיימים דגמים שונים של מא"זים שהעיקרים שבניהם:

דגם A - מיועד לצידוד אלקטרוני (בעל זמן תגובה איטי יחסי).

דגם B – מיועד לצידוד תאורה (3-5In).

דגם C – מיועד למנועים (5-10In).

דגם D – מיועד לצידוד בעל התנעות קשות בעלי זרם התנעה גבוה (10-20In).

המא"זים מיועדים לזרמים נומינאליים של 0.5A-63A. מא"ז קיימים בשוק כ- חד קוטביים,

דו קוטביים, תלת קוטביים או בעלי 4 קטבים)

(השימושיים ביותר-2A,6A,10A,16A,20A,25A,32A,40A,50A,63A)

המא"ז הוא בעל הגנה תרמית נקובה בפני זרם יתר (שאינה ניתנת לכיוון) בהתאם לדגם.

המא"ז הוא בעל הגנה מגנטית נקובה בפני זרם קצר (שאינה ניתנת לכיוון) בהתאם לדגם.

למא"זים יש נתון הנקרא כושר ניתוק (מיתוג) והוא מגדיר החוזק המכאני של המא"ז או לחילופין מה הזרם המרבי שניתן להעביר דרך המא"ז מבלי שיינזק (לדוגמא בזרם קצר).

קיים בשוק בגדלים 3KA, 6KA, 10KA, 15KA

קיימים דגמים שונים של מאמ"תים שהעיקרים שבניהם:

הגנת מנוע – אביזר זעיר האביזר כולל הגנה תרמית והגנה מגנטית עם אפשרות לכיוון מיועד לזרמים נומינאליים של עד 40A וקיים בשוק בעיקר כתלת קוטביים עם כושר ניתוק בגדלים 22KA,50KA,100KA .

מפסק הספק (ברקר) – אביזר גדול פיזית מיועד לזרמים נומינאליים 25A-6300A כוללים הגנות תרמיות ומגנטיות ניתנות לכיוון וקיים בשוק כתלת קוטבי או בעלי 4 קטבים עם כושר ניתוק בגדלים 25KA,35KA,50KA,100KA.

נתיכים

משמש לצורך הגנה התעשייה כאשר יש צורך בתגובה איטית לדוגמא לצורך סלקטיביות מיועד לזרמים נומינאליים 1A-1600A וקיים בשוק עם כושר ניתוק של עד 120KA.

תרגיל דוגמא

קבע את גודל המא"ז עבור מעגל תאורה חד פאזי שהזרם הצפוי לזרם במוליך הוא 22A אם ידוע שהזרם המרבי שיכול לזרם במוליך $4mm^2$ הוא 29A.

פתרון לתרגיל דוגמא

מכיוון שנתון ש- $I_b=22A$ נבחר מא"ז מסוג B בעל זרם נקוב של $I_n=25A$ ונבדוק עם הוא עומד בתנאים: תנאי ראשון-

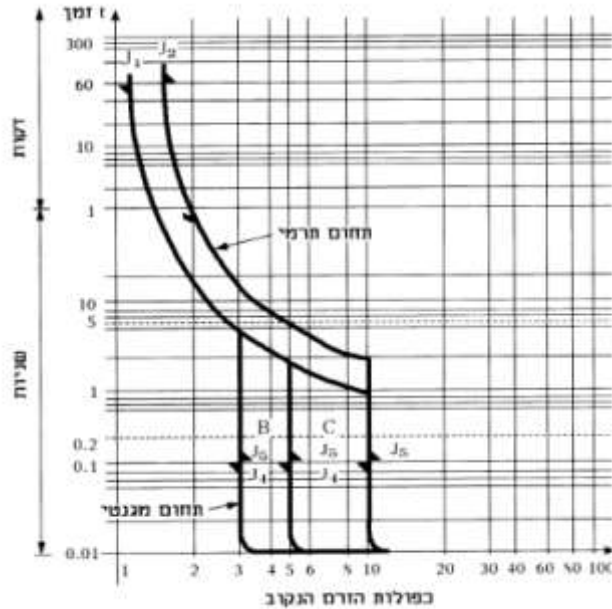
$$I_b \leq I_n \leq I_z$$
$$22A \leq 25A \leq 29A \checkmark$$

$$1.12I_n \leq I_z \quad \text{תנאי שני-}$$

$$1.12 * 25 \leq 29 \checkmark$$

אופייניים

כדי לתאר את תגובת המאבטח היצרן מצרף לכל סוג של מאבטח אופיין המתאר בצורה גרפית את זמן הניתוק של המאבטח הן עבור זרמי יתר והן עבור זרמי קצר כפונקציה של זמן. החוק קובע כי הזמן המקסימאלי לניתוק של מאבטח בזרם קצר לא יעלה על 5 שניות.



אופייני מאזינים מסוג B ו-C בטמפרטורת סביבה של 30 מעלות צלסיוס		
	B	C
$J_1 (t > 1h)$	$1.13 \times J_N$	$1.13 \times J_N$
$J_2 (t < 1h)$	$1.45 \times J_N$	$1.45 \times J_N$
$J_4 (t \geq 0.1S)$	$3 \times J_N$	$5 \times J_N$
$J_5 (t < 0.1S)$	$5 \times J_N$	$10 \times J_N$

באיור נתון אופיין זרם של מא"ז לפי התקן הישראלי. הציר האנכי (ציר-Y) הוא ציר הזמן בשניות ובדקות, הציר האופקי (ציר-X) הוא ציר הזרם בכפולות הזרם הנקוב של המא"ז.

באופיין ניתן לראות שזרם האי-פעולה של המא"ז שווה ל- $1.13 \times I_n$, שזהו "זרם הבדיקה הנמוך" I1. המאבטח לא יפעל אם זרם זה יזרום דרכו במשך שעה. זרם הפעולה של המא"ז שווה ל- $1.45 \times I_n$ שזהו "זרם הבדיקה הגבוה" I2. המאבטח חייב לפעול אם זרם זה יזרום דרכו במשך שעה. התחום התרמי-הגנה בפני זרמי יתר-הניתוק נעשה באופן איטי לאחר זמן התלוי בעוצמת זרם היתר. ככל שזרם היתר גדל (בכפולות של I_n) הזמן לניתוק קטן. התחום המגנטי-הגנה בפני זרם קצר-הניתוק נעשה באופן מהיר מאוד וניתן לראות באופיין כי עבור מא"ז מסוג B בזרם קצר הגדול מ- $3I_n$ ועבור מא"ז מסוג C בזרם קצר הגדול מ- $5I_n$ וזאת בזמן הקטן מ-5 שניות כהגדרת החוק אך גדול מ-0.1 שניות. עבור

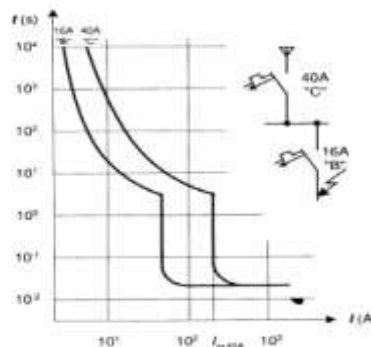
זרמי קצר גדולים יותר ניתן לראות כי מא"ז מסוג B ינתק זרם קצר הגדול מ-5In ומא"ז מסוג C ינתק זרם קצר הגדול מ-10In בפחות מ-0.1 שניות.

סלקטיביות בהפעלת מאבטחים

סלקטיביות זרם

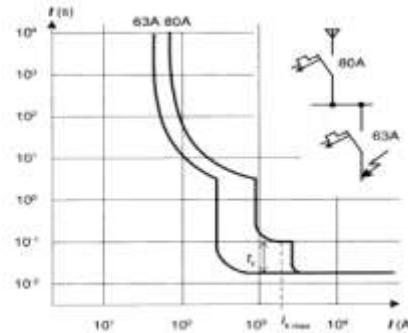
פעולת מאבטחים נחשבת סלקטיבית כאשר במקרה של הופעת זרם יתר במעגל יפעל אך ורק המאבטח הקרוב ביותר למקום התקלה. לפי עקרון זה הזרם הנקוב של כל מאבטח חייב להיות קטן מהזרם הנקוב של המאבטח המותקן לפניו (ביחס למקור המתח). התנאים לסלקטיביות זרם:

- במקרה של תקלה במערכת התקני ההגנה בפני זרם יתר צריכים לפעול ולנתק רק את המעגל המושפע מהתקלה.
 - זרמי מעבר של העומסים אינו צריך לגרום לניתוק המעגל.
 - מערכת סלקטיבית צריכה להיות מתוכננת כך שאם המאבטח הקרוב למקום התקלה אינו פועל צריך המאבטח המותקן לפניו לפעול ולנתק את הזרם המעגל. כאשר לא קיימת נקודת מפגש באופייניים של 2 מאבטחים המחוברים בטור במעגל אזי קיימת בניהם סלקטיביות מלאה. ואם קיימת נקודת מפגש אזי הסלקטיביות הינה חלקית או שלא קיימת.
- סלקטיביות בין מאבטחים תהיה עד הגבול של זרם ההגנה המידי Im של המאבטח הגדול במעגל.
- דוגמא לסלקטיביות זרם מלאה בין 2 מאבטחים:



סלקטיביות זמן

בכדי להגיע לסלקטיביות מלאה בין 2 מאבטחים יש צורך גם להתייחס לסלקטיביות בזמן. ז"א שתגובת ההגנה המגנטית של המפסק המותקן במעלה המעגל צריכה להיות איטית יותר ביחס למאבטח המותקן בקרבת התקלה. ישנם מאת"ים עם אפשרות כיול לזמן תגובה מגנטי עבור זרמי הקצר. זמן זה מוגדר tv. פעולת מאבטחים תהיה סלקטיבית כאשר זרם הקצר המרבי הצפוי בהדקי המאבטח הקטן יותר תהיה בתחום ההשהיה של המפסק הגדול יותר. דוגמא לסלקטיביות זמן מלאה בין 2 מאבטחים:



תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני העמסת יתר

שלבי תכנון

א. חישוב זרם העבודה הממושך I_b הצפוי לעבור במעגל על פי הנוסחאות הבאות:

$$I_b = \frac{P}{U_n \cdot \cos \varphi} \quad \text{עבור צרכן חד פאזי-}$$

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi} \quad \text{עבור צרכן תלת פאזי-}$$

ב. בחירת סוג המאבטח בהתאם לתחום שימושם והזרם נקוב של מאבטח בהתאם וגדלים הסטנדרטיים הקיימים והתאם לתנאי הראשון- $I_b \leq I_n$.

ג. בחירת שיטת ההתקנה סוג המוליכים וסוג הבידוד.
יש לבחור את שיטת ההתקנה של המוליכים מתוך 18 שיטות ההתקנה בתוספת השנייה לתקנות של חוק החשמל (העמסה והגנה של מוליכים...)

בתוך שיטת ההתקנה יש להגדיר סוג החומר של המוליך (נחושת או אלומיניום), ואת סוג הבידוד (70° או 90°). התוצאה של שלב זה קביעת הטבלה המתאימה לתנאי המעגל.

ד. חישוב ערך נדרש של זרם מרבי מתמיד I_z .

על סמך בחירת סוג המאבטח וזרמו הנקוב בשלב ב' יש לחשב את הערך הנדרש של הזרם המתמיד I_z על פי התנאי השני לפי אחת מהנוסחאות:

$$I_z \geq 1.10 I_n \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_z \geq 1.12 I_n \quad \text{עבור מא"זים}$$

$$I_z \geq 1.05 I_n \quad \text{עבור מאמ"תים}$$

ה. בחירת חתך המוליכים המעגל המתוכנן בתנאי סביבה רגילים.
יש למצוא בטבלה שנקבעה בשלב ג' את חתך המוליך בעל הזרם המתמיד המרבי הגבוה או שווה לערך הנדרש שחושב בשלב ד'.
הערה- תנאי סביבה רגילים הם:

1. למוליכים וכבלים שסביבם אוויר-טמפרטורה של 35°C .
2. כבלים שסביבם קרקע- טמפרטורה של 30°C והתנגדות תרמית סגולית של הקרקע $120^\circ\text{C} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{W}}$.
3. התקנת עד 3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גדיים ללא רווח בניהם למעט מוליכי הארקה, בהתקנה חשופה לתנועת לאוויר.
4. התקנת עד כבל רב גדי אחד בהתקנה חשופה לאוויר במידה ותנאי הסביבה אינם רגילים יש צורך בשימוש במקדמי תיקון לקביעת הזרם המרבי המתמיד במוליך I_z .

מקדמי תיקון

1. כאשר טמפרטורת האוויר הסביבתית שונה מ- 35°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 17 שבתקנות החשמל.
2. כאשר טמפרטורת הקרקע הסביבתית שונה מ- 30°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 18 שבתקנות החשמל.
3. כאשר מותקנים יותר מ-3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גידיים למעט מוליכי הארקה ללא רווח בניהם בהתקנה חשופה לתנועת האוויר בתנוחה אופקית או אנכית כדוגמא בהתקנה על סולמות, יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 15 שבתקנות החשמל.
4. כאשר מותקנים כבלים רב גידים אחדים ללא רווח בניהם בהתקנה חשופה לתנועת האוויר בתנוחה אופקית או אנכית כדוגמא בהתקנה על סולמות, יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 16 שבתקנות החשמל.

תרגיל דוגמא

נתונים 6 מפוחים תלת פאזיים זהים בעלי הנתונים הבאים:

$$U_n=400\text{V} ; P_n=800\text{W} ; \cos\varphi=0.78 ; \eta=0.82$$

המפוחים מוזנים כל אחד בנפרד ע"י כבלים נחושת עם בידוד של 90°C ומותקנים בתעלה צרה סגורה משותפת בשכבה אחת ובטמפרטורה סביבתית אופפת של האוויר של 45°C . קבע את שטח החתך של כל כבל ואת סוג וגודל המאבטח של כל מפוח.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. נחשב את הזרם הממושך הצפוי לעבור במוליכים של כל מפוח-

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi * \eta} = \frac{800}{\sqrt{3} * 400 * 0.78 * 0.82} = 1.805\text{A}$$

ב. נקבע את סוג וגודל המאבטח.

נבחר במאבטח מסוג "הגנת מנוע" בעל תחום כיוול ההגנה התרמית של $I_r=1.6\text{A}-4\text{A}$ ונכיל אותו ל- $I_n=2\text{A}$.

ג. נמצא בתוספת השנייה- שיטת התקנה "ה", כבלים נחושת בידוד 90°C טבלה 90.1.

ד. נמצא בטבלה המתאימה חתך מוליך בעל זרם מתמיד מרבי גדול או שווה ערך הנדרש- שטח חתך- $I_z=18\text{A} ; 1.5\text{mm}^2$.

נבצע תיקון ל- I_z בהתאם למקדמי התיקון שבטבלה 16 וטבלה 17-

$$I_z' = I_z * k_{16} * k_{17} = 18 * 0.68 * 0.9 = 11.016\text{A}$$

נבחן את המוליך הנבחר ב-2 התנאים:

$$I_b \leq I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.8 < 2 < 11 \Rightarrow \checkmark$$

$$1.045 I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.045 * 2 < 11 \Rightarrow \checkmark$$

לסיכום נבחר כבל של 4X1.5 N2XY עבור כל מפוח המאובטח במאבטח מסוג "הגנת מנוע"

בעל הגנה תרמית מכילת ל-2A.