

מתקני חשמל והספק

הנדסאי חשמל

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים

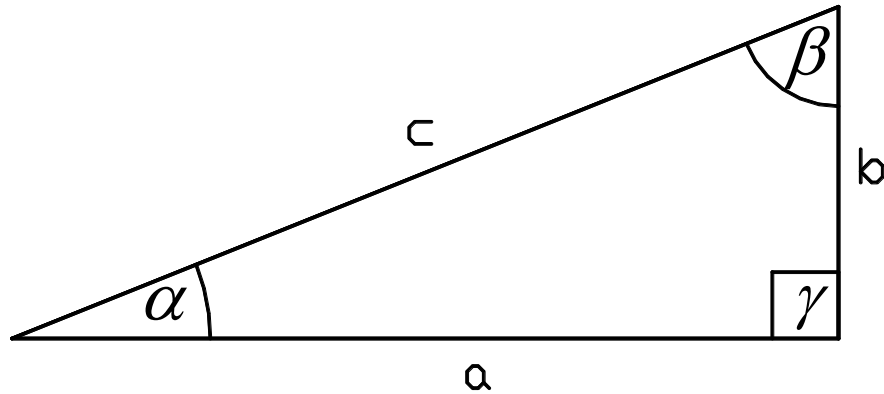
2017

תוכן עניינים:

פרק 1 – זרמים והספקים בזרם חילופין	עמ' 3-10
פרק 2 – חישובי רשתות	עמ' 11-53
פרק 3 – זרמי קצר	עמ' 54-65
פרק 4 - העמסה והגנה על מוליכים	עמ' 66-87
פרק 5 - שיפור גורם ההספק	עמ' 88-96
פרק 6 - ציוד בלוח חשמל	עמ' 97-103
פרק7- הארקות והגנות בפני התחשמלות	עמ' 104-112
פרק 8- מערכות הספק למתח גבוה ועליון	עמ' 113-134
פרק 9- תאורה	עמ' 135-154
פרק 10- נספחים	עמ' 155-167

פרק 1- זרמים והספקים בזרם חילופין

מבוא-משפט פיתגורס



$$c^2 = a^2 + b^2$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$a = c * \cos \alpha$$

$$b = c * \sin \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{a}{c}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{a}{c} \right)$$

$$\sin \alpha = \frac{b}{c}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{b}{c} \right)$$

$$\tan \alpha = \frac{b}{a}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right)$$

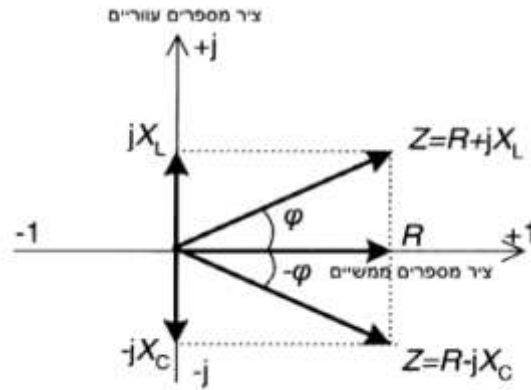
זרמים והספקים בזרם חילופין

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 האשראי עם סימן "+".

זווית העכבה φ מתקבלת לפי הביטויים:

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

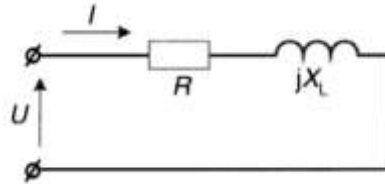
$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{X_L}{Z} \right)$$

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

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

$$R + jX_L = Z \angle +\varphi$$

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי השראי:



את הזרם נחשב בהתאם לחוק אום: $\vec{I} = \frac{\vec{U}}{Z}$ כאשר העכבה מושבת לפי: $Z = R + jX_L$.

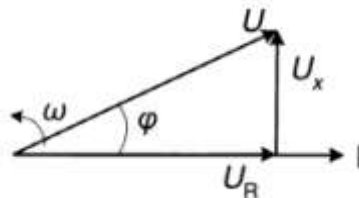
מפל מתח במעגל טורי מתחלק ביחס ישר להתנגדותם של רכיבי המעגל ומחושב בהתאם

$$\text{לחוק אום: } U_X = I * jX_L = j * I * X_L, \quad U_R = I * R$$

כיוון שווקטור המתח U_R זהה לכיוון וקטור הזרם I ווקטור המתח U_X מקדים את הזרם בזווית

של 90° , ניתן לשרטט דיאגרמה פאזורית של המעגל כאשר וקטור הייחוס הוא וקטור

הזרם:



בהתאם לדגם המתמטי המתאר זרם סינוסוידלי, מערכת הווקטורים מסתובבת נגד כיוון

$$\text{השעון במהירות זוויתית } \omega: \omega = 2\pi f \text{ (rad/sec)}$$

מהדיאגרמה ניתן לראות שבמקרה של עכבה אומית-השראי וקטור הזרם מפגר אחרי וקטור

המתח באותה זווית φ המכונה "זווית המופע". כדי להדגיש את עובדת פיגור הזרם, צרכן

מסוג זה נקרא "עומס מפגר".

עבור צרכן בעל אופי קיבולי-

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

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

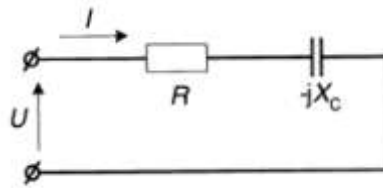
$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{-X_C}{Z}\right)$$

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

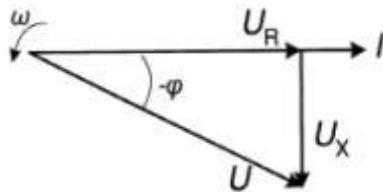
מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו:

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

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי קיבולי:



את הזרם נחשב בהתאם לחוק אום: $\vec{I} = \frac{\vec{U}}{Z}$ כאשר העכבה מושבת לפי: $Z = R - jX_C$.
מפל מתח במעגל טורי מתחלק ביחס ישר להתנגדותם של רכיבי המעגל ומחושב בהתאם לחוק אום: $U_R = I * R$, $U_X = I * (-jX_C) = -j * I * X_C$, כיוון שווקטור המתח U_R זהה לכיוון וקטור הזרם I , וווקטור המתח U_X מפגר לאחר הזרם בזווית של 90° , ניתן לשרטט דיאגרמה פאזורית של המעגל כאשר וקטור הייחוס הוא וקטור הזרם:



בדיאגרמה פאזורית וקטור הזרם מקדים את וקטור המתח וצרכן מסוג זה נקרא "עומס מקדים".

*בדרך כלל בחישובים ומדידות משתמשים בערכים אפקטיביים (rms) של זרמים ומתחים.

משולש הספקים:

הביטוי - $P = U * I * \cos \varphi$ מסמל הספק אקטיבי (ממשי) של צרכן, הוא תמיד חיובי ומתאר תהליך המרת אנרגיה חשמלית לסוגי אנרגיה אחרים (חום אור תנועה וכו'). הספק אקטיבי נמדד ביחידות (W).

הביטוי - $Q = U * I * \sin \varphi$ מסמל הספק ראקטיבי (היגבי) של צרכן, ומתאר תהליך החלפת אנרגיה בין מקור המתח לרשת באמצעות שדות מגנטיים וחשמליים. הספק ראקטיבי נמדד ביחידות (VAR). הספק זה חיובי בצרכן בעל אופי השראי, ושילי בצרכן בעל אופי קיבולי.

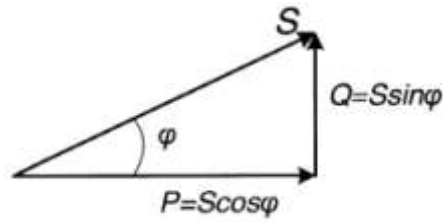
הביטוי $S = U * I$ מסמן הספק מדומה (מלא) של הצרכן והוא שווה לסכום הקומפלקסי של

$$S = P + jQ = U * I \cos \varphi + j * U * I * \sin \varphi = \vec{U} * \vec{I}^*$$

שני סוגי ההספקים: כאשר המתח נקבע כווקטור הייחוס: $\vec{U} = U^{\angle 0^\circ}$. ווקטור הזרם נלקח עם הזווית

$$\vec{I}^* = I^{\angle -\varphi}$$

ניתן להציג מערכת זו בעזרת משולש ההספקים:



ההספק המדומה נמדד ביחידות (VA).

ניתן על-פי משפט פיתגורס לקבוע את הביטויים הבאים:

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

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

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

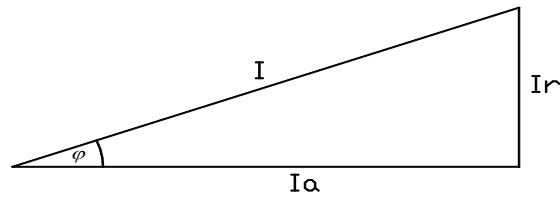
$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$$

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

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

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

משולש הזרמים



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

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

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

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

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

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

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

מערכת תלת מופעית חיבור צרן בחיבור כוכב ובחיבור משולש

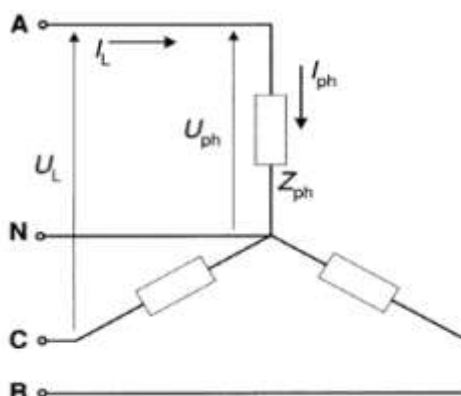
חיבור צרן בחיבור כוכב

במערכת תלת פאזית ישנם 2 סוגי מתחים:

א. מתח פאזי U_{ph} והוא המתח על כל צרן בנפרד: U_A, U_B, U_C .

ב. מתח קווי (שלוש) U_L והוא המתח בין 2 מוליכים פאזיים של הרשת: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

התחלתה של כל פאזה מחוברת למוליך הפאזי של הרשת. קצוות של שלשת הפאזות מחוברים יחד בנקודת הכוכב. נקודה זו מחוברת למוליך האפס (N) של הרשת. זווית המופע בין שלשת המתחים הפאזיים שווה ל- 120° נהוג לקבוע את ווקטור המתח של פאזה A כבסיס וביחס איליו ווקטור פאזה B מפגר ב- 120° ווקטור המתח בפאזה C מקדים ב- 120° .



כאשר:

$$U_A \angle 0^\circ, U_B \angle -120^\circ, U_C \angle 120^\circ$$

$$U_L = \sqrt{3} * U_{ph}$$

לפי חוק מפלי מתח של קירכהוף ניתן לרשום:

$$\vec{U}_{AB} = \vec{U}_A - \vec{U}_B, \quad \vec{U}_{BC} = \vec{U}_B - \vec{U}_C, \quad \vec{U}_{CA} = \vec{U}_C - \vec{U}_A$$

הספקים נחשב:

$$S = 3 * S_{ph} = 3 * \vec{I}_{ph} * \vec{U}_{ph}$$

בחיבור צרן מאוזן ז"א שכל עכבות הצרן בכל 3 הפאזות שוות גם בגודל וגם בזווית:

$$\vec{Z}_A = \vec{Z}_B = \vec{Z}_C$$

מכאן שגם הזרמים שווים:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_B = \vec{I}_C$$

ומכיוון שהזרם במוליך ה-N הוא הסכום הקומפלקסי של 3 הזרמים הפאזיים ולכן:

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_N = 0A$$

מסיבה זו בחיבור צרן תלת מופעי מאוזן אין צורך בחיבור מוליך N.

תרגיל דוגמא

ברשת תלת פאזית 400V שלושה צרכנים אומים מחוברים בכוכב:

$$P_A = 230W, P_B = 2300W, P_C = 920W$$

א. חשב את הזרמים הקווים בכל אחד מארבעת מוליכי הרשת.

ב. חשב את המתחים והזרמים הפאזיים לאחר ניתוק מוליך האפס.

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. נחשב את הזרמים הפאזיים-

$$\vec{I}_{A_{ph}} = \frac{P_A}{U_{A_{ph}} * \cos \varphi_A} = \frac{230}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right) * 1} = 1^{\angle 0^\circ} A$$

$$\vec{I}_{B_{ph}} = \frac{P_B}{U_{B_{ph}} * \cos \varphi_B} = \frac{2300}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right) * 1} = 10^{\angle -120^\circ} A$$

$$\vec{I}_{C_{ph}} = \frac{P_C}{U_{C_{ph}} * \cos \varphi_C} = \frac{920}{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right) * 1} = 4^{\angle 120^\circ} A$$

$$\vec{I}_N = \vec{I}_{A_{ph}} + \vec{I}_{B_{ph}} + \vec{I}_{C_{ph}} = 1^{\angle 0^\circ} + 10^{\angle -120^\circ} + 4^{\angle 120^\circ} = 7.9^{\angle -139^\circ} A$$

ב. נחשב את העכבות הפאזיים-

$$\vec{Z}_{A_{ph}} = \frac{\vec{U}_{A_{ph}}}{\vec{I}_{A_{ph}}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle 0^\circ}}{1^{\angle 0^\circ}} = 230.94^{\angle 0^\circ} \Omega$$

$$\vec{Z}_{B_{ph}} = \frac{\vec{U}_{B_{ph}}}{\vec{I}_{B_{ph}}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -120^\circ}}{10^{\angle -120^\circ}} = 23.094^{\angle 0^\circ} \Omega$$

$$\vec{Z}_{C_{ph}} = \frac{\vec{U}_{C_{ph}}}{\vec{I}_{C_{ph}}} = \frac{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle 120^\circ}}{4^{\angle 120^\circ}} = 57.735^{\angle 0^\circ} \Omega$$

$$\vec{Z}_N = \frac{1}{\frac{1}{\vec{Z}_{A_{ph}}} + \frac{1}{\vec{Z}_{B_{ph}}} + \frac{1}{\vec{Z}_{C_{ph}}}} = \frac{1}{\frac{1}{230.94^{\angle 0^\circ}} + \frac{1}{23.094^{\angle 0^\circ}} + \frac{1}{57.735^{\angle 0^\circ}}} = 15.396^{\angle 0^\circ} \Omega$$

חישוב המתח בנקודת הכוכב-

$$\vec{U}_N = \vec{I}_N * \vec{Z}_N = 7.9^{\angle -139^\circ} * 15.396 = 121.628^{\angle -139^\circ} V$$

חישוב מתחים הפאזיים-

$$\vec{U}'_{A_{ph}} = \vec{U}_{A_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle 0^\circ} - 121.628^{\angle -139^\circ} = 332.452^{\angle 13.88^\circ} V$$

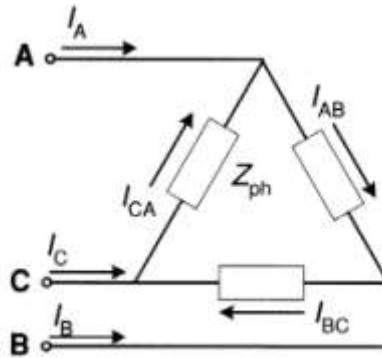
$$\vec{U}'_{B_{ph}} = \vec{U}_{B_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -120^\circ} - 121.628^{\angle -139^\circ} = 122.514^{\angle -101.14^\circ} V$$

$$\vec{U}'_{C_{ph}} = \vec{U}_{C_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle 120^\circ} - 121.628^{\angle -139^\circ} = 280.795^{\angle 94.84^\circ} V$$

מסקנה: על פי תוצאות החישובים לאחר ניתוק מוליך האפס המתחים הפאזיים משתנים בצורה משמעותית והמתח המסופק לצרכן שונה מהמתח הנקוב שלו שיכול לסכנו.

חיבור צרכן בחיבור משולש

בחיבור משולש פאזות הצרכן מתחברות בין המוליכים הקווים.



בחיבור זה המתחים הפאזיים שווים למתחים הקווים:

$$U_A = U_{AB}, \quad U_B = U_{BC}, \quad U_C = U_{CA}$$

נהוג לקבוע את ווקטור המתח U_{AB} כווקטור הייחוס וביחס אליו קובעים את המתחים האחרים:

$$U_{AB} \angle 0^\circ, \quad U_{BC} \angle -120^\circ, \quad U_{CA} \angle 120^\circ$$

זרמים יחושבו לפי חוק אום:

$$\vec{I}_{AB} = \frac{\vec{U}_{AB}}{Z_{AB}}, \quad \vec{I}_{BC} = \frac{\vec{U}_{BC}}{Z_{BC}}, \quad \vec{I}_{CA} = \frac{\vec{U}_{CA}}{Z_{CA}}$$

כאשר העומס סימטרי ז"א שהעכבות שוות וגם הזרמים הפאזיים שווים בגודל ובזווית:

$$I_L = \sqrt{3} * I_{ph}$$

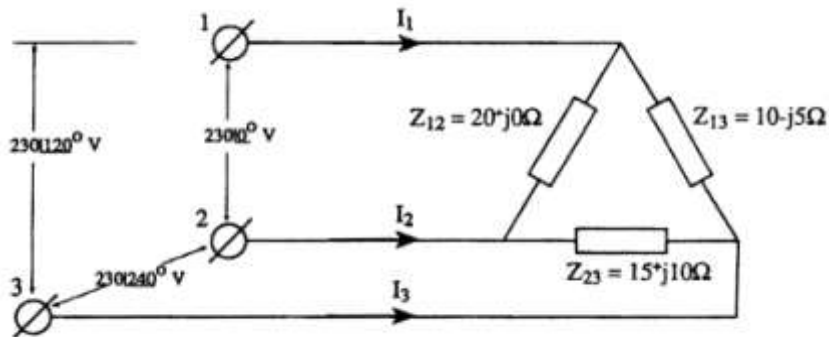
הספקים נחשב:

$$S = 3 * I_{ph} * U_{ph} = 3 * \frac{I_L}{\sqrt{3}} * U_L = \sqrt{3} * I_L * U_L$$

כאשר העומס הוא אינו סימטרי, זרמים פאזיים וקווים לא שווים ויש לחשבם לפי הנוסחאות הנ"ל, בכל מקרה סכום הווקטורים של הזרמים הקווים שווה ל-0.

תרגיל דוגמא:

עומס תלת פאזי בלתי סימטרי מחובר למערכת חשמל תלת פאזית שהמתח השלוב שלה שווה ל-230V. העומס מחובר במשולש. עכבות העומס מתוארות באיור הבא:



- א. חשב את הזרמים הקווים.
- ב. חשב את סכום הזרמים הקווים.
- ג. חשב את ההספקים הראקטיבי והאקטיבי בכל מופע ואת ההספק העומס הכולל.

ד. חשב את מקדם ההספק של העומס.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. חישוב הזרמים הפאזיים:

$$\vec{I}_{ph_{12}} = \frac{\vec{U}_{ph_{12}}}{\vec{Z}_{ph_{12}}} = \frac{230 \angle 0^\circ}{20 + j0} = 11.5 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\vec{I}_{ph_{13}} = \frac{\vec{U}_{ph_{13}}}{\vec{Z}_{ph_{13}}} = \frac{230 \angle 120^\circ}{10 - j5} = 20.572 \angle 147^\circ \text{ A}$$

$$\vec{I}_{ph_{23}} = \frac{\vec{U}_{ph_{23}}}{\vec{Z}_{ph_{23}}} = \frac{230 \angle 240^\circ}{15 + j10} = 12.758 \angle -154^\circ \text{ A}$$

נחשב את הזרמים הקווים לפי הפרש הזרמים הפאזיים:

$$\vec{I}_{L_1} = \vec{I}_{ph_{13}} - \vec{I}_{ph_{12}} = 20.572 \angle 147^\circ - 11.5 \angle 0^\circ = 30.859 \angle 159^\circ \text{ A}$$

$$\vec{I}_{L_2} = \vec{I}_{ph_{12}} - \vec{I}_{ph_{23}} = 11.5 \angle 0^\circ - 12.758 \angle -154^\circ = 23.638 \angle 14^\circ \text{ A}$$

$$\vec{I}_{L_3} = \vec{I}_{ph_{23}} - \vec{I}_{ph_{13}} = 12.758 \angle -154^\circ - 20.572 \angle 147^\circ = 17.766 \angle -71^\circ \text{ A}$$

ב. חישוב סכום הזרמים הקווים:

$$\vec{I}_{L_1} + \vec{I}_{L_2} + \vec{I}_{L_3} = 30.859 \angle 159^\circ + 23.638 \angle 14^\circ + 17.766 \angle -71^\circ = 0 \text{ A}$$

ג. חישוב הספקים (בהצבת הזרמים יש להציב את הערך הצמוד):

$$\vec{S}_{12} = \vec{U}_{ph_{12}} * \vec{I}_{ph_{12}} = 230 \angle 0^\circ * 11.5 \angle 0^\circ = 2645 \angle 0^\circ = (2645 + j0) \text{ VA}$$

$$\vec{S}_{13} = \vec{U}_{ph_{13}} * \vec{I}_{ph_{13}} = 230 \angle 120^\circ * 20.572 \angle -147^\circ = 4731.56 \angle -27^\circ = (4215.85 - j2148.08) \text{ VA}$$

$$\vec{S}_{23} = \vec{U}_{ph_{23}} * \vec{I}_{ph_{23}} = 230 \angle 240^\circ * 12.758 \angle 154^\circ = 2934.34 \angle 34^\circ = (2432.68 + j1640.86) \text{ VA}$$

$$\vec{S}_T = \vec{S}_{12} + \vec{S}_{13} + \vec{S}_{23} = 2645 \angle 0^\circ + 4731.56 \angle -27^\circ + 2934.34 \angle 34^\circ = 9.307 \angle -3^\circ \text{ KVA}$$

ד. חישוב מקדם ההספק של העומס:

$$\cos \varphi_T = \cos(-3) = 0.9986$$

פרק 2-חישובי רשתות

קיימים שיקולים שונים לבחירת שטח חתך מוליכים:

1. שיקול חוזק מכני.
 2. שיקול העמסת יתר.
 3. שיקול מפל מתח מותר.
 4. שיקול הפסדי הספק.
 5. שיקול מינימום חומר.
 6. שיקול צפיפות זרם כלכלית.
 7. חוק כדאיות כלכלית (חוק קלווין).
- בבחירת שטח חתך של מוליכים יש להתחשב במספר השיקולים הנ"ל, אך לא בכולם יחד, כאשר השיקולים 1-3 הם חובה.

בחירת שטח חתך המוליכים לפי שיקול חוזק מכני

שיקול זה קובע את החתך המינימאלי של המוליכים מבחינת חוזקם, על מנת שלא יפגעו תוך כדי התקנתם ובמשטר עבודה תקין של המתקן.

בתקנות החשמל מוגדרים החתכים המינימאליים של המוליכים במתקן מתח נמוך:

- א. למוליך נחוש 1.5 mm^2 .
- ב. למוליך אלומיניום 2.5 mm^2 (במעגלים סופיים 6 mm^2).
- ג. למוליך נחוש בכבל עילי (התלוי על תיל נושא) 4 mm^2 .
- ד. למוליך אלומיניום בכבל עילי 16 mm^2 .
- ה. למוליך נחוש ברשת עילית ללא בידוד 16 mm^2 .
- ו. למוליך אלומיניום ברשת עילית ללא בידוד 25 mm^2 .

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מפל מתח מותר

תקנות:

לפי תקנות החשמל: "מפל המתח המרבי בין הדקי הצרן לבין נקודת צריכה כלשהי במתקן הצרן לא יעלה על 3% מהמתח הנומינאלי של הרשת".

ז"א מפל המתח המקסימאלי במתקן כלשהו נמדד בין לוח החשמל הראשי לבין הצרן הרחוק ביותר של המעגל העמוס ביותר והארוך ביותר. מפל המתח המרבי המותר מהווה 3% מהמתח $230\text{V}/400\text{V}$.

יש לציין שדרישת החוק אינה מתייחסת לקווים ורשתות. ששם עלפי כללי הרשת הארצית בדבר תכנון קווי מתח נמוך לדוגמא-"מפל מתח מהדקי השנאי ועד הדקי הצרן לא יעבור 10% מהמתח הנקוב של הרשת".

מבוא

מקובל להציג רשת חשמלית ע"י מעגל תמורה טורי הכולל 2 מרכיבים:

- א. מרכיב אקטיבי R_L הנובע מהתנגדותם האומית של מוליכי הרשת.
- ב. מרכיב היגבי X_L הנובע מתדירות של זרם חילופין והשראות בין המוליכים. ההיגב השראי X_L תלוי במרחק בין מוליכי הפאזות ברשת. בתדירות של 50Hz ההיגב לקילומטר של קו X_0 שווה:

קו אווירי מתח נמוך: $X_0=0.2-0.3 \Omega/\text{Km}$

קו אווירי מתח גבוה: $X_0=0.3-0.4 \Omega/\text{Km}$

קו אווירי מתח עליון: $X_0=0.4-0.45 \Omega/\text{Km}$

כבל מתח נמוך: $X_0=0.07 \Omega/\text{Km}$

כבל מתח גבוה: $X_0=0.08-0.12 \Omega/Km$

מפל מתח בקו מוגדר כהפרש אריתמטי בין המתח בתחילת הקו לבין מתח בסוף הקו:

$$\Delta U = |U1| - |U2|$$

$$\varphi = \varphi1 - \varphi2$$

ניתן לחשב את מפל המתח כסכום מפל המתח הנובע מהמרכיב של המוליכים האקטיבי ומפל המתח הנובע מהמרכיב ההיגבי של המוליכים באמצעות הנוסחאות הבאות:

א. עבור רשת חד פאזית-

$$\Delta U = \Delta Ua + \Delta Ur = I * RL * \cos \varphi2 \mp I * XL * \sin \varphi2 = I(RL * \cos \varphi2 \mp XL * \sin \varphi2)$$

ב. עבור רשת תלת פאזית-

$$\Delta U = \Delta Ua + \Delta Ur = \sqrt{3} * I * RL * \cos \varphi2 \mp \sqrt{3} * I * XL * \sin \varphi2$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * I(RL * \cos \varphi2 \mp XL * \sin \varphi2)$$

מהנוסחאות ניתן לראות שמפל המתח תלוי בגודל ובזווית המופע של הזרם בקו.

בעומס השראי הזרם מפגר אחרי המתח ולכן יש להפוך את הסימן לפני המרכיב הראקטיבי של מפל המתח: $\Delta Ur = -XL * \sin \varphi2$ כך שהרכיב הראקטיבי יהיה חיובי בעומס השראי ושילי בעומס קיבולי.

שלבי חישוב שטח חתך אחיד.

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית.

ב. חישוב מפל מתח ראקטיבי $\Delta Ur\%$.

הערות:

- בתצוגה קרטזית של הספקי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+) כאשר האופי הוא השראי וב-(-) כאשר האופי הוא קיבולי.
- בתצוגה קרטזית של זרמי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+) כאשר האופי הוא קיבולי וב-(-) כאשר האופי הוא השראי.
- בחישוב מפל המתח הראקטיבי כאשר הרשת מוצגת ע"י זרמים יש להפוך את הסימנים.
- מפל מתח הראקטיבי שווה לאפס או ניתן להזנחה במקרים הבאים:
רשת לזרם ישר.
מקדם הספק של צרכנים קרוב ל-1.
מוליכי רשת בעלי חתכים קטנים שהתנגדותם האומית הרבה יותר גדולה מההיגב האשראי שלהם.

במקרים אלו מניחים כי- $\Delta Ua\% = \Delta U\%$ ועוברים לשלב ד.

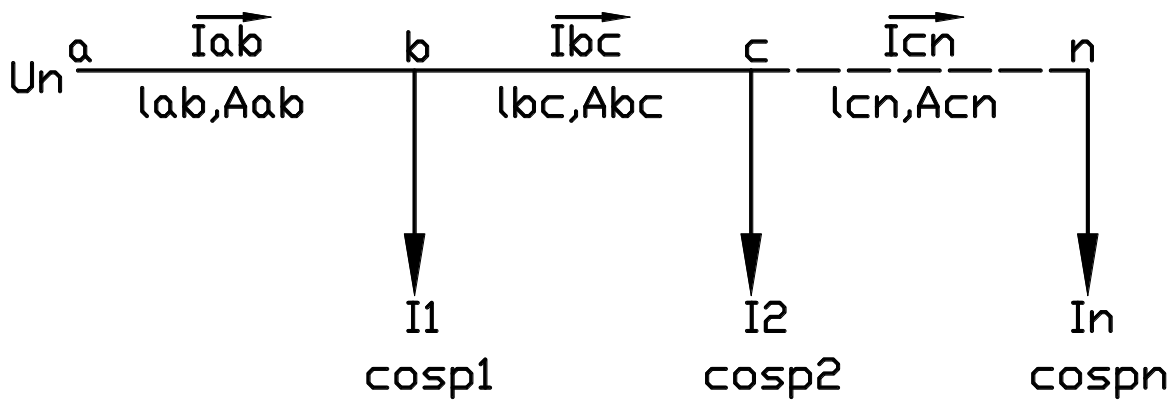
ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $\Delta Ua\%$ לפי הנוסחה: $\Delta Ua\% = \Delta U\% - \Delta Ur\%$

ד. חישוב שטח חתך אחיד לפי $\Delta Ua\%$.

נוסחאות

מפל מתח אקטיבי (%)	מפל מתח ראקטיבי (%)	הצגת הרשת	סוג הרשת
$\Delta Ua\% = \frac{200\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Iali * li$	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	זרמי קטעים	חד מופעית
$\Delta Ua\% = \frac{200\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n Pli * li$	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Qli * li$	הספקי קטעים	
$\Delta Ua\% = \frac{\sqrt{3} * 100\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Iali * li$	$\Delta Ur\% = \frac{\sqrt{3}Xo}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	זרמי קטעים	תלת מופעית
$\Delta Ua\% = \frac{100\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n Pli * li$	$\Delta Ur\% = \frac{Xo}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Qli * li$	הספקי קטעים	

כאשר ρ התנגדות הסגולית של המוליכים בהתאם לסוג החומר



כאשר:

$$\vec{I1} = Ia1 \mp Jlr1$$

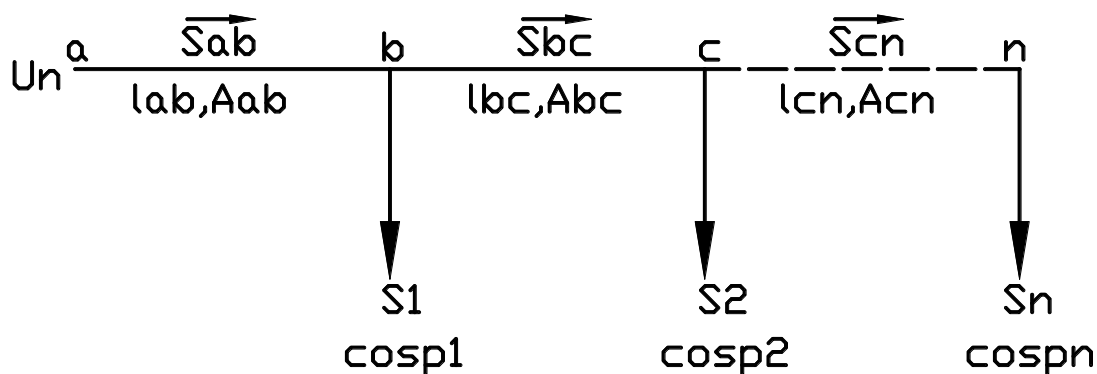
$$\vec{I2} = Ia2 \mp Jlr2$$

$$\vec{In} = Ian \mp Jlrn$$

$$\vec{Icn} = \vec{In}$$

$$\vec{Ibc} = \vec{Icn} + \vec{I2}$$

$$\vec{Iab} = \vec{Ibc} + \vec{I1}$$



כאשר:

$$\begin{aligned} \vec{S}_1 &= P_1 - jQ_1 \\ \vec{S}_2 &= P_2 - jQ_2 \\ \vec{S}_n &= P_n - jQ_n \\ \vec{S}_{cn} &= \vec{S}_n \\ \vec{S}_{bc} &= \vec{S}_{cn} + \vec{S}_2 \\ \vec{S}_{ab} &= \vec{S}_{bc} + \vec{S}_1 \end{aligned}$$

עבור שטח חתך אחד, ניתן לחשב את מפל המתח האקטיבי ע"י שינוי נושא נוסחה לדוגמא עבור רשת חד פאזית המוצגת ע"י זרמי קטעים:

$$A = \frac{200\rho}{\Delta U a\% * U_n} \sum_{i=1}^n I_{ali} * l_i$$

אם שטח החתך אינו אחד, ניתן לחשב את מפל המתח האקטיבי לדוגמא עבור רשת חד פאזית המוצגת ע"י זרמי קטעים:

$$\Delta U a\% = \frac{200\rho}{U_n} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ali} * l_i}{A_{li}}$$

את מפל המתח ביחידות וולט ניתן לחשב לפי:

$$\Delta U = \frac{\Delta U\%}{100} * U_n$$

מפל המתח המקסימאלי ברשת הוא סכום מפלי המתח בקטעים השונים:

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

לדוגמא ברשת חד פאזית בעלת שטח חתך וסוג החומר אחד המוצגת ע"י זרמי קטעים:

$$\Delta U_{max}\% = \frac{200 * \rho}{A * U_n} * \sum I_a * l + \frac{X_o}{10U_n} * \sum I_r * l$$

קורס- מתקני השמל-הנדסאי השמל

ניתן גם לחשב מפלי המתח האקטיבי וראקטיבי ישירות ביחידות וולט לפי הנוסחאות הבאות:

מפל מתח אקטיבי (V)	מפל מתח ראקטיבי (V)	הצגת הרשת	סוג הרשת
$\Delta Ua = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	זרמי קטעים	חד מופעית
$\Delta Ua = \frac{2\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	הספקי קטעים	
$\Delta Ua = \frac{\sqrt{3} * \rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$	$\Delta Ur = \frac{\sqrt{3}Xo}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	זרמי קטעים	תלת מופעית
$\Delta Ua = \frac{\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$	$\Delta Ur = \frac{Xo}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	הספקי קטעים	

לדוגמא ברשת חד פאזית בעלת שטח חתך וסוג החומר אחיד המוצגת ע"י זרמי קטעים:

$$\begin{aligned} \Delta Umax &= \Delta Ua + \Delta Ur \\ \Delta Umax &= \frac{2 * \rho}{A} * \sum Ia * l + \frac{Xo}{1000} * \sum Ir * l \\ \Delta Ua &= Ro * Ia * l \\ \Delta Ur &= Xo * Ir * l \\ Ro &= \frac{\rho}{A} \\ R &= \frac{\rho}{A} * l \end{aligned}$$

תרגילי דוגמא ברשת זרם ישר

תרגיל דוגמא 1

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

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

א. חשב את שטח החתך של המוליך.

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. כיוון $\cos\phi=1$

$$\Delta Ua\% = \Delta Umax\%$$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta Umax\% * Un} * I * l = \frac{200}{3 * 115 * 58} * 30 * 40 = 11.99mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$

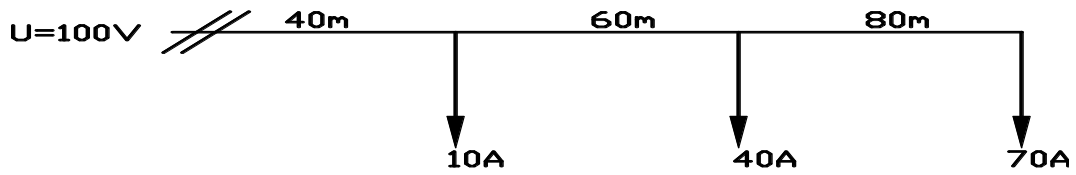
$$\Delta Umax\%' = \frac{200\rho}{A' * Un} * I * l = \frac{200}{16 * 115 * 58} * 30 * 40 = 2.249\%$$

$$\Delta Umax' = \frac{\Delta Umax\%}{100} * Un = \frac{2.249}{100} * 115 = 2.586V$$

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

תרגיל דוגמא 2

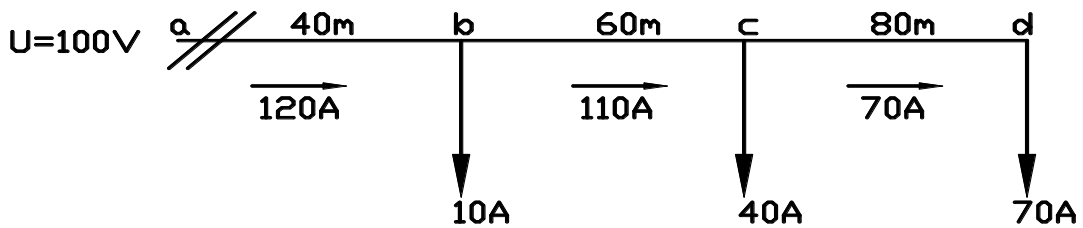
נתונה הרשת הבאה:



נתון כי $\rho = \frac{1}{34}$

- 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. כיוון $\cos\phi=1$

$\Delta Ua\% = \Delta Umax\%$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta Umax\% * Un} * \sum I * l = \frac{200}{4 * 100 * 34} * (120 * 40 + 110 * 60 + 70 * 80) =$$

$$A = 250mm^2$$

ב.

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

$$\Delta Uac\% = \frac{200\rho}{A * Un} * (Iab * lab + Ibc * lbc) = \frac{200}{2 * 150 * 100 * 34} * (120 * 40 + 110 * 60)$$

$\Delta Uac\% = 2.235\%$

$$\Delta Uac = \frac{\Delta Uac\%}{100} * Un = \frac{2.235}{100} * 100 = 2.235V$$

$$Uc = Ua - \Delta Uac = 100 - 2.235 = 97.765V$$

ג.

$$\Delta Umax\% = \frac{200\rho}{A * Un} * \sum I * l = \frac{200}{2 * 150 * 100 * 34} * (120 * 40 + 110 * 60 + 70 * 80)$$

$$\Delta Umax\% = 3.333\%$$

תרגיל דוגמא ברשת מתח חילופין חד פאזי

תרגיל דוגמא 1

נתון צרכן אשראי חד פאזי בעל הנתונים הבאים: $100A$, $\cos\varphi=0.8$
מחובר למקור מתח של $200V$ באמצעות כבל בעל הנתונים הבאים:

$$L=100m, \rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right], X_0=0.1 \frac{\Omega}{Km}$$

- 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.

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

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

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

$$\Delta U_r \% = \frac{X_0}{10U_n} * \bar{I}_r * l = \frac{0.1}{10 * 200} * (+60) * 100 = 0.3\%$$

$$\Delta U_a \% = \Delta U_{max} \% - \Delta U_r \% = 3 - 0.3 = 2.7\%$$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta U_a \% * U_n} * I_a * l = \frac{200}{2.7 * 200 * 57} * 80 * 100 = 51.98mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $70mm^2$.

$$\Delta U_{max} \% = \frac{200\rho}{A * U_n} * I_a * l + \frac{X_0}{10 * U_n} * \bar{I}_r * l =$$

$$\Delta U_{max} \% = \frac{200}{70 * 200 * 57} * 80 * 100 + \frac{0.1}{10 * 200} * 60 * 100 = 2.3\%$$

$$\Delta U_{max} = \frac{\Delta U_{max} \%}{100} * U_n = \frac{2.3}{100} * 200 = 4.6V$$

$$U(\text{צרכן}) = U(\text{מקור}) - \Delta U_{max} = 200 - 4.6 = 195.4V$$

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 השראתי של הרשת עד לצרכן הוא 0.15Ω .

חשב את מתח המקור.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

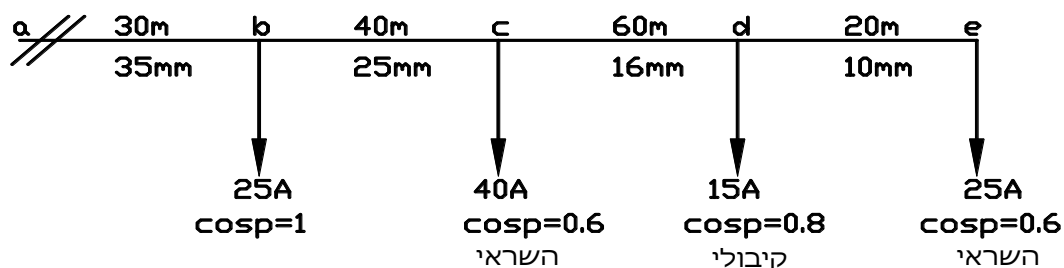
$$I L_a = \frac{PL}{UL} = \frac{15 * 10^3}{220} = 68.182A$$

$$I L_r = \frac{QL}{UL} = \frac{P * \tan \varphi}{UL} = \frac{15 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.8)}{220} = 51.136A$$

$$\Delta U_{max} = \Delta U_a + \Delta U_r = I L_a * R + I L_r * X$$

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

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



נתון כי:

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

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

$$U_n = 200V$$

- א. חשב את המתח הנופל על הצרכנים.
 ב. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

א. נחשב את הזרמים בכל חלקי הרשת בצורה קרטזית באמצעות הביטויים הבאים:

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

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

$$I_e = (15 - j20)A$$

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

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

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

$$I_{de} = I_e = (15 - j20)A$$

$$I_{cd} = I_d + I_{de} = (12 + j9) + (15 - j20) = (27 - j11)A$$

$$I_{bc} = I_c + I_{cd} = (24 - j32) + (27 - j11) = (51 - j43)A$$

$$I_{ab} = I_b + I_{bc} = (25 + j0) + (51 - j43) = (76 - j43)A$$

$$\Delta U_{ab} = \frac{2\rho}{A_{ab}} * I_a(ab) * I_{ab} + \frac{X_o}{1000} * \bar{I}_r(ab) * I_{ab} =$$

$$\Delta U_{ab} = \frac{2}{35 * 57} * 76 * 30 + \frac{0.2}{1000} * 43 * 30 = 2.54V$$

$$U_b = U_n - \Delta U_{ab} = 200 - 2.54 = 197.46V$$

$$\Delta U_{bc} = \frac{2\rho}{A_{bc}} * I_a(bc) * I_{bc} + \frac{X_o}{1000} * \bar{I}_r(bc) * I_{bc} =$$

$$\Delta U_{bc} = \frac{2}{25 * 57} * 51 * 40 + \frac{0.2}{1000} * 43 * 40 = 3.2V$$

$$U_c = U_b - \Delta U_{bc} = 197.46 - 3.2 = 194.26V$$

$$\Delta U_{cd} = \frac{2\rho}{A_{cd}} * I_a(cd) * I_{cd} + \frac{X_o}{1000} * \bar{I}_r(cd) * I_{cd} =$$

$$\Delta U_{cd} = \frac{2}{16 * 57} * 27 * 60 + \frac{0.2}{1000} * 11 * 60 = 3.68V$$

$$U_d = U_c - \Delta U_{cd} = 194.26 - 3.68 = 190.58V$$

$$\Delta U_{de} = \frac{2\rho}{A_{de}} * I_a(de) * l_{de} + \frac{X_o}{1000} * \bar{I}r(de) * l_{de} =$$

$$\Delta U_{de} = \frac{2}{10 * 57} * 15 * 20 + \frac{0.2}{1000} * 20 * 20 = 1.13V$$

$$U_e = U_d - \Delta U_{de} = 190.58 - 1.13 = 189.45V$$

ב.

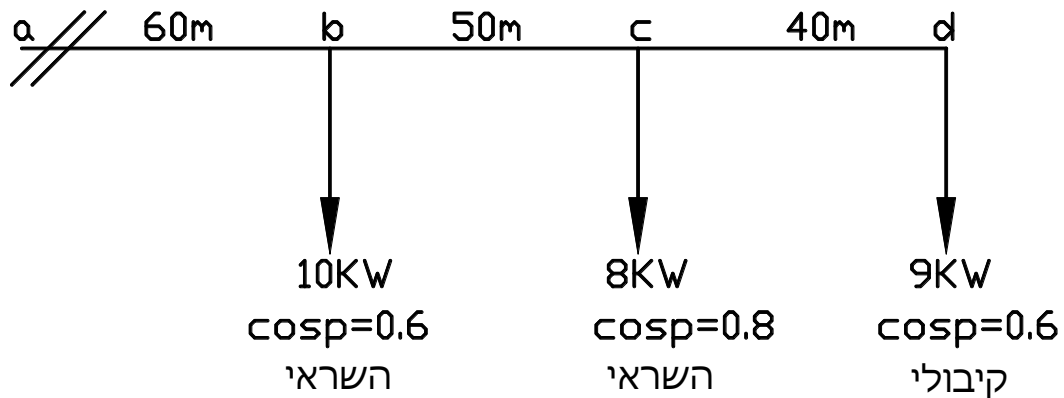
$$\Delta U_{max} = \sum \Delta U = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{de} =$$

$$\Delta U_{max} = 2.54 + 3.2 + 3.68 + 1.13 = 10.55$$

$$\Delta U_{max}\% = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} * 100 = \frac{10.55}{200} * 100 = 5.275\%$$

תרגיל דוגמא 4

נתונה הרשת הבאה:



נתון כי:

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

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

$$U_n = 240V$$

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

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח של הצרן C ואת מפל המתח בקטע cd בלבד.

פתרון לתרגיל דוגמא 4

א. נחשב את הספקים המדומים בכל חלקי הרשת בצורה קרטזית באמצעות הביטוי הבא:

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

$$S_d = (9 - j12)KVA$$

$$S_c = (8 + j6)KVA$$

$$S_b = (10 + j13.33)KVA$$

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

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

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

$$Ur\% = \frac{Xo}{10Un^2} * \sum Q * l =$$

$$\Delta Ur = \frac{0.35}{10 * 240^2} * 10^3 * (7.33 * 60 - 6 * 50 - 12 * 40) = -0.207\%$$

$$\Delta Ua\% = \Delta Umax\% - \Delta Ur\% = 5 + 0.207 = 5.207\%$$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta Ua\% * Un^2} * \sum P * l =$$

$$A = \frac{200}{5.207 * 240^2 * 58} * 10^3 * (27 * 60 + 17 * 50 + 9 * 40) = 32.537mm^2$$

ב.נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$.

$$\Delta U(ac) = \frac{2\rho}{A * Un} * (Pab * lab + Pbc * lbc) + \frac{Xo}{1000Un} * (Qab * lab + Qbc * lbc) =$$

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

$$\Delta U(ac) = 10.343V$$

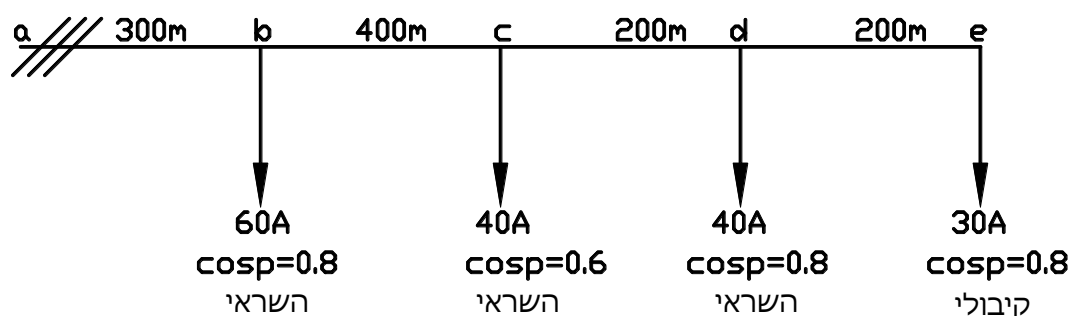
$$Uc = Un - \Delta U(ac) = 240 - 10.343 = 229.657V$$

$$\Delta U(cd) = \frac{2\rho}{A * Un} * (Pcd * lcd) + \frac{Xo}{1000Un} * (Qcd * lcd) =$$

$$\Delta U(cd) = \frac{2}{35 * 240 * 58} * 10^3 * 9 * 40 + \frac{0.35}{1000 * 240} * 10^3 * (-12) * 40 = 0.778V$$

תרגיל דוגמא ברשת מתח חילופין תלת פאזי

תרגיל דוגמא 1



נתון כי:

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

$$Un = 400V$$

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 1

א. נחשב את הזרמים בכל חלקי הרשת בצורה קרטזית באמצעות הביטויים הבאים:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

כיוון ש- X_0 לא נתון לכן:

$$\Delta U_a\% = \Delta U_{max}\% = 5\%$$

$$A = \frac{\sqrt{3} * 100 * \rho}{\Delta U_a\% * U_n} * \sum I_a * l$$

$$A = \frac{\sqrt{3} * 100 * 0.0175}{5 * 400} * (128 * 300 + 80 * 400 + 56 * 200 + 24 * 200) = 130.943mm^2$$

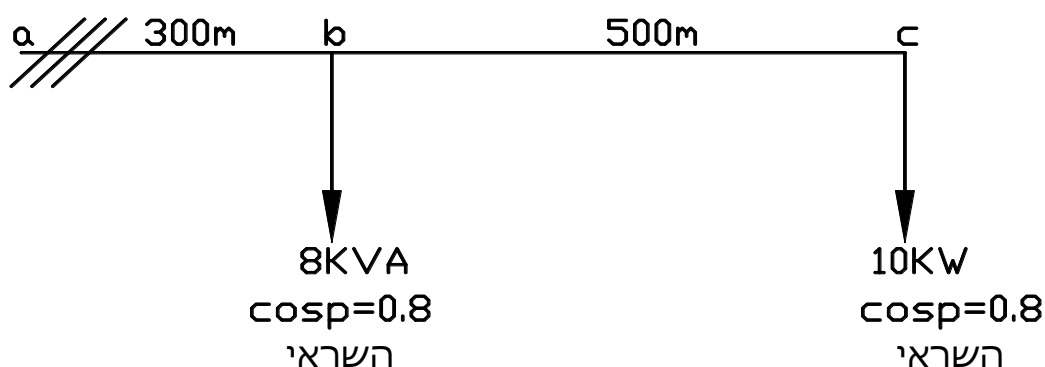
ב.נבחר שטח חתך מסחרי של $150mm^2$.

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

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

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

תרגיל דוגמא 2



נתון כי: המוליכות הסגולית של המוליכים $g = 56 \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right]$, מתח המקור $400V$.

$$X_0 = 0.35 \frac{\Omega}{km}$$

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

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

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

$$\vec{S}_{bc} = \vec{S}_c = (10 + j7.5)KVA$$

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

$$\Delta U_r\% = \frac{X_o}{10Un^2} * \sum Q * l = \frac{X_o}{10Un^2} * (Q_{ab} * l_{ab} + Q_{bc} * l_{bc}) =$$

$$\Delta U_r\% = \frac{0.35}{10 * 400^2} * 10^3 * (12.3 * 300 + 7.5 * 500) = 1.628\%$$

$$\Delta U_a\% = \Delta U_{max}\% - \Delta U_r\% = 3 - 1.628 = 1.372\%$$

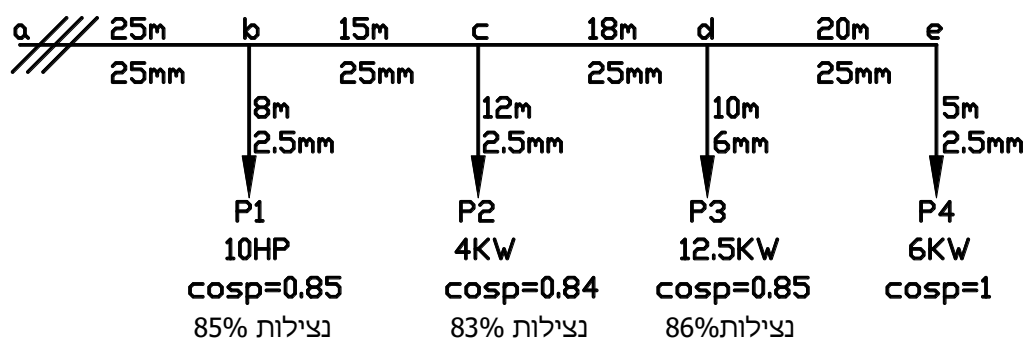
$$A = \frac{100\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} * \sum P * l = \frac{100\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} * (P_{ab} * l_{ab} + P_{bc} * l_{bc}) =$$

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

$$A = \frac{100}{1.372 * 400^2 * 56} * 10^3 * (16.4 * 300 + 10 * 500) = 80.696 mm^2$$

נבחר בשטח חתך מסחרי של $95 mm^2$.

תרגיל דוגמא 3



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 כאשר $U_n = 400V$.

פתרון תרגיל דוגמא 3

$$P_1 = \frac{P_b}{\eta_b} = \frac{10 * 736}{0.85} = 8658.82W$$

$$P_2 = \frac{P_c}{\eta_c} = \frac{4000}{0.83} = 4819.28W$$

$$P_3 = \frac{P_d}{\eta_d} = \frac{12500}{0.86} = 14534.9W$$

$$P_4 = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{6000}{1} = 6000W$$

$$P_{de} = P_4 = 6000W$$

$$P_{cd} = P_3 + P_{de} = 14534.9 + 6000 = 20534.9W$$

$$P_{bc} = P_2 + P_{cd} = 4819.28 + 20534.9 = 25354.2W$$

$$P_{ab} = P_1 + P_{bc} = 8658.82 + 25354.2 = 34013W$$

נתון כי ניתן להזניח את ההשראות בקו, והמשמעות היא:

$$\Delta U = \Delta U_a$$

$$\Delta U(a-1) = \Delta U_{ab} + \Delta U_1 = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{P_{ab} * l_{ab}}{A_{ab}} + \frac{P_1 * l_1}{A_1} \right)$$

$$\Delta U(a-1) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34013 * 25}{25} + \frac{8658.82 * 8}{2.5} \right) = 4.538V$$

$$\Delta U(a-2) = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_2 = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{P_{ab} * l_{ab}}{A_{ab}} + \frac{P_{bc} * l_{bc}}{A_{bc}} + \frac{P_2 * l_2}{A_2} \right)$$

$$\Delta U(a-2) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34013 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{4819.28 * 12}{2.5} \right) = 5.32V$$

$$\Delta U(a-3) = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_3$$

$$\Delta U(a-3) = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{P_{ab} * l_{ab}}{A_{ab}} + \frac{P_{bc} * l_{bc}}{A_{bc}} + \frac{P_{cd} * l_{cd}}{A_{cd}} + \frac{P_3 * l_3}{A_3} \right)$$

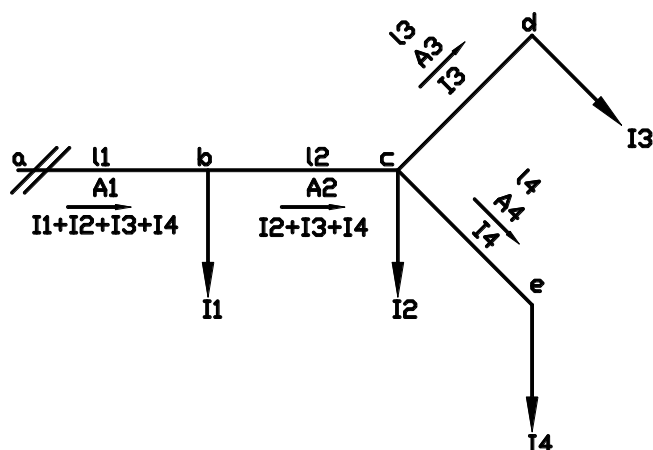
$$\Delta U(a-3) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34013 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{14534.9 * 10}{6} \right) = 6.49V$$

$$\Delta U(a-4) = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{de} + \Delta U_4$$

$$\Delta U(a-4) = \frac{\rho}{Un} * \left(\frac{P_{ab} * l_{ab}}{A_{ab}} + \frac{P_{bc} * l_{bc}}{A_{bc}} + \frac{P_{cd} * l_{cd}}{A_{cd}} + \frac{P_{de} * l_{de}}{A_{de}} + \frac{P_4 * l_4}{A_4} \right)$$

$$\Delta U(a-4) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34013 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{6000 * 20}{25} + \frac{6000 * 5}{2.5} \right) = 5.942V$$

רשת מתפצלות

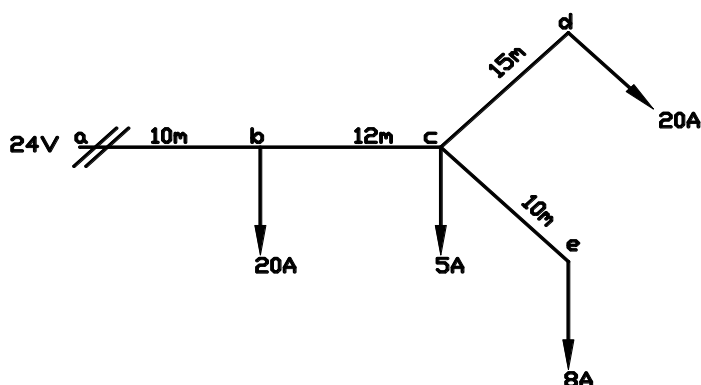


$$\Delta U_{max}(ad) = \frac{2\rho}{A(ad)} * \sum(I(ad) * l(ad))$$

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

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מבניהם.

תרגיל דוגמא



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

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

פתרון לתרגיל דוגמא

$$I_{cd} = I_d = 20A$$

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

$$I_{bc} = I_{cd} + I_{ce} + I_c = 20 + 8 + 5 = 33A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = 33 + 20 = 53A$$

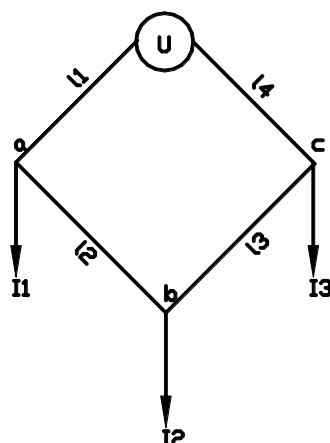
$$A = \frac{200\rho}{\Delta U_{max\%} * U_n} * \sum I * l$$

$$A(ad) = \frac{200}{3 * 24 * 57} * (53 * 10 + 33 * 12 + 20 * 15) = 59.747mm^2$$

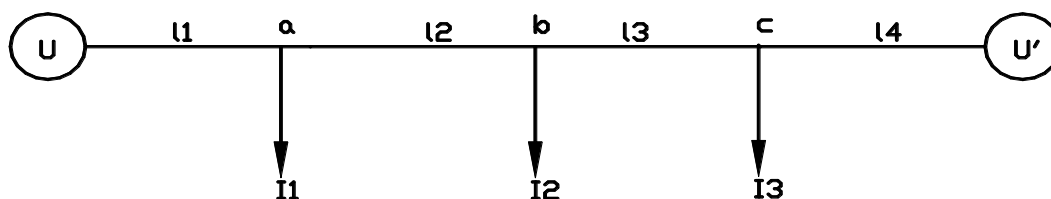
$$A(ae) = \frac{200}{3 * 24 * 57} * (53 * 10 + 33 * 12 + 8 * 10) = 49.025mm^2$$

על פי החישוב ניתן לראות כי שטח הגדול האחיד של קטע רשת ad הוא גדול יותר ולפיו יקבע שטח החתך האחיד של הרשת. נבחר שטח חתך מסחרי של $70mm^2$.

רשת טבעתית או רשת עם 2 מקורות שווים



שלב ראשון- יש לפתוח את הרשת הטבעתית כמו רשת בעלת 2 מקורות שווים. סימון כיווני הזרמים-הקטעים הקיצוניים מסמנים את כיוון הזרם לתוך הרשת,כיוון יתר הזרמים יתבררו במהלך החישובים בהתאם לערך הוקטורי שלהם.



שלב שני- לחשב את הזרם (או הספק מדומה) שיוצא מכל מקור עבור כל קטע בהתאם החלק היחסי של אורך הקווים בקטעים השונים עבור שטח חתך אחיד בהתאם לנוסחת מומנט הזרמים כלפי נקודת U או U':

$$I_u = \frac{\vec{I}_1 * (l_2 + l_3 + l_4) + \vec{I}_2 * (l_3 + l_4) + \vec{I}_3 * l_4}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

או

$$I_{u'} = \frac{\vec{I}_1 * l_1 + \vec{I}_2 * (l_1 + l_2) + \vec{I}_3 * (l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

שלב שלישי- חישוב זרמי הקטעים השונים (או הספקי הקטעים) עלפי קירכהוף. זרם שסימנו שלילי יש לשנות את כיוונו.

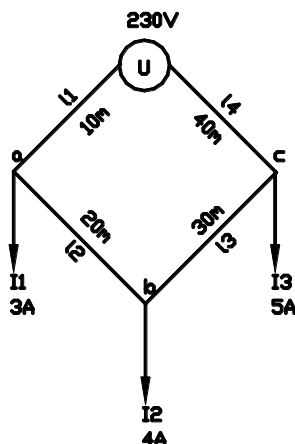
$$I_{ab} = I_u - I_1$$

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

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

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.

תרגיל דוגמא 1

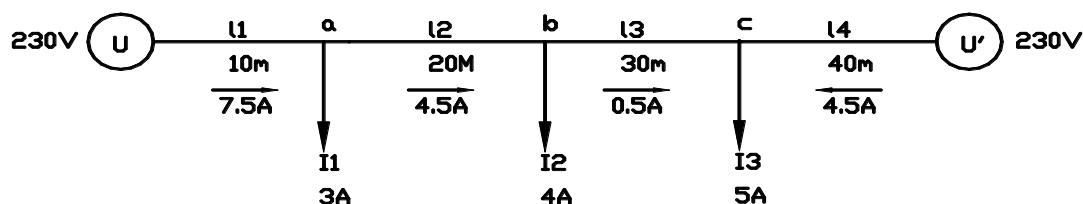


נתון כי:

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

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

חשב ומצא את הנקודה ברשת שבה המתח הוא מינימאלי.
פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

א

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

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

ולכן

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

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

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

הסימן השלילי מעיד כי בקטע זה כיוון הזרם הפוך.

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

מפגש הזרמים מתבצע הנקודה C ולכן נקודה זו היא נקודת השפך שבו מפל המתח הוא מקסימאלי ניתן לחשב זאת ב-2 אפשריות:

$$\Delta U_{u'c} = \frac{2\rho}{A} * I_{u'} * l_4 =$$

$$\Delta U_{u'c} = \frac{2}{4 * 58} * 4.5 * 40 = 1.552V$$

אפשרות 2-

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

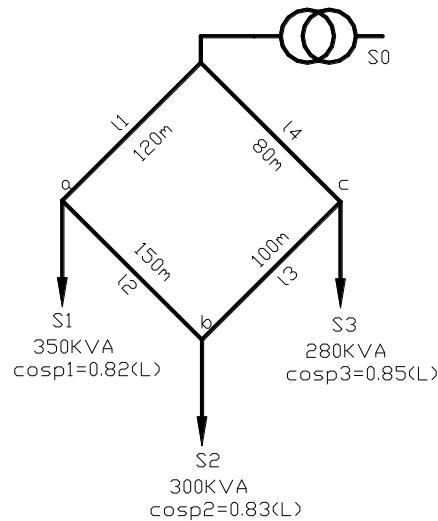
$$\Delta U_{uc} = \frac{2}{4 * 58} * 7.5 * 10 + 4.5 * 20 + 0.5 * 30 = 1.552V$$

המתח בנקודה השפך-

$$U_c = U_n - \Delta U_{uc} = 230 - 1.552 = 228.448V$$

תרגיל דוגמא 2

באיור הבא מתוארת מערכת הספקת חשמל תלת מופעית במתח נמוך-



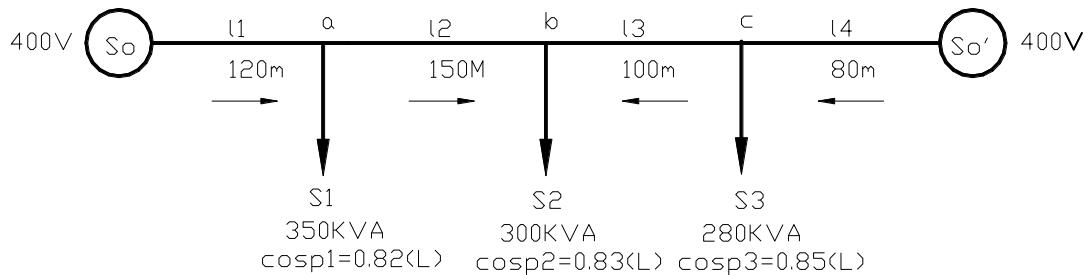
נתון כי המוליכות הסגולית של המוליכים - $g = 35 \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right]$

מתח הרשת 400V.

ההיגב האשראי של המוליכים זניח.

א. חשב את השטח המסחרי האחיד של המוליכים עבור מפל מתח מותר של 4%.

ב. חשב את המתח בנקודת השפך.



$$\rho_1 = \cos^{-1} 0.82 = 34.92^\circ$$

$$\rho_2 = \cos^{-1} 0.83 = 33.90^\circ$$

$$\rho_3 = \cos^{-1} 0.85 = 31.79^\circ$$

$$S_1 = 350 \angle 34.92^\circ \text{KVA}$$

$$S_2 = 300 \angle 33.90^\circ \text{KVA}$$

$$S_3 = 280 \angle 31.79^\circ \text{KVA}$$

$$S_{oa} = \frac{S_3 * l_4 + S_2 * (l_3 + l_4) + S_1 * (l_2 + l_3 + l_4)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}$$

$$S_{oa} = \frac{280 \angle 31.79^\circ * 80 + 300 \angle 33.90^\circ * (100 + 80) + 350 \angle 34.92^\circ * (150 + 100 + 80)}{120 + 150 + 100 + 80}$$

$$S_{oa} = 426.379 \angle 34.27^\circ \text{KVA}$$

$$S_{ab} = S_o - S_1 = (426.379 \angle 34.27^\circ - 350 \angle 34.92^\circ) * 10^3 = 76.505 \angle 31.30^\circ \text{KVA}$$

$$S_{bc} = S_{ab} - S_2 = (76.505 \angle 31.30^\circ - 300 \angle 33.90^\circ) * 10^3 = 223.601 \angle -145.63^\circ \text{KVA}$$

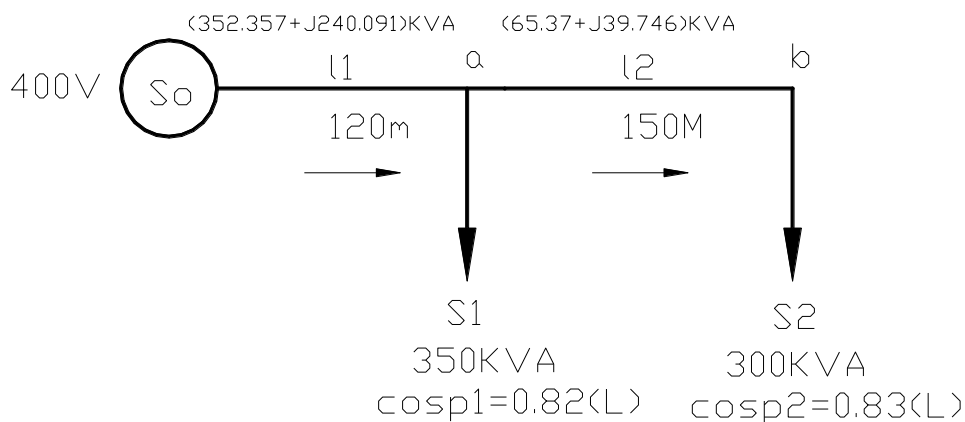
ימין שלילי בזווית או זווית הגדולה מ- $\pm 90^\circ$ מעידה על שינוי כיוון הזרם (נקודת השפך). ועל מנת

לקבל את הערך הנכון של הזרם (או ההספק בדוגמא זו) יש לשנות את הסימנים לפני הערכים:

$$S_{bc} = S_{ab} - S_2 = (-76.505 \angle 31.30^\circ + 300 \angle 33.90^\circ) * 10^3 = 223.601 \angle 34.80^\circ \text{KVA}$$

$$S_{co'} = S_{bc} + S_3 = (223.601 \angle 34.80^\circ + 280 \angle 31.79^\circ) * 10^3 = 503.409 \angle 33.13^\circ \text{KVA}$$

לצורך חישוב שטח החתך נתייחס לרשת מאחד המקורות ועד לנקודת השפך:



$$S_{oa} = 426.379 \angle 34.27^\circ \text{KVA} = (352.357 + j240.091) \text{KVA}$$

$$S_{ab} = 76.505 \angle 31.30^\circ \text{KVA} = (65.35 + j39.746) \text{KVA}$$

$$A = \frac{100\rho}{\Delta U_a \% * U_n^2} * \sum P * l = \frac{100\rho}{\Delta U_a \% * U_n^2} * (P_{oa} * l_{oa} + P_{ab} * l_{ab}) =$$

$$A = \frac{100}{4 * 400^2 * 35} * (352.357 * 120 + 65.37 * 150) * 10^3 = 232.537 \text{mm}^2$$

נבחר שטח חתך מסחרי של 240mm^2 .

ב.

$$\Delta U_{ob} = \frac{\rho}{A * U_n} * \sum P * l = \frac{\rho}{A * U_n} * (P_{oa} * l_{oa} + P_{ab} * l_{ab}) =$$

$$\Delta U_{ob} = \frac{1}{240 * 400 * 35} * (352.357 * 120 + 65.37 * 150) * 10^3 = 15.5 \text{V}$$

$$U_b = U_n - \Delta U_{ob} = 400 - 15.5 = 384.5 \text{V}$$

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול הפסדי הספק

זרם במוליכים יוצר חום שמתפזר בסביבה וגורם לאיבוד הספק אפקטיבי לפי הביטוי:

$$\Delta P = I^2 * R \Rightarrow R = \frac{\rho}{A} * l \Rightarrow \Delta P = \frac{I^2 * \rho * l}{A}$$

ניתן לראות מהביטוי כי שעור איבודי ההספק תלוי בשטח החתך של המוליכים ביחס הפוך. לפי שיקול של הפסדי הספק ניתן לבחור בשטח חתך אחיד של מוליכי הרשת, בתנאי שהפסדי ההספק לא יעלו מעל אחוז מסוים מהספק הכללי של הרשת.

שלבי החישוב:

- א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית או פולארית.
- ב. חישוב שטח אחיד של מוליכי הרשת.

נוסחאות:

סוג הרשת	הצגת הרשת	שטח חתך אחיד ברשת (mm ²)
רשת חד מופעית	זרמי קטעים	$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$
רשת תלת מופעית	זרמי קטעים	$A = \frac{300\rho}{\Delta P\% * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$A = \frac{100\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$

I_{li} - זרם מדומה (ללא הזווית) בקטע i (A).

S_{li} - הספק מדומה (ללא הזווית) בקטע i (VA).

P_{l1} - ההספק הכללי (ההספק האקטיבי בקטע הראשון של הרשת) (W).

$\Delta P\%$ - הפסדי ההספק המותרים ברשת (%).

ρ - התנגדות סגולית של חומר המוליך:

$$\rho_{cu} = \frac{1}{48} \div \frac{1}{60} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right] \text{ נחושת}$$

$$\rho_{Al} = \frac{1}{34} \div \frac{1}{36} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right] \text{ אלומיניום}$$

l - המרחק מהמקור ועד לצרכן (m).

A - שטח החתך של המוליך (mm²).

אם ידוע שטח החתך האחיד של המוליכים ניתן לחשב את הפסדי ההספק ע"י שינוי נוסח נוסחה.

לדוגמא עבור רשת חד פאזית המוצגת ע"י זרמי קטעים:

$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$$

ואם שטח החתך אינו אחיד:

$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{P_{l1}} \sum_{i=1}^n \frac{I_{li}^2 * l}{A_{li}}$$

קורס- מתקני השמל-הנדסאי השמל

אם סוג המוליכים ושטח החתך אינם אחידים:

$$\Delta P\% = \frac{200}{P_{l1}} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{li}}{A_{li}} * I_{li}^2 * l$$

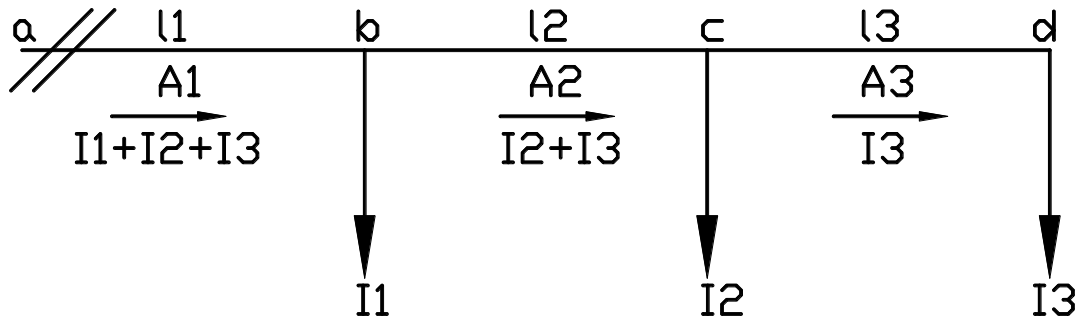
את הפסדי ההספק בוואטים ניתן לחשב לפי:

$$\Delta P = \frac{\Delta P\%}{100} * P_{l1} [W]$$

ניתן גם לחשב איבודי הספק ישירות ביחידות וואט לפי הנוסחאות הבאות:

שטח חתך אחיד ברשת (mm ²)	הצגת הרשת	סוג הרשת
$\Delta P = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$	זרמי קטעים	רשת חד מופעית
$\Delta P = \frac{2\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$	הספקי קטעים	
$\Delta P = \frac{3\rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$	זרמי קטעים	רשת תלת מופעית
$\Delta P = \frac{\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$	הספקי קטעים	

ברשת זרם ישר



$$I_{cd} = I_3$$

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

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

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

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

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

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

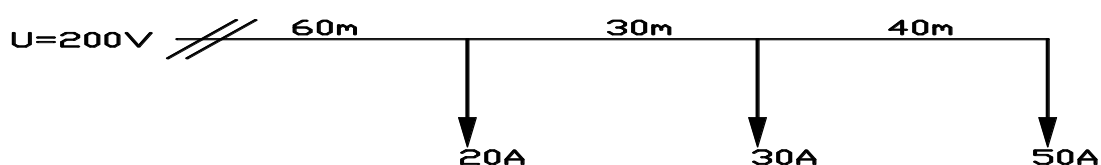
$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

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

$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_n * U n^2} * \sum S^2 * l$$

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת השמל במתח ישר המתוארת באיור הבא:



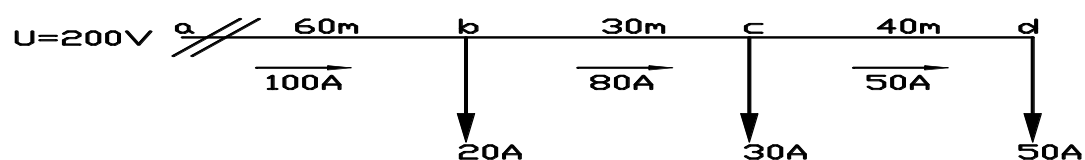
נתון:

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

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

מה איבוד ההספק המקסימאלי ברשת?
האם הרשת כלכלית אם לא הצע פתרון לשיפור?

פתרון לתרגיל דוגמא 1



$$I_{cd} = I_d = 50A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_c = 50 + 30 = 80A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = 80 + 20 = 100A$$

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

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

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

$$P_n = U_n * I_n = 200 * 100 = 20KW$$

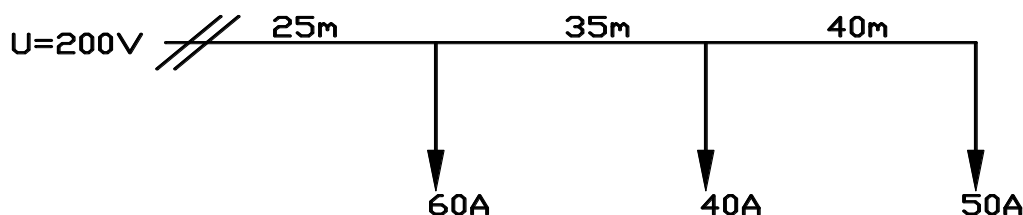
$$\Delta P_{max}\% = \frac{3129.82}{20 * 10^3} * 100 = 15.649\%$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

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.

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:

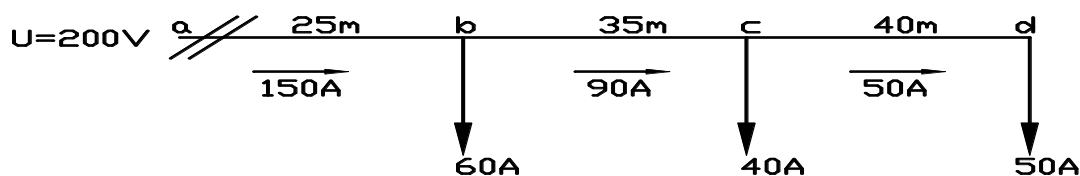


נתון:

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 2



א.

$$I_{cd} = I_d = 50A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_c = 50 + 40 = 90A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = 90 + 60 = 150A$$

$$P_n = U_n * I_{ab} = 200 * 150 = 30KW$$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_n} \sum I^2 * l$$

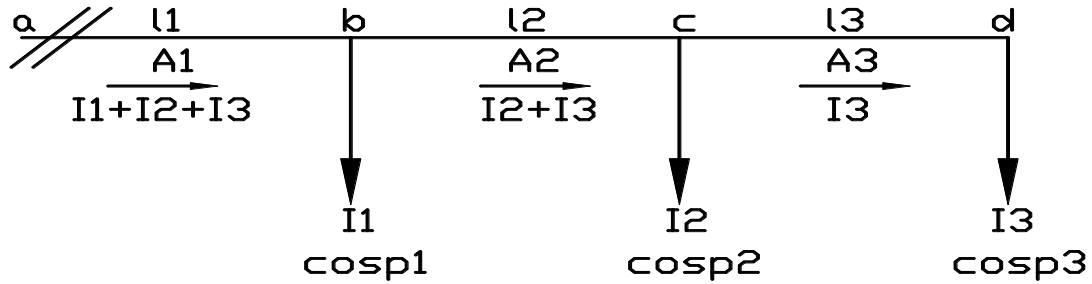
$$A = \frac{200}{6 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 30.92mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$

$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

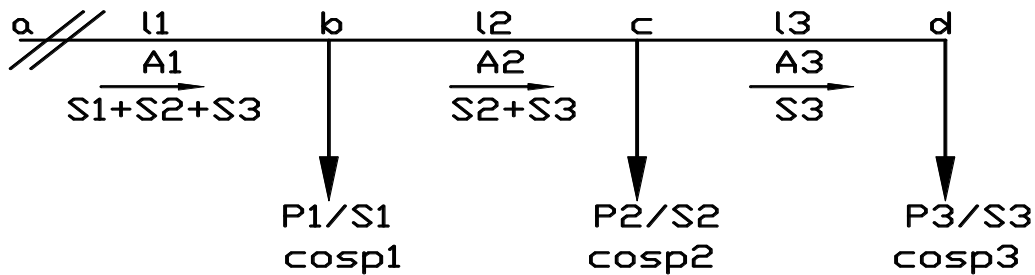
$$\Delta P\% = \frac{200}{35 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 5.3\%$$



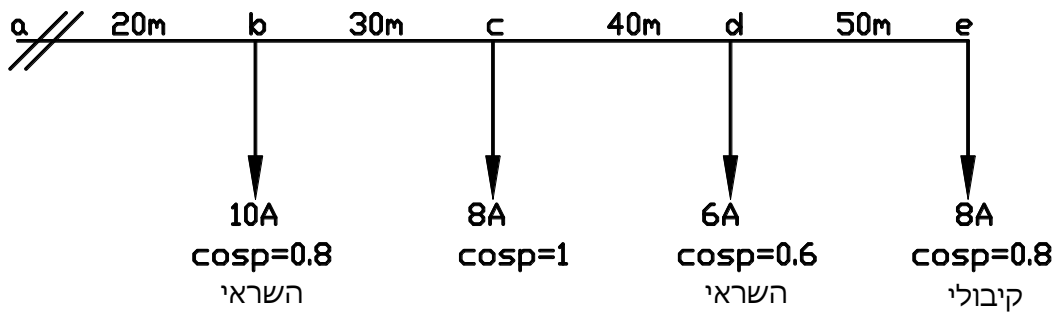
$$\begin{aligned} \vec{I}_{cd} &= \vec{I}_3 \\ \vec{I}_{bc} &= \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \\ \vec{I}_{ab} &= \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \\ \Delta P_{cd} &= \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd}^2 * l_3 \\ \Delta P_{bc} &= \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc}^2 * l_2 \\ \Delta P_{ab} &= \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1 \\ \Delta P_{max} &= \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd} \end{aligned}$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

$$\begin{aligned} \Delta P_{max} &= \frac{2\rho}{A} * \sum I^2 * l \\ \Delta P\% &= \frac{200\rho}{A * P_n} * \sum I^2 * l \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} S &= U * I \\ P &= U * I * \cos\phi \\ Q &= U * I * \sin\phi \\ I &= \frac{S}{U} \text{ מכיוון ש-} \\ I^2 &= \frac{S^2}{U^2} \text{ לכן-} \\ \Delta P_{max} &= \frac{2\rho}{A * U^2} * \sum S^2 * l \\ \Delta P\% &= \frac{200\rho}{A * P_n * U_n^2} * \sum S^2 * l \end{aligned}$$



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 הכלליים 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.

$$P_n = U_n * I_{ab} = 250 * 26 = 6500W$$

$$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_n} \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{200}{1.2 * 6500 * 34} * (26.683^2 * 20 + 18^2 * 30 + 10^2 * 40 + 8^2 * 50) = 23.5mm^2$$

ג. נבחר שטח חתך מסחרי של $25mm^2$.

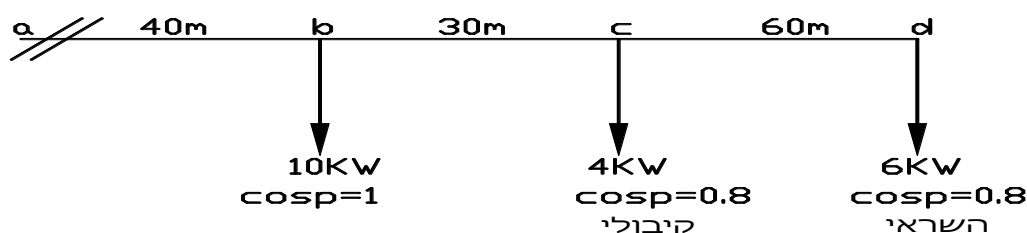
$$\Delta P_{bc} = \frac{2\rho}{A} * I_{bc}^2 * l_{bc} = \frac{2}{25 * 34} * 18^2 * 30 = 22.78W$$

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

$$\Delta P_{max} = \frac{2}{25 * 34} * (26.683^2 * 20 + 18^2 * 30 + 10^2 * 40 + 8^2 * 50) = 73.317W$$

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.

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

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

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

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

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

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

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

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

$$A = \frac{2}{1000 * 250^2 * 56} * (20.056^2 * 40 + 10.112^2 * 30 + 7.5^2 * 60) * 10^6 = 12.88mm^2$$

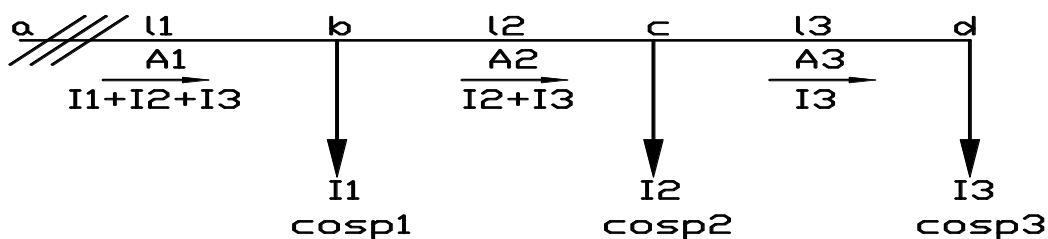
נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$.

ב.

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

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

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



$$\vec{Icd} = \vec{I3}$$

$$\vec{Ibc} = \vec{I2} + \vec{I3}$$

$$\vec{Iab} = \vec{I1} + \vec{I2} + \vec{I3}$$

$$\Delta Pcd = \Delta Pcd = \frac{3 * \rho^3}{A3} * Icd^2 * l3$$

$$\Delta Pbc = \frac{3 * \rho^2}{A2} * Ibc^2 * l2$$

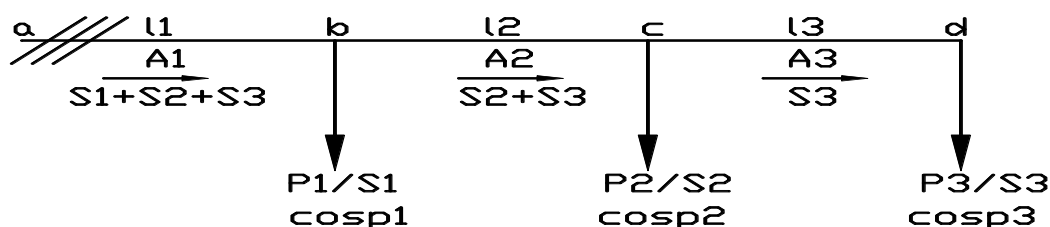
$$\Delta Pab = \frac{3 * \rho^1}{A1} * Iab^2 * l1$$

$$\Delta Pmax = \Delta Pab + \Delta Pbc + \Delta Pcd$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

$$\Delta P\% = \frac{300\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$



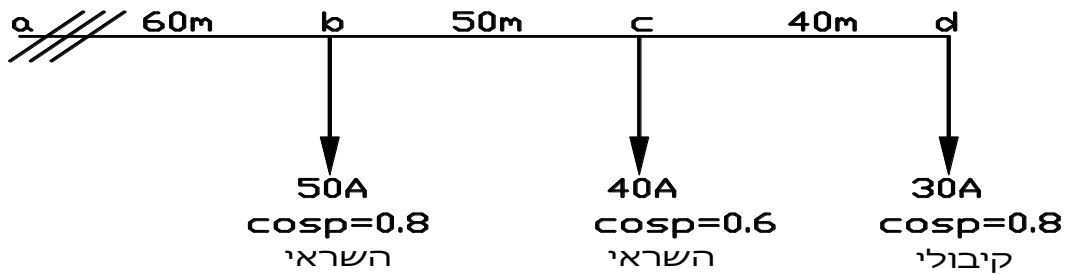
$$S = \sqrt{3} * U * I$$

$$P = \sqrt{3} * U * I * cosp$$

$$Q = \sqrt{3} * U * I * sinp$$

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

$$\Delta P\% = \frac{100\rho}{A * P_n * Un^2} \sum S^2 * l$$



נתון:

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

$$UL = 400V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

$$\vec{I}_d = (24 + j18) A$$

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

$$\vec{I}_b = (40 - j30) A$$

$$|\vec{I}_{cd}| = |\vec{I}_d| = \sqrt{24^2 + 18^2} = 30 A$$

$$|\vec{I}_{bc}| = |\vec{I}_c + \vec{I}_{cd}| = (24 - j32) + (24 + j18) = (48 - j14) = \sqrt{48^2 + 14^2} = 50 A$$

$$|\vec{I}_{ab}| = |\vec{I}_b + \vec{I}_{bc}| = (40 - j30) + (48 - j14) = (88 - j44) = \sqrt{88^2 + 44^2} = 98.387 A$$

ב.

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

$$A = \frac{300\rho}{\Delta P\% * P_n} \sum I^2 * l$$

$$A = \frac{300}{4 * 60.938 * 10^3 * 56} * (98.387^2 * 60 + 50^2 * 50 + 30^2 * 40) = 16.303 mm^2$$

ג.

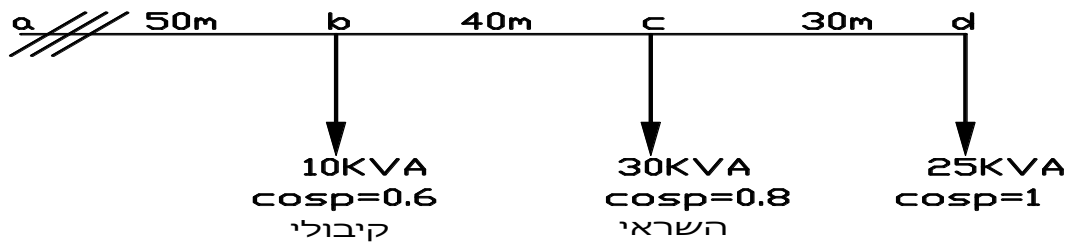
נבחר שטח חתך מסחרי $25 mm^2$.

$$\Delta P\% = \frac{300\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

$$\Delta P\% = \frac{300}{25 * 60.938 * 10^3 * 56} * (98.387^2 * 60 + 50^2 * 50 + 30^2 * 40) = 2.6\%$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

$$UL = 400V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

$$P_n = P_{ab} = 55KW$$

$$A = \frac{100\rho}{\Delta P\% * P_n * U_n^2} \sum S^2 * l$$

$$A = \frac{100}{1.5 * 55 * 10^3 * 400^2 * 57} * 10^6 (55.902^2 * 50 + 52.202^2 * 40 + 25^2 * 30) = 37.746mm^2$$

ג.

נבחר שטח חתך מסחרי $50mm^2$

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

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

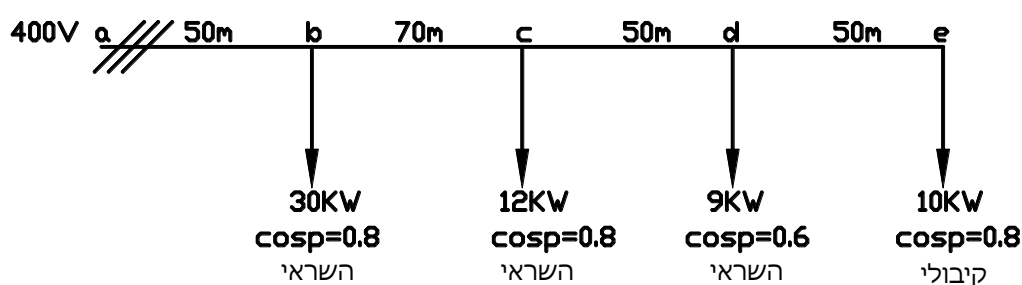
חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול העמסה מותרת

בתקנות החשמל (העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים במתח עד 1000 וולט), בתוספת הראשונה מובאים ערכי זרם מתמיד מרבי I_z של מוליכים בהתאם לשיטת התקנתם. יש לבחור את שטח חתך המוליכים לפי התנאי: $I_b \leq I_n \leq I_z$ כאשר I_b - זרם עבודה ממושך (זרם נתון או מחושב), I_n - זרם הנומינאלי של המאבטח להגנה בפני זרמי יתר וזרמי קצר. יש לציין כי לא ניתן לבחור חתך מוליך ללא בחירת גודל וסוג המאבטח המגן עליו. נרחיב בנושא זה בפרק הדין בהגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר. כאשר מותקנים כבלים ללא רווח בניהם או כאשר הטמפרטורה האופפת במקום ההתקנה שונה מהטמפרטורה התקינית (35°C באוויר ו- 30°C באדמה), יש להכפיל את הערך I_z במקדם תיקון k . $I_z' = k * I_z$. ובמקרים אלו יש לבחור את שטח החתך לפי התנאי:

$$I_b \leq I_z' \Rightarrow I_b \leq \frac{I_z}{k}$$

תרגיל דוגמא 1

נתונה הרשת התלת פאזית הבאה:



נתון: כבל ההזנה בקטעים $a-e$ מונחים בתעלה פתוחה מאווררת יחד עם עוד 2 כבלים. הכבלים עשויים מנחושת בעלי בידוד של 90°C בעלי התנגדות סגולית של-

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

א. מצא את שטח החתך של כל אחד מקטעי הרשת לפי תנאי ההתקנה וזרמים מותרים.

ב. על סמך החתכים שמצאת, מצא את מפל המתח בקו עד לנקודה e באחוזים ובדוק אם מפל המתח זה הוא בגדר המותר של 5%. (הזנח את מפל המתח הראקטיבי).

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

$$\vec{I}_e = \frac{P_e}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_e} = \frac{10 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 18.042 \angle 36.87^\circ A$$

$$\vec{I}_d = \frac{P_d}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_d} = \frac{9 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.6} = 21.65 \angle - 53.13^\circ A$$

$$\vec{I}_c = \frac{P_c}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_c} = \frac{12 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 21.65 \angle - 36.87^\circ A$$

$$\vec{I}_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_b} = \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 54.127 \angle - 36.87^\circ A$$

קורס- מתקני השמל-הנדסאי השמל

$$\vec{I_{de}} = \vec{I_e} = (18.042 \angle 36.87^\circ)A$$

$$\vec{I_{cd}} = \vec{I_d} + \vec{I_{de}} = 21.65 \angle -53.13^\circ + 18.042 \angle 36.87^\circ = (28.182 \angle -13.32^\circ)A$$

$$\vec{I_{bc}} = \vec{I_c} + \vec{I_{cd}} = 21.65 \angle -36.87^\circ + 28.182 \angle -13.32^\circ = (48.802 \angle -23.53^\circ)A$$

$$\vec{I_{ab}} = \vec{I_b} + \vec{I_{bc}} = 54.127 \angle -36.87^\circ + 48.802 \angle -23.53^\circ = (102.234 \angle -30.547^\circ)A$$

לפי שיטת ההתקנה נבחר בטבלה 90.1 עם מקדם תיקון ל- I_z עבור 3 כבלים של 0.73.

ונמצא מטבלה זו את שטחי החתך העומדים בתנאי: $I_{b'} \leq I_z$

זרם מרבי (A) I_z מתמיד	שטח חתך נבחר בהתאם לתנאי (mm ²)	זרם מחושב כולל מקדם תיקון (A) $I_{b'} = \frac{I_b}{k}$	זרם מחושב (A) I_b	קטע רשת
33	4	$I_{b'} = \frac{18.042}{0.73} = 24.715$	18.042	de
41	6	$I_{b'} = \frac{28.182}{0.73} = 38.606$	28.182	cd
79	16	$I_{b'} = \frac{48.802}{0.73} = 66.852$	48.802	bc
155	50	$I_{b'} = \frac{102.234}{0.73} = 140.047$	102.234	ab

ב.כיוון שעל פי נתוני השאלה מזניחים את מפל הראקטיבי לכן- $\Delta U = \Delta U_a$

נציג את זרמי הקטעים בצורה קרטזית:

$$\vec{I_{de}} = (18.042 \angle +36.87^\circ) = (14.437 + j10.825)A$$

$$\vec{I_{cd}} = (28.182 \angle -13.32^\circ) = (27.424 - j6.493)A$$

$$\vec{I_{bc}} = (48.802 \angle -23.53^\circ) = (44.744 - j19.483)A$$

$$\vec{I_{ab}} = (102.234 \angle -30.547^\circ) = (88.045 - j51.96)A$$

$$\Delta U_a \% = \frac{\sqrt{3} * 100 \rho}{U_n} \sum_{i=1}^n \frac{I_{ali} * l_i}{A_{li}}$$

$$\Delta U_a \% = \frac{\sqrt{3} * 100}{400 * 57} * \left[\frac{14.437 * 50}{4} + \frac{27.424 * 50}{6} + \frac{44.744 * 70}{16} + \frac{88.045 * 50}{50} \right] =$$

$$\Delta U_a \% = 5.26\%$$

לפי מפל מתח זה אנו לא עומדים בדרישת התרגיל למפל מתח מקסימאלי של 5%

הפתרון לכך הוא-להגדיל את שטח החתך של לדוגמא של הקטע האחרון (de) ולחשב שוב

את המפל מתח.

$$\Delta U_a \% = \frac{\sqrt{3} * 100}{400 * 57} * \left[\frac{14.437 * 50}{6} + \frac{27.424 * 50}{6} + \frac{44.744 * 70}{16} + \frac{88.045 * 50}{50} \right] =$$

$$\Delta U_a \% = 4.8\%$$

מצב זה עומד בדרישות התרגיל.

תרגיל דוגמא 2

מפעל צורך הספק של 150KW במתח שלוב 400V, במקדם הספק של 0.85 השראי. המפעל מוזן משנאי חלוקה קרוב באמצעות כבל A רב גידי תלת פאזי העשוי נחושת. הכבל טמון במישרין בקרקע עם כיסוי מגן מלוחות ביטון. נתוני הכבל: אורך 120m בחתך $150mm^2$ הגיבו האשראי $X_0 = 0.02 \frac{\Omega}{km}$ התנגדותו הסגולית $\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$. הזרם המתמיד המרבי המותר בכבל זה בתנאי התקנה זו הוא 277A. מעוניינים לחבר במקביל לכבל הנתון כבל נוסף B לשם הרחבת המפעל. נתוני הכבל: אורך 120m שטח חתך $25mm^2$ הגיבו האשראי $X_0 = 0.06 \frac{\Omega}{km}$ התנגדותו הסגולית ושיטת ההתקנה זהה לכבל A, הזרם המתמיד המרבי המותר בכבל זה בתנאי התקנה זו הוא 101A.

א. חשב את חלוקת הזרמים בין 2 הכבלים ואת זווית המופע בין 2 הזרמים.
 ב. חשב אם ניתן לחבר ל-2 הכבלים במקביל עומס נוסף בהספק של 50KW במקדם הספק של 0.9 השראי מבלי לעבור את הזרם המתמיד המרבי המותר בכל אחד מ-2 הכבלים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. נחשב את רכיבי המעגל ונציג את מעגל התמורה שלו:

$$R_A = \rho_A * \frac{l_A}{A_A} = \frac{1}{57} * \frac{120}{150} = 0.014\Omega$$

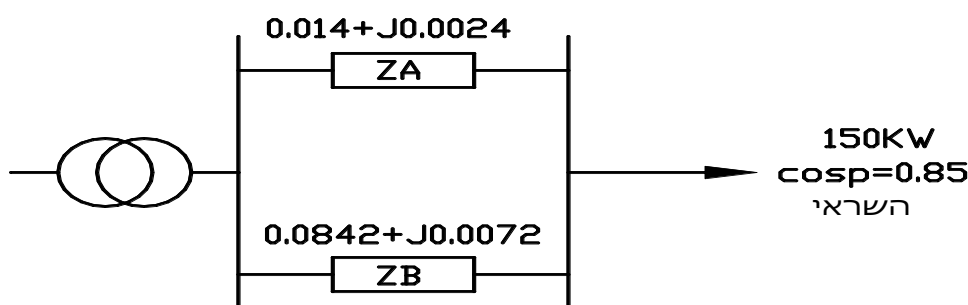
$$X_A = \frac{X_{0A}}{1000} * l_A = \frac{0.02}{1000} * 120 = 0.0024\Omega$$

$$R_B = \rho_B * \frac{l_B}{A_B} = \frac{1}{57} * \frac{120}{25} = 0.0842\Omega$$

$$X_B = \frac{X_{0B}}{1000} * l_B = \frac{0.06}{1000} * 120 = 0.0072\Omega$$

$$Z_A = (0.014 + j0.0024)\Omega$$

$$Z_B = (0.0842 + j0.0072)\Omega$$



נחשב את זרם העומס:

$$I_{L1} = \frac{P_{L1}}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_{L1}} = \frac{150 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.85} = (254.713\angle - 31.79^\circ)A$$

נחשב את הזרמים בכל כבל לפי כלל מחלק הזרם:

$$I_A = I_{L1} * \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} = (254.713\angle - 31.79) * \frac{0.0842 + j0.0072}{0.014 + j0.0024 + 0.0842 + j0.0072} = (218.157\angle - 31.09^\circ)A$$

$$I_B = I_{L1} * \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} = (254.713\angle - 31.79) * \frac{0.014 + j0.0024}{0.014 + j0.0024 + 0.0842 + j0.0072} = (36.668\angle - 35.93^\circ)A$$

הפרש המופע בין 2 הזרמים:

$$\varphi_{L1} = \varphi_B - \varphi_A = (-35.93^\circ) - (-31.09^\circ) = -4.84^\circ$$

ב. נחשב את זרם העומס הנוסף:

$$I_{L2} = \frac{P_{L2}}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_{L2}} = \frac{50 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.9} = (80.188\angle - 25.84^\circ)A$$

הזרם השקול של 2 העומסים:

$$\vec{I}_{LT} = \vec{I}_{L1} + \vec{I}_{L2} = (254.713\angle - 31.79^\circ) + (80.188\angle - 25.84^\circ) = (334.572\angle - 30.37^\circ)A$$

נחשב את הזרמים בכל כבל לפי כלל מחלק הזרם:

$$I_A = I_{LT} * \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} = (334.572\angle - 30.37) * \frac{0.0842 + j0.0072}{0.014 + j0.0024 + 0.0842 + j0.0072} = (286.554\angle - 29.67^\circ)A$$

$$I_B = I_{LT} * \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} = (334.572\angle - 30.37) * \frac{0.014 + j0.0024}{0.014 + j0.0024 + 0.0842 + j0.0072} = (48.165\angle - 34.51^\circ)A$$

מהתוצאות של הזרמים בין הכבלים לאחר הוספת ההספק ניתן לראות כי כבל B אינו עובר

את ההעמסה המותרת שלו (101A) אבל כבל A עובר את ההעמסה המותרת שלו (277A),

ולכן לא ניתן בתנאים אלו לחבר את העומס הנוסף.

פתרון למצב זה להגדיל את שטח החתך של כבל B ולבדוק שוב.

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מינימום חומר

שיקול של מינימום חומר מאפשר לבחור שטחי חתך לא אחידים לקטעי הרשת אשר מבטיחים תנאי שימוש בכמות מינימאלית של נחושת (או אלומיניום), כאשר מפל המתח הכללי ברשת לא עובר את מפל המתח המקסימאלי המותר. לפי עיקרון זה, מקדם הרשת הוא היחס בין שטח החתך של כל קטע ברשת, לבין השורש הריבועי של הרכיב האקטיבי של זרם או הספק הקטע ויהיה מספר קבוע לכל קטעי הרשת:

$$k_I = \frac{A_{li}}{\sqrt{I_{ali}}} ; \quad k_P = \frac{A_{li}}{\sqrt{P_{li}}}$$

שלב: חישוב

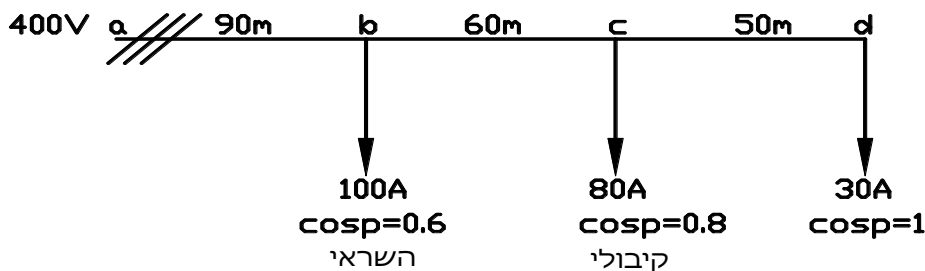
- א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת, בצורה קרטזית.
- ב. חישוב מפל המתח הראקטיבי $\Delta U_r\%$.
- ג. חישוב מפל המתח האקטיבי המותר $\Delta U_a\%$.
- ד. חישוב מקדם הרשת k_I או k_P .
- ה. חישוב שטחי החתך של קטעי הרשת.

נוסחאות

שטח חתך של כל קטע ברשת (mm^2)	מקדם הרשת	סוג הרשת	הצגת הרשת
$A_{li} = k_I * \sqrt{I_{ali}}$	$k_I = \frac{200\rho}{\Delta U_a\% * Un} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ali}} * l_i$	חד מופעית	זרמי קטעים
	$k_I = \frac{\sqrt{3} * 100\rho}{\Delta U_a\% * Un} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ali}} * l_i$	תלת מופעית	
$A_{li} = k_P * \sqrt{P_{li}}$	$k_P = \frac{200\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{li}} * l_i$	חד מופעית	הספקי קטעים
	$k_P = \frac{100\rho}{\Delta U_a\% * Un^2} \sum_{i=1}^n \sqrt{P_{li}} * l_i$	תלת מופעית	

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת תלת פאזית הבאה:



נתון:

$$\gamma = 57 \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right], \quad X_o = 0.4 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

- א. חשב את שטח החתך של קטעי הרשת לפי קריטריון מינימום חומר אם מפל המתח המותר הוא 5%.
- ב. חשב את הפסדי ההספק באחוזים ברשת לאחר בחירת שטחי חתך מסחריים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נחשב את זרמי הקטעים ונציגם בצורה קרטזית-

$$I_{cd} = I_d = 30 \angle 0^\circ = (30 + j0)A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_c = 30 \angle 0^\circ + 80 \angle 36.87^\circ = 105.546 \angle 27.05^\circ = (94 + j48)A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = 105.546 \angle 27.05^\circ + 100 \angle -53.13^\circ = 157.29 \angle -11.74^\circ = (154 - j32)A$$

נחשב את מפל המתח האקטיבי המותר-

$$\Delta U_r \% = \frac{\sqrt{3} * X_0}{10 U_n} \sum \bar{I}_r * l = \frac{\sqrt{3} * 0.4}{10 * 400} * (0 * 50 - 48 * 60 + 32 * 90) = 0\%$$

$$\Delta U_a \% = \Delta U_{max} \% - \Delta U_r \% = 5\% - 0\% = 5\%$$

נחשב את מקדם הרשת k_I -

$$k_I = \frac{\sqrt{3} * 100 \rho}{\Delta U_a \% * U_n} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ali}} * l_i = \frac{\sqrt{3} * 100}{5 * 400 * 57} * (\sqrt{30} * 50 + \sqrt{94} * 60 + \sqrt{154} * 90) = 3$$

נחשב את שטחי החתך של קטעי הרשת לפי-

$$A_{li} = k_I * \sqrt{I_{ali}}$$

$$A_{cd} = k_I * \sqrt{I_{acd}} = 3 * \sqrt{30} = 16.432 mm^2$$

$$A_{bc} = k_I * \sqrt{I_{abc}} = 3 * \sqrt{94} = 29.086 mm^2$$

$$A_{ab} = k_I * \sqrt{I_{aab}} = 3 * \sqrt{154} = 37.229 mm^2$$

ב. נבחר שטחי חתך סטנדרטים-

$$A_{cd} = 25 mm^2$$

$$A_{bc} = 35 mm^2$$

$$A_{ab} = 50 mm^2$$

נחשב את הפסדי ההספק-

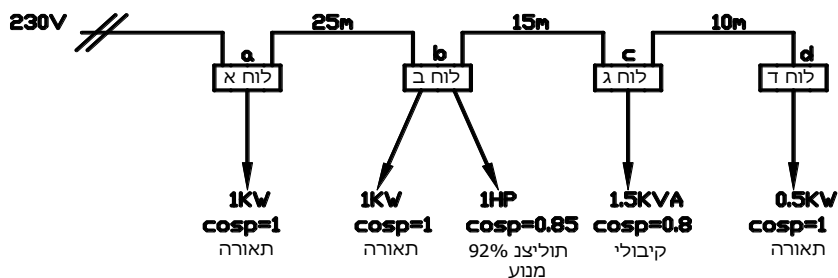
$$P_n = P_{ab} = \sqrt{3} * I_{a_{ab}} U_n = \sqrt{3} * 154 * 400 = 106.694 KW$$

$$\Delta P \% = \frac{300 \rho \sum \frac{I^2 * l}{A}}{P_n} =$$

$$\Delta P \% = \frac{300}{106.694 * 10^3 * 57} * \left(\frac{30^2 * 50}{25} + \frac{105.546^2 * 60}{35} + \frac{157.29^2 * 90}{50} \right) = 3.23\%$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה מערכת לוחות חלוקה חד מופעיים כפי שמתואר באיור הבא:



נתון: כי התנגדות הסגולית של מוליכי הרשת $0.0175 \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]$ וההיגב האשראי של המוליכים

זניה. מפל המתח המרבי הוא 4%.

א. חשב את הזרמים בקטעי הרשת הנתונה ואת הזרם בנקודת הזינה.

ב. חשב על פי קריטריון מינימום חומר את שטח החתך של המוליכים בקטעי הרשת, ובחר

שטחי חתך מסחריים.

.א

$$I_{cd} = I_d = \frac{Pd}{Un * \cos \varphi d} = \frac{0.5 * 10^3}{230 * 1} = 2.174 \angle 0^\circ = (2.174 + j0)A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_c = I_{cd} + \frac{Sc}{Un} = 2.174 \angle 0^\circ + \frac{1.5 * 10^3}{230} \angle 36.87^\circ =$$

$$I_{bc} = 8.363 \angle 27.9^\circ = (7.391 + j3.913)A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_{b_2} + I_{b_1} = I_{bc} + \frac{Pb_2}{Un * \cos \varphi b_2 * \eta b_2} + \frac{Pb_1}{Un * \cos \varphi b_1} =$$

$$I_{ab} = 8.363 \angle 27.9^\circ + \frac{1 * 736}{230 * 0.85 * 0.92} \angle -31.79^\circ + \frac{1 * 10^3}{230 * 1} \angle 0^\circ =$$

$$I_{ab} = 15.341 \angle 6.6^\circ = (15.217 + j1.763)A$$

$$I_T = I_{ab} + I_a = I_{ab} + \frac{Pa}{Un * \cos \varphi a} =$$

$$I_T = 15.341 \angle 6.6^\circ + \frac{1 * 10^3}{230 * 1} \angle 0^\circ = 19.666 \angle 5.14^\circ = (19.587 + j1.763)A$$

.ב

$$k_I = \frac{200\rho}{\Delta Ua\% * Un} \sum_{i=1}^n \sqrt{I_{ai}} * l_i =$$

$$k_I = \frac{200 * 0.0175}{4 * 230} * (\sqrt{2.174} * 10 + \sqrt{7.391} * 15 + \sqrt{15.217} * 25 + \sqrt{19.587} * 0) = 0.582$$

$$A_{cd} = k_I * \sqrt{I_{a_{cd}}} = 0.582 * \sqrt{2.174} = 0.858 mm^2$$

$$A_{bc} = k_I * \sqrt{I_{a_{bc}}} = 0.582 * \sqrt{7.391} = 1.582 mm^2$$

$$A_{ab} = k_I * \sqrt{I_{a_{ab}}} = 0.582 * \sqrt{15.217} = 2.27 mm^2$$

$$A_{Ta} = k_I * \sqrt{I_{a_T}} = 0.582 * \sqrt{19.587} = 2.58 mm^2$$

נבחר שטחי חתך מסחריים:

שטח חתך מינימאלי על פי תקנות החשמל עבור מתח נמוך-

$$A_{cd} = 1.5 mm^2$$

$$A_{bc} = 2.5 mm^2$$

$$A_{ab} = 2.5 mm^2$$

$$A_T = 4 mm^2$$

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול כדאיות כלכלית (חוק קלווין)

לפי כלל קלווין, שטח החתך הכדאי ביותר של מוליכי הרשת הינו חתך שבו העלות השנתית של הפסדי האנרגיה ברשת שווה לעלות השנתית של הריבית והפחת.

$$C_w = C_k$$

הוצאות הרשת לאחר הפעלת כוללים 2 מרכיבים:

א. עלות הפסדי אנרגיה שנתית במוליכי הקו C_w .

מרכיב זה תלוי באיבודי ההספק בקו ובתעריף של האנרגיה החשמלית:

$$C_w = \Delta W * M$$

כאשר:

ΔW - איבוד אנרגיה חשמלית במשך שנה $[kWh]$.

M - תעריף האנרגיה החשמלית $\left[\frac{\text{₪}}{kWh}\right]$

אם העומס בקו הינו קבוע במשך השנה, ניתן לחשב את איבודי האנרגיה ברשת תלת פאזית לפי הנוסחה הבאה:

$$\Delta W = 3 * I^2 * R_L * \frac{8700}{1000}$$

כאשר:

8700- מספר השעות בשנה.

1000- מקדם הפיכת יחידות הספק (W) ל- (kW) .

R_L - התנגדות מוליך הרשת (Ω) .

I - זרם העומס ברשת (A) .

במקרה כללי העומס בקו משתנה במשך היממה ונהוג לחשב את איבודי האנרגיה לפי:

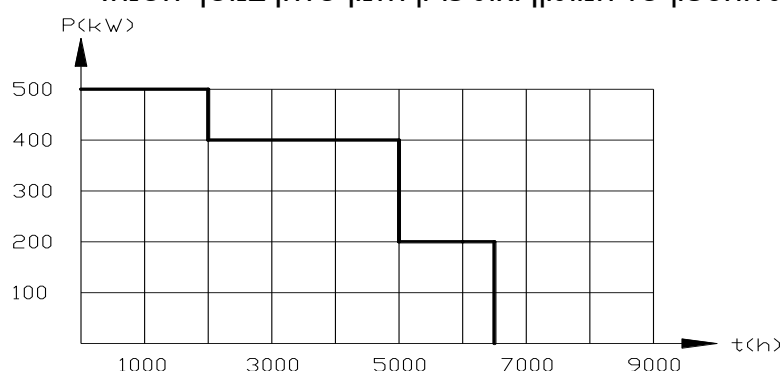
$$\Delta W = 3 * I_{max}^2 * R_L * \frac{T_{max}}{1000}$$

כאשר:

I_{max} - זרם העומס המרבי (A) .

T_{max} - זמן שימוש בהספק מרבי (h) .

בתרשים הבא נתונה דיאגרמת העמסה של מתקן לדוגמא, ובה ניתן לראות את משטרי צריכת ההספק של המתקן ואת פרק הזמן שלהן במשך השנה:



ניתן לראות מהדיאגרמה כי ההספק המרבי הוא $500kW$.

את הזרם המרבי ניתן לחשב לפי-

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi}$$

על פי נתוני הדיאגרמה ניתן לחשב את האנרגיה השנתית הנצרכת ע"י המתקן:

$$W_Y = \sum P * t = 500 * 2000 + 400 * 3000 + 200 * 1500 = 2.5 * 10^6 kWh$$

זמן השימוש בהספק המרבי T_{max} זהו הזמן הנדרש למתקן על מנת לצרוך את האנרגיה השנתית, לו היה פועל כל הזמן הזה בהספקו המרבי:

$$T_{max} = \frac{W_Y}{P_{max}} = \frac{2.5 * 10^6}{500} = 5000h$$

ניתן לבטא את התנגדות המוליכים גם:

$$R_L = \rho * \frac{l}{A}$$

כאשר:

l - אורך הקו (m).

A - שטח החתך של המוליך (mm^2).

וניתן לבטא את הפסדי האנרגיה השנתית במוליכי הקו גם:

$$C_w = 3 * I_{max}^2 * \rho * \frac{l}{A} * \frac{T_{max}}{1000} * M$$

ב. עלות השנתית של ריבית והפחת C_k .

מרכיב זה תלוי בעלות המוליכים ועלות התקנתם בעת בניית הרשת ומהווה אחוז מסוים מההשקעה הראשונית:

$$C_k = \frac{K\%}{100} * B$$

כאשר:

$K\%$ ריבית ופחת שנתיים (%).

B - עלות הרשת (ש).

ההשקעה בבניית הרשת תלויה בשטח החתך המוליכים ביחס ישר:

$$B = b * l$$

כאשר:

$b = x * A$ - מחיר סגולי של הרשת בתלות בשטח החתך $\left(\frac{m}{m}\right)$.

A - שטח החתך של מוליכי הרשת (mm^2).

l - אורך מוליכי הרשת (m).

לסיכום, העלות השנתית של הריבית והפחת:

$$C_k = \frac{K\%}{100} * x * A * l$$

כאמור לפי כלל קלווין:

$$C_w = C_k$$

ניתן לבטא זאת גם:

$$3 * I_{max}^2 * \rho * \frac{l}{A} * \frac{T_{max}}{1000} * M = C_k = \frac{K\%}{100} * x * A * l$$

ומכאן ניתן לחלץ את שטח החתך של המוליכים הכדאי ביותר מחינה כלכלית:

$$A = \sqrt{\frac{3 * I_{max}^2 * \rho * T_{max} * M * 100}{1000 * K\% * x}}$$

קורס - מתקני חשמל - הנדסאי חשמל

הנוסחה לעיל מתאימה לרשת תלת פאזית כאשר הגדלים הן היחידות תקניות כפי שפורט, במקרה והיחידות הנתונות שונות יש לעדכן את הנוסחה בהתאם. ניתן לראות מהנוסחה כי אורך הרשת אינו בא לידי ביטוי בנוסחה. לסיכום שלבי החישוב:

א. הצגת עלות הפסדי האנרגיה השנתית ברשת כפונקציה של שטח חתך המוליכים:

$$C_w = 3 * I_{max}^2 * \rho * \frac{l}{A} * \frac{T_{max}}{1000} * M$$

ב. הצגת עלות הריבית והפחת השנתית כפונקציה של שטח חתך המוליכים:

$$C_k = \frac{K\%}{100} * x * A * l$$

ג. רישום המשוואה:

$$C_w = C_k$$

ד. הצבה במשוואה ומציאת שטח החתך הכדאי ביותר על פי כלל קלווין.

תרגיל דוגמא

חשב את שטח החתך הכדאי מבחינה כלכלית של כבל להזנת צרכן תלת מופעי בהתאם לנתונים הבאים:

א. מתח הרשת $400[V]$.

ב. ההספק הנדרש $30[KVA]$.

ג. מחי האנרגיה $0.3 \left[\frac{\text{מ}}{kWh} \right]$.

ד. המחיר הסגולי של הכבל בתלות בשטח החתך $0.93 * A \left[\frac{\text{מ}}{m} \right]$.

ה. הכבל עשוי נחושת בעל התנגדות סגולית $\frac{1}{57} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]$.

ו. הריבית והפחת השנתיים 13.5% .

ז. פרק הזמן להפעלת המתקן $7000 \left[\frac{h}{y} \right]$.

ח. אורך הכבל $200[m]$.

ט. העומסים הפאזיים הם סימטריים ומאוזנים.

פתרון לתרגיל דוגמא

מהנתונים ניתן להבין כי הצרכן עובד בעומס קבוע של:

$$S_{max} = 30KVA \text{ במשך } T_{max} = 7000 h \text{ בשנה.}$$

נחשב את הזרם המקסימאלי:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 43.301A$$

נבטא את עלות הפסדי האנרגיה:

$$C_w = 3 * I_{max}^2 * \rho * \frac{l}{A} * \frac{T_{max}}{1000} * M = 3 * 43.301^2 * \frac{1}{57} * \frac{200}{A} * \frac{7000}{1000} * 0.3 = \frac{41447}{A}$$

נבטא את עלות הריבית והפחת השנתית:

$$C_k = \frac{K\%}{100} * x * A * l = \frac{13.5}{100} * 0.93 * A * 200 = 25.11 * A$$

נרשום את המשוואה ונחלץ את שטח החתך:

$$C_w = C_k$$

$$\frac{41447}{A} = 25.11 * A \Rightarrow A = \sqrt{\frac{41447}{25.11}} = 40.628mm^2$$

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול צפיפות זרם

בשיקול זה קימות 2 אפשרויות:
 א. שיקול צפיפות זרם כלכלית.
 ב. שיקול צפיפות זרם אחידה.

שיקול צפיפות זרם כלכלית

שיקול של צפיפות זרם מאפשר לבחור שטח חתך של מוליכי הרשת אשר יבטיח יחס יעיל ביותר בין כמות החומר במוליך לבין הוצאות הפסדי ההספק בקו. צפיפות הזרם היא היחס בין הזרם לשטח החתך

$$j = \frac{I}{A} \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

כאשר:

I - זרם בקו [A].

A - שטח חתך הקו [mm^2].

j_{ec} - תעריף האנרגיה החשמלית [$\frac{A}{mm^2}$].

הערך של צפיפות זרם הכלכלית תלוי בזמן השימוש בהספק המרבי T_{max} ובסוג הרשת והוא נתון הטבלה הבאה:

זמן שימוש בהספק מרבי	צפיפות זרם כלכלית A/mm^2			
	רשת תת-קרקעית		רשת עלית	
	Cu	Al	Cu	Al/Fe
1000-3000	2.65	1.65	2.5	1.5
3000-5000	2.25	1.5	1.75	1
5000-8760	2	1.3	1.25	0.75

לאחר קביעת צפיפות זרם כלכלית, ניתן לחשב את מתח הרשת הנקוב המומלץ מבחינה כלכלית, כאשר ידוע הפסדי ההספק באחוזים.

$$Un_{ec} = \frac{\sqrt{3} * j_{ec} * \rho * l}{\Delta P\% * \cos \varphi} * 100 [kV]$$

כאשר:

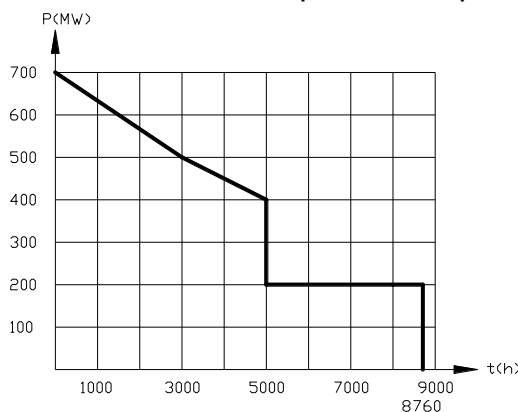
Un_{ec} - המתח הנקוב המומלץ [kV].

l - אורך הקו [km].

$\Delta P\%$ - הפסדי ההספק המרביים בקו [%].

תרגיל דוגמא

באיור הבא נתונה דיאגרמת העמסה של מערכת הספק תלת מופעית, המוזנת מקו עילי העשוי Al/Fe בעל התנגדות סגולית של $\frac{1}{35} \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]$ שאורכו 100km. הצרכן הוא בעל מקדם הספק של 0.92. הפסדי ההספק המרביים בקו הם 5%.



- א. חשב את כמות האנרגיה שמועברת בקו.
- ב. חשב את זמן השימוש בהספק מרבי.
- ג. חשב את מתח הקו המומלץ בהתבסס על שיקולים כלכליים.

פתרון לתרגיל דוגמא

נחשב את כמות האנרגיה לפי-

$$W = \sum P * t$$

עבור ההספק הנצרך המתואר בדיאגרמה נחשב את כמות האנרגיה לפי-

$$W_Y = \frac{700 + 500}{2} * 3000 + \frac{500 + 400}{2} * 2000 + 200 * 3760 = 3.45 * 10^6 MWh$$

נחשב את הזמן השימוש בהספק המרבי לפי-

$$T_{max} = \frac{W_Y}{P_{max}} = \frac{3.45 * 10^6}{700} = 4929h$$

לפי הטבלה ניתן לקבוע שצפיפות הזרם הכלכלית היא-

$$j_{ec} = 1 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

נחשב את המתח המומלץ לפי-

$$Un_{ec} = \frac{\sqrt{3} * j_{ec} * \rho * l}{\Delta P\% * \cos \varphi} * 100 = \frac{\sqrt{3} * 1 * 100}{5 * 0.92 * 35} * 100 = 107.581 [kV]$$

צפיפות זרם אחידה

אם רשת מורכבת מקטעים בעלי העמסה שונה, ניתן לחשב את חתכי הקטעים אשר מבטיחים צפיפות זרם אחידה בכל אורך הרשת, כאשר מפל המתח הכללי הרשת אינו עובר את המקסימום המותר. לפי עיקרון זה היחס בין הזרם המדומה הזורם בקטע רשת, לבין שטח החתך של הקטע, הינו מספר קבוע לכל קטעי הרשת:

$$j = \frac{I_{l1}}{A_{l1}} = \frac{I_{l2}}{A_{l2}} = \dots = \frac{I_{ln}}{A_{ln}}$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

שלב: חישוב

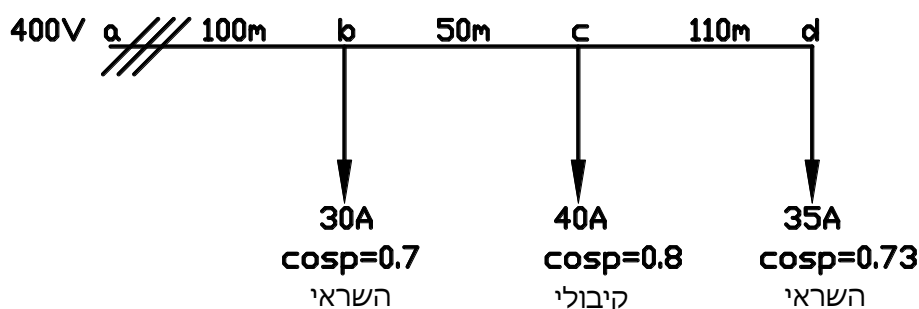
- א. הצגת זרמי הקטעים הרשת בצורה קרטזית ובצורה פולארית.
- ב. חישוב מפל המתח הראקטיבי $U_r\%$.
- ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $U_a\%$.
- ד. חישוב צפיפות זרם אחידה j .
- ה. חישוב שטחי חתך של הרשת.

נוסחאות

שטח חתך של כל קטע (mm^2)	צפיפות זרם אחידה	סוג הרשת	הצגת הרשת
$A_{l1} = \frac{I_{l1}}{j}$	$j = \frac{\Delta U_a\% * Un}{200 * \rho * \sum_{i=1}^n li * \cos\varphi_{li}}$	חד-מופעית	זרמי קטעים
	$j = \frac{\Delta U_a\% * Un}{\sqrt{3} * 100\rho * \sum_{i=1}^n li * \cos\varphi_{li}}$	תלת-מופעית	

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת עילית תלת פאזית עשויה ממוליכי נחושת הבהא:



נתון:

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

$$X_0 = 0.4 \left[\frac{\Omega}{km} \right]$$

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

- א. חשב את שטח החתך הבלתי אחיד של קטעי הרשת לפי קריטריון צפיפות זרם אחידה.
- ב. בחר שטחי חתך מסחריים של כל קטעי הרשת וחשב את המתח בנקודה d.

א. הצגת זרמי הקטעים בצורה פולארית וקרטזית:

$$I_{cd} = I_d = (35\angle - 43.11^\circ) = (25.551 - j23.919)A$$

$$I_{bc} = I_{cd} + I_c = (35\angle - 43.11^\circ) + (40\angle 36.87^\circ) =$$

$$I_{bc} = (57.552\angle 0^\circ) = (57.552 + j0)A$$

$$I_{ab} = I_{bc} + I_b = (57.552\angle 0^\circ) + (30\angle - 45.57^\circ) =$$

$$I_{ab} = (81.422\angle - 15.25^\circ) = (78.553 - j21.423)A$$

חישוב מפל המתח הראקטיבי:

$$\Delta U_r\% = \frac{\sqrt{3} * X_o}{10 * U_n} \bar{I}_r * l = \frac{\sqrt{3} * 0.4}{10 * 400} * (23.919 * 110 + 21.423 * 100) = 0.827\%$$

חישוב מפל המתח האקטיבי:

$$\Delta U_a\% = \Delta U_{max}\% - \Delta U_r\% = 5 - 0.827 = 4.17\%$$

חישוב צפיפות הזרם האחידה:

$$j = \frac{\Delta U_a\% * U_n}{\sqrt{3} * 100 \rho * \sum_{i=1}^n l_i * \cos \varphi_{li}} =$$

$$j = \frac{4.17 * 400}{\sqrt{3} * 100 * \frac{1}{57} * (110 * 0.73 + 50 * 1 + 100 * 0.96)} = 2.43 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

חישוב שטחי החתך של הקטעים השונים:

$$A_{cd} = \frac{I_{cd}}{j} = \frac{35}{2.43} = 14.40 mm^2$$

$$A_{bc} = \frac{I_{bc}}{j} = \frac{57.552}{2.43} = 23.68 mm^2$$

$$A_{ab} = \frac{I_{ab}}{j} = \frac{81.552}{2.43} = 33.50 mm^2$$

ב. בחירת שטחי חתך מסחריים:

$$A_{cd} = 16 mm^2$$

$$A_{bc} = 25 mm^2$$

$$A_{ab} = 35 mm^2$$

חישוב המתח בנקודה d:

$$\Delta U_{a_{ad}} = \sqrt{3} * \rho * \sum \frac{I_{a_{ad}} * l_{ad}}{A_{ad}} =$$

$$\Delta U_{a_{ad}} = \frac{\sqrt{3}}{57} * \left(\frac{25.551 * 110}{16} + \frac{57.552 * 50}{25} + \frac{78.553 * 100}{35} \right) = 15.655V$$

$$\Delta U_{r_{ad}} = \frac{\Delta U_r\%}{100} * U_n = \frac{0.827}{100} * 400 = 3.308V$$

$$\Delta U_{ad} = \Delta U_{a_{ad}} + \Delta U_{r_{ad}} = 15.655 + 3.308 = 18.963V$$

$$U_d = U_n - \Delta U_{ad} = 400 - 18.963 = 381.037V$$

פרק 3-זרמי קצר

קצר הוא תופעת מעבר, שכתוצאה ממנה עולה ערך הזרם בהרבה מעל הזרם המחושב למערכת. זרם קצר מופיע כתוצאה ממגע בין מוליכי המופעים או כתוצאה ממגע בין מוליך המופע לאדמה דרך עכבה קטנה מאוד.

במערכת תלת מופעית מבחינים ב-4 סוגים של קצר:

א. קצר תלת מופעי- מגע בין מוליכי שלשת המופעים.

ב. קצר דו מופעי לאדמה- מגע בין מוליכי 2 מופעים לאדמה.

ג. קצר דו מופעי- מגע בין מוליכי 2 מופעים.

ד. קצר חד מופעי – מגע בין מוליך מופע אחד לאדמה.

נגדיר את המונח "זרם הלם" כזרם קצר מרבי הוא מופיע בחצי מחזור של זרם הקצר ז"א כאשר זרם הקצר הוא בערך המקסימאלי שלו.

מטרת חישוב זרם הקצר:

א. זרם קצר תלת מופעי- משמש לקביעת כושר הניתוק של המאבטח המגן על מוליכים.

ב. זרם הלם- משמש לקביעת עמידות דינמית של הציוד החשמלית.

ג. זרם קצר חד מופעי- משמש לקביעת זמן הניתוק של מאבטח המגן על מוליכי המעגל מבחינת עמידותם התרמית בעת קצר.

חישובי זרם קצר תלת מופעי וזרם הלם:

ברגע ההתחלתי של הופעת הקצר קיימים 2 רכיבים של זרם הקצר:

א. רכיב מחזורי (סינוסוידלי)- ik – רכיב זה קיים כל הזמן מרגע התחלת הקצר ועד לניתוקו-

$$i_k = I_k * \sqrt{2} * \sin(\omega t + a - \varphi_k)$$

ב. רכיב זרם ישר (אקספוננציאלי)- ia – והוא הזרם שמקורו בתהליך מעבר ברשת. גודלו מרבי הרגע הראשון של הופעת הקצר והוא הולך ודועך במשך 2-3 מחזורים-

$$i_a = -\sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k) * e^{-\frac{t}{\tau}}$$

הערך הרגעי של זרם הקצר מוגדר-

$$i = i_k + i_a$$

כאשר:

I_k - זרם קצר תלת מופעי (A).

$$I_k = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_k}$$

Z_k - עכבת הקצר (Ω).

$$Z_k = R_k + jX_k$$

a - זווית המתח ברגע הופעת הקצר (rad). היא חיובית כאשר הערך הרגעי של המתח בעת הופעת הקצר הנו חיובי.

φ_k - זווית המופע של עכבת הקצר (rad). היא תמיד חיובית מאחר ואופי עכבת הקצר תמיד השראי.

$$\varphi_k = \varphi_U - \varphi_{Ik}$$

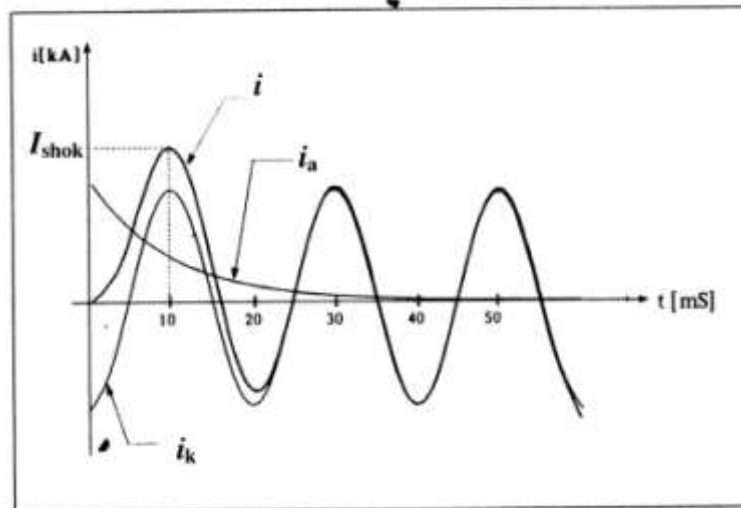
τ - קבוע הזמן של מעגל הקצר (s).

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X_k}{\omega R_k}$$

ω - תדירות מעגלית של מתח הרשת (rad/s).

$$\omega = 2\pi f$$

1.1- מקדם סטיית מתח הרשת המותרת של 10% מעל למתח הנקוב.



מכיוון הערך הרגעי של זרם הקצר הוא סכום הרכיבים ניתן לרשום:

$$i = \sqrt{2} * I_k \left[\sin(\omega t + a - \varphi_k) - \sin(a - \varphi_k) e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

חישוב זרם הקצר כאשר זמן התחלת הקצר- $t = 0$:

נציב במשוואה את הערך הזמן $t=0$ ונחשב את רכיבי זרם הקצר:

$$i_{k0} = \sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k)$$

$$i_{a0} = -\sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k)$$

נחבר את הרכיבים ונחשב את הערך הרגעי של זרם הקצר:

$$i_0 = \sqrt{2} * I_k \left[\sin(\omega * 0 + a - \varphi_k) - \sin(a - \varphi_k) e^{-\frac{0}{\tau}} \right] =$$

$$i_0 = \sqrt{2} * I_k [\sin(a - \varphi_k) - \sin(a - \varphi_k)] = 0A$$

ניתן לראות שבזמן התחלת הקצר זרם הקצר הרגעי שווה ל-0.

אם הקצר מתרחש כאשר המתח בפאזה עובר דרך נקודת האפס, בנקודה זו זווית המתח

תהיה- $a = 0$, נציב בנוסחה ולכן:

$$i_0 = \sqrt{2} * I_k [\sin(0 - \varphi_k) - \sin(0 - \varphi_k)] =$$

$$i_0 = \sqrt{2} * I_k [\sin \varphi_k - \sin \varphi_k] = 0A$$

ומכאן:

$$i_{k0} = \sqrt{2} * I_k * \sin \varphi_k \quad , \quad i_{a0} = -\sqrt{2} * I_k * \sin \varphi_k$$

חישוב זרם הקצר כאשר זמן התחלת הקצר- $t > 0$ ובהנחה ש- $a = 0$

$$i_a = \sqrt{2} * I_k * \sin \varphi_k * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad , \quad i_k = \sqrt{2} * I_k * \sin(\omega t - \varphi_k)$$

$$i = i_k + i_a = \sqrt{2} * I_k \left[\sin(\omega t - \varphi_k) + \sin \varphi_k * e^{-\frac{t}{\tau}} \right]$$

חישוב זרם ההלם I_{shok} כאשר $t = 10ms$ ובהנחה ש- $a = 0$

כעבור $10ms$ מרגע התחלת הקצר מגיע זרם הקצר לערכו המרבי, זרם קצר זה מוגדר כזרם

ההלם שניתן לחשב אותו לפי:

$$I_{shok} = \sqrt{2} * I_k \left[\sin(\omega * 0.01 - \varphi_k) + \sin \varphi_k * e^{-\frac{0.01}{\tau}} \right]$$

הביטוי בסוגרים נקרא מקדם ההלם והוא תלוי ביחס בין ההתנגדות לבין ההיגב האשראי של

מעגל הקצר:

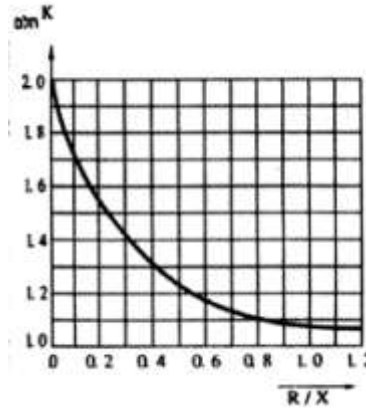
קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

$$k_{shok} = \left[\sin(\omega * 0.01 - \varphi_k) + \sin \varphi_k * e^{-\frac{0.01}{\tau}} \right]$$

ערכי מקדמי ההלם מובאים בטבלה:

0	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	$\frac{R_k}{X_k}$
2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.08	1.06	1.04	k_{shok}

ניתן לראות את מקדם ההלם גם בגרף הבא:



את זרם ההלם מחשבים לפי:

$$I_{shok} = \sqrt{2} * I_k * k_{shok}$$

חישוב זרם ההלם דרוש לקביעת כושר עמידות דינמית של ציוד חשמלי (כמו: מפסקים, מנתקים, פסי צבירה וכו')

חישוב זרם קצר תלת מופעי

זרם קצר תלת מופעי תמידי I_k הנו הערך האפקטיבי של הרכיב המחזורי של זרם הקצר. זהו זרם שקיים במעגל לאחר פרק זמן של 0.02-0.05 שניות, כאשר רכיב הזרם הישר התרסן, ועד להפסקתו ע"י המאבטח.

מסיבה זו חישוב זרם הקצר התלת מופעי התמידי דרוש לקביעת כושר הניתוק של המאבטח.

כאמור זרם קצר תלת מופעי מחשבים לפי:

$$I_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k}$$

פרמטר נוסף שמאפיין מאבטח הוא הספק הקצר המופסק על ידו, הספק הקצר מחשבים לפי:

$$S_k = \sqrt{3} * I_k * Un$$

חישוב עכבת הקצר Z_k

עכבת הקצר הנה עכבת המסלול הקצר ממקור המתח (שנאי, גנראטור) ועד למקום הקצר. לקביעת כושר הניתוק של המאבטח מחשבים את זרם הקצר בלוח החשמל בו הוא מותקן.

כל מרכיב הרשת מוצג על ידי רכיבים טוריים של מעגל תמורה, כאשר עכבת הקצר הנה

$$Z_k = \sum Z \text{ - חיבור טורי של עכבות הרכיבים -}$$

א. שנאי מוצג על ידי העכבה-

$$Z_{TR} = R_{TR} + jX_{TR}$$

$$R_{TR} = \frac{\Delta P_{cu} * Un^2}{Sn^2}$$

$$R_{TR} = \frac{U_r \% * Un^2}{100Sn}$$

$$X_{TR} = \frac{U_x \% * Un^2}{100Sn}$$

$$Z_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100Sn}$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2}$$

כאשר:

ΔP_{cu} - הפסדי נחושת נקובים (W).

Sn - הספק נקוב של השנאי (VA).

$U_k \%$ - מתח הקצר (%).

$U_r \%$ - הרכיב האקטיבי של מתח הקצר (%).

$U_x \%$ - הרכיב הראקטיבי של מתח הקצר (%).

Un - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

במידה ואין אפשרות לחשב את ההתנגדות R_{TR} , ניתן להזניח כאשר הספק השנאי הוא 630KVA או יותר. ובמקרה זה מניחים $U_x \% = U_k \%$ או $Z_{TR} = jX_{TR}$.

ב. קו מוצג ע"י העכבה- $Z_L = R_L + jX_L$

$$R_L = \rho \frac{l}{A}$$

כאשר:

ρ - התנגדות הסגולית של מוליכי הקו $\left(\frac{\Omega mm^2}{m}\right)$.

l - אורך הקו (m).

A - שטח החתך של מוליכי הקו (mm^2) .

$$R_L = r_0 * l$$

$$X_L = x_0 * l$$

כאשר:

r_0 - התנגדות של 1km של מוליך הקו $\left(\frac{\Omega}{km}\right)$.

x_0 - היגב של 1km של מוליך הקו $\left(\frac{\Omega}{km}\right)$.

l - אורך הקו (km).

אם קו נמצא במתח נקוב אחר מהמתח הנקוב בנקודת הקצר, יש לייחס את עכבת הקו למתח בנקודת הקצר.

$$Z_k' = Z_k \left(\frac{Un'}{Un}\right)^2$$

כאשר:

Un - המתח הנקוב של הקו (V).

Un' - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

$-Z_k$ - עכבת הקו (Ω).

$-Z_k'$ - עכבת הקו המשוקפת למתח בנקודת הקצר (Ω).

ג. מערכת אספקה במתח גבוה מוצגת ע"י ההיגב- JX_s

$$X_s = \frac{Un^2}{S_k}$$

כאשר:

$-S_k$ - הספק הקצר של המערכת (VA).

$-Un$ - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

הספק הקצר המוכרז של מתח גבוה של חב' חשמל הוא $400MVA$ במתח $12.6KV$ ו- $500MVA$ במתחים $22KV$ ו- $33KV$.

אם ידוע שהמערכת היא בעלת הספק אין סופי ביחס להספק השנאי המוזן ממנה, אזי היא לא משפיעה על גודל זרם הקצר וניתן להניח כי $X_0=0$.

שלבי חישוב של זרם תלת מופעי:

א. הצגת הרשת ע"י מעגל תמורה עם סימון נקודת הקצר.

ב. חישוב העכבות של כל רכיבי המעגל.

ג. חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודת הקצר הראשונה.

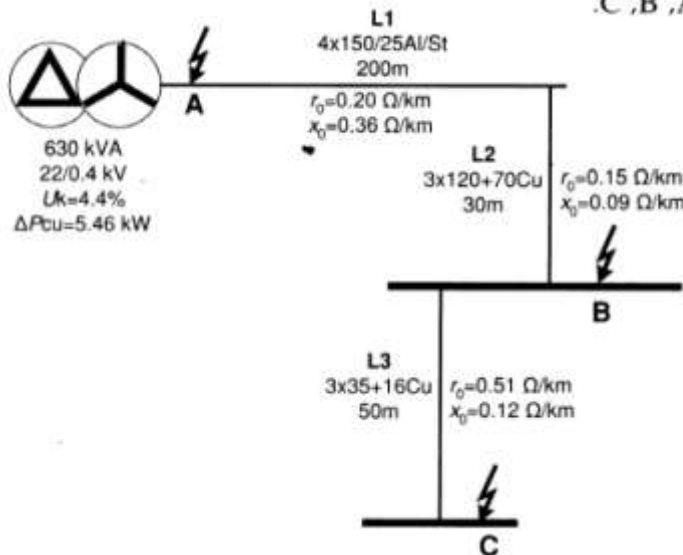
ד. חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודה השנייה וכך הלאה.

תרגיל דוגמא 1

נתון תרשים של מתקן חשמלי במתח נמוך

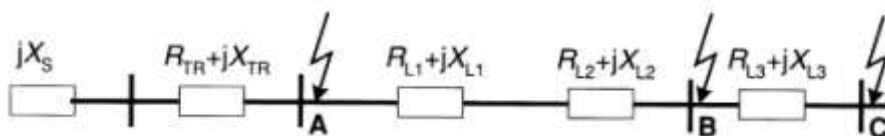
הלוח הראשי של המתקן מוזן מרשת עלית $L1$ של חב' חשמל על ידי כבל $L2$. לוח משנה "א" מוזן מהלוח הראשי על ידי כבל $L3$.

חשב את זרמי הקצר בנקודות A, B, C.



פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נציג את הרשת על ידי מעגל תמורה:



ב. נחשב את עכבות רכיבי הרשת:

כל נקודות הקצר הן במתח 400V ולכן זהו המתח הנקוב במערכת.

1. חישוב היגב מערכת Xs מצד המתח הגבוה-

הספק הקצר המוכרז במתח 22kV הוא 500MVA ולכן:

$$X_s = \frac{Un^2}{S_k} = \frac{400^2}{500 * 10^6} = 0.32m\Omega$$

$$R_s = 0 \text{ (מוזנח)}$$

$$Z_s = (0 + j0.32)m\Omega$$

2. חישוב עכבת השנאי $-Z_{TR}$

$$R_{TR} = \frac{\Delta P_{cu} * Un^2}{Sn^2} = \frac{5460 * 400^2}{(630 * 10^3)^2} = 2.2m\Omega$$

$$Z_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100Sn} = \frac{4.4 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 11.17m\Omega$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = \sqrt{11.17^2 - 2.2^2} = 10.95m\Omega$$

$$Z_{TR} = (2.2 + j10.95)m\Omega$$

3. חישוב עכבת הקו $-Z_{L1}$

$$X_{L1} = x_0 * l_1 = \frac{0.36}{1000} * 200 = 72m\Omega$$

$$R_{L1} = r_0 * l_1 = \frac{0.2}{1000} * 200 = 40m\Omega$$

$$Z_{L1} = (40 + j72)m\Omega$$

4. חישוב עכבת הקו $-Z_{L2}$

$$X_{L2} = x_0 * l_2 = \frac{0.09}{1000} * 30 = 2.7m\Omega$$

$$R_{L2} = r_0 * l_2 = \frac{0.15}{1000} * 30 = 4.5m\Omega$$

$$Z_{L1} = (4.5 + j2.7)m\Omega$$

5. חישוב עכבת הקו $-Z_{L3}$

$$X_{L3} = x_0 * l_3 = \frac{0.12}{1000} * 50 = 6m\Omega$$

$$R_{L3} = r_0 * l_3 = \frac{0.51}{1000} * 50 = 25.5m\Omega$$

$$Z_{L3} = (25.5 + j6)m\Omega$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

ג. נחשב את עכבת הקצר ואת זרם הקצר בנקודה A-

$$Z_{kA} = Z_s + Z_{TR} = j0.32 + 2.2 + j10.95 = 2.2 + j11.27 = 11.48m\Omega$$

$$I_{kA} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_{kA}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 11.48 * 10^{-3}} = 22.128kA$$

ד. נחשב את עכבת הקצר ואת זרם הקצר בנקודה B-

$$Z_{kB} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} = 2.2 + j11.27 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 =$$

$$Z_{kB} = 46.7 + j85.97 = 97.84m\Omega$$

$$I_{kB} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 97.84 * 10^{-3}} = 2.596kA$$

ה. נחשב את עכבת הקצר ואת זרם הקצר בנקודה C-

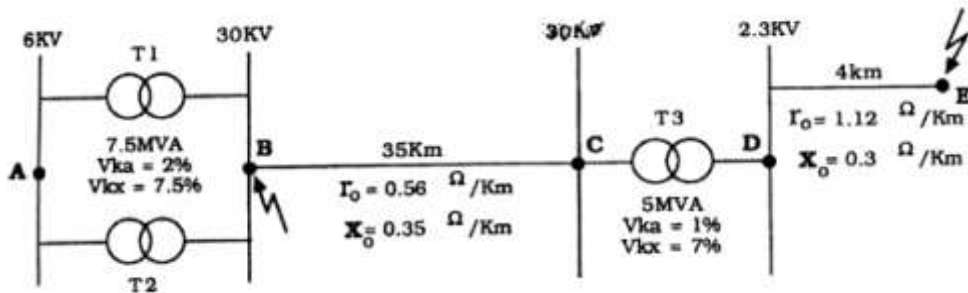
$$Z_{kC} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L2} = 2.2 + j11.27 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 + 25.5 + j6 =$$

$$Z_{kC} = 72 + j91.97 = 116.8m\Omega$$

$$I_{kC} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_{kC}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 116.8 * 10^{-3}} = 2.175kA$$

תרגיל דוגמא 2

נתונה מערכת של רשת תלת פאזית, השנאים T1 ו-T2 מקבילים זה לזה וזהים כמתואר באיור הבא:



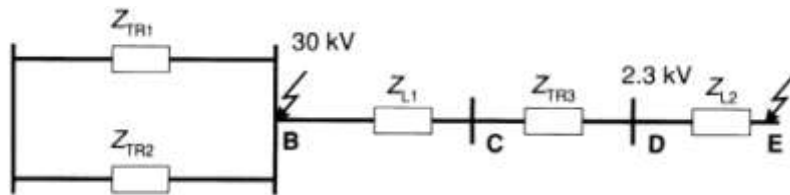
א. חשב את זרמי הקצר התלת פאזיים בנקודות B ו-E.

ב. חשב את גודל הסליל שיש לחבר בטור לשנאי T3 בצד המתח הנמוך על מנת להקטין

את זרם הקצר בנקודה E ל-200A בלבד.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. נציג את מעגל התמורה של הרשת:



$$R_{TR1} = R_{TR2} = \frac{U_r \% * Un^2}{100Sn} = \frac{2 * (30 * 10^3)^2}{100 * 7.5 * 10^6} = 2.4\Omega$$

$$X_{TR1} = X_{TR2} = \frac{U_x \% * Un^2}{100Sn} = \frac{7.5 * (30 * 10^3)^2}{100 * 7.5 * 10^6} = 9\Omega$$

$$Z_{TR1} = Z_{TR2} = R_{TR2} + jX_{TR2} = (2.4 + j9)\Omega$$

$$Z_{kB} = Z_{TR1} \parallel Z_{TR2} = \frac{Z_{TR1}}{2} = \frac{Z_{TR2}}{2} = \frac{2.4 + j9}{2} = 1.2 + j4.5 = 4.657\Omega$$

$$I_{kB} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{1.1 * 30 * 10^3}{\sqrt{3} * 4.657} = 4.091kA$$

$$R_{L1} = r_0 * l_1 = \frac{0.56}{1000} * 35 * 10^3 = 19.6\Omega$$

$$X_{L1} = X_0 * l_1 = \frac{0.35}{1000} * 35 * 10^3 = 12.25\Omega$$

$$Z_{L1} = (19.6 + j12.25)\Omega$$

$$Z_{kc} = Z_{kB} + Z_{L1} = 1.2 + j4.5 + 19.6 + j12.25 = (20.8 + j16.75)\Omega$$

שיקוף העכבה Z_{kc} ממתח $30kV$ למתח $2.3kV$

$$Z'_{kc} = Z_{kc} * \left(\frac{U'n}{Un}\right)^2 = (20.8 + j16.75) * \left(\frac{2.3 * 10^3}{30 * 10^3}\right)^2 = (0.122 + j0.098)\Omega$$

$$R_{TR3} = \frac{U_r \% * Un^2}{100Sn} = \frac{1 * (2.3 * 10^3)^2}{100 * 5 * 10^6} = 0.0106\Omega$$

$$X_{TR3} = \frac{U_x \% * Un^2}{100Sn} = \frac{7 * (2.3 * 10^3)^2}{100 * 5 * 10^6} = 0.0741\Omega$$

$$Z_{TR3} = R_{TR3} + jX_{TR3} = (0.0106 + j0.0741)\Omega$$

$$R_{L2} = r_0 * l_1 = \frac{1.12}{1000} * 4 * 10^3 = 4.48\Omega$$

$$X_{L2} = X_0 * l_1 = \frac{0.3}{1000} * 4 * 10^3 = 1.2\Omega$$

$$Z_{L2} = (4.48 + j1.2)\Omega$$

$$Z_{kE} = Z'_{kc} + Z_{TR3} + Z_{L2} =$$

$$Z_{kE} = 0.122 + j0.098 + 0.0106 + j0.0741 + 4.48 + j1.2 = 4.613 + j1.372 = 4.813\Omega$$

$$I_{kE} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_{kE}} = \frac{1.1 * 2.3 * 10^3}{\sqrt{3} * 4.813} = 303.49A$$

ב. כדי לקבל בנקודה E זרם קצר של 200A עכבת הקצר בנקודה E צריכה להיות:

$$Z'_{kE} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * I_{kE}} = \frac{1.1 * 2.3 * 10^3}{\sqrt{3} * 200} = 7.303\Omega$$

$$Z'_{kE} = R_{kE} + j(X_{kE} + X_L)$$

$$7.303 = 4.613 + j(1.372 + X_L)$$

$$7.303 = \sqrt{4.613^2 + (1.372 + X_L)^2}$$

$$7.303^2 = 4.613^2 + (1.372 + X_L)^2$$

$$(1.372 + X_L)^2 = 7.303^2 - 4.613^2$$

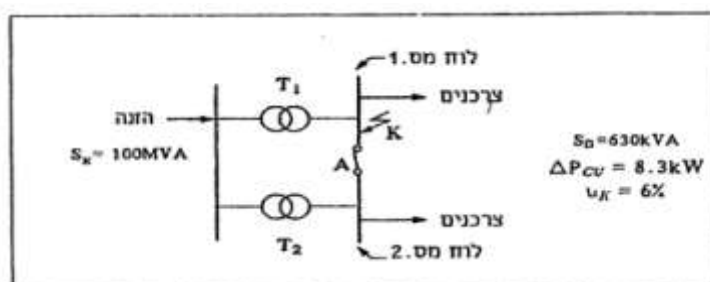
$$1.372 + X_L = \sqrt{7.303^2 - 4.613^2} = 5.662$$

$$X_L = 5.662 - 1.372$$

$$X_L = 4.29\Omega$$

תרגיל דוגמא 3

המתח בלוחות 1 ו-2 הוא 400V ומוזנים באמצעות 2 שנאים זהים בתאם למתואר באיור הבא:



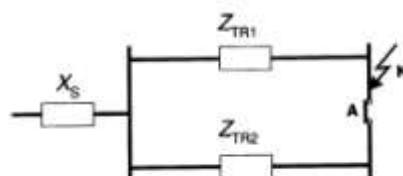
טבלה מס. 1

0	0.1	0.16	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	R/X
2	1.75	1.6	1.4	1.32	1.24	1.18	1.14	1.1	1.08	1.06	1.04	Канок

- המנתק A המקשר בין 2 הלוחות הראשיים הוא במצב "סגור".
 מתרחש קצר תלת מופעי בלוח מס' 1 (בנקודה K).
 א. חשב את הרכיב המחזורי של זרם הקצר (ערך אפקטיבי). בנקודת התקלה.
 ב. חשב את זרם ההלם המתקיים בפתחת המנתק מגשר A בעת התקלה.
 בטבלה מס' 1 ערכים של מקדם ההלם כתלות בפרמטרים של הרשת.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

א. נציג את מעגל התמורה של הרשת-



$$Z_s = X_s = \frac{Un^2}{S_k} = \frac{400^2}{100 * 10^6} = 1.6m\Omega$$

$$R_{TR1} = R_{TR2} = \frac{\Delta P_{Cu} * Un^2}{Sn^2} = \frac{8.3 * 10^3 * 400^2}{(630 * 10^3)^2} = 3.346m\Omega$$

$$Z_{TR1} = Z_{TR2} = \frac{U_k \% * Un^2}{100S_n} = \frac{6 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 15.238m\Omega$$

$$X_{TR1} = X_{TR2} = \sqrt{Z_{TR2}^2 - R_{TR2}^2} = \sqrt{15.238^2 - 3.346^2} = 14.866m\Omega$$

$$Z_{TR1} = Z_{TR2} = R_{TR2} + jX_{TR2} = (3.346 + j14.866)m\Omega$$

$$Z_k = X_s + Z_{TR1} \parallel Z_{TR2} = X_s + \frac{Z_{TR1}}{2} = X_s + \frac{Z_{TR2}}{2} =$$

$$Z_k = j1.6 + \frac{3.346 + j14.866}{2} = j1.6 + 1.673 + j7.433 = 1.673 + j9.033 = 9.187m\Omega$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

$$I_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 9.187 * 10^{-3}} = 27.652kA$$

ב. זרם הקצר שחושב בסעיף א שווה למחצית הזרם הקצר שיעבור דרך המנתק A כיוון שהמנתק מותקן בין 2 עכבות שוות ביחס לנקודת הקצר ולכן:
נחשב את היחס R_k/X_k ונמצא את מקדם ההלם-

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{1.673}{9.033} = 0.185$$

לפי טבלת מקדם ההלם המצורפת נמצא-

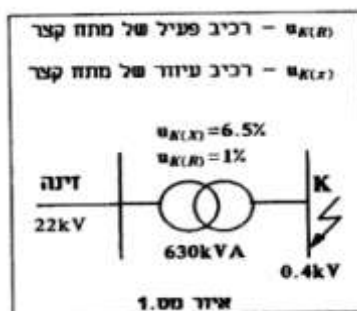
$$k_{shok} \approx 1.5$$

ולכן:

$$I_{shok} = \sqrt{2} * k_{shok} * \frac{I_k}{2} = \sqrt{2} * 1.5 * \frac{27.652 * 10^3}{2} = 29.329kA$$

תרגיל דוגמא 4

בפסי הצבירה 0.4kV של תחנת השנאה 22kV/0.4kV מתרחש קצר תלת מופעי. העומס המועבר לעומס לפני ההפרעה דרך השנאי הוא בעל מקדם הספק של $\cos\phi=1$. התקלה מתרחשת כאשר המתח במופע R עובר בנקודת ה-0. זרם ההלם במופע זה הוא בעל ערך של 31.02kA. עכבת הקצר של רשת הזינה זניחה.



0	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.2	$\frac{R_k}{X_k}$
2	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.08	1.06	1.04	k_{shok}

- א. חשב את הערך האפקטיבי של זרם הקצר התמידי.
- ב. מהו ערכו של רכיב הזרם הישר (במופע R) ברגע התרחשות הקצר
- ג. חשב את ערכו הרגעי של הזרם (במופע R) בנקודת הקצר כעבור 80ms מרגע התרחשות התקלה. תדירות הרשת היא 50Hz.

פתרון לתרגיל דוגמא 4

א.

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{U_{r\%}}{U_{x\%}} = \frac{1}{6.5} = 0.154$$

$$k_{shok} \approx 1.6$$

$$I_k = \frac{I_{shok}}{\sqrt{2} * k_{shok}} = \frac{31.02 * 10^3}{\sqrt{2} * 1.6} = 13.709kA$$

- ב. על פי נתוני התרגיל זווית המתח היא $\alpha = 0^\circ$
- נחשב את זווית המופע של עכבת הקצר-

$$\tan\varphi = \frac{X_k}{R_k} = \frac{U_{x\%}}{U_{r\%}} = \frac{6.5}{1} = 6.5$$

$$\varphi = \tan^{-1} 6.5 = 81.25^\circ$$

נחשב את רכיב הזרם הישר ברגע התרחשות הקצר (t=0)-

$$i_{a0} = \sqrt{2} * I_k * \sin\varphi_k = \sqrt{2} * 13.709 * 10^3 * \sin 81.25 = 19.162kA$$

ג. כעבור 80ms מרגע התרחשות התקלה, הרכיב הישר כבר לא קיים ולזרם הקצר ישנו

רק רכיב אחד והוא הרכיב המחזורי ואותו נחשב-

$$i_k = \sqrt{2} * I_k * \sin(\omega t - \varphi_k)$$

מכיוון שהיחידות של התדירות המעגלית ω הן rad/s ולכן יש גם להעביר את הזווית φ_k ליחידות rad וזאת לפי הביטוי-

$$\varphi(rad) = \varphi(deg) * \frac{2\pi}{360} = 81.25 * \frac{2\pi}{360} = 1.418 (rad)$$

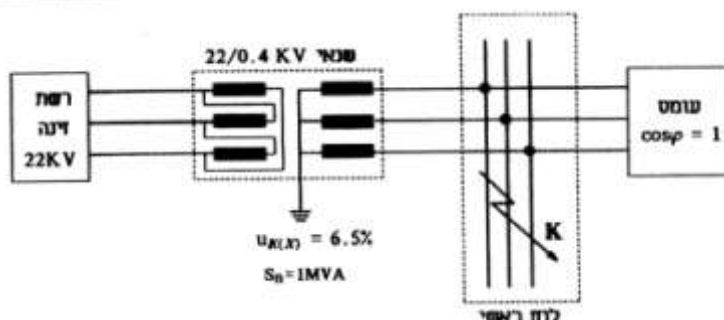
$$i_k = \sqrt{2} * I_k * \sin(\omega t - \varphi_k) =$$

$$i_k = \sqrt{2} * 13.709 * 10^3 * \sin(2\pi * 50 * 80 * 10^{-3} - 1.418) = -19.162kA$$

תרגיל דוגמא 5

שנאי רשת בעל הספק נקוב של 1000KVA מזין לוח ראשי 400V כמתואר באיור. מקדם ההספק של העומס הוא $\cos\varphi=1$.

מתרחש קצר תלת מופעי בפסי הצבירה של הלוח. הקצר מתרחש ברגע שגל המתח במופע S (בצד המתח הנמוך) הוא בעל ערך רגעי מקסימאלי.



א. חשב את הערכים האפקטיביים של זרמי הקצר התמידי בנקודת הקצר ובמופעי קו הזינה 22kV.

ב. חשב את הספק הקצר המועבר דרך השנאי.

ג. באיזה מהמופעים רכיב "זרם ישר" בזרם הקצר הוא מזערי?

הערות:

1. ההתנגדות האומית של השנאי זניחה.

2. עכבת רשת הזינה זניחה יחסית לעכבת השנאי.

3. סדר הופעת המופעים היא - $R \Rightarrow S \Rightarrow T$.

פתרון לתרגיל דוגמא 5

א. חישוב זרם הקצר המתמיד בנקודת הקצר-

$$U_k \% = U_x \% = 6.5\%$$

$$Z_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100S_n} = \frac{6.5 * 400^2}{100 * 1 * 10^6} = 10.4m\Omega$$

$$I_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 10.4 * 10^{-3}} = 24.426kA$$

חישוב זרם הקצר המתמיד במופעי קו הזינה 22Kv-

$$Z'_{22kV} = Z_{400V} * \left(\frac{U'n}{Un}\right)^2 = 10.4 * 10^{-3} * \left(\frac{22 * 10^3}{400}\right)^2 = 31.46\Omega$$

$$I'_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 22 * 10^3}{\sqrt{3} * 31.46} = 444.116A$$

ב. חישוב הספק בקצר המועבר דרך השנאי-

$$S_k = \sqrt{3} * I_k * Un = \sqrt{3} * 24.426 * 10^3 * 400 = 16.923MVA$$

ג. כיוון שנתון שגל המתח במופע S הוא בערכו המקסימאלי ברגע התרחשות הקצר ניתן

להבין מכך ש- $\alpha=90^\circ$ ומכיוון שמזניחים את ההתנגדות האומית של השנאי ניתן לומר

שעכבת השנאי היא בעלת אופי השראי טהור ולכן $\varphi_k = 90^\circ$ ולכן-

$$i_{a0} = -\sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k) = -\sqrt{2} * I_k * \sin(90^\circ - 90^\circ) = 0A$$

מכאן ניתן להבין שזרם הקצר של רכיב "זרם הישר" המזערי יהיה במופע S.

פרק 4-העמסה והגנה על מוליכים

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 וכן להגן על המוליך בפני זרם קצר. קיים קשר ישיר בין הזרם הצפוי במוליך לבין גודל המאבטח וכן שטח החתך של המוליך. תמיד צריך להתקיים התנאים הבאים:

1.

$$I_b \leq I_n \leq I_z'$$

2.

$$I_2 \leq 1.45I_z'$$

3.

$$I_z' = I_z' * c$$

כאשר:

I_b - הזרם הצפוי במוליך.

I_n - הערך הנומינאלי של המאבטח.

I_z - הזרם המרבי שמותר להעביר במוליך.

I_z' - הזרם המרבי המותר להעביר במוליך המתוקן.

c - מקדם תיקון משוקלל.

I₂ - זרם הבדיקה הגבוה של המאבטח שהוא נתון יצרן:

$$I_2 = 1.75I_n \quad 10A < I_n \leq 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_2 = 1.6I_n \quad I_n > 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_2 = 1.45I_n \quad \text{עבור מא"זים}$$

$$I_2 = 1.3I_n \quad \text{עבור מאמ"תים הניתנים לכיוון}$$

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

$$10A < I_n \leq 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$1.75I_n \leq 1.45I_z'$$

$$\frac{1.75I_n}{1.45} \leq I_z'$$

$$1.2I_n \leq I_z'$$

$$I_n > 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$1.6I_n \leq 1.45I_z'$$

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

$$1.1I_n \leq I_z'$$

עבור מא"זים:

$$1.45I_n \leq 1.45I_z'$$

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

$$I_n \leq I_z'$$

עבור מאמ"תים :

$$1.3I_n \leq 1.45I_z'$$

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

$$0.9I_n \leq I_z'$$

ניתן לסכם את התנאים בצורה הבאה:

עבור נתיכים $10A < I_n \leq 25A$:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1.2I_n \leq I_z'$

עבור נתיכים $I_n > 25A$:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1.1I_n \leq I_z'$

עבור מא"זים:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1I_n \leq I_z'$

עבור מאמ"תים:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $0.9I_n \leq I_z'$

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 לציוד אלקטרוני (בעל זמן תגובה איטי יחסי).

דגם B – מיועד לציוד תאורה (3-5In).

דגם C – מיועד למנועים (5-10In).

דגם D – מיועד לציוד 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

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

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 השוק כתלת קוטבי או בעלי 4 קטבים עם כושר ניתוק בגדלים 25KA,35KA,50KA,100KA.

נתיכים

משמש לצורך הגנה התעשייה כאשר יש צורך בתגובה איטית לדוגמה 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

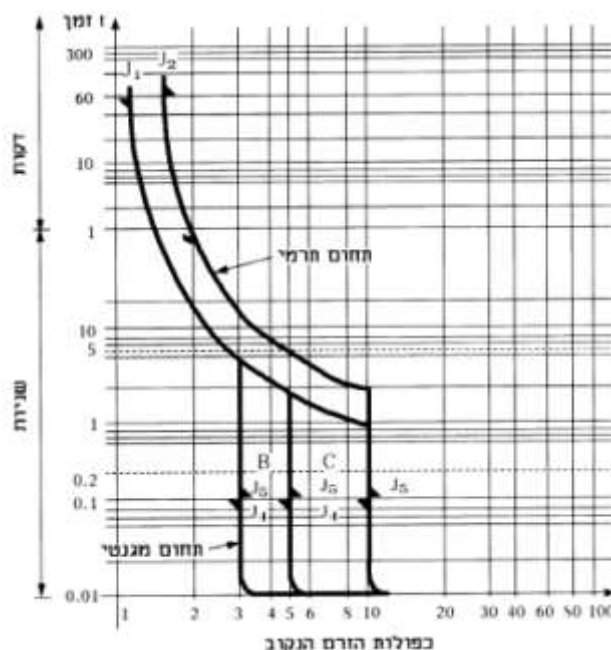
מכיוון שנתון ש- $I_b=22A$ נבחר הגנה מסוג מא"ז בעל זרם נקוב של $I_n=25A$ ונבדוק עם הוא

עומד בתנאים: תנאי ראשון- $I_b \leq I_n \leq I_z$

תנאי שני- $I_n \leq I_z$

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 מאז"ים 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" 1. 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" 2. 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- $5I_n$ ומא"ז מסוג C ינתק זרם קצר הגדול מ- $10I_n$ בפחות מ-0.1 שניות.

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני העמסת יתר

שלב: תכנון

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

מנועים	צרכנים רגילים	סוג המעגל
$I_b = \frac{\beta * P_n * (736)}{U_n * \eta * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{P}{U_n * \cos \varphi}$	חד מופעי
$I_b = \frac{\beta * P_n * (736)}{\sqrt{3} * U_n * \eta * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi}$	תלת מופעי

כאשר:

P - הספק (W).

U_n - מתח נקוב של המעגל (V).

β - מקדם העמסה של מנוע (כאשר המנוע עובד בעומס שונה מהספקו הנקוב).

736 - מקדם המרה (כאשר הספק המנוע נתון בכ"ס (HP)).

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 Iz.
 - על סמך בחירת סוג המאבטח וזרמו הנקוב בשלב ב' יש לחשב את הערך הנדרש של הזרם המתמיד Iz על פי התנאי השני.
 - 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. לכבלים 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 גידיים ללא רווח בניהם למעט מוליכי הארקה, בהתקנה חשופה לתנועת לאוויר.
4. התקנת עד כבל רב גידי אחד בהתקנה חשופה לאוויר במידה ותנאי הסביבה אינם רגילים יש צורך בשימוש במקדמי תיקון לקביעת הזרם המרבי המתמיד במוליך Iz.

מקדמי תיקון

1. כאשר טמפרטורת האוויר הסביבתית שונה מ- 35°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי Iz שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה שבתקנות החשמל.
2. כאשר טמפרטורת הקרקע הסביבתית שונה מ- 30°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי Iz שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה 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 Iz שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה שבתקנות החשמל.
4. כאשר מותקנים כבלים רב גידיים אחדים ללא רווח בניהם בהתקנה חשופה לתנועת האוויר בתנוחה אופקית או אנכית כדוגמא בהתקנה על סולמות, יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי Iz שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה שבתקנות החשמל.

תרגיל דוגמא 1

נתונים 6 מפוחים תלת פאזיים זהים בעלי הנתונים הבאים:

$$Un=400V ; Pn=800W ; \cos\phi=0.78 ; \eta=0.82$$

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 1

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

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

ב. נקבע את סוג וגודל המאבטח.

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

ג. נמצא בתוספת השניה- לפי שיטת ההתקנה כבלים נחושת בידוד $90^{\circ}C$ טבלה 90.1.

ד. נמצא בטבלה המתאימה חתך מוליך בעל זרם מתמיד מרבי גדול או שווה

ערך הנדרש- שטח חתך- $I_z=18A$; $1.5mm^2$.

נבצע תיקון ל- I_z בהתאם למקדמי התיקון-

$$I_z' = I_z * C1 * C2 = 18 * 0.68 * 0.9 = 11.016A$$

נבחן את המוליך הנבחר ב-2 התנאים:

$$I_b \leq I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.8 < 2 < 11 \Rightarrow o.k.$$

$$0.9I_n \leq I_z' \Rightarrow 0.9 * 2 < 11 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר כבל של $4X1.5 N2XY$ עבור כל מפוח המאובטח במאבטח מסוג "הגנת מנוע" בעל הגנה תרמית מכיילת ל-2A.

תרגיל דוגמא 2

מנוע תלת פאזי בעל הנתונים הבאים:

$$U_n=400V; P_n=100HP; \cos\varphi=0.75; \eta=0.78$$

מוזן ע"י כבל אלומיניום, בידוד $90^{\circ}C$ המותקן בצינור טמון באדמה. המנוע עמוס ב- 80% מהספקו הנקוב, תכנן את המעגל.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

$$I_b = \frac{\beta * P_n * (736)}{\sqrt{3} * U_n * \eta * \cos \varphi} = \frac{0.8 * 100 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.78 * 0.75} = 145.275A$$

נבחר בסוג המאבטח- מכיוון שהמאבטח מגן על מנוע נבחר במאבטח מסוג מאמ"ת מסוג הגנת מנוע (הניתן לכוונון) בעל זרם בסיסי $I_u = 160$ בעל כיוון ההגנה התרמית $I_r = 125 \div 160A$, נכוון את המאבטח ל-150A.

על פי שיטת ההתקנה שבתוספת השנייה נבחר בטבלה 90.8 וניתן לראות שעבור זרם מתמיד של 164A יש להשתמש בכבל בעל שטח חתך של $95mm^2$. נבדוק אם בחירה זו

עומדת ב-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$145.275 \leq 150 \leq 164 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מאמ"ת:

$$0.9I_n \leq I_z$$

$$0.9 * 150 \leq 164 \Rightarrow o.k.$$

תרגיל דוגמא 3

10 מפוחים תלת פאזיים בעלי הנתונים הבאים:

$$Un=400V ; Pn=800W ; \cos\varphi=0.78 ; \eta=0.82$$

מוזנים כל אחד בנפרד מלוח מפוחים ע"י כבל נחושת בעל בידוד $90^{\circ}C$ מותקנים במקובץ בתעלה צרה סגורה בטמפ' סביבתית של $45^{\circ}C$, הלוח מוזן ע"י כבל אלומיניום בעל בידוד $90^{\circ}C$ המותקן במישרין באדמה. תכנן את המעגל.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

קביעת גודלת סוג מאבטח ושטח חתך הכבל לכל מפוח-

$$I_b = \frac{P_n}{\sqrt{3} * U_n * \eta * \cos \varphi} = \frac{800}{\sqrt{3} * 400 * 0.82 * 0.78} = 1.8A$$

נבחר מאבטח מסוג מאמ"ת הגנת מנוע בעל הנתונים הבאים:

$$I_u = 2.5A, I_r = 1.6 \div 2.5A, I_n = 1.8A$$

על פי שיטת ההתקנה נבחר בטבלה 90.1 ונבחר בכבל שעל שטח חתך $1.5mm^2$ שהוא שטח חתך מינימאלי מותר במתח נמוך, ונבחן את התאמתו ל-2 התנאים.

$$C = 0.48 \text{ כיוון ש-10 הכבלים מונחים במקובץ לכן-}$$

$$C = 0.9 \text{ וכיוון שהטמפרטורה האופפת היא } 45^{\circ}C \text{ לכן-}$$

לכן I_z לאחר התיקון הוא:

$$I'_z = I_z * C * C = 1.8 * 0.48 * 0.9 = 7.776A$$

נבדוק אם בחירה זו עומדת ב-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I'_z$$

$$1.8 = 1.8 < 7.776 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מאמ"ת:

$$0.9I_n \leq I_z$$

$$0.9 * 1.8 < 7.776 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג הגנת מנוע מכוייל ל-1.8A וכבל בעל שטח חתך של $1.5mm^2$ עבור כל מפוח.

קביעת גודלת סוג מאבטח ושטח חתך כבל ההזנה-

$$I_{b(total)} = \sum I_b = 10 * 1.8 = 18A$$

נבחר מאבטח מסוג מא"ז בעל אופיין C:

$$I_u = 20A$$

על פי שיטת ההתקנה נבחר בטבלה 90.6 ונבחר בכבל שעל שטח חתך $6mm^2$ שהוא שטח חתך מינימאלי מותר במתח נמוך, ונבחן את התאמתו ל-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$18 < 20 < 43 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מא"ז B או C:

$$1I_n \leq I_z$$

$$1 * 20 < 43 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג מא"ז 20A בעל אופיין C וכבל בעל שטח חתך של $6mm^2$.

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני זרם קצר

בהגנה בפני זרמי קצר יש לבדוק את התאמת המאבטח למקום התקנתו ולשטח החתך המעגל המוגן. את הבדיקה מבצעים לאחר קביעת סוג וגודל המאבטח, סוג וחתך המוליכים כפי שהוסבר.

תקנות החשמל מחייבות קיום 2 תנאים לגבי תפקיד של מאבטח בהגנת מוליכים בפני קצר:
 א. כושר הניתוק של המאבטח יהיה גדול מזרם הקצר המרבי הצפוי לעבור דרכו. כושר ניתוק של מאבטחים נתון בקטלוגים, לגבי מפסקים אוטומטים מתכווננים התקן מבדיל בין 2 נתונים:

$$1. \text{ כושר ניתוק בסיסי } I_{cu} \text{ (kA).}$$

$$2. \text{ כושר ניתוק בשרות } I_{cs} \text{ (%), באחוזים ביחס לכושר הניתוק הבסיסי. זוהי יכולת}$$

המאבטח להפסיק 2 קצרים ברצף (במקרה הפעלה חוזרת אוטומטית).

לצורך בדיקת כושר הניתוק הנדרש של מאבטח יש לחשב את זרם הקצר התלת

מופעי $I_{k(max)}$ במקום התקנתו כפי שנלמד.

ניתן לרשום את התנאי:

$$I_{cu} > I_{k(max)}$$

באופן מעשי גודל זרם הקצר התלת מופעי בפסי צבירה של לוח חשמל מגדיר את

כושר הניתוק של כל המאבטחים בלוח זה.

כושר ניתוק של מאבטח יכול להיות קטן מהנדרש בתנאי שלפניו מותקן מאבטח אחר

בעל כושר ניתוק מספיק שיפעל מהר יותר. (עקרון זה מכונה "הגנה עורפית")

ב. זמן ניתוק קצר על ידי מאבטח יהיה קטן מהערך המחושב על פי הנוסחה הבאה אך

לא יותר מ- 5 שניות (לפי התקנות):

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

כאשר:

t - הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר (s).

k - מקדם הנתון בתקנות ערכו תלוי בסוג החומר המוליך וסוג הבידוד $\left[\frac{A * S^{\frac{1}{2}}}{mm^2} \right]$

סוג הבידוד		
חומר המוליך	בידוד 70°C	בידוד 90°C
נחושת	115	140
אלומיניום	74	90

S - שטח חתך המוליך (mm^2).

$I_{k(min)}$ - זרם קצר חד מופעי הצפוי בנקודה המרוחקת ביותר של המעגל (A).

משמעות בדיקה זו היא לבדוק שטמפרטורת מוליכי המעגל לא תעלה על ערך

המרבי המותר בעת קצר בהתאם לתקנות:

1. 160°C לבידוד 70°C.

2. 250°C לבידוד 90°C.

אם הזמן t המחושב לפי הנוסחה הנ"ל קטן מ- 0.1 s יש לבדוק את התנאי הנוסף:

$$k^2 * S^2 \geq \int_0^t I^2 dt$$

כאשר $I^2 dt$ הוא נתון יצרן המאבטח המבטא את הים החום המרבי שהמאבטח

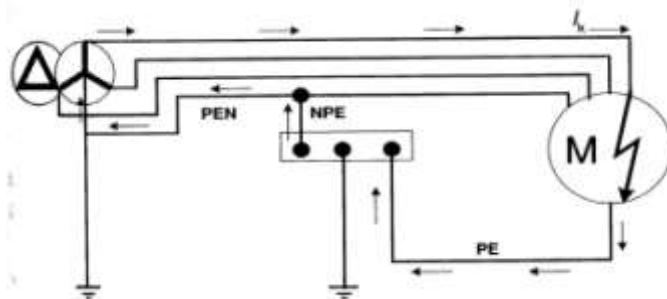
מעביר למוליכים.

שלב: תכנון:

א. חישוב זרם קצר תלת מופעי הצפוי במקום התקנת המאבטח וקביעת כושר

הניתוק הנדרש לפי התנאי: $I_{cu} > I_{k(max)}$

ב. חישוב זרם קצר חד מופעי הנקודה המרוחקת של המעגל- $I_{k(min)}$.



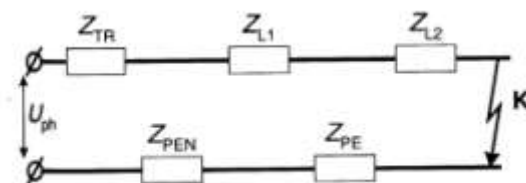
בתרשים מסומן מסלול הזרם קצר חד פאזי בין מוליך המופע לגוף המכשיר במתקן המוגן בשיטת "איפוס", כאשר:

PE - מוליך הארקה המעגל הסופי.

NPE - מוליך המחבר בין פס השוואת הפוטנציאלים לבין מוליך האפס של הרשת.

PEN - מוליך האפס של הרשת.

ניתן להציג את מעגל זרם הקצר על ידי מעגל תמורה:



כאשר:

Z_{TR} - עכבת הקצר של השנאי.

Z_{L1} - עכבת מוליך המופע של קו ההזנה מהשנאי עד ללוח הראשי.

Z_{L2} - עכבת מוליך המופע של המעגל הסופי.

Z_{PE} - עכבת מוליך הארקה.

Z_{PEN} - עכבת מוליך האפס של הרשת.

אם ידועים נתוני השנאי, אורכי וחתכי המוליכים ניתן לחשב את זרם הקצר החד מופעי לפי:

$$I_{k(min)} = \frac{0.9 * U_{ph}}{Z_T}$$

כאשר:

U_{ph} - מתח מופעי (230V).

Z_T - העכבה השקולה של מעגל הקצר: $Z_T = Z_{TR} + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{PE} + Z_{PEN}$

הערות:

1. במקרה של קצר בין מוליך המופע למוליך האפס החישוב יהיה זהה כיוון שאורך וחתך מוליך האפס במעגל הסופי זהים לזה של מוליך הארקה: $Z_N = Z_{PE}$
2. יש להתחשב בעליית התנגדות המוליכים לפני הקצר עקב טמפרטורת העמסה ולשם כך יש להכפיל את התנגדויות של המוליכים במקדם $k=1.3$.
כאשר גודל ומיקום השנאי אינם ידועים, ניתן לחשב את זרם הקצר המזערי בסוף המעגל הסופי במתקנים המוגנים בשיטת האיפוס לפי הנוסחה:

$$I_{k(min)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5(R_{ph} + R_N)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5\rho} * \frac{S_{ph} * S_N}{l(S_{ph} + S_N)}$$

כאשר:

U_{ph} - מתח מופעי (230V).

0.8- מקדם נפילת המתח ב- 20% בעת הקצר.

1.5- מקדם עלית התנגדות המוליכים לפני הקצר.

R_{ph}, S_{ph} - התנגדות וחתך מוליך המופע (Ω, mm^2).

R_N, S_N - התנגדות וחתך מוליך המופע (Ω, mm^2).

l - אורך מוליכי המעגל (m).

ג. חישוב משך הזמן המרבי לניתוק הקצר:

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

ד. בדיקת זמן ניתוק t_{br} של זרם הקצר $I_{k(min)}$ על ידי המבטח.

ניתן לבדוק את זמן הניתוק על פי אופיין המבטח. זמן זה חייב להיות קטן מהזמן המחושב, ולא יותר מ-5 שניות:

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

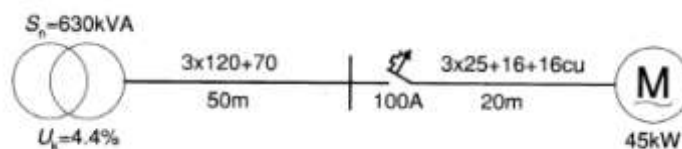
באופן מעשי צריך לוודא, שזרם הקצר $I_{k(min)}$ נמצא בתחום אלקטרו-מגנטי (מידי) של

המבטח. בתחום זה המבטח פועל תוך זמן הקטן מ- 0.1s.

אם תנאי זה לא מתקיים, במקרה של קצר לאדמה מותר להתקין בנוסף למבטח גם מפסק מגן (ממסר פחת). זרם הקצר חייב להיות לפחות פי 10 גדול מזרם ההפעלה של מפסק המגן.

תרגיל דוגמא 1

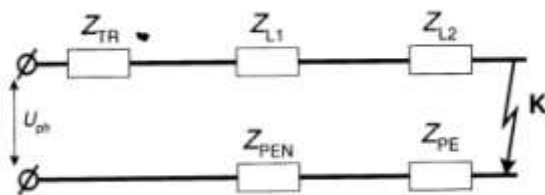
מנוע תלת פאזי מוזן מלוח חשמל ראשי כמתואר באיור הבא:



כל הכבלים מנחושט בעלי בידוד של $90^{\circ}C$.

$$U_n = 400V, x_0 = 0.08 \left[\frac{\Omega}{km} \right], \rho = 0.018 \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

תכנן את מעגל המנוע מהיבט הגנה בפני זרם קצר, בתנאי שבלוח הראשי של המתקן בוצע איפוס.



חישוב זרם הקצר התלת מופעי המקסימאלי $I_{k(max)}$ בפסי הצבירה של הלוח-

$$Z_{TR} = X_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100 * Sn} = \frac{4.4 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 11.175m\Omega$$

$$R_{L1} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{50}{120} = 7.5m\Omega$$

$$X_{L1} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 50 = 4m\Omega$$

$$Z_{L1} = R_{L1} + jX_{L1} = (7.5 + j4)m\Omega$$

$$Z_k = Z_{TR} + Z_{L1} = jX_{TR} + R_{L1} + jX_{L1} =$$

$$Z_k = j11.175 + 7.5 + j4 = 7.5 + j15.175 = 16.927m\Omega$$

$$I_{k(max)} = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 16.927 * 10^{-3}} = 15kA$$

מסקנה: כושר הניתוק הנדרש של המאבטח 15kA.

נחשב את זרם הקצר החד מופעי בקצה המעגל $I_{k(min)}$ כדי לבדוק אם מוליכי המעגל מוגנים

גם בפני זרם קצר.

$$R_{L2} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{20}{25} = 14.4m\Omega$$

$$X_{L2} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 20 = 1.6m\Omega$$

$$Z_{L2} = R_{L1} + jX_{L1} = (14.4 + j1.6)m\Omega$$

$$R_{PE} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{20}{16} = 22.5m\Omega$$

$$X_{PE} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 20 = 1.6m\Omega$$

$$Z_{PE} = R_{L1} + jX_{L1} = (22.5 + j1.6)m\Omega$$

$$R_{PEN} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{50}{70} = 12.86m\Omega$$

$$X_{PEN} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 50 = 4m\Omega$$

$$Z_{PEN} = R_{L1} + jX_{L1} = (12.86 + j4)m\Omega$$

$$Z_{kT} = 1.3 * R_T + jX_T =$$

$$Z_{kT} = 1.3 * (R_{L1} + R_{L2} + R_{PE} + R_{PEN}) + j(X_{TR} + X_{L1} + X_{L2} + X_{PE} + X_{PEN}) =$$

$$Z_{kT} = 1.3 * (7.5 + 14.4 + 22.5 + 12.86) + j(11.175 + 4 + 1.6 + 1.6 + 4) =$$

$$Z_{kT} = 74.438 + j22.375 = 77.728m\Omega$$

$$I_{k(min)} = \frac{0.9 * U_{ph}}{Z_{kT}} = \frac{0.9 * 230}{77.728 * 10^{-3}} = 2.663kA$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

חישוב הזמן המרבי לניתוק זרם קצר דרך מוליך הארקה של מעגל המנוע שעל פי הנתונים:
k=115, 16mm² -S עבור מוליך נחושת 70°C.

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2 = \left(\frac{115 * 16}{2.663 * 10^3} \right)^2 = 0.477s$$

בדיקת זמן הניתוק של זרם קצר 2.663kA ע"י מאבטח 100A-

$$\frac{I_k}{I_u} = \frac{2.663 * 10^3}{100} = 26.63 \text{ היחס בין הזרמים:}$$

עבור מאבטח מסוג מאמ"ת ניתן לראות מנתוניו כי זמן הניתוק המידי שלו היא בתחום

$$(6 - 14) * I_u$$

זאת אומרת שהוא יפעל מידית $t_{br} \leq 0.1s$ בכל כיוול של ההגנה.

ומכאן שהמבטח עומד גם בתנאי-

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

$$5s \geq 0.1s \leq 0.477s$$

מסקנה : המעגל מוגן בפני זרם קצר.

תרגיל דוגמא 2

מנוע תלת פאזי מוזן מלוח חשמל מאופס במתח נמוך על ידי כבל נחושת בעל בידוד 90°C

בחתך $(3X70+35)mm^2$ באורך ההתנגדות הסגולית של המוליכים $0.0175 \frac{\Omega * mm^2}{m}$.

מעגל המנוע מוגן באמצעות מפסק אוטומטי $I_n=160A$. זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בפסי

הצבירה של הלוח 15kA. בדוק האם המעגל מוגן בפני זרם קצר.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

לפי נתון זרם הקצר הצפוי בפסי הצבירה בלוח נקבע כי כושר הניתוק של המאבטח 15kA.

כיוון שלא קיימים נתוני השנאי והמוליכים אליו נחשב את הקצר החד מופעי בנקודה

המרוחקת של המעגל לפי:

$$I_{k(min)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5\rho} * \frac{S_{ph} * S_N}{l(S_{ph} + S_N)} = \frac{0.8 * 230}{1.5 * 0.0175} * \frac{70 * 35}{60 * (70 + 35)} = 2.726kA$$

נחשב את הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר כאשר $k=140$ עבור בידוד 90°C.

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2 = \left(\frac{140 * 35}{2.726 * 10^3} \right)^2 = 3.23s$$

בדיקת זמן הניתוק של זרם קצר 2.726kA ע"י מאבטח 160A-

$$\frac{I_k}{I_u} = \frac{2.726 * 10^3}{160} = 17.08 \text{ היחס בין הזרמים:}$$

עבור מאבטח מסוג מאמ"ת ניתן לראות מנתוניו כי זמן הניתוק המידי שלו היא בתחום

$$(6 - 14) * I_u$$

זאת אומרת שהוא יפעל מידית $t_{br} \leq 0.1s$ בכל כיוול של ההגנה.

ומכאן שהמבטח עומד גם בתנאי-

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

$$5s \geq 0.1s \leq 3.23s$$

מסקנה : המעגל מוגן בפני זרם קצר.

בדיקת מבטח לעמידה בזרם התנעה

מכשירי חשמל רבים צורכים בזמן הפעלתם זרם העולה פי כמה וכמה על הזרם הנקוב. בבחירת מבטח להגנת מעגלים הכוללים מכשירים בעלי זרמי מעבר גבוהים יש להתחשב בהשפעות זרמים אלו על המבטח. פרמטר חשוב נוסף- משך זמן זרם מעבר. להלן צרכנים שונים עם זרמי מעבר אופייניים וההתייחסות בבחירת גודל המבטח: (כאשר הזרם הנקוב של הצרכן מסומן ב- I_n , והזרם הנקוב של המבטח מסומן I_u).

סוג הצרכן	זרם מעבר ($\times I_n$)	משך זמן זרם המעבר (s)	התייחסות בבחירת גודל מבטח
נורות ליבון	15-20	0.001	אין
נורות פריקה ללא קבלים לשיפור $\cos \varphi$	1-1.6	0.002	אין
נורות פריקה עם קבלים לשיפור $\cos \varphi$	15-20	0.002	מומלץ לבחור מא"ז מסוג "C" לפי: $I_u \geq 1.3 * I_n$
קבלים לשיפור $\cos \varphi$	30-60	0.002	נדרש בתקנות לבחור מבטח לפי: $I_u \geq 1.43 * I_n$
שנאי חלוקה	10-15	0.002-0.004	בחירת נתיך מתח גבוה לפי: $I_u \geq (1.4 - 2) * I_n$
מנוע השראה	5-7	2-5	מומלץ לבדוק לפי התנאי: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$

התנאי לבחירת מבטח למעגל מנוע: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$

משמעותו בדיקת אי פעולת המבטח בזרם העולה ב-30% על זרם התנעת המנוע תוך זמן של 5 שניות.

ערכים של זרם התנעה מופיעים בקטלוגים של מנועים ככפולות הזרם הנקוב:

$$I_{st} = (5 - 7) * I_n$$

זרם I_5'' ניתן לקבל מאופיינים של המבטחים.

לדוגמא: אם במעגל מנוע מותקן מא"ז, ניתן לראות באופיין המא"ז שהזרם המינימאלי העלול להפעיל את המא"ז תוך זמן של 5 שניות שהוא הזרם הנקוב כפול 3 (ראה אופיין מא"זים).

$$3 * I_n \geq 1.3 * I_{st}$$

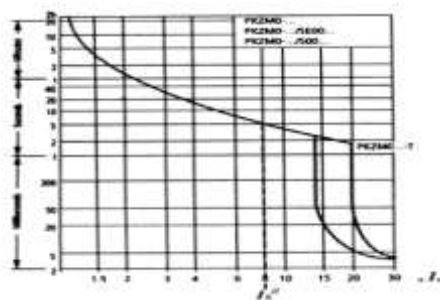
מכאן המא"ז מתאים למנוע אם מתקיים התנאי: $3 * I_n \geq 1.3 * I_{st}$. מומלץ להשתמש להגנה על מעגלי מנועים במפסק אוטומטי הניתן לכוונון ("הגנת מנוע"), במקרה זה אין חשש לפעולה שגויה של המבטח בזרם התנעה מכיוון שזרם הפעולה המידי

$$I_m = (14 - 20) * I_n$$

כאשר מאמ"ת הוא בעל הגנה מיידית מתכוונת יש לכייל אותה לזרם הגדול מזרם ההתנעה

$$I_m > I_{st}$$

להלן דוגמא לאופיין של מבטח מסוג "הגנת מנוע":



הגנה על מנוע והגנה על מוליכי מעגל המנוע

על פי תקנות החשמל "מנוע שהספקו עולה על 0.5kW יוגן בפני עומס יתר ע"י מאבטח המיועד לו בלבד, המפסיק אוטומטית זרם העלול לגרום נזק למנוע בשל התחממות יתרה".
 בחירת מבטח מסוג מא"ז אינה מאפשרת תאום בין זרם המבטח לבין זרם המנוע בשל הסדרה הדיסקרטית של הזרמים הנקובים ובשל זרם התנעה המחייב בחירת מא"ז גדול יותר, לכן הפתרון הוא בחירת מבטח מפסק אוטומטי הניתן לכוונון. נהוג לכייל את ההגנה התרמית של המפסק לזרם השווה לזרם המעשי או גבוה מזה בכמה אחוזים. מצד שני, קיימת דרישה להגן גם על מוליכי המעגל בפני זרם העמסת יתר ובפני זרם קצר. מכאן קיימות מס' אפשרויות לתכנון מעגל מנוע:

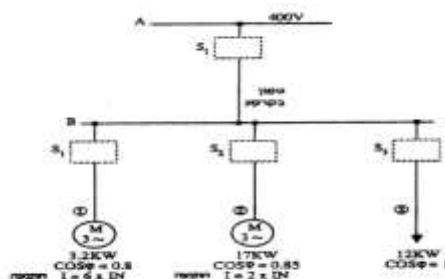
א. מנוע ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכיול - ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר המנוע מוזן באמצעות מעגל בלעדי ומעגל הפיקוד נמצא בלוח המזין.
 ההגנה על המנוע ועל מוליכי המעגל בפני זרם העמסת יתר ובפני זרם קצר מתבצעת ע"י המפסק.

יש לכייל את ההגנה התרמית של המפסק לזרם המנוע, זרם זה יהווה את הזרם הנקוב של המבטח, ולפיו מתכננים את חתך מוליכי המעגל, בנוסף בודקים את התאמת המפסק להגנה על המעגל בפני זרם קצר.
 ב. מנוע מוגן ע"י ממסר יתרת זרם (O.L.) ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מא"ז או נתיך - ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר מעגל הפיקוד נמצא ליד המנוע. במקרה זה מכיילים את ממסר יתרת זרם לזרם המנוע והוא מגן על המנוע ומוליכי המעגל בפני זרם יתר ואת חתך מוליכי המעגל מחשבים לפי זרם הכיול של הממסר.
 מא"ז או נתיך מגנים על מוליכי המעגל בפני זרם קצר בלבד ויש לבדוק את התאמתם להגנה זו, ולאחר בודקים את עמידות המא"ז או הנתיך לזרם התנעת המנוע ואת תנאי הסלקטיביות בינם לבין הממסר.

ג. מנוע מוגן ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכוונון או ממסר יתרת זרם ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי או מא"ז - ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר הוא מזין מספר מנועים.
 במקרה זה מפסק המותקן בראש המעגל מגן על מוליכי המעגל בפני זרם יתר ובפני זרם קצר על פי הכללים הרגילים. ואילו מפסקים מתכוונים מגנים על כל מנוע בנפרד בפני זרם יתר וזרם קצר, ויש לבדוק את תנאי הסלקטיביות ביניהם וכן את עמידות המפסק הראשי בזרמי התנעת המנועים בהתאם למטר העבודה שלהם.
 יש לציין שעל פי התקנות: מנוע תלת פאזי שהספקו גדול מ-3HP ומנוע חד פאזי שהספקו גדול מ-1HP מחויב במתנע כאמצעי להקטנת זרם ההתנעה.

תרגיל דוגמא

נתון המערכת הבאה:



קורס - מתקני חשמל - הנדסאי חשמל

נתון: כי הכבלים מנחושת בעלי בידוד של 90°C וכן הכבלים עבור עומסים 1,2,3 מותקנים בתוך צינור.

א. בחר את שטחי החתך של הכבלים בהתאם לדרישות הצרכן והזרמים המותרים.
ב. בחר את סוג וגודל המבטחים S1-S4 הדרושים להבטחת הצרכנים והמוליכים.

פתרון לתרגיל דוגמא

חישוב הזרם המתמיד-

$$I_{b1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_1} = \frac{3.2 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 5.774A$$

$$I_{b2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_2} = \frac{17 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.85} = 28.868A$$

$$I_{b3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_3} = \frac{12 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 17.321A$$

$$\vec{I}_T = \vec{I}_{b1} + \vec{I}_{b2} + \vec{I}_{b3} =$$

$$\vec{I}_T = (5.775 \angle 36.87^{\circ}) + (28.868 \angle 31.79^{\circ}) + (17.321 \angle 0^{\circ}) = (50.089 \angle 21.89^{\circ})A$$

לפי שיטת ההתקנה עבור הזנות הצרכנים 1-3 המותקנים בתוך צינור, נבחר בטבלה 1-90:

עבור צרכן 1- נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג הגנת מנוע בגודל

(4-6.3)A נכיל אותו ל-6A ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_n \Rightarrow 5.8 < 6 \Rightarrow o.k.$$

נבחר בשטח חתך 1.5mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 18A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי השני:

$$0.9I_n \leq I_z \Rightarrow 0.9 * 6 = 5.4 < 18A \Rightarrow o.k.$$

נבדוק התאמתו לזרם ההתנעה:

$$I_{st} = 6 * I_n = 6 * 5.8 = 34.8A$$

על פי הנתונים הטכניים של סוג הגנה זו ניתן לראות כי זרם הפעלה מידי של הגנה זו היא $88A$ ולכן בזרם ההתנעה של הצרכן ההגנה לא תנתק.

עבור צרכן 2- נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג הגנת מנוע בגודל

(24-32)A נכיל אותו ל-30A ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_n \Rightarrow 28.868 < 30 \Rightarrow o.k.$$

נבחר בשטח חתך 4mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 33A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי השני:

$$0.9I_n \leq I_z \Rightarrow 0.9 * 30 = 27 < 33A \Rightarrow o.k.$$

נבדוק התאמתו לזרם ההתנעה:

$$I_{st} = 2 * I_n = 2 * 27 = 54A$$

על פי הנתונים הטכניים של סוג הגנה זו ניתן לראות כי זרם הפעלה מידי של הגנה זו היא $448A$ ולכן בזרם ההתנעה של הצרכן ההגנה לא תנתק.

עבור צרכן 3- נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג מאמ"ת בגודל $20A$

ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_n \Rightarrow 17.321 < 20 \Rightarrow o.k.$$

נבחר בשטח חתך 2.5mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 24A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי השני:

$$1I_n \leq I_z \Rightarrow 1 * 20 = 20 < 24A \Rightarrow o.k.$$

עבור ההזנה הראשית- לפי שיטת ההתקנה עבור ההזנה הראשית הטמונה באדמה נבחר בטבלה 90.5 :

נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג מא"ז בגודל 63A ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_n \Rightarrow 50.089 < 63 \Rightarrow o.k.$$

נבחר בשטח חתך 10mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 76A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי השני:

$$1In \leq Iz \Rightarrow 1 * 63 = 63 < 76A \Rightarrow o.k.$$

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:

א. במקרה של תקלה במערכת התקני ההגנה בפני זרם יתר צריכים לפעול ולנתק רק את המעגל המושפע מהתקלה.

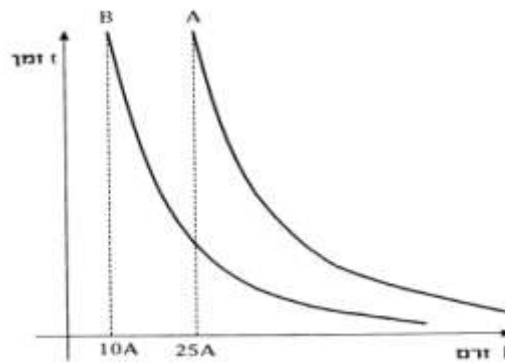
ב. זרמי מעבר של העומסים אינו צריך לגרום לניתוק המעגל.

ג. מערכת סלקטיבית צריכה להיות מתוכננת כך שאם המאבטח הקרוב למקום התקלה אינו פועל צריך המאבטח המותקן לפניו לפעול ולנתק את הזרם המעגל.

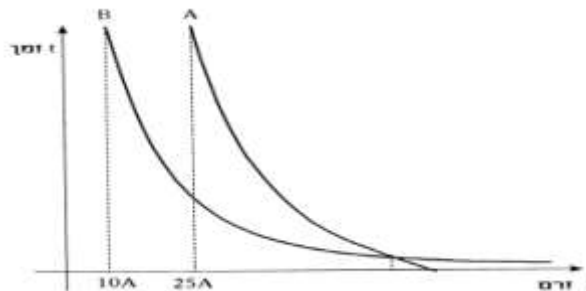
כאשר לא קיימת נקודת מפגש באופינים של 2 מאבטחים המחוברים בטור במעגל אזי קיימת בניהם סלקטיביות מלאה. ואם קיימת נקודת מפגש אזי הסלקטיביות הינה חלקית או שלא קיימת.

סלקטיביות בין מאבטחים תהיה עד הגבול של זרם ההגנה המידי I_m של המאבטח הגדול במעגל.

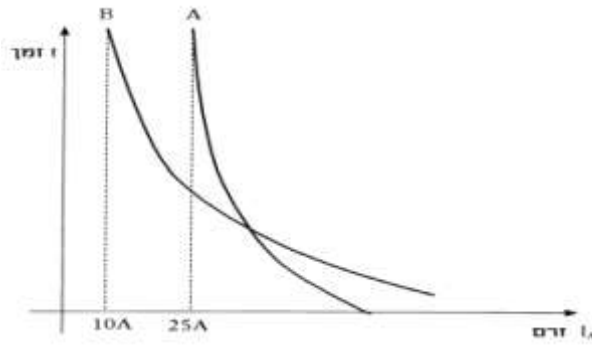
דוגמא לסלקטיביות זרם מלאה בין 2 מאבטחים:



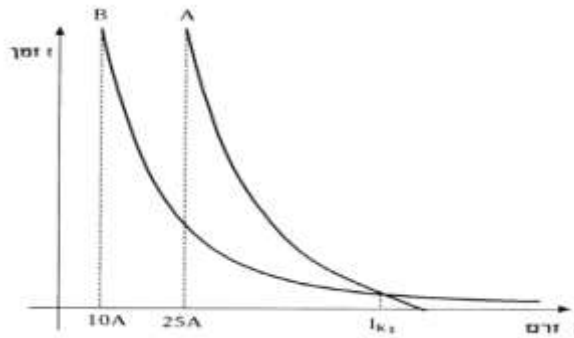
דוגמא לסלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים (רק בתחום ההגנה התרמית):



דוגמא לחוסר סלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים:



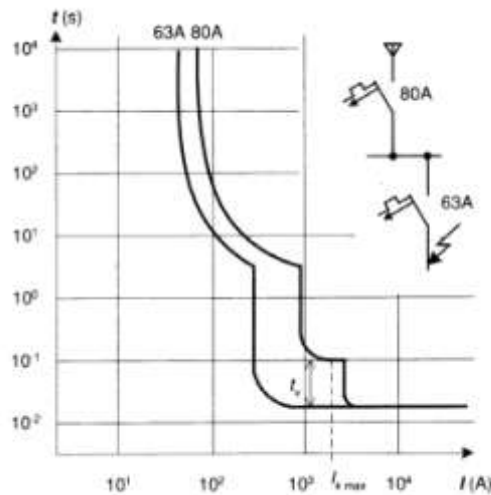
דוגמא לסלקטיביות בין 2 נתיכים אם זרם הקצר במתקן קטן מ- I_{k1} .



סלקטיביות זמן

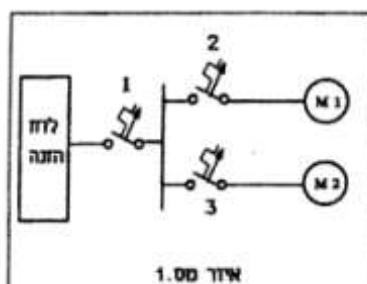
בכדי להגיע לסלקטיביות מלאה בין 2 מאבטחים יש צורך גם להתייחס לסלקטיביות בזמן. ז"א שתגובת ההגנה המגנטית של המפסק המותקן במעלה המעגל צריכה להיות איטית יותר ביחס למאבטח המותקן בקרבת התקלה. ישנם מאת"ים עם אפשרות כיוול לזמן תגובה מגנטי עבור זרמי הקצר. זמן זה מוגדר t_v .

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:



תרגיל דוגמא:

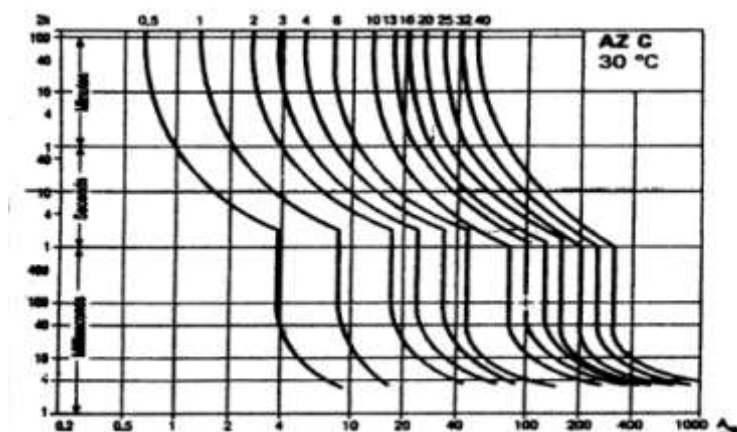
2 מנועים תלת מופעיים ובעלי מתח נקוב של 400V מוזנים ממקור בעל מתח נקוב של 400V, כמתואר באיור מס' 1. נתוני המנועים כמפורט בטבלה.



זמן התנעה (sec)	זרם התנעה (A)	נצילות (%)	cos φ	הספק המנוע (HP)	
10	30	90	0.92	7.5	מנוע M1
10	18	85	0.92	3	מנוע M2

א. חשב את הזרמים הנקובים של המנועים.

ב. בהנחה שעוצמת זרם הקצר בנקודה כל שהיא במעגל היא 200A מהם הגדלים הנקובים של המאבטחים עבור נקודות ההזנה 1-2-3 לשם השגת הגנה סלקטיבית במעגל. (אופייני ההפעלה של המבטחים באיור הבא)



פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I_{nM1} = \frac{P_{M1} * 736}{\sqrt{3} * Un * \eta_{M1} * \cos \varphi_{M1}} = \frac{7.5 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.9 * 0.92} = 9.623A$$

$$I_{nM2} = \frac{P_{M2} * 736}{\sqrt{3} * Un * \eta_{M2} * \cos \varphi_{M2}} = \frac{3 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.85 * 0.92} = 4.075A$$

$$\vec{I}_{nT} = \vec{I}_{nM1} + \vec{I}_{nM2} = 9.623 \angle 23.07^\circ + 4.075 \angle 23.07^\circ = (13.698 \angle 23.07^\circ)A$$

ב. עבור מאבטח 2- על פי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 10A עומד בזרם ההתנעה של 30A במשך 10sec ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.

עבור מאבטח 3- על פי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 6A עומד בזרם ההתנעה של 18A במשך 10sec ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.
עבור מאבטח 1- על מנת ליצור סלקטיביות מאבטח 1 צריך להיות גדול ממאבטחים 2 ו-3 ולפי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 16A עומד בזרם ההתנעה של 30A במשך 10sec שהוא זמן ההתנעה הארוך מבין 2 המנועים ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.

חישוב זמן השהייה המרבי לניתוק זרם קצר

כאשר ההגנה מיידית של מפסק פועלת בהשהייה על מנת להבטיח תנאי סלקטיביות עם מפסק אחר, המותקן במורד המעגל, יש לבדוק האם מוליכי המעגל עומדים בהלם החום של זרם הקצר.

את הבדיקה מבצעים לפי הנוסחה הבאה:

$$t = \left(\frac{k * S}{I_k} \right)^2$$

כאשר:

-t הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר (S).

-k מקדם הנתון התקנות. ערכו תלוי בסוג חומר המוליך ובסוג הבידוד.

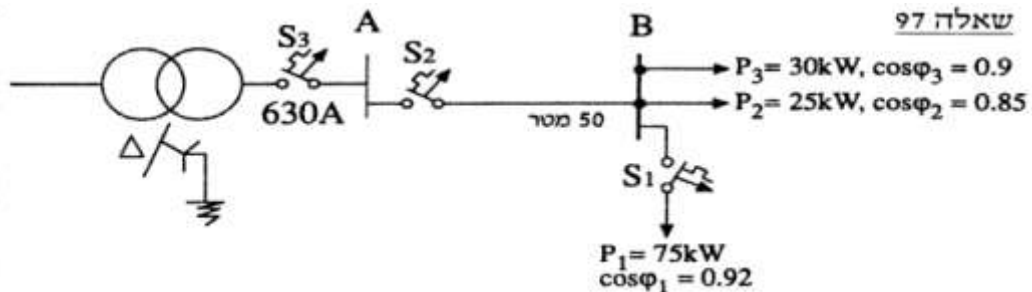
-S שטח המוליך (mm²).

-I_k זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בסוף המעגל המוגן (A).

אחר כך יש לוודא שזמן ניתוק הקצר אינו גדול מהזמן המרבי המותר: $t_{br} \leq t$.

תרגיל דוגמא 1

נתון המעגל הבא:



מתח הקו הנומינאלי 400V.

העכבה הכוללת עד מפסק S3 היא: $(0.005 + j0.01)\Omega$.

ההתנגדות הסגולית של נחושת: $\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega mm}{m} \right]$.

א. בחר חתך הכבל העשוי נחושת ומזין את לוח משנה B לפי העמסה מותרת. הכבל מונח

בתעלה צרה סגורה בה הטמפרטורה האופפת 35°C.

ב. הגדר את מפסקים S1 ו-S2. הסבר אילו נתונים מגדירים מפסק ואיך חשבת אותם.

ג. צפיפות הזרם המרבית המותרת הכבל נחושת הנתון בזמן תקלה (קצר) היא:

$70 \left[\frac{A}{mm^2} * sec \right]$. נתון כי השהייה בפתיחת המפסק S1 בזמן קצר מלא היא 0.03sec.

מה היא השהייה המרבית המותרת בפתיחת מפסק S2 בזמן קצר מלא ליד מפסק S1.

האם לדעתך יש סלקטיביות של זמני השהייה של 2 המפסקים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נחשב את הזרם בכבל המזין את לוח B:

$$S_T = S_1 \angle \varphi_1 + S_2 \angle \varphi_2 + S_3 \angle \varphi_3 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} + \frac{P_2}{\cos \varphi_2} + \frac{P_3}{\cos \varphi_3} =$$

$$S_T = \left(\frac{75}{0.92} + \frac{25}{0.85} + \frac{30}{0.9} \right) * 10^3 = 144.267 \text{KVA}$$

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{144.267 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 208.231 \text{A}$$

זרם הכיול 210A גודל המפסק 250A.

הזרם המתמיד המרבי הדרוש לפי התנאי השני:

על פי שיטת ההתקנה נבחר את מטבלה 90.1 שטח חתך מוליך של 95mm².

ב. המפסק האוטומטי S1:

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_1} = \frac{75 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} = 117.666 \text{A}$$

זרם הכיול 120A גודל המפסק 125A.

חישוב זרם הקצר התלת מופעי על פס B (בהזנחת היגב הכבל):

$$R = \rho * \frac{l}{A} = \frac{1}{57} * \frac{50}{95} = 0.00923 \Omega$$

$$Z_{KB} = Z_{KA} + R = 0.005 + j0.01 + 0.00923 = (0.01423 + j0.01) \Omega$$

$$I_{kB} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{KB}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * (0.01423 + j0.01)} = 14.606 \text{KA}$$

מכאן ניתן לקבוע שכושר הניתוק של המפסק S1 הוא: $I_{cus1} \geq 15 \text{KA}$

המפסק האוטומטי S2:

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_1} + \frac{P_2}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_2} + \frac{P_3}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_3} =$$

$$I_b = \frac{75 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} + \frac{25 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.85} + \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.9} = 208.231 \text{A}$$

זרם הכיול 210A גודל המפסק 250A.

חישוב זרם הקצר התלת מופעי על פס A:

$$I_{kA} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{KA}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * (0.005 + j0.01)} = 22.722 \text{KA}$$

מכאן ניתן לקבוע שכושר הניתוק של המפסק S2 הוא: $I_{cus2} \geq 23 \text{KA}$

ג. חישוב ההשהיה המותרת בניתוק מפסק S2:

$$t_{s2} = \left(\frac{k * S}{I_{ks1}} \right)^2 = \left(\frac{70 * 95}{15 * 10^3} \right)^2 = 0.196 \text{sec}$$

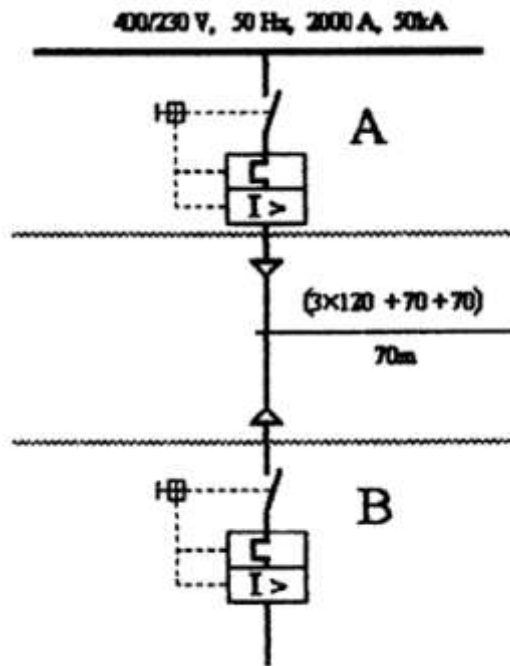
וזאת ההשהיה המרבית שניתן לכייל במפסק S2. מכיוון שהיא גדולה מהשהיית

מפסק S1 (הנתונה 0.03sec) קיימת סלקטיביות בין המפסקים.

תרגיל דוגמא 2

באיור הבא מתואר חיבור קו הזנה למכונה. מפסק A נמצא בלוח הראשי. הניזון משני שנאים זהים. לכל אחד מהשנאים הספק נקוב של 630KVA. יחס מתחים 22/0.4 KV. מתח הקצר 4% מהמתח הנקוב.

מפסק B נמצא בלוח המשנה של המכונה. הכבל עשוי נחושת עם בידוד ל-90°. הזרם המרבי המתמיד של הכבל 313A. (ניתן להזניח את ההיגב האשראי של הכבל). הזרם המרבי שהמכונה צורכת בעבודה רגילה הוא 227A. בהפעלת המכונה הזרם עולה לערך של עד 400A, עד סיום תהליכי ההתנעה של המנועים במכונה, שנמשכים כ-3 שניות לכל היותר.



בחר את המאבטחים A ו-B לכל מאבטח ציין את הנתונים הבאים: מתח, זרם, כושר ניתוק, זמן השהיה מותר לניתוק זרם הקצר, תחום כיוון הגנה בפני עומס יתר, תחום כיוון הגנה בפני זרם קצר.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. המתח הנקוב של 2 המפסקים הוא 400V.

ב. קביעת הזרמים הנקובים וכיול ההגנה התרמית:

מפסק B- מגן על המכונה הצורכת 227A ולכן גודל המפסק הנדרש על פי התנאי

הראשון: $I_n \geq I_b = 250A$ ומכאן גודל הכיול ההגנה התרמית 230A.

נבדוק את תנאי ההתנעה לפי אופיין המפסק: זרם של 400A יגרום לניתוק המפסק תוך

זמן של 1min שזה זמן הגדול יותר מ-3sec זמן ההתנעה המרבי של המנועים.

מפסק A- מגן על הכבל בפני העמסת יתר ובפני זרם קצר.

$$I_n \leq \frac{I_z}{0.9} = \frac{313}{0.9} = 348A$$

ולכן זרם הכיול התרמי חייב להיות: 348A. מכאן נבחר במפסק בגודל 400A המכיל ל-350A.

ג. כושר ניתוק של המפסקים:

חישוב זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בהדקי המפסק A:

$$X_{kA} = Z_{kA} = \frac{Z_{TR}}{2} = \frac{U_{k\%} * U_n^2}{2 * 100 * S_n} = \frac{4 * 400^2}{2 * 100 * 630 * 10^3} = (J5.079)m\Omega$$

$$I_{kA} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * J5.078 * 10^{-3}} = 50KA$$

ומכאן כושר הניתוק של מפסק A: 50KA.

חישוב זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בהדקי המפסק B:

$$R = \rho * \frac{l}{A} = 0.0175 * \frac{70}{120} = 10.208m\Omega$$

$$Z_{kB} = Z_{kA} + R = (10.208 + J5.079)m\Omega$$

$$I_{kB} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * (10.208 + J5.079) * 10^{-3}} = 22.28KA$$

ומכאן כושר הניתוק של מפסק B: 23KA.

ד. חישוב זמן ההשהיה המותר לפתיחת מפסק A:

לפי תקנות החשמל עבור כבל נחושת בעל בידוד $90^\circ - k=140$

$$t_A = \left(\frac{k * S}{I_{kA}} \right)^2 = \left(\frac{140 * 120}{22.28 * 10^3} \right)^2 = 0.568sec$$

עבור מפסק B אין צורך בהשהיה

קיימת סלקטיביות בין המפסקים כיוון שמספיק זמן השהיה של 0.1 sec כדי להבטיח

תנאי סלקטיביות בין המפסקים.

ה. תחום כיוון הגנה בפני זרם יתר:

מפסק B: ניתן לכייל את ההגנה המידית שלו לכל זרם העולה מעל זרם התנעת

המכונה. $I_{mB} > 400A$ ניתן לקבוע שעל פי הנתונים הקטלוגים

$$I_{mB} = 2 * I_r = 2 * 230 = 460A$$

מפסק A: כיוון שהסלקטיביות בין 2 המפסקים היא סלקטיביות זמן כיוון שקיימת השהיה

בפתיחת מפסק A. לכן ניתן לכייל את ההגנה המידית של מפסק A לפי יחס זהה ל-B:

$$I_{mA} = 2 * I_r = 2 * 350 = 700A$$

פרק 5-שיפור גורם ההספק

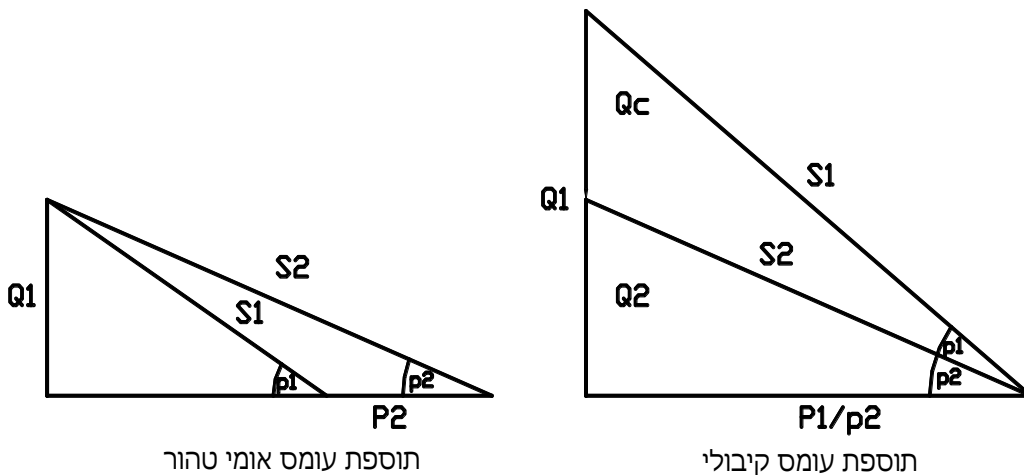
לפי נוסחת ההספק המושקע $P = UL * I * \cos\phi$ ברור כי ככל שגורם ההספק יהיה קטן, יהיה דרוש זרם גדול יותר כדי לספק לצרכן את אותו ההספק (בתנאי שהמתח על הדקי הצרכן אינו משתנה).

יתכן מצב בו משתנים תנאי העבודה של הצרכן ההשראתי וגורם ההספק שלו קטן (כדוגמא 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 $P = r * I^2$.

בשל עליית הזרם יתכן כי מוליכי הרשת השנאים והגנראטורים 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.

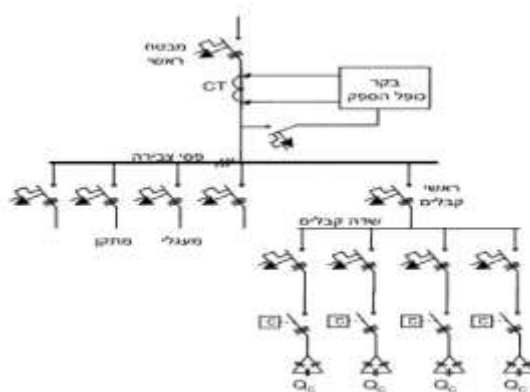
הדרכים הטבעיות לשיפור גורם ההספק:

- 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.
- ניתן להגביל צריכה ריאקטיבית מהרשת ע"י שימוש בקבלים אשר מהווים מקור מקומי של אנרגיה ריאקטיבית ובכך לשפר את גורם ההספק.
- ב. חיבור עומסים אומים טהורים הגורמים להגדלת ההספק הממשי ובכך משפרים את גורם ההספק.
 - ג. חיבור מנוע סינכרוני העובד בריקם במקביל לצרכנים השראתיים הגורם להגדלת ההיגב הקיבולי במתקן ובכך גורם לשיפור גורם ההספק במתקן.



שיטות התקנת קבלים לשיפור גורם ההספק

- א. שיטה יחידנית:
- לכל צרכן מחובר קבל לשיפור גורם ההספק.
- יתרונות בשיטה זו- התקנה היחידנית משפרת את ההספק גם בקווים של המעגלים הסופיים ובכך מתקבלת תועלת מרבית.
- חסרונות בשיטה זו- כמות הקבלים היא מרבית (עלות).
- אין שליטה על מצב הקבלים (בלאי).
- אין קיזוז טבעי של לגורם ההספק ע"י צרכנים אומים.
- ממומלץ להשתמש בשיטה זו כאשר ההספק של צרכן בודד מהווה חלק משמעות מההספק הכולל של המתקן.
- ב. שיטה קבוצתית:
- לכל קבוצת צרכנים (בלוח משנה) מותקן קבל לשיפור גורם ההספק
- יתרונות בשיטה זו- ההתקנה הקבוצתית משפרת את מקדם ההספק גם בקווים הפנימיים מלוח הראשי עד ללוח המשנה.
- כמות הקבלים במתקן יחסית לשיטה הקודמת קטנה.
- חסרונות בשיטה זו- כאשר משטר העומס משתנה באופן משמעותי עלול להיווצר או קיזוז חסר ובמצב זה השיפור הוא לא מספק, או קיזוז יתר שמשמעותו שההספק הראקטיבי המופק מהקבל גדול יותר מהספק הראקטיבי הנצרך ע"י המתקן, ומצב זה מלווה בעליית מתח על הדקי הצרכנים המסכן אותם.
- ממומלץ להשתמש בשיטה זו כאשר משטר העבודה של הצרכנים קבוע וכן שהמתקן פרוש על שטח גדול (אורך קווי ההזנה ללוחות המשנה ארוכים).
- ג. שיטה מרכזית:
- בלוח הראשי (או משני) מותקנות סוללות קבלים ובקר כופל הספק. הבקר מחשב באופן רציף את מקדם ההספק של המתקן באמצעות מדידת זרם, מתח והזווית בניהם. בהתאם לתוצאות המדידה, הבקר ממתג את סוללות הקבלים באמצעות מגענים.
- יתרונות בשיטה זו- כמות הקבלים המתקן היא יחסית מינימאלית.
- אודות לבקר אין חשש למקם חסר או יתר.
- חסרונות בשיטה זו- השיפור אינו כולל את הקווים הפנים במתקן. עלות גבוהה.
- שיטה זו היא השימושית ביותר.



חישוב הספק וקיבול סוללת הקבלים:

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

בחיבור קבלים משולש-

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{Un^2 * 6\pi f}$$

בחיבור קבלים בכוכב-

$$C_Y = \frac{Q_c}{Un^2 * 2\pi f}$$

כאשר:

Q_c -הספק של סוללות הכבלים (VAr).

P -הספק המתקן (W).

φ -זווית המופע לפני השיפור.

φ -זווית המופע הרצויה לאחר השיפור.

C -קיבול הקבל (F).

Un -מתח שלוב נקוב (V).

Un_{ph} -מתח מופעי נקוב (V).

f -תדר הרשת (Hz).

תכנון קו הזנה לסוללת הקבלים:

את שטח החתך של המוליכים וגודל המבטח בוחרים לפי זרם הקבל המחושב לפי-

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * Un}$$

בעת בחירת מוליכים ואמצעי מיתוג והגנה יש להתחשב בזרם ההתנעה הגבוה אשר מופיע בזמן חיבור של קבל לא טעון למקור המתח. מסיבה זו נקבע בתקנות החשמל: "מוליכים במעגל זינה לקבל יוגנו בפני זרם קצר על ידי מאבטח בעל זרם הנקוב השווה לזרם הנקוב של הקבל כפול 1.43 לזרם הנקוב הגבוה יותר, הקרוב ביותר מתוך הסדרה התקנית של מאבטחים".

זאת אומרת יש לבחור מבטח מעגל לפי- $I_n \geq 1.43 * I_c$.

לעומת זאת לפי לשון התקנה: "אין מניעה שחתך המוליכים במעגל הזינה של הקבל יתאים לזרם הנקוב של הקבל ולא לזרם של המבטח במעגל הזינה".
זאת אומרת שמותר לבחור את חתך המוליכים לפי התנאי- $I_z \geq I_c$ בהתאם לשיטה תקנת מוליכי המעגל.

תרגיל דוגמא 1

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$S_T = S_1 + S_2 = (P_1 + JQ_1) + (P_2 + JQ_2)$$

$$S_T = [(7 + J6.173) + (5 + J6.667)] * 10^3 = (12 + J12.84) \text{KVA}$$

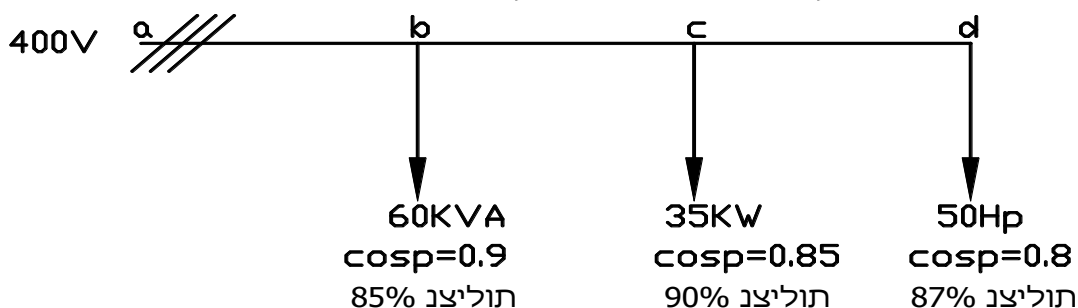
$$\tan \varphi_{\text{קיים}} = \frac{Q_T}{P_T} = \frac{12.84 * 10^3}{12 * 10^3} = 1.07$$

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

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

תרגיל דוגמא 3

נתונה רשת תלת מופעית המזינה בית מלאכה עם צרכנים השראתיים 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

$$Pd = \frac{Pd'}{\eta d} = \frac{50 * 736}{0.87} = 42.299KW$$

$$Pc = \frac{Pc'}{\eta c} = \frac{35 * 10^3}{0.9} = 38.889KW$$

$$Pb = \frac{Sb' * \cos \rho b}{\eta b} = \frac{60 * 10^3 * 0.9}{0.85} = 63.529KW$$

$$Qd = Pd * \tan \rho d = 42.299 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.8) = 31.724KVar$$

$$Qc = Pc * \tan \rho c = 38.889 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.85) = 24.101KVar$$

$$Qb = Pb * \tan \rho b = 63.529 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.9) = 30.769KVar$$

$$ST = (Pd + JQd) + (Pc + JQc) + (Pb + JQb)$$

$$ST = [(42.299 + J31.724) + (38.889 + J24.101) + (63.529 + J30.769)] * 10^3$$

$$ST = (144.717 + J86.594)KVA$$

$$\tan \varphi = \frac{QT}{PT} = \frac{86.594 * 10^3}{144.717 * 10^3} = 0.5984$$

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

$$\cos \varphi = \cos 30.8963 = 0.858$$

.ב

$$\tan \rho = \tan(\cos^{-1} 0.92) = 0.426$$

$$Qc = P(\tan \varphi - \tan \rho) = 144.717 * 10^3(0.5984 - 0.426) = 24.949KVar$$

נבחר בסוללת הקבלים הקרובה ביותר 25KVar.

תרגיל דוגמא 4

לוח חשמל ראשי במפעל המוזן ממתח תלת מופעי 400V/50Hz מזין מספר קבוצות צרכנים כמפורט בטבלה:

שם הקבוצה	הספק (KW)	מקדם הספק
קבוצה A	100	0.75
קבוצה B	50	0.8
קבוצה C	40	1
קבוצה D	20	0.85

א. חשב את מקדם ההספק.

ב. חשב את הספק סוללת הקבלים שיש להתקין על מנת לשפר את מקדם ההספק של המפעל ל- 0.92.

ג. חשב את גודל הקבלים שבסוללה כאשר הן מחוברות בחיבור משולש וכן שהן מחוברות בחיבור כוכב.

ד. בחר סוללת קבלים מסחרית וחשב את גודל המאבטח עבורן (בחיבור משולש).

ה. קבע את שטח החתך של המוליכים עבור סוללת הקבלים.

פתרון לתרגיל 4:

א.

$$Q_T = P_A * \tan \varphi_A + P_B * \tan \varphi_B + P_C * \tan \varphi_C + P_D * \tan \varphi_D =$$

$$Q_T = 10^3 * [100 * \tan(\cos^{-1} 0.75) + 50 * \tan(\cos^{-1} 0.8) + 40 * \tan(\cos^{-1} 1) + 20 * \tan(\cos^{-1} 0.85)] =$$

$$Q_T = 138.087 \text{ KVAR}$$

$$P_T = P_A + P_B + P_C + P_D = 10^3 * [100 + 50 + 40 + 20] = 210 \text{ KW}$$

$$\tan \varphi_T = \frac{Q_T}{P_T} = \frac{138.087}{210} = 0.658$$

$$\cos \varphi_T = \cos(\tan^{-1} 0.658) = 0.835$$

ב.

$$Q_C = P_T(\tan \varphi_{\text{קיים}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}) = 210 * 10^3 [0.658 - \tan(\cos^{-1} 0.92)] = 48.927 \text{ KVAR}$$

ג.

$$C_{\Delta} = \frac{Q_C}{Un^2 * 6\pi f} = \frac{48.927 * 10^3}{400^2 * 6\pi * 50} = 324.457 \mu F$$

$$C_Y = \frac{Q_C}{Un^2 * 2\pi f} = \frac{48.927 * 10^3}{400^2 * 2\pi * 50} = 973.372 \mu F$$

ד. נבחר בסוללת קבלים מסחרית בגודל 50KVar

$$I_c = \frac{Q_C}{\sqrt{3} * Un} = \frac{50 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 72.16 \text{ A}$$

נבחר במבטח בגודל לפי התנאי: $I_n \geq 1.43 * I_c$

$$I_n \geq 1.43 * 72.16 = 103.2 \text{ A}$$

נבחר בגודל מבטח מסחרי בגודל 125A

ה. את שטח החתך של המוליכים נבחר לפי התנאי: $I_z \geq I_c$ לפי שיטת התקנה "א" טבלה

$$I_z = 70.1 - \text{נבחר בשטח חתך } 25 \text{ mm}^2 \text{ שעבורו- } 82$$

נגדי פריקה

לפי תקנות החשמל: "קבל יצויד באמצעים מתאימים לפריקת מטענו. אמצעי הפריקה יבטיחו כי דקה אחת לכל היותר לאחר ניתוקו של הקבל מהזינה לא יישאר בין הדקיו מתח העולה על 50V".

הדרישה נועדה להבטיח היעדרות מתח על הקבל לאחר הניתוק מטעמי בטיחות ובנוסף למנוע תופעות מעבר חמורות בזמן חיבור חוזר של הקבל לרשת.

ניתן לחשב את מתח פריקת הקבל לפי:

$$U_c = U_{max_0} * \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

כאשר:

U_c - המתח על הקבל כעבור זמן t (V).

U_{max_0} - המתח המקסימאלי בקבל בתחילת הפריקה (V).

t - זמן הפריקה (s).

R - התנגדות נגד הפריקה (Ω).

C - קיבול הקבל (F).

שינוי נושא נוסחה:

$$R = \frac{t}{-\ln\left(\frac{U_c}{U_{max_0}}\right) * C}$$

תרגיל דוגמא

- צריכת האנרגיה השנתית של מתקן היא 1200MWh ו- 850MVar.
 המתקן מופעל 6106 שעות בשנה. מתח הרשת 400V/50Hz.
 יש צורך להתקין סוללת קבלים לשיפור גורם ההספק ל-0.92.
 א. חשב את מקדם ההספק של המתקן לפני השיפור.
 ב. חשב את הספק סוללת הקבלים לצורך השיפור הנדרש.
 ג. חשב את ערך נגדי הפריקה בהבטחת דעיכת מתח הקבל ל-24V תוך דקה מרגע הפסקת המתח לסוללת הקבלים (הקבלים מחוברים במשולש).

פתרון לתרגיל דוגמא

א.

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{850}{1200} = 0.708$$

$$\cos \varphi_T = \cos(\tan^{-1} 0.708) = 0.816$$

ב.

$$P = \frac{W_p}{h} = \frac{1200 * 10^6}{6106} = 196.528 \text{ KW}$$

$$Q_c = P_T(\tan \varphi_{\text{קיים}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}) = 196.528 * 10^3 [0.708 - \tan(\cos^{-1} 0.92)] = 55.421 \text{ KVar}$$

ג.

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{Un^2 * 6\pi f} = \frac{55.421 * 10^3}{400^2 * 6\pi * 50} = 367.522 \mu F$$

$$R = \frac{t}{-\ln\left(\frac{U_c}{U_{max_0}}\right) * C} = \frac{60}{-\ln\left(\frac{24}{400 * \sqrt{2}}\right) * 367.522 * 10^{-6}} = 51.663 \text{ K}\Omega$$

חישוב פרק זמן להחזרת השקעה בהתקנת סוללת קבלים

כאשר בלוח חשמל מותקנת סוללת קבלים לשיפור מקדם ההספק היא גורמת להקטנת הזרם בקו המזין וכתוצאה מכך לירידת הפסדי ההספק בקו.

ניתן לחשב רווח כלכלי מהתקנת סוללת הקבלים באופן הבא:

אם הפסדי ההספק בקו לפני התקנת הקבלים היו ΔP_1 ולאחר ההתקנה ΔP_2 , ניתן לחשב את החיסכון באנרגיה השנתית באופן הבא: $\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) * t$ כאשר t - שעות צריכה בשנה.

אם נכפיל את האנרגיה בתעריף החשמל M , נקבל את החיסכון הכספי השנתי:

$$Cw_n = \Delta W * M$$

מצד שני עלות ההשקעה היא: $B = b * Q_c$. כאשר Q_c - הספק סוללת הקבלים, b - מחיר של 1KVar, בהתחשב בריבית והפחת השנתיים $K\%$, ניתן לחשב את עלות ההשקעה

$$C_{Qn} = b * Q_c \left(1 + \frac{K\%}{100} * n\right)$$

פרק הזמן להחזרת ההשקעה הוא מספר שנים n , שבהם החיסכון הכספי משתווה לעלות

ההשקעה: $Cw_n = C_{Qn}$. למציאת פרק הזמן הנדרש להחזר ההשקעה יש לפתור את

המשוואה עבור הנעלם n .

תרגיל דוגמא

במתקן חשמלי הפסדי ההספק בקטע הרשת שבין המונה של ח"ח לבין הלוח הראשי מהווים 2.8% מההספק הפעיל הנצרך. מקדם ההספק של עומס המתקן הוא 0.8 (השראי). המתקן מופעל 5500 שעות בשנה לפי עומס קבוע. המחיר של כל קו"ט"ש הוא 32 אג'. לצורך שיפור מקדם ההספק ל-0.92 הותקנה בלוח סוללת קבלים בעלת הספק נקוב של 45KVA_r. מחירה הסגולי של סוללת הקבלים היא: $\frac{65}{KVAr}$. המתח הנקוב של רשת הזינה התלת מופעית הוא 400V. הריבית והפחת השנתיים בגין ההשקעה בסוללת הקבלים מהווים 13% ממחיר הסוללה.

- חשב את ההספק הפעיל הנצרך ע"י המתקן.
- חשב את הזרמים הקווים ברשת הזינה לפני ואחרי שיפור גורם ההספק.
- פי כמה פחתו ההפסדים בקו המזין את לוח הראשי לאחר חיבור סוללת הקבלים.
- חשב את הפרק הזמן להחזרת ההשקעה הכרוכה בהרכבת סוללת הקבלים.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. חישוב ההספק הפעיל-

$$P = \frac{Q_c}{\tan \varphi_{\text{קיי}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}} = \frac{45 * 10^3}{\tan(\cos^{-1} 0.8) - \tan(\cos^{-1} 0.92)} = 138.888KW$$

ב. חישוב הזרמים לפני ואחרי השיפור-

$$I_{\text{לפני}} = \frac{P}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_{\text{קיי}}} = \frac{138.888 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 250.584A$$

$$I_{\text{אחרי}} = \frac{P}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_{\text{אחרי}}} = \frac{138.888 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} = 217.9A$$

ג. חישוב בכמה פחתו ההפסדים-

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\Delta P_{\text{אחרי}}}{\Delta P_{\text{לפני}}} = \frac{I_{\text{אחרי}}^2 * R}{I_{\text{לפני}}^2 * R} = \left(\frac{I_{\text{אחרי}}}{I_{\text{לפני}}} \right)^2 = \left(\frac{217.9}{250.584} \right)^2 = 0.756 = 75.6\%$$

מכאן שההפסדים פחתו ב- 24.4%

ד. חישוב פרק הזמן להחזרת ההשקעה-

$$\Delta P_1 = 2.8\% * P = \frac{2.8}{100} * 138.888 * 10^3 = 3.889KW$$

$$\Delta P_2 = 75.6\% * \Delta P_1 = \frac{75.6}{100} * 3.889 * 10^3 = 2.94KW$$

החיסכון באנרגיה השנתית-

$$\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) * t = 10^3 * (3.889 - 2.94) * 5500 = 5219.5KWh$$

החיסכון הכספי בסוף שנת ה-

$$Cw_n = \Delta W * M * n = 5219.5 * 0.32 * n = (1670.24 * n) \text{ ש"ח}$$

מצד שני עלות ההשקעה בסוף שנת ה-

$$C_{Qn} = b * Q_c \left(1 + \frac{K\%}{100} * n \right) = 65 * 45 * \left(1 + \frac{13}{100} * n \right) = [2925 * (1 + 0.13 * n)] \text{ ש"ח}$$

חישוב מספר השנים להחזר ההשקעה-

$$Cw_n = C_{Qn}$$

$$1670.24 * n = 2925 * (1 + 0.13 * n)$$

$$1670.24 * n = 2925 + 380.25 * n$$

$$1670.24 * n - 380.25 * n = 2925$$

$$1670.24 * n - 380.25 * n = 2925$$

$$1289.99 * n = 2925$$

$$n = \frac{2925}{1289.99} = 2.267_{\text{שנים}}$$