

המחלקה לחשמל
קירור ומיזוג אוויר

מתקני חשמל ורשת

חשמלאי ראשי

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים

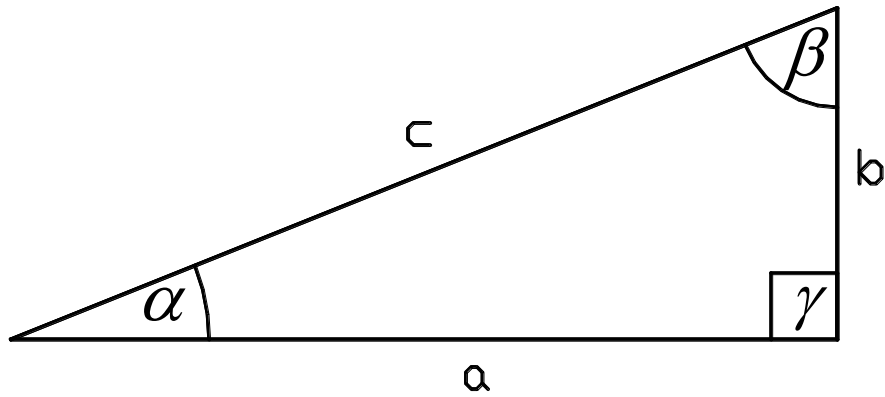
2011

תוכן עניינים:

פרק 1 – זרמים והספקים בזרם חילופין	עמ' 3-12
פרק 2 – חישובי רשתות	עמ' 13-57
פרק 3 – זרמי קצר	עמ' 58-67
פרק 4 – שיפור גורם ההספק	עמ' 68-73
פרק 5 – הגנות על מוליכים	עמ' 74-90
פרק 6 – הארקות והגנות בפני התחשמלות	עמ' 91-99
פרק 7 – תאורה	עמ' 100-116
פרק 8 – נספחים	עמ' 117-129

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

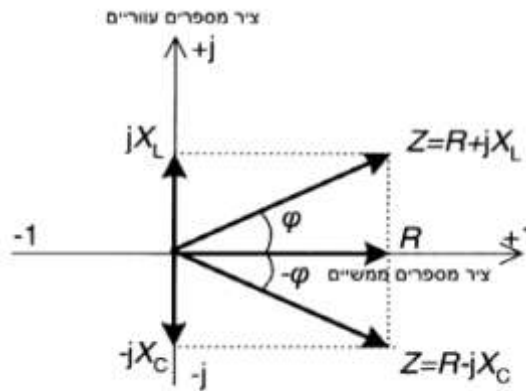
באופן כללי צרכן הזרם חילופין מאופיין ע"י העכבה Z. העכבה בנויה מ-2 רכיבים:

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:

- היגב השראי X_L לצרכנים הכוללים סלילים אשר אוגרים בתוכם שדה מגנטי.
- היגב קיבולי X_C לצרכנים הכוללים קבלים אשר אוגרים בתוכם שדה חשמלי.

חיבור בין האפקטיבי והראקטיבי הינו מספר מרוכב וניתן להציגו בדיאגרמות הוקטוריות הבאות:



עבור צרכן בעל אופי השראי-

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

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

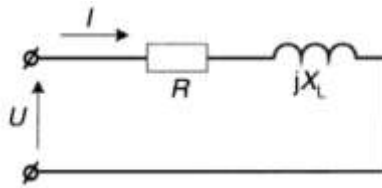
$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{X_L}{Z} \right)$$

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

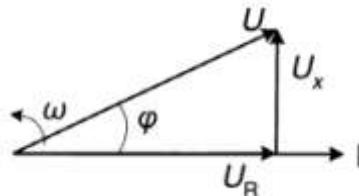
מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו :

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

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 לחוק אום: $U_R = I * R$, $U_X = I * jX_L = j * I * X_L$,
כיוון שווקטור המתח U_R זהה לכיוון וקטור הזרם I וווקטור 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 סינוסידלי , מערכת הווקטורים מסתובבת נגד כיוון השעון במהירות זוויתית ω : $\omega = 2\pi f \text{ (rad/sec)}$
מהדיאגרמה ניתן לראות שבמקרה של עכבה אומית-הרשאית 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:

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

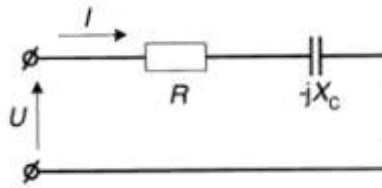
$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{-X_C}{Z}\right)$$

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

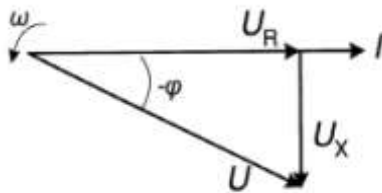
מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו :

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

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי קיבולי:



את הזרם נחשב בהתאם לחוק אום: $\vec{I} = \frac{\vec{U}}{\vec{Z}}$ 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 המעגלית 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.

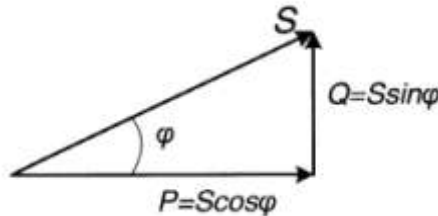
משולש הספקים

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

כאשר המתח נקבע כווקטור הייחוס: $\vec{U} = U \angle 0^\circ$. ווקטור הזרם נלקח עם הזווית הצמודה: $\vec{I} = I \angle -\varphi^\circ$. ניתן להציג מערכת זו בעזרת משולש ההספקים:



ההספק המדומה נמדד ביחידות (VA).

ניתן על-פי משפט פיתגורס לקבוע את הביטויים הבאים

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

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

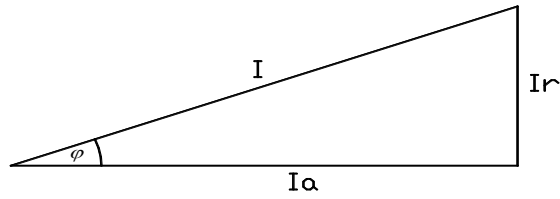
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

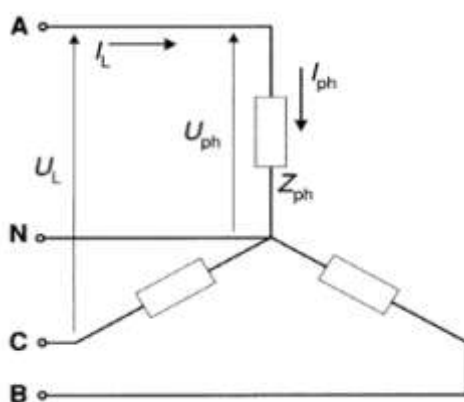
מערכת תלת מופעית חיבור צרכן בחיבור כוכב ובחיבור משולש

חיבור צרכן בחיבור כוכב

במערכת תלת פאזית ישנם 2 סוגי מתחים:

- מתח פאזי U_{ph} והוא המתח על כל צרכן בנפרד: U_A, U_B, U_C .
- מתח קווי (שלוב) 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 צרכן מאוזן ז"א שכל עכבות הצרכן 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 צרכן 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-

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

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

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

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

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-

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

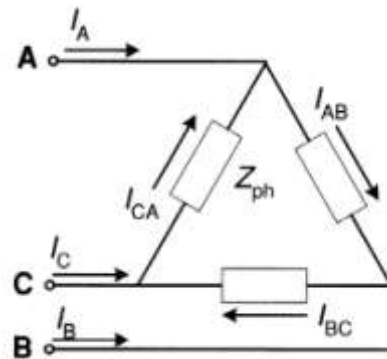
$$\vec{U}'_{B_{ph}} = \vec{U}_{B_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -120^\circ} - 121.628^{\angle 139^\circ} = 122.514^{\angle -101.14^\circ} V$$

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

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:

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

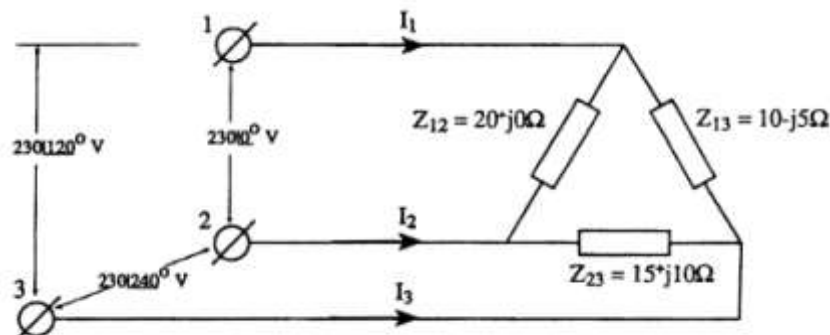
הספקים נחשב:

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

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

תרגיל דוגמא:

עומס תלת פאזי בלתי סימטרי מחובר למערכת הספקת 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 והאקטיביים בכל מופע ואת ההספק העומס הכולל.
- ד. חשב את מקדם ההספק של העומס.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. חישוב הזרמים הפאזיים:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{ph_{12}} &= \frac{\vec{U}_{ph_{12}}}{\vec{Z}_{ph_{12}}} = \frac{230\angle 0^\circ}{20+j0} = 11.5\angle 0^\circ \text{ A} \\ \vec{I}_{ph_{13}} &= \frac{\vec{U}_{ph_{13}}}{\vec{Z}_{ph_{13}}} = \frac{230\angle 120^\circ}{10-j5} = 20.572\angle 147^\circ \text{ A} \\ \vec{I}_{ph_{23}} &= \frac{\vec{U}_{ph_{23}}}{\vec{Z}_{ph_{23}}} = \frac{230\angle 240^\circ}{15+j10} = 12.758\angle -154^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

נחשב את הזרמים הקווים לפי הפרש הזרמים הפאזיים:

$$\begin{aligned}\vec{I}_{L_1} &= \vec{I}_{ph_{13}} - \vec{I}_{ph_{12}} = 20.572\angle 147^\circ - 11.5\angle 0^\circ = 30.859\angle 159^\circ \text{ A} \\ \vec{I}_{L_2} &= \vec{I}_{ph_{12}} - \vec{I}_{ph_{23}} = 11.5\angle 0^\circ - 12.758\angle -154^\circ = 23.638\angle 14^\circ \text{ A} \\ \vec{I}_{L_3} &= \vec{I}_{ph_{23}} - \vec{I}_{ph_{13}} = 12.758\angle -154^\circ - 20.572\angle 147^\circ = 17.766\angle -71^\circ \text{ A}\end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned}\vec{S}_{12} &= \vec{U}_{ph_{12}} * \vec{I}_{ph_{12}} = 230\angle 0^\circ * 11.5\angle 0^\circ = 2645\angle 0^\circ = (2645 + j0) \text{ VA} \\ \vec{S}_{13} &= \vec{U}_{ph_{13}} * \vec{I}_{ph_{13}} = 230\angle 120^\circ * 20.572\angle -147^\circ = 4731.56\angle -27^\circ = (4215.85 - j2148.08) \text{ VA} \\ \vec{S}_{23} &= \vec{U}_{ph_{23}} * \vec{I}_{ph_{23}} = 230\angle 240^\circ * 12.758\angle -154^\circ = 2934.34\angle 34^\circ = (2432.68 + j1640.86) \text{ VA} \\ \vec{S}_T &= \vec{S}_{12} + \vec{S}_{13} + \vec{S}_{23} = 2645\angle 0^\circ + 4731.56\angle -27^\circ + 2934.34\angle 34^\circ = 9.307\angle -3^\circ \text{ KVA}\end{aligned}$$

ד. חישוב מקדם ההספק של העומס:

$$\cos \varphi_T = \cos -3 = 0.998$$

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.

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 נחושת 1.5 mm^2 .
- ב. למוליך אלומיניום 2.5 mm^2 (במעגלים סופיים 6 mm^2).
- ג. למוליך נחושת בכבל עילי (התלוי על תיל נושא) 4 mm^2 .
- ד. למוליך אלומיניום בכבל עילי 16 mm^2 .
- ה. למוליך נחושת 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: $X_0=0.2-0.3 \Omega/Km$

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

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

כבל מתח נמוך: $X_0=0.07 \Omega/Km$

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:

$$\Delta U = |U_1| - |U_2|$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

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

א. עבור רשת חד פאזית-

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = I * RL * \cos \varphi_2 \mp I * XL * \sin \varphi_2 = I(RL * \cos \varphi_2 \mp XL * \sin \varphi_2)$$

ב. עבור רשת תלת פאזית-

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = \sqrt{3} * I * RL * \cos \varphi_2 \mp \sqrt{3} * I * XL * \sin \varphi_2$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * I(RL * \cos \varphi_2 \mp XL * \sin \varphi_2)$$

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: $\Delta U_r = -XL * \sin \varphi_2$ כך שהרכיב הראקטיבי יהיה חיובי בעומס השראי ושליילי בעומס קיבולי.

שלב חישוב שטח חתך אחיד.

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית.

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

הערות:

1. בתצוגה קרטזית של הספקי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+) כאשר

האופי הוא השראי וב-(-) כאשר האופי הוא קיבולי.

2. בתצוגה קרטזית של זרמי קטעים מסמנים את הרכיב הראקטיבי ב-(+) כאשר

האופי הוא קיבולי וב-(-) כאשר האופי הוא השראי.

3. בחישוב מפל המתח הראקטיבי כאשר הרשת מוצגת ע"י זרמים יש להפוך את הסימנים.

4. 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- $\Delta U_a\% = \Delta U\%$ ועוברים לשלב ד.

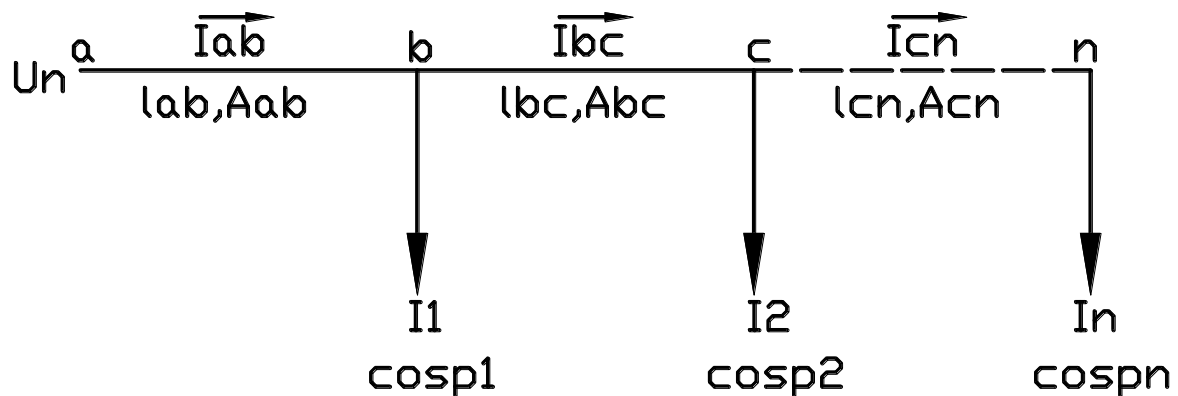
ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $\Delta U_a\%$ לפי הנוסחה: $\Delta U_a\% = \Delta U\% - \Delta U_r\%$

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

סוג הרשת	הצגת הרשת	מפל מתח ראקטיבי (%)	מפל מתח אקטיבי (%)
חד מופעית	זרמי קטעים	$\Delta U_r\% = \frac{X_o}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}_r li * li$	$\Delta U_a\% = \frac{200\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n I_{ali} * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r\% = \frac{X_o}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Q_{li} * li$	$\Delta U_a\% = \frac{200\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n P_{li} * li$
תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta U_r\% = \frac{\sqrt{3}X_o}{10Un} \sum_{i=1}^n \bar{I}_r li * li$	$\Delta U_a\% = \frac{\sqrt{3} * 100\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n I_{ali} * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r\% = \frac{X_o}{10Un^2} \sum_{i=1}^n Q_{li} * li$	$\Delta U_a\% = \frac{100\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n P_{li} * li$

כאשר $\rho \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$ התנגדות הסגולית של המוליכים בהתאם לסוג החומר.

לעיתים מופע נתון γ -מוליכות הסגולית של המוליכים, כאשר: $\gamma = \frac{1}{\rho} \left[\frac{m}{\Omega * mm^2} \right]$



כאשר:

$$\vec{I1} = I_{a1} \mp J I_{r1}$$

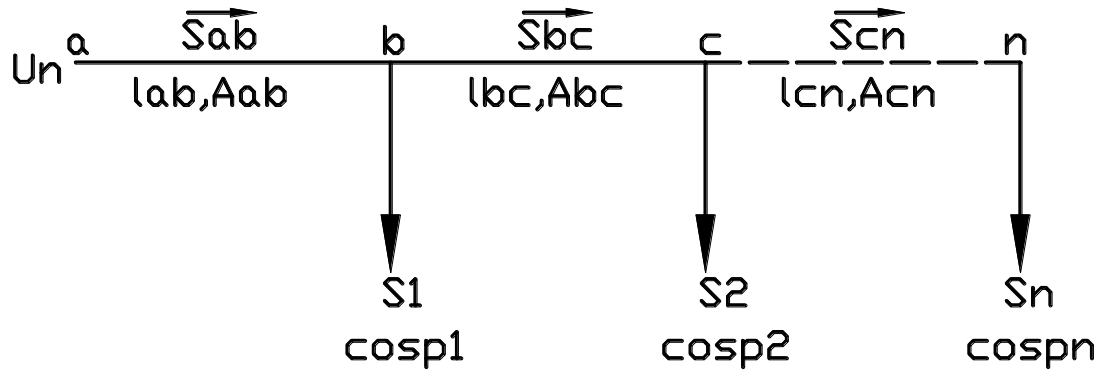
$$\vec{I2} = I_{a2} \mp J I_{r2}$$

$$\vec{In} = I_{an} \mp J I_{rn}$$

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

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

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



כאשר:

$$\vec{S1} = P1 \mp JQ1$$

$$\vec{S2} = P2 \mp JQ2$$

$$\vec{Sn} = Pn \mp JQn$$

$$\vec{Scn} = \vec{Sn}$$

$$\vec{Sbc} = \vec{Scn} + \vec{S2}$$

$$\vec{Sab} = \vec{Sbc} + \vec{S1}$$

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:

$$A = \frac{200\rho}{\Delta Ua\% * Un} \sum_{i=1}^n Iali * li$$

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

$$\Delta Ua\% = \frac{200\rho}{Un} \sum_{i=1}^n \frac{Iali * li}{Ali}$$

את מפל המתח ביחידות וולט ניתן לחשב לפי:

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

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 אחיד המוצגת ע"י זרמי קטעים:

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

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

סוג הרשת	הצגת הרשת	מפל מתח ראקטיבי (V)	מפל מתח אקטיבי (V)
חד מופעית	זרמי קטעים	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}r_{li} * li$	$\Delta U_a = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{ali} * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000U_n} \sum_{i=1}^n Q_{li} * li$	$\Delta U_a = \frac{2\rho}{A * U_n} \sum_{i=1}^n P_{li} * li$
תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta U_r = \frac{\sqrt{3}X_o}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}r_{li} * li$	$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3} * \rho}{A} \sum_{i=1}^n I_{ali} * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000U_n} \sum_{i=1}^n Q_{li} * li$	$\Delta U_a = \frac{\rho}{A * U_n} \sum_{i=1}^n P_{li} * li$

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

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

$$\Delta U_{max} = \frac{2 * \rho}{A} * \sum I_a * l + \frac{X_o}{1000} * \sum \bar{I}r * l$$

$$\Delta U_a = R_o * I_a * l$$

$$\Delta U_r = X_o * \bar{I}r * l$$

$$R_o = \frac{\rho}{A}$$

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

ברשת זרם ישר

תרגיל דוגמא 1

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

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

- 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 $16mm^2$

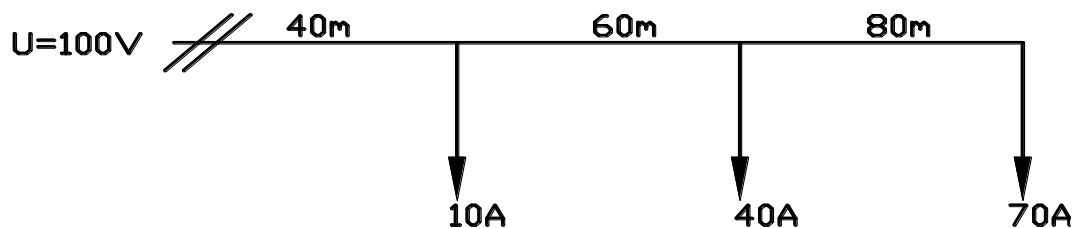
$$\Delta Umax\%' = \frac{200\rho}{A' * Un} * I * l = \frac{200}{16 * 115 * 58} * 30 * 40 = 2.249\%$$

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

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

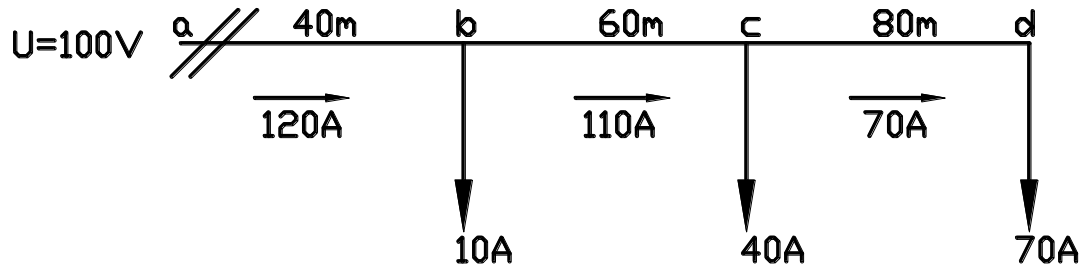
תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



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

- א. חשב שטח אחיד לרשת עבור מפל מתח של 4%.
 ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח הנופל על צרכן c.
 ג. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.



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.

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

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

תזכורת:

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

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

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

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

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

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

$$S[\varphi] = P + jQ$$

$$S = U * I$$

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

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

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

כאשר:

I_a - זרם דרך המרכיב הממשי של המוליך- [A]

I_r - זרם דרך המרכיב ההיגבי של המוליך- [A]

P - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן- [W]

Q - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן- [Var]

S - ההספק המדומה המתפתח בצרכן- [VA]

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:

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

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $70mm^2$.

$$\Delta U_{max}\% = \frac{200\rho}{A * U_n} * I_a * l + \frac{X_o}{10 * U_n} * I_r * l =$$
$$\Delta U_{max}\% = \frac{200}{70 * 200 * 57} * 80 * 100 + \frac{0.1}{10 * 200} * 60 * 100 = 2.3\%$$

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

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

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 ההשראתי של הרשת עד לצרכן הוא 0.15Ω . חשב את מתח המקור.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

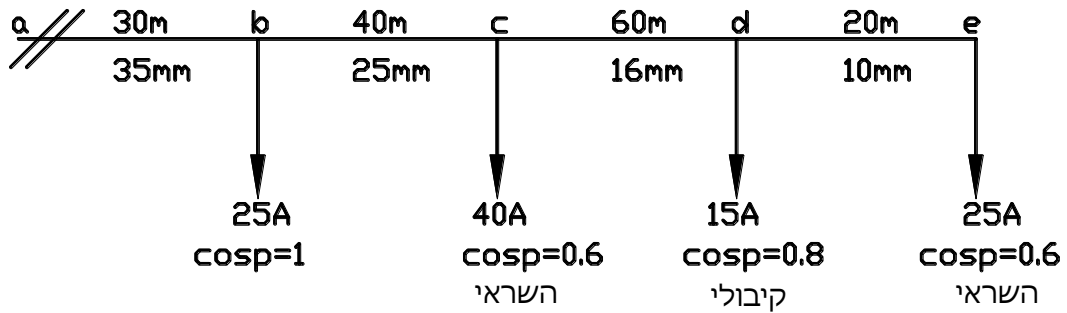
$$I_{La} = \frac{PL}{UL} = \frac{15 * 10^3}{220} = 68.182A$$

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

$$\Delta U_{max} = \Delta U_a + \Delta U_r = I_{La} * R + I_{Lr} * X$$

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

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



נתון כי:

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

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

$$U_n = 200V$$

- 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

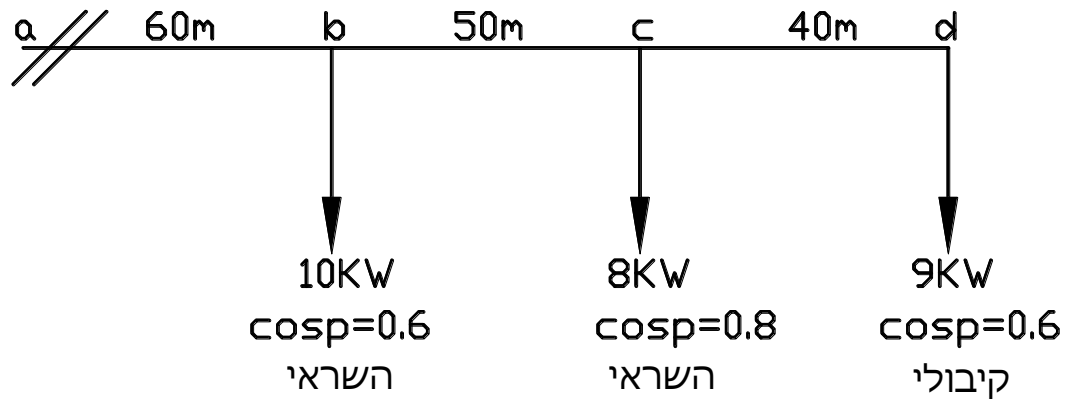
ב.

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

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

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

נתונה הרשת הבאה:



נתון כי:

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

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

$$U_n = 240V$$

- חשב שטח חתך אחיד לרשת עבור מפל מתח של 5%.
- בחר שטח חתך מסחרי וחשב את המתח של הצרכן C ואת מפל המתח בקטע cd בלבד.
- פתרון לתרגיל דוגמא 4

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Delta U_r\% = \frac{X_o}{10U_n^2} * \sum Q * l =$$

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

$$\Delta U_a\% = \Delta U_{max}\% - \Delta U_r\% = 5 + 0.207 = 5.207\%$$

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

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

ב.נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$.

$$\Delta U(ac) = \frac{2\rho}{A * U_n} * (P_{ab} * l_{ab} + P_{bc} * l_{bc}) + \frac{X_o}{1000U_n} * (Q_{ab} * l_{ab} + Q_{bc} * l_{bc}) =$$

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

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

$$U_c = U_n - \Delta U(ac) = 240 - 10.343 = 229.657V$$

$$\Delta U(cd) = \frac{2\rho}{A * U_n} * (P_{cd} * l_{cd}) + \frac{X_o}{1000U_n} * (Q_{cd} * l_{cd}) =$$

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

תזכורת:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I_a - זרם דרך המרכיב הממשי של המוליך- [A]

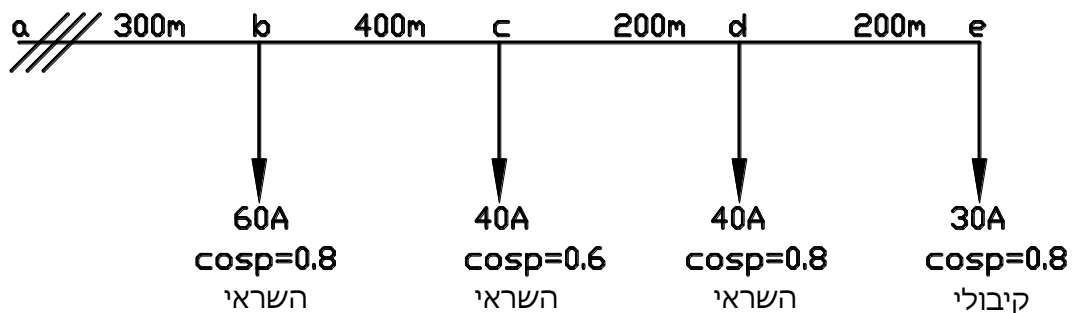
I_r - זרם דרך המרכיב ההיגבי של המוליך- [A]

P - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן- [W]

Q - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן- [Var]

S - ההספק המדומה המתפתח בצרכן- [VA]

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.

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

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

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

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

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

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

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

$$\vec{I_{de}} = \vec{I_e} = (24 + j18)A$$

$$\vec{I_{cd}} = \vec{I_d} + \vec{I_{de}} = (32 - j24) + (24 + j18) = (56 - j6)A$$

$$\vec{I_{bc}} = \vec{I_c} + \vec{I_{cd}} = (24 - j32) + (56 - j6) = (80 - j38)A$$

$$\vec{I_{ab}} = \vec{I_b} + \vec{I_{bc}} = (48 - j36) + (80 - j38) = (128 - j74)A$$

בהזנחה של X_0 (כיוון שלא נתון).

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

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

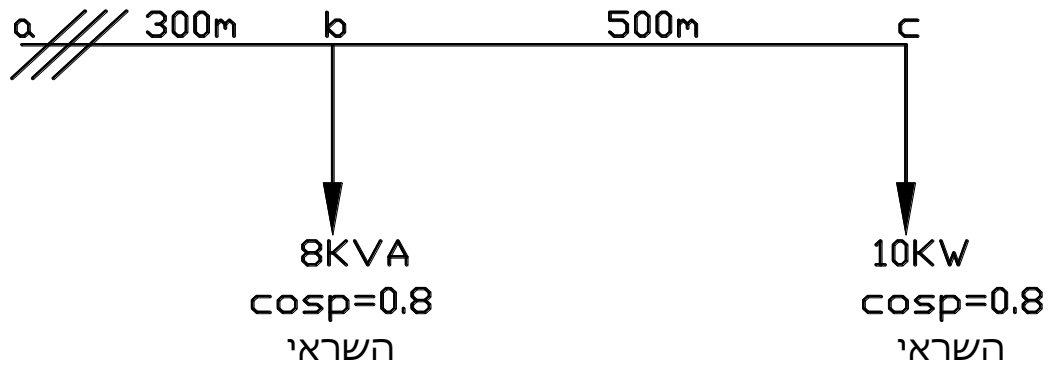
$$A = \frac{\sqrt{3} * 100 * 0.0175}{5 * 400} * (128 * 300 + 80 * 400 + 56 * 200 + 24 * 200) = 130.943 mm^2$$

ב. נבחר שטח חתך מסחרי של $150 mm^2$.

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

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

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



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

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 2

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

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

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

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

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

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

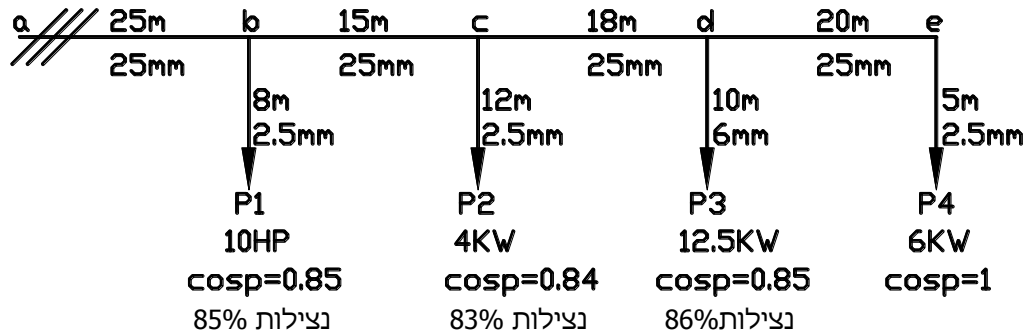
$$\Delta U_a \% = \Delta U_{max} \% - \Delta U_r \% = 3 - 1.628 = 1.372\%$$

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

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

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

נבחר בשטח חתך מסחרי של $95 mm^2$.



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

$$P_1 = \frac{P_b}{\eta_b} = \frac{10 * 736}{0.84} = 8761.90W$$

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

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

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

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

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

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

$$P_{ab} = P_1 + P_{bc} = 8761.9 + 25354.2 = 34116.1W$$

נתון כי ניתן להזניח את ההשראות בקו, המשמעות היא:

$$\Delta U = \Delta U_a$$

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

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

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

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

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

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

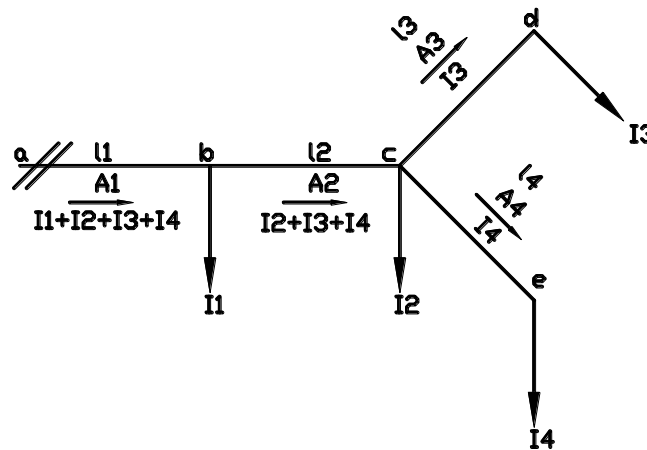
$$\Delta U(a-3) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{14534.9 * 10}{6} \right) = 6.49V$$

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

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

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

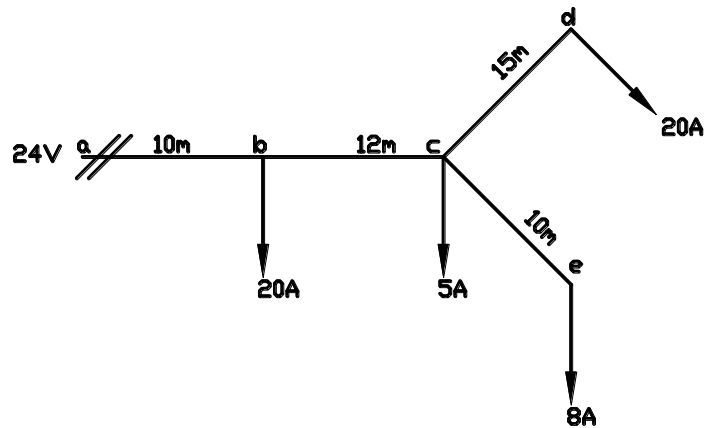
רשת מתפצלות



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

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

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מבניהם.



נתון

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא

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

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

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

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

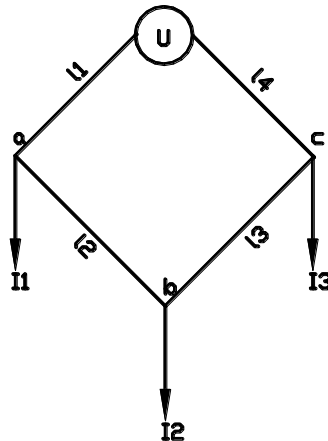
$$A = \frac{200\rho}{\Delta U_{\text{max}\%} * U_n} * \sum I * l$$

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

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

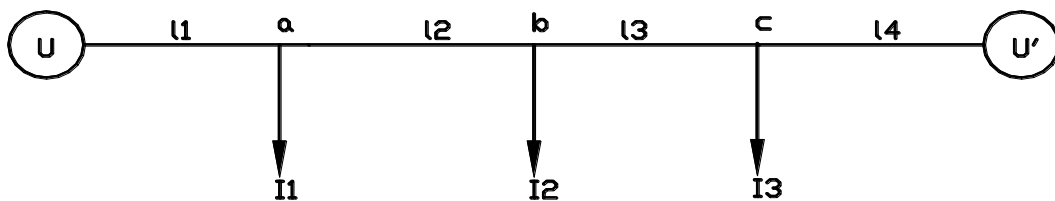
על פי החישוב ניתן לראות כי שטח הגדול האחיד של קטע רשת ad הוא גדול יותר ולפיכך יקבע שטח החתך האחיד של הרשת. נבחר שטח חתך מסחרי של 70mm^2 .

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':

$$I_u = \frac{\vec{I1} * (l2 + l3 + l4) + \vec{I2} * (l3 + l4) + \vec{I3} * l4}{l1 + l2 + l3 + l4}$$

או

$$I_{u'} = \frac{\vec{I1} * l1 + \vec{I2} * (l1 + l2) + \vec{I3} * (l1 + l2 + l3)}{l1 + l2 + l3 + l4}$$

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

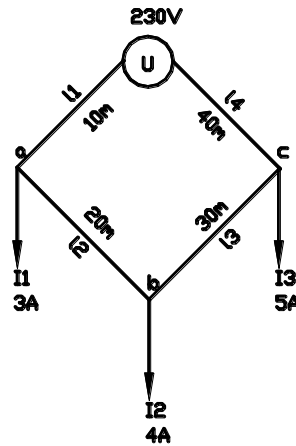
$$I_{ab} = I_u - I1$$

$$I_{bc} = I_{ab} - I2$$

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

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



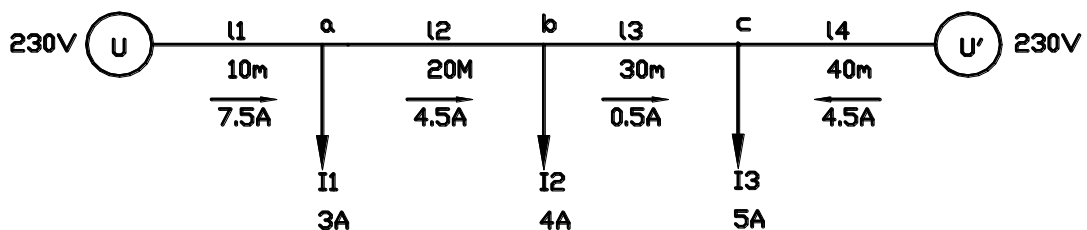
נתון כי:

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

$$A = 4 mm^2$$

חשב ומצא את הנקודה ברשת שבה המתח הוא מינימאלי.

פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

או

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

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

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.

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-

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

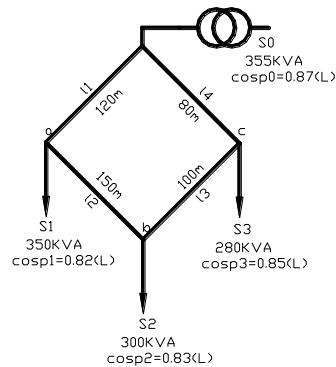
$$\Delta U_{uc} = \frac{2}{4 * 58} * 7.5 * 10 + 4.5 * 20 + 0.5 * 30 = 1.552V$$

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.

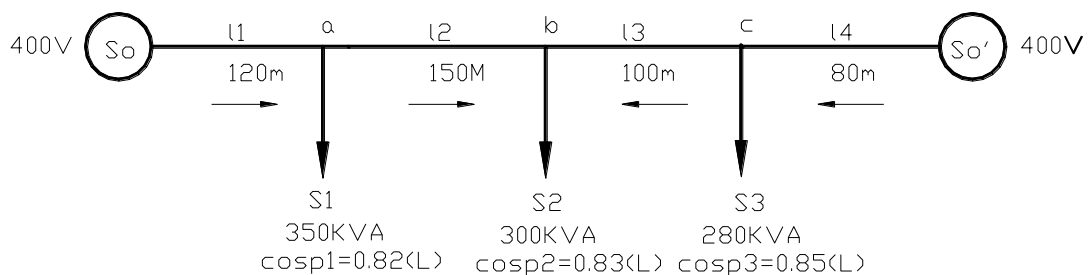
ההיגב האשראי של המוליכים זניח.

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

ב. חשב את המתח בנקודת השפך.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.



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

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

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

$$S_1 = 350 \angle 34.92^\circ KVA$$

$$S_2 = 300 \angle 33.90^\circ KVA$$

$$S_3 = 280 \angle 31.79^\circ KVA$$

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

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

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

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

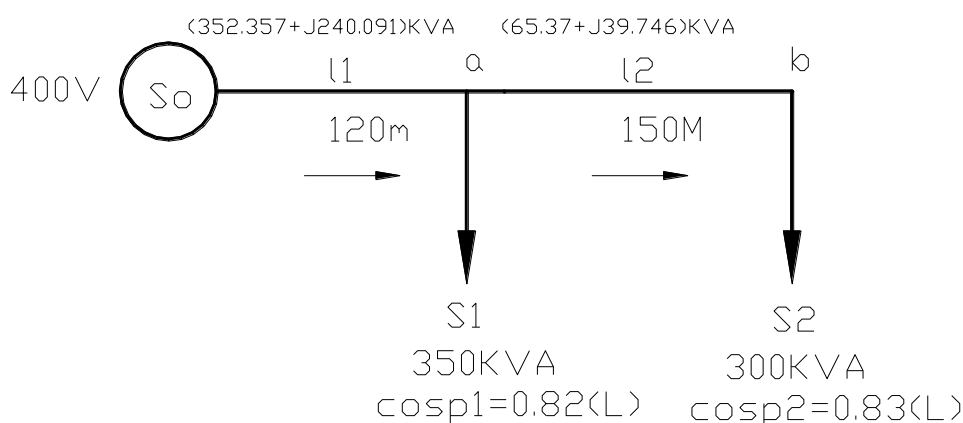
$$S_{bc} = S_{ab} - S_2 = (76.505 \angle 31.30^\circ - 300 \angle 33.90^\circ) * 10^3 = 223.601 \angle -145.63^\circ KVA$$

סימן שלילי בזווית או זווית הגדולה מ- $90^\circ \pm$ 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:

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

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

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



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

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

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

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

נבחר שטח חתך מסחרי של $240 mm^2$.

ב.

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

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

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

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.

תזכורת: התנגדות הסגולית נתונה בד"כ בטמפ' של 20°. אם נתון שטמפרטורת המוליכים היא בטמפרטורה שונה, הדבר משפיע על התנגדות המוליכים R ויש צורך לשקף את התנגדות המוליכים לטמפרטורה הנתונה באמצעות הנוסחה הבאה:

$$R_{T^\circ} = R_{20^\circ} * [1 + \alpha(T^\circ - 20^\circ)]$$

שלב 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	$A = \frac{200\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$
רשת תלת מופעית	זרמי קטעים	$A = \frac{300\rho}{\Delta P\% * P_{l1}} \sum_{i=1}^n I_{li}^2 * l$
	הספקי קטעים	$A = \frac{100\rho}{\Delta P\% * P_{l1} * Un} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$

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:

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

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

l- המרחק מהמקור ועד לצרכן (m).

A- שטח החתך של המוליך (mm^2).

אם ידוע שטח החתך האחיד של המוליכים ניתן לחשב את הפסדי ההספק ע"י שינוי נושא 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:

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

אם סוג המוליכים ושטח החתך אינם אחידים:

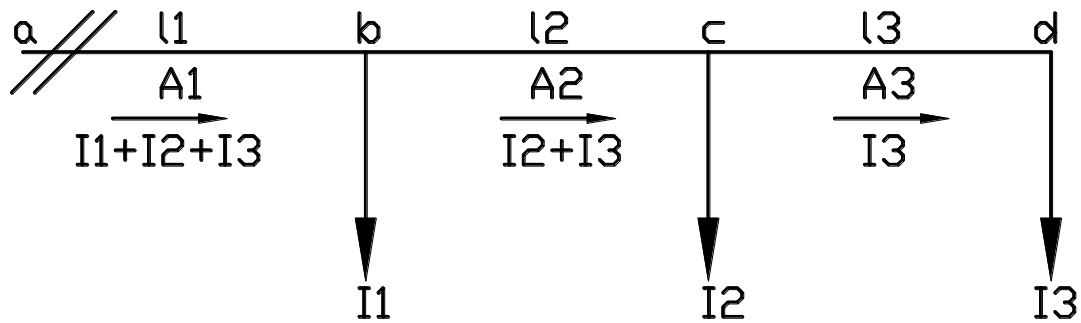
$$\Delta P\% = \frac{200}{P_{l1}} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{li}}{A_{li}} * I_{li}^2 * l$$

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:

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



$$I_{cd} = I_3$$

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

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

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

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

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

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

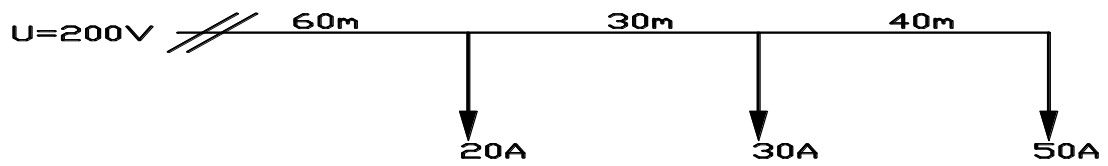
$$\Delta P_{\%} = \frac{200\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

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

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

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת חשמל במתח ישר המתוארת באיור הבא:



נתון:

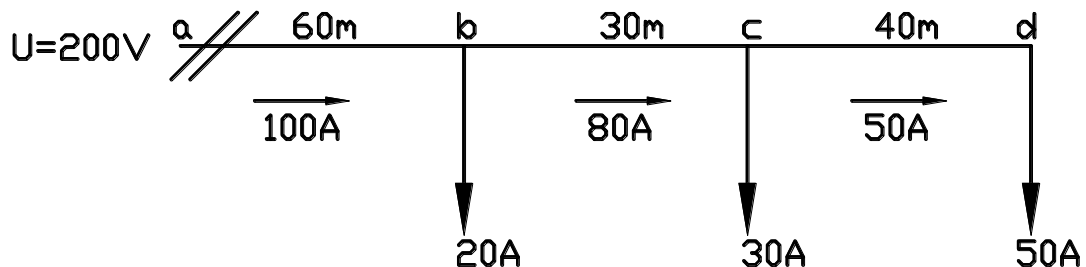
$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

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

מה איבוד ההספק המקסימאלי ברשת ?

האם הרשת כלכלית אם לא הצע פתרון לשיפור ?

פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

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

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

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

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

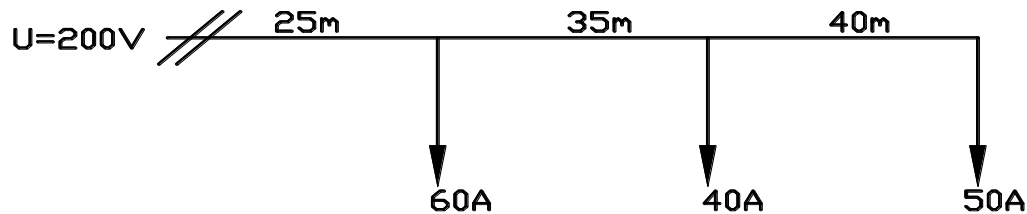
$$P_n = U_n * I_n = 200 * 100 = 20KW$$

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

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

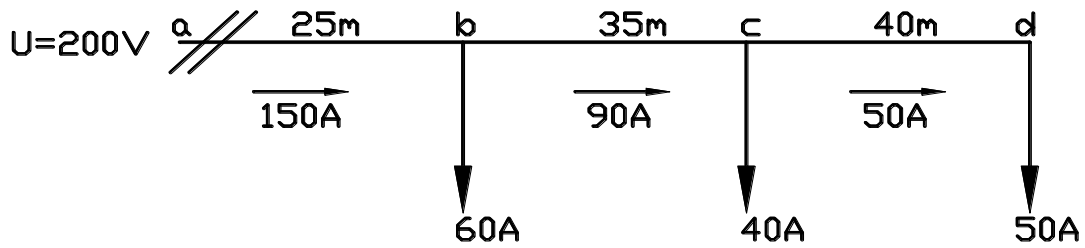
נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

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



א.

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

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

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

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

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

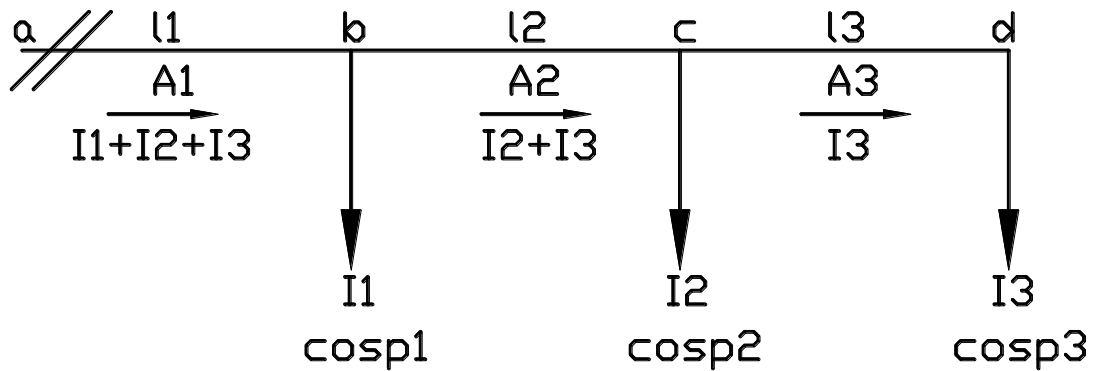
$$A = \frac{200}{6 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 30.92mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$

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

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



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

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

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

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

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

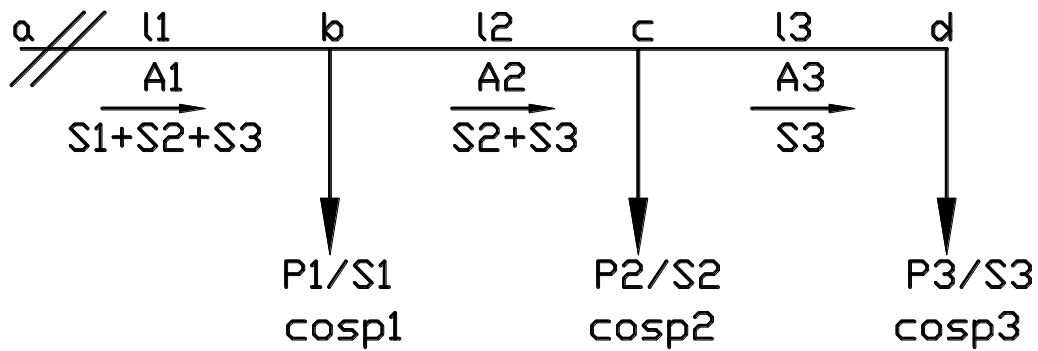
$$\Delta P_{ab} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

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



$$S = U * I$$

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

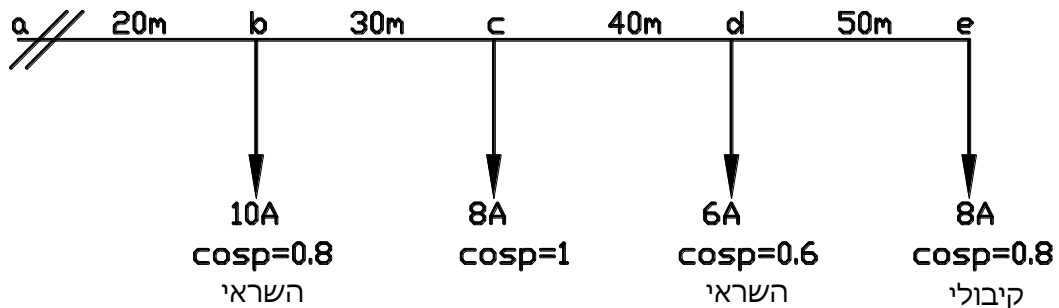
$$Q = U * I * \sin \rho$$

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

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

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

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



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.

$$\vec{I}_e = (6.4 + j4.8) A$$

$$\vec{I}_d = (3.6 - j4.8) A$$

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

$$\vec{I}_b = (8 - j6) A$$

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

$$\vec{I}_{cd} = \vec{I}_d + \vec{I}_{de} = (3.6 - j4.8) + (6.4 + j4.8) = (10 + j0) = \sqrt{10^2 + 0^2} = 10 A$$

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

$$\vec{I}_{ab} = \vec{I}_b + \vec{I}_{bc} = (8 - j6) + (18 + j0) = (26 - j6) = \sqrt{26^2 + 6^2} = 26.683A$$

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 $25mm^2$.

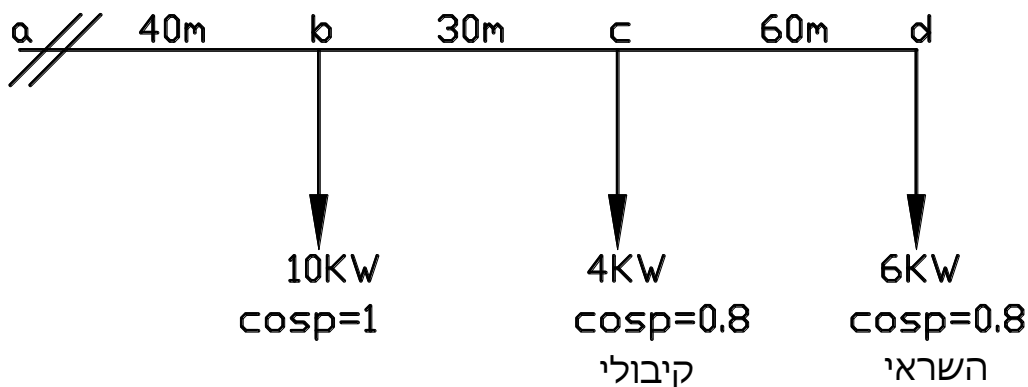
$$\Delta P_{bc} = \frac{2\rho}{A} * I_{bc}^2 * l_{bc} = \frac{2}{25 * 34} * 18^2 * 30 = 22.78W$$

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

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

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.

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

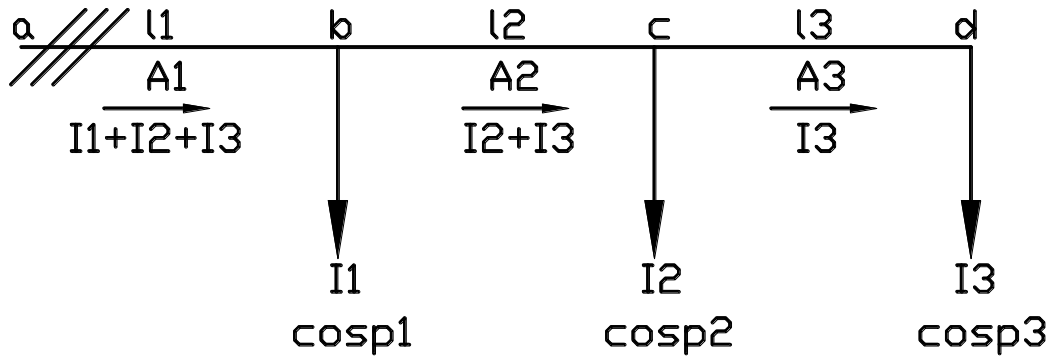
נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$.

ב.

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

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

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



$$\vec{I_{cd}} = \vec{I_3}$$

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

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

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

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

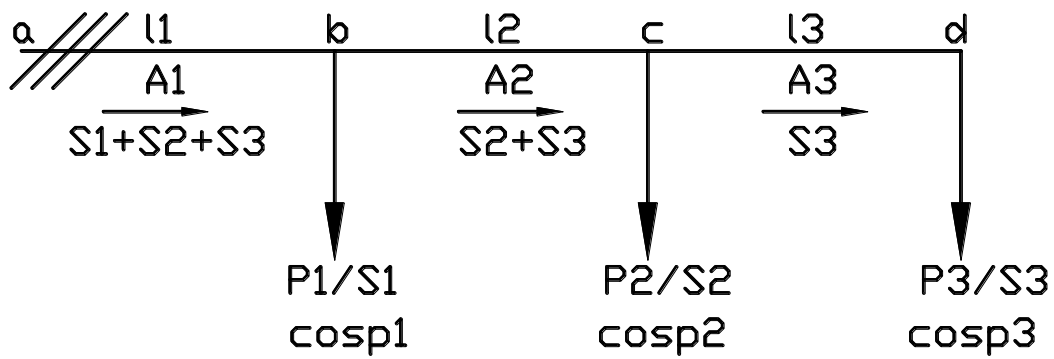
$$\Delta P_{ab} = \frac{3 * \rho^1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

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



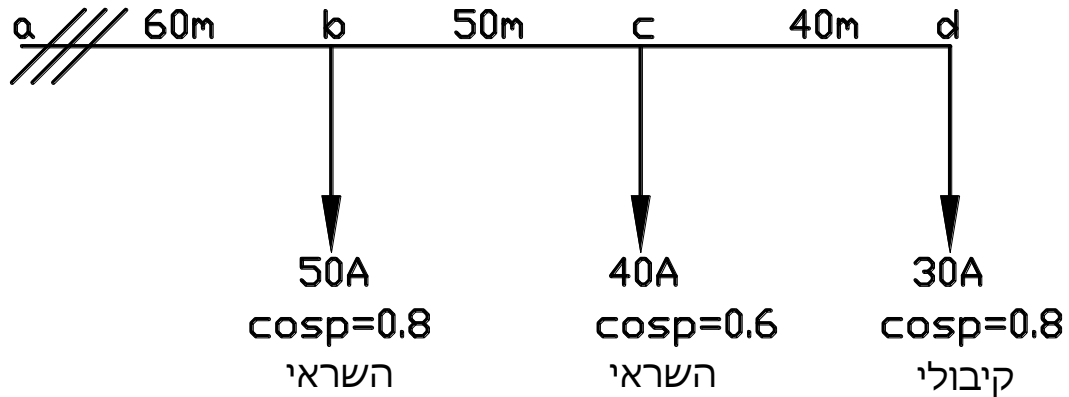
$$S = \sqrt{3} * U * I$$

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

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

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

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



נתון:

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

$$UL = 400V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג.

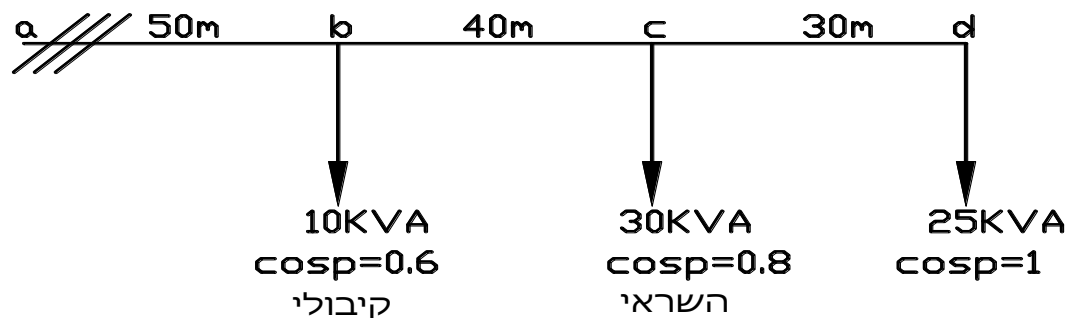
נבחר שטח חתך מסחרי $25mm^2$.

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

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

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.

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.

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

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

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

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.

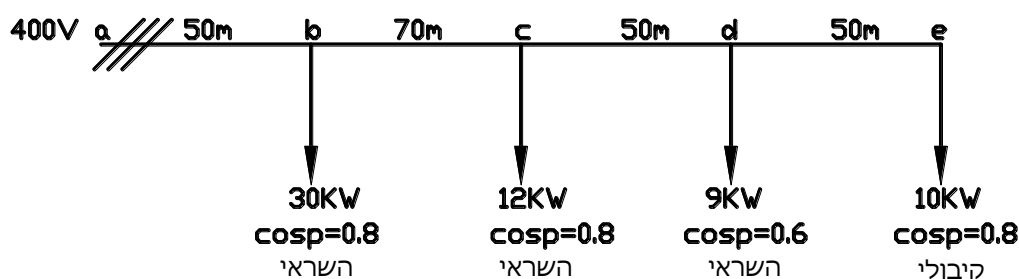
יש לציין כי לא ניתן לבחור חתך מוליך ללא בחירת גודל וסוג המאבטח המגן עליו. נרחיב בנושא זה בפרק הדן בהגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר.

כאשר מותקנים כבלים ללא רווח בניהם או כאשר הטמפרטורה האופפת במקום ההתקנה שונה מהטמפרטורה התקנית (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:

$$I_b \leq I_z' \Rightarrow I_b' = \frac{I_b}{k} \Rightarrow I_b' \leq I_z \text{ בצורה הבאה:}$$

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).

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

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: $I_{b'} \leq I_z$

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

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

נציג את זרמי הקטעים בצורה קרטזית:

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

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

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

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

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

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

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

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.

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

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

מצב זה עומד בדרישות התרגיל.

תרגיל דוגמא 2

מפעל צורך הספק של 150KW במתח של 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 $X_o = 0.02 \frac{\Omega}{\text{km}}$ התנגדותו הסגולית -

$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]$ 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 היגבו האשראי $X_o = 0.06 \frac{\Omega}{\text{km}}$ 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:

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

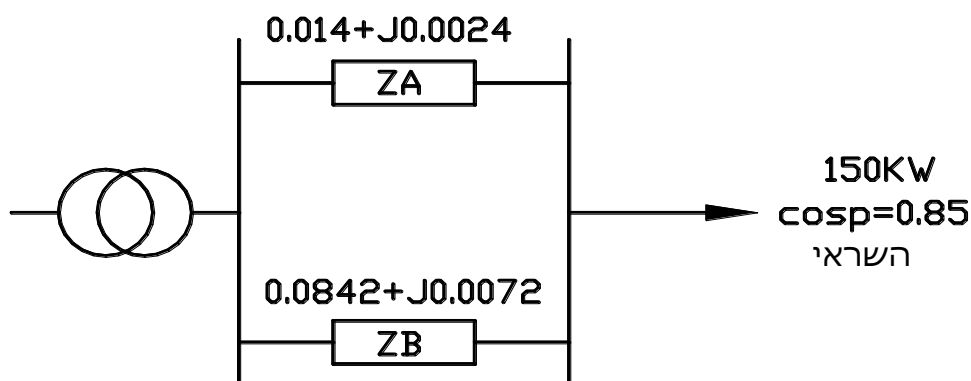
$$X_A = \frac{X_{oA}}{1000} * l_A = \frac{0.02}{1000} * 120 = 0.0024\Omega$$

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

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

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

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



נחשב את זרם העומס:

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

נחשב את הזרמים בכל כבל לפי כלל מחלק הזרם:

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

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

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:

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

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

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.

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:

- קצר תלת מופעי- מגע בין מוליכי שלשת המופעים.
- קצר דו מופעי לאדמה- מגע בין מוליכי 2 מופעים לאדמה.
- קצר דו מופעי- מגע בין מוליכי 2 מופעים.
- 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:

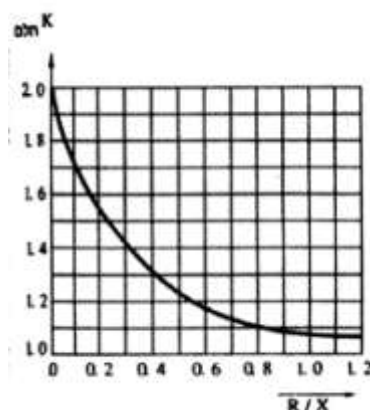
- זרם קצר תלת מופעי- משמש לקביעת כושר הניתוק של המאבטח המגן על מוליכי המעגל.
- זרם הלם- משמש לקביעת עמידות דינמית של הציוד החשמלית.
- זרם קצר חד מופעי- משמש לקביעת זמן הניתוק של מאבטח המגן על מוליכי המעגל מבחינת עמידותם התרמית בעת קצר.

חישובי זרם קצר תלת מופעי וזרם הלם:

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, גנרטור) 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 חיבור טורי של עכבות הרכיבים - $Z_k = \sum Z$

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).

S_n - 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 להזניחה כאשר הספק השנאי הוא 630KVA או יותר. ובמקרה זה מניחים $U_x\% = U_k\%$ או $Z_{TR} = jX_{RT}$.

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).

$$R_L = r_0 * l$$

$$X_L = x_0 * l$$

וכאשר:

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 $X_0=0$.

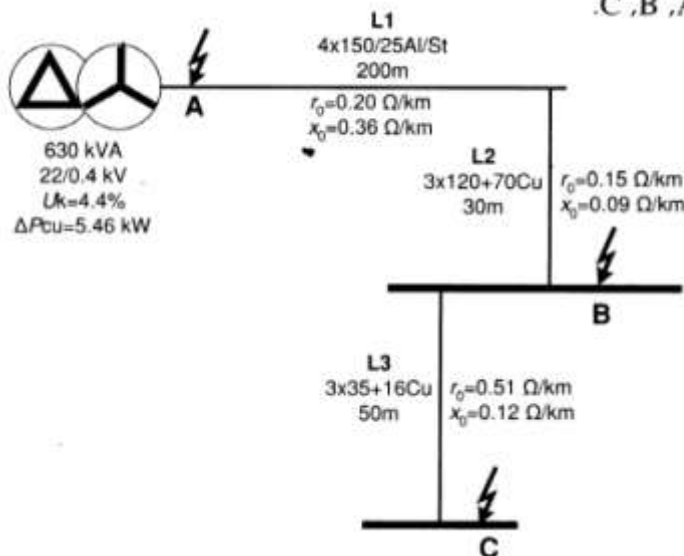
שלבי חישוב של זרם תלת מופעי:

- הצגת הרשת ע"י מעגל תמורה עם סימון נקודת הקצר.
- חישוב העכבות של כל רכיבי המעגל.
- חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודת הקצר הראשונה.
- חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודה השניה וכך הלאה.

תרגיל דוגמא 1

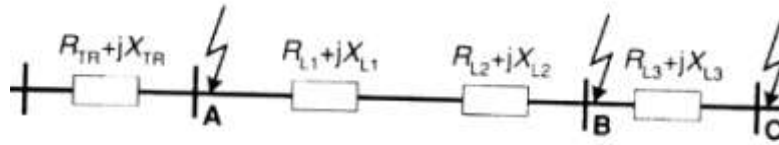
נתון תרשים של מתקן חשמלי במתח נמוך
הלוח הראשי של המתקן מוזן מרשת עלית L1 של חב' חשמל על ידי כבל L2. לוח משנה
"א" מוזן מהלוח הראשי על ידי כבל L3.

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 עכבת השנאי $-Z_{TR}$

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

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

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

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

2. חישוב עכבת הקו $-Z_{L1}$

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

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

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

3. חישוב עכבת הקו $-Z_{L2}$

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

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

$$Z_{L2} = (4.5 + j2.7)m\Omega$$

4. חישוב עכבת הקו $-Z_{L3}$

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

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

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

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

$$Z_{kA} = Z_{TR} = 2.2 + j10.95 = 11.17m\Omega$$

$$I_{kA} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{kA}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 11.17 * 10^{-3}} = 22.743kA$$

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

$$Z_{kB} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} = 2.2 + j11.17 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 =$$

$$Z_{kB} = 46.7 + j85.87 = 97.75m\Omega$$

$$I_{kB} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 97.75 * 10^{-3}} = 2.599kA$$

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

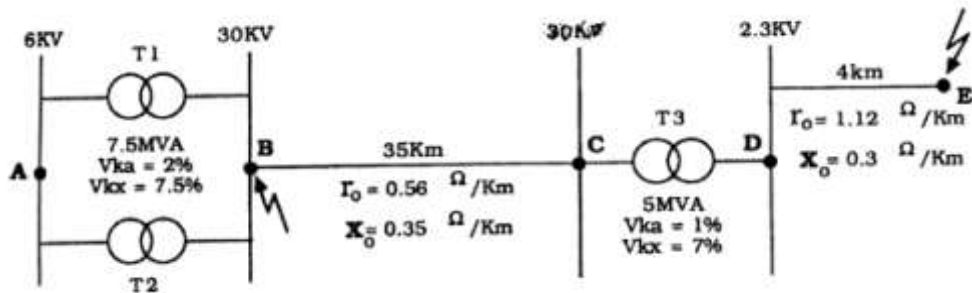
$$Z_{kC} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3} = 2.2 + j11.17 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 + 25.5 + j6 =$$

$$Z_{kC} = 72 + j91.87 = 116.72m\Omega$$

$$I_{kC} = \frac{1.1 * U_n}{\sqrt{3} * Z_{kC}} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 116.72 * 10^{-3}} = 2.176kA$$

תרגיל דוגמא 2

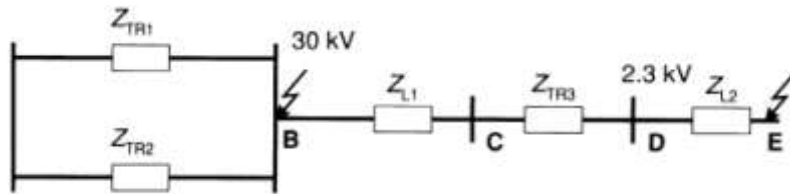
נתונה מערכת של רשת תלת פאזית, השנאים T1 ו-T2 מקבילים זה לזה וזהים כמתואר באיור הבא:



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

פתרון לתרגיל דוגמא 2

נציג את מעגל התמורה של הרשת:



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

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

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

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

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

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

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

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

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

שיקוף העכבה Z_{kc} מממתח $30kV$ לממתח $2.3kV$

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

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

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

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

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

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

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

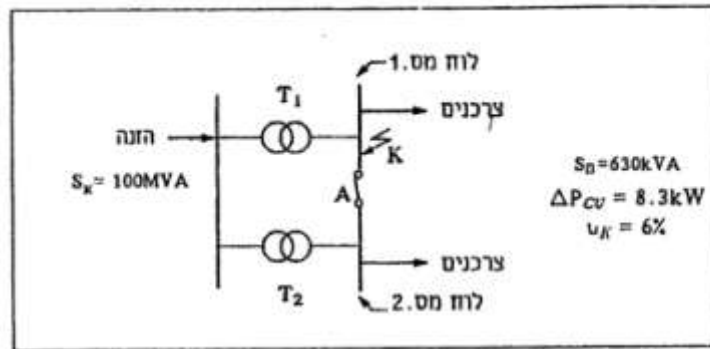
$$Z_{kE} = Z'_{kc} + Z_{TR3} + Z_{L2} =$$

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

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

תרגיל דוגמא 3

המתח בלוחות הראשיים הוא 400V וזנים 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	K _{החוק}

המנתק A המקשר בין 2 הלוחות הראשיים הוא במצב "סגור".
מתרחש קצר תלת מופעי בלוח מס' 1 (בנקודה K).

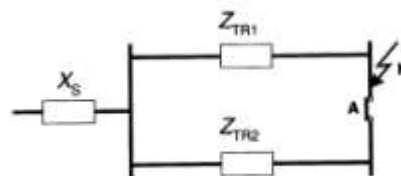
א. חשב את זרם הקצר (ערך אפקטיבי). בנקודת התקלה.

ב. חשב את זרם ההלם המתקיים במנתק 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-



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

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

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

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

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

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

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

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:

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

לפי טבלת מקדם ההלם המצורפת נמצא-

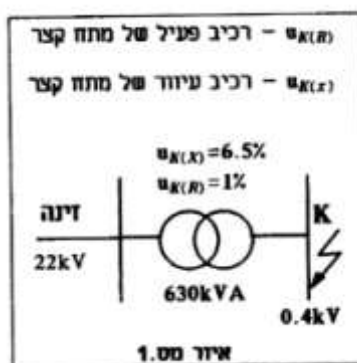
$$k_{shok} \approx 1.5$$

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 הפרעה דרך השנאי הוא בעל מקדם הספק של $\cos\varphi=1$. 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}

חשב את הערך האפקטיבי של זרם הקצר התמידי.

פתרון לתרגיל דוגמא 4

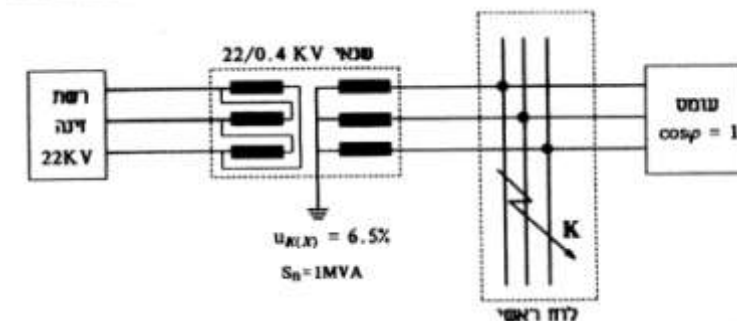
$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{U_{r\%}}{U_{x\%}} = \frac{1}{6.5} = 0.154$$

$$k_{shok} \approx 1.6$$

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

תרגיל דוגמא 5

שנאי רשת בעל הספק נקוב של 1000KVA מזין לוח ראשי 400V כמתואר באיור. מקדם ההספק של העומס הוא $\cos\phi=1$. מתרחש קצר תלת מופעי בפסי הצבירה של הלוח.



- חשב את הערכים האפקטיביים של זרמי הקצר התמידי בנקודת הקצר ובמופעי קו הזינה 22kV.
 - חשב את הספק הקצר המועבר דרך השנאי.
- הערות:
- מזניחים את ההתנגדות האומית של השנאי.
 - עכבת רשת הזינה זניחה יחסית לעכבת השנאי.
 - 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-

$$S_k = \sqrt{3} * I_k * Un = \sqrt{3} * 24.426 * 10^3 * 400 = 16.923MVA$$

פרק 4-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.

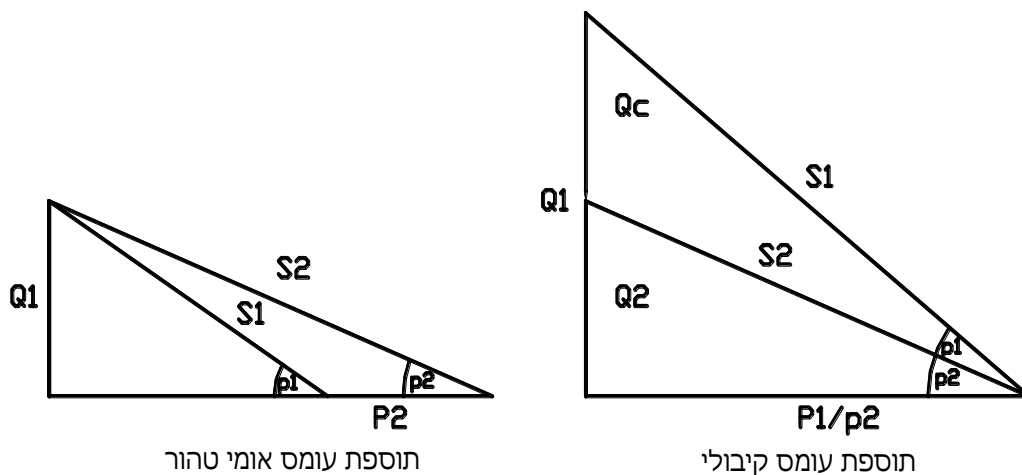
החוק מחייב להתקין במתקן אמצעי שיפור גורם ההספק עבור צרכנים השראתיים עד רמה של 0.92.

הדרכים הטבעיות לשיפור גורם ההספק:

- להתאים את הצרכנים לצריכה הממשית שלהם כדי שהם יעבדו בעומס הנקוב המלא שלהם.
- למנוע מצב בו מנועים אסינכרוניים עובדים בריקם.
- שימוש במנועים או בציוד משופרים בעלי גורם הספק גבוה.

הדרכים המלאכותיות לשיפור גורם ההספק:

- 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.
- חיבור עומסים אומים טהורים הגורמים להגדלת ההספק הממשי ובכך משפרים את גורם ההספק.
- חיבור מנוע סינכרוני העובד בריקם במקביל לצרכנים ההשראתיים הגורם להגדלת ההיגב הקיבולי במתקן ובכך גורם לשיפור גורם ההספק במתקן, (לא כלכלי).



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 משמעותי מההספק הכולל של המתקן.

ב. שיטה קבוצתית:

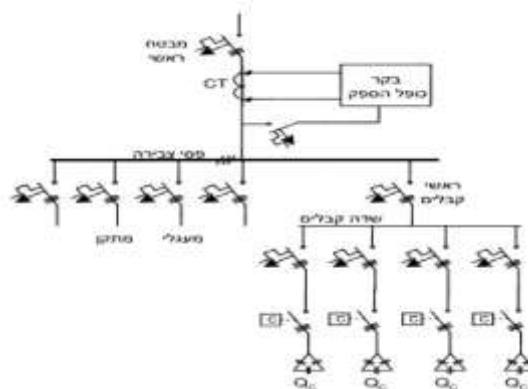
לכל קבוצת צרכנים (בלוח משנה) מותקן קבל לשיפור גורם ההספק
יתרונות בשיטה זו- ההתקנה הקבוצתית משפרת את מקדם ההספק גם בקווים הפנימיים מלוח הראשי עד ללוח המשנה.
כמות הקבלים במתקן יחסית לשיטה הקודמת קטנה.
חסרונות בשיטה זו- כאשר משטר העומס משתנה באופן משמעותי עלול להיווצר או קיזוז חסר ובמצב זה השיפור הוא לא מספק, או קיזוז יתר שמשמעותו שההספק הראקטיבי המופק מהקבל גדול יותר מההספק 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-

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{U n^2 * 6\pi f}$$

בחיבור קבלים בכוכב-

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

כאשר:

Q_c - ההספק של סוללות הכבלים (Var).

P - הספק המתקן (W).

φ - זווית המופע לפני השיפור.

φ - זווית המופע הרצויה.

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 נתרן לחץ גבוה בעלת הספק של 400W מ-0.45 ל-0.92 כאשר מתח הרשת 230V/50Hz.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

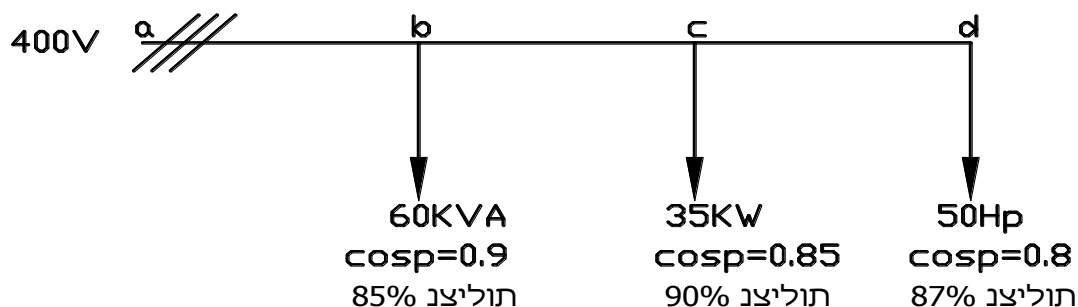
$$\tan \varphi_{\text{קיים}} = \frac{Q_T}{P_T} = \frac{12.84 * 10^3}{12 * 10^3} = 1.07$$

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

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

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.

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

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

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

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

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

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

$$ST = (Pd + JQd) + (Pc + JQc) + (Pb + JQb)$$

$$ST = [(42.299 + J31.724) + (38.889 + J24.101) + (63.529 + J30.769)] * 10^3$$

$$ST = (144.717 + J86.594)KVar$$

$$\tan \varphi_{\text{קיי}} = \frac{QT}{PT} = \frac{86.594 * 10^3}{144.717 * 10^3} = 0.5984$$

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

$$\cos \varphi_{\text{קיי}} = \cos 30.8963 = 0.858$$

ב.

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

$$Qc = P(\tan \varphi_{\text{קיי}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}) = 144.717 * 10^3(0.5984 - 0.426) = 24.949KVar$$

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.

$$Q_C = P_T (\tan \varphi_{\text{קיי}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}) = 210 * 10^3 [0.658 - \tan(\cos^{-1} 0.92)] = 48.927 \text{ KVar}$$

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 בגודל 50KVar

$$I_c = \frac{Q_C}{\sqrt{3} * Un} = \frac{48.927 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 70.62 \text{ A}$$

נבחר במבטח בגודל לפי התנאי: $I_n \geq 1.43 * I_c$

$$I_n \geq 1.43 * 70.62 = 100.987 \text{ A}$$

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

$$I_z = 82 - \text{נבחר בשטח חתך } 25 \text{ mm}^2 \text{ שעבורו -}$$

פרק 5-הגנות על מוליכים בפני זרמי יתר וזרמי קצר

סוגי הגנות

קיימים 3 סוגים עיקריים של מאבטחים:

- נתיכים
- מפסקי זרם אוטומטים זעירים (מא"ז) בלתי מתכווננים.
- 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 גודל הזרם הצפוי במוליך לבין גודל המאבטח וכן שטח החתך של המוליך.

תמיד צריך להתקיים 2 התנאים הבאים:

א.

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

ב. עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L

$$I_2 \leq 1.45I_z$$

עבור מא"זים בעלי אופיין B,C

$$I_2 \leq 1.3I_z$$

עבור מאמ"תים

$$I_2 \leq 1.1I_z$$

כאשר:

I_b - הזרם הצפוי במוליך.

I_n - הערך הנומינאלי של המאבטח.

I_z - הזרם המרבי שמותר להעביר במוליך.

I_2 - זרם הבדיקה הגבוה של המאבטח שהוא נתון יצרן:

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

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

עבור מאמ"תים $I_2 = 1.15I_n$

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

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L

$$1.6In \leq 1.45Iz$$

$$\frac{1.6In}{1.45} \leq Iz$$

$$1.10In \leq Iz$$

עבור מא"זים בעלי אופיין B,C

$$1.45In \leq 1.3Iz$$

$$\frac{1.45In}{1.3} \leq Iz$$

$$1.12In \leq Iz$$

עבור מאמ"טים

$$1.15In \leq 1.1Iz$$

$$\frac{1.15In}{1.1} \leq Iz$$

$$1.05In \leq Iz$$

ניתן לסכם את התנאים בצורה הבאה:

עבור נתיכים או מא"ז בעל אופיין L:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.103In \leq Iz$

עבור מא"זים בעל אופיין B,C:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.115In \leq Iz$

עבור מאמ"טים:

תנאי ראשון: $Ib \leq In \leq Iz$

תנאי שני: $1.045In \leq Iz$

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 $Ik = 10In$. 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 (לדוגמה בזרם קצר).
קיים בשוק בגדלים 3KA, 6KA, 10KA, 15KA

קיימים דגמים שונים של מאמ"תים שהעיקרים שבניהם:

- הגנת מנוע – אביזר זעיר האביזר כולל הגנה תרמית והגנה מגנטית עם אפשרות לכיוון מיועד לזרמים נומינאליים של עד 40A וקיים בשוק בעיקר כתלת קוטביים עם כושר ניתוק בגדלים 22KA,50KA,100KA .
מפסק הספק (ברקר) – אביזר גדול פיזית מיועד לזרמים נומינאליים 25A-6300A כוללים הגנות תרמיות ומגנטיות ניתנות לכיוון וקיים 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 מא"ז מסוג B בעל זרם נקוב של $I_n=25A$ ונבדוק עם הוא עומד בתנאים: תנאי ראשון-

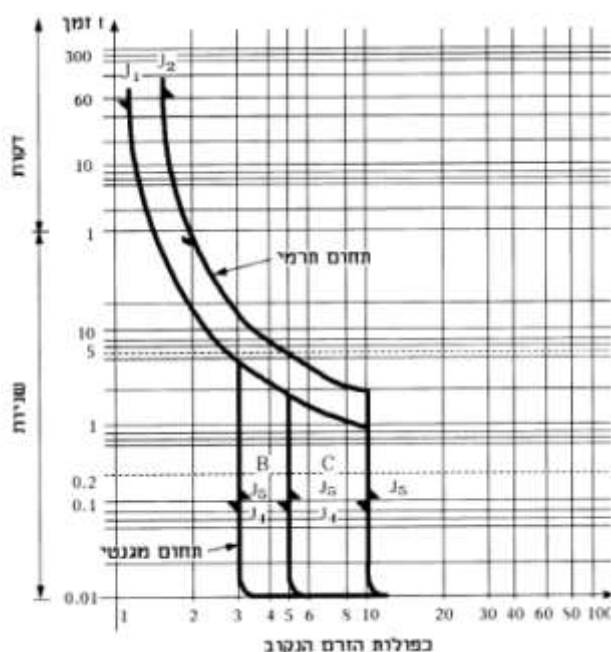
$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$1.12I_n \leq I_z$$

תנאי שני-

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"ם 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-3In ועבור מא"ז מסוג C בזרם קצר הגדול מ-5In וזאת בזמן הקטן מ-5 שניות כהגדרת החוק אך גדול מ-0.1 שניות. עבור זרמי קצר גדולים יותר ניתן לראות כי מא"ז מסוג B ינתק זרם קצר הגדול מ-5In ומא"ז מסוג C ינתק זרם קצר הגדול מ-10In בפחות מ-0.1 שניות.

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני העמסת יתר

שלבי תכנון

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

סוג המעגל	צרכנים רגילים	מנועים
חד מופעי	$I_b = \frac{P}{Un * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{\beta * Pn * (736)}{Un * \eta * \cos \varphi}$
תלת מופעי	$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi}$	$I_b = \frac{\beta * Pn * (736)}{\sqrt{3} * Un * \eta * \cos \varphi}$

כאשר:

P - הספק (W).

Un - 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 שימוש 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 השניה לתקנות של חוק החשמל (העמסה והגנה של מוליכים...) בתוך שיטת ההתקנה יש להגדיר סוג החומר של המוליך (נחושת או אלומיניום), ואת סוג הבידוד (70° או 90°). התוצאה של שלב זה קביעת הטבלה המתאימה לתנאי המעגל.

ד. חישוב ערך נדרש של זרם מרבי מתמיד I_z .

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

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

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

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

ה. בחירת חתך המוליכים המעגל המתוכנן בתנאי סביבה רגילים.

יש למצוא בטבלה שנקבעה בשלב ג' את חתך המוליך בעל הזרם המתמיד המרבי הגבוה או שווה לערך הנדרש שחושב בשלב ד'.

הערה- תנאי סביבה רגילים הם:

1. למוליכים וכבלים שסביבם אוויר-טמפרטורה של 35°C .
 2. 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 גדיים ללא רווח בניהם למעט מוליכי הארקה, בהתקנה חשופה לתנועת לאוויר.
 4. התקנת עד כבל רב גדי אחד בהתקנה חשופה לאוויר
- במידה ותנאי הסביבה אינם רגילים יש צורך בשימוש במקדמי תיקון לקביעת הזרם המרבי המתמיד במוליך 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 מטבלה 17 שבתקנות החשמל.
2. כאשר טמפרטורת הקרקע הסביבתית שונה מ- 30°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי Iz שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מטבלה 18 שבתקנות החשמל.
3. כאשר מותקנים יותר מ-3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גדיים 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 מטבלה 15 שבתקנות החשמל.
4. כאשר מותקנים כבלים רב גדיים 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 מטבלה 16 שבתקנות החשמל.

תרגיל דוגמא 1

נתונים 6 מפוחים תלת פאזיים זהים בעלי הנתונים הבאים:

$$Un=400V; Pn=800W; \cos\varphi=0.78; \eta=0.82$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

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

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

ב. נקבע את סוג וגודל המאבטח.

קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

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

ג. נמצא בתוספת השניה- שיטת התקנה "ה", 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 שבטבלה 16 וטבלה 17-

נבחן את המוליך הנבחר ב-2 התנאים:

$$I_b \leq I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.8 < 2 < 11 \Rightarrow o.k.$$

$$1.045I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.045 * 2 < 11 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר כבל של $4 \times 1.5 N2XY$ עבור כל מפוח המאבטח במאבטח מסוג "הגנת מנוע"

בעל הגנה תרמית מכוילת 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 $I_u = 160A$ בעל

כיוון ההגנה התרמית $I_r = 125 \div 160A$, נכוון את המאבטח ל-150A.

על פי שיטת ההתקנה ט"ז שבתוספת השניה 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:

$$1.045I_n \leq I_z$$

$$1.045 * 150 \leq 164 \Rightarrow o.k.$$

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°C מותקנים במקובץ בתעלה צרה סגורה בטמפ' סביבתית של 45°C , הלוח מוזן ע"י כבל אלומיניום בעל בידוד 90°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 ה' 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.

כיוון ש-10 הכבלים מונחים במקובץ לכן- $k_{16} = 0.48$

וכיוון שהטמפרטורה האופפת היא 45°C לכן- $k_{17} = 0.9$

לכן I_z לאחר התיקון הוא:

$$I'_z = I_z * k_{16} * k_{17} = 18 * 0.48 * 0.9 = 7.776A$$

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:

$$1.045I_n \leq I_z$$

$$1.045 * 1.8 < 7.776 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג הגנת מנוע מכויל 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 יד' 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:

$$1.115 I_n \leq I_z$$
$$1.115 * 20 < 43 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג מא"ז 20A בעל אופיין C וכבל בעל שטח חתך של 6mm^2 .

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 ליבון ללא קבלים לשיפור $\cos \varphi$	1-1.6	0.002	אין
נורות ליבון 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:
שנאי חלוקה	10-15	0.002-0.004	בחירת נתיך מתח גבוה לפי:
מנוע השראה	5-7	2-5	מומלץ לבדוק לפי התנאי:

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.

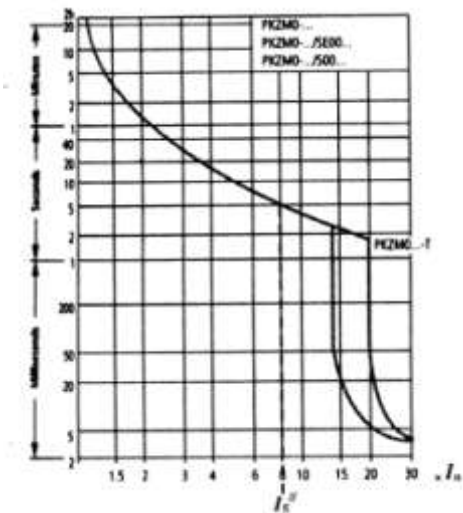
ערכים של זרם התנעה מופיעים בקטלוגים של מנועים ככפולות הזרם הנקוב:

זרם I_5'' ניתן לקבל מאופיינים של מבטחים.

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). 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 (ההגנה המגנטית) של המבטח נמצא בתחום: $I_m = (14 - 20) * I_n$.
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:

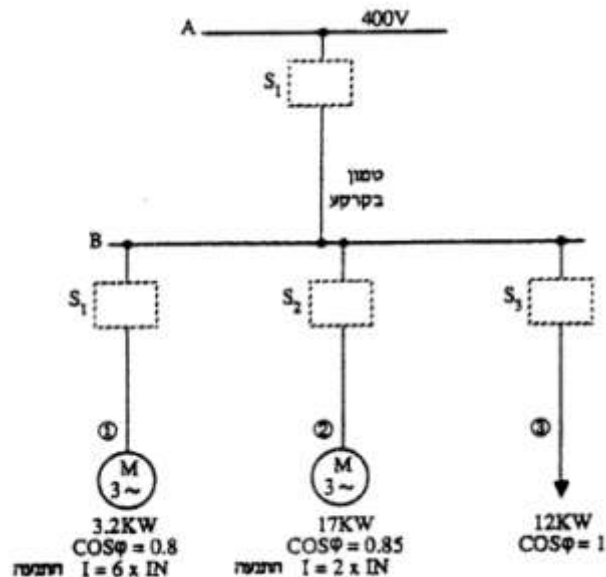
- מנוע ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכיול- ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר המנוע מוזן באמצעות מעגל בלעדי ומעגל הפיקוד נמצא בלוח המזין. ההגנה על המנוע ועל מוליכי המעגל בפני זרם העמסת יתר ובפני זרם קצר מתבצעת ע"י המפסק. יש לכייל את ההגנה התרמית של המפסק לזרם המנוע, זרם זה יהווה את הזרם הנקוב של המבטח, ולפיו מתכננים את חתך מוליכי המעגל, בנוסף בודקים את התאמת המפסק להגנה על המעגל בפני זרם קצר.
- 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.
- מנוע מוגן ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכוונון או ממסר יתרת זרם ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי או מא"ז-

קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

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 בניהם 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:



- 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 התקנה "ז" עבור הזנות הצרכנים 1-3 המותקנים בתוך צינור, נבחר בטבלה - 90.1 :

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:

$$1.045I_n \leq I_z \Rightarrow 1.045 * 6 = 6.27 < 18A \Rightarrow o.k.$$

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:

$$1.045I_n \leq I_z \Rightarrow 1.045 * 30 = 31.35 < 33A \Rightarrow o.k.$$

נבדוק התאמתו לזרם ההתנעה:

$$I_{st} = 2 * I_n = 2 * 28.868 = 57.74A$$

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:

$$1.115I_n \leq I_z \Rightarrow 1.115 * 20 = 22.3 < 24A \Rightarrow o.k.$$

עבור ההזנה הראשית- לפי שיטת התקנה "יד" 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:

$$1.045I_n \leq I_z \Rightarrow 1.045 * 63 = 65.8 < 76A \Rightarrow o.k.$$

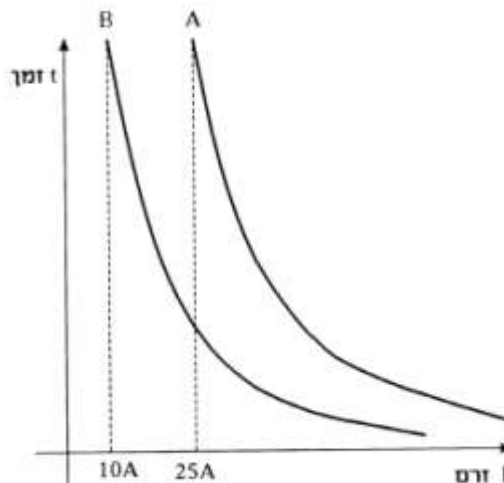
סלקטיביות בהפעלת מאבטחים

סלקטיביות זרם

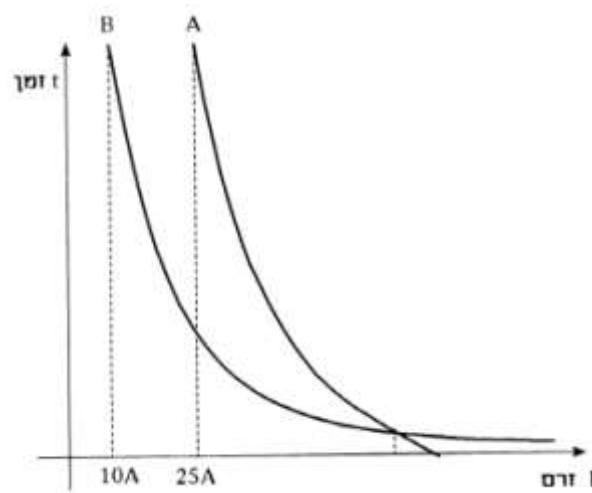
פעולת מאבטחים נחשבת סלקטיבית כאשר במקרה של הופעת זרם יתר במעגל יפעל אך
ורק המאבטח הקרוב ביותר למקום התקלה. לפי עקרון זה הזרם הנקוב של כל מאבטח
חייב להיות קטן מהזרם הנקוב של המאבטח המותקן לפניו (ביחס למקור המתח).

התנאים לסלקטיביות זרם:

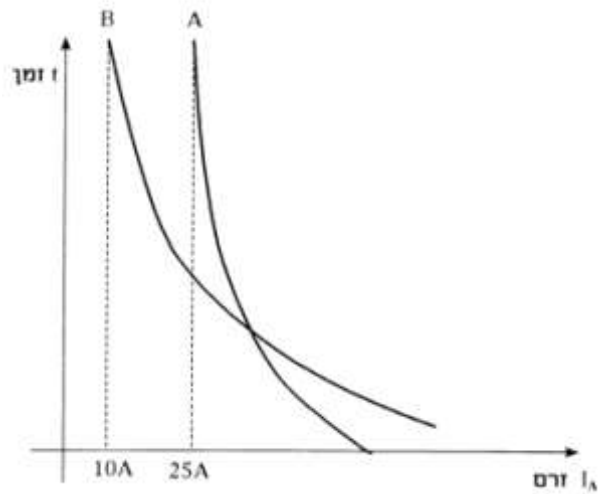
- במקרה של תקלה במערכת התקני ההגנה בפני זרם יתר צריכים לפעול ולנתק רק את
המעגל המושפע מהתקלה.
- זרמי מעבר של העומסים אינו צריך לגרום לניתוק המעגל.
- מערכת סלקטיבית צריכה להיות מתוכננת כך שאם המאבטח הקרוב למקום התקלה
אינו פועל צריך המאבטח המותקן לפניו לפעול ולנתק את הזרם המעגל.
כאשר לא קיימת נקודת מפגש 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:



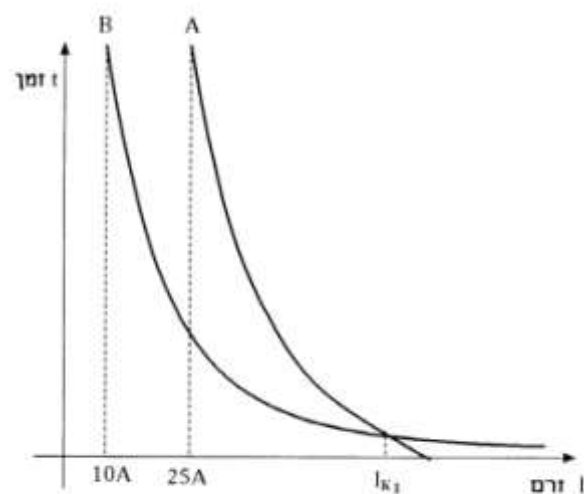
דוגמא לסלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים (רק בתחום ההגנה התרמית):



דוגמא לחוסר סלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים:



דוגמא לסלקטיביות בין 2 נתיכים אם זרם הקצר במתקן קטן מ- I_{k1} .

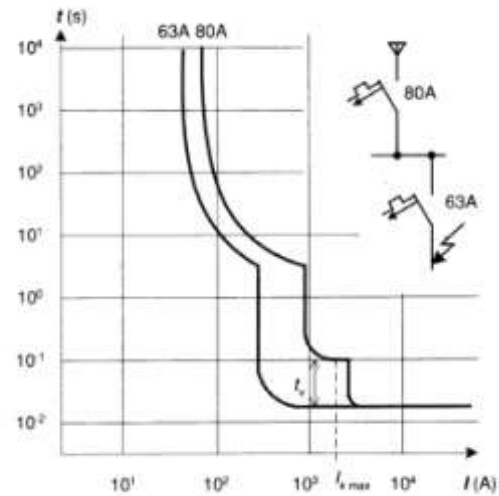


סלקטיביות זמן

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 כיול לזמן תגובה מגנטי עבור זרמי הקצר. זמן זה מוגדר t_v .

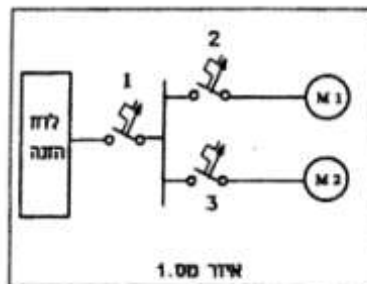
פעולת מאבטחים תהיה סלקטיבית כאשר זרם הקצר המרבי הצפוי בהדקי המאבטח הקטן יותר תהיה בתחום ההשהיה של המפסק הגדול יותר.

דוגמא לסלקטיביות זמן מלאה בין 2 מאבטחים:



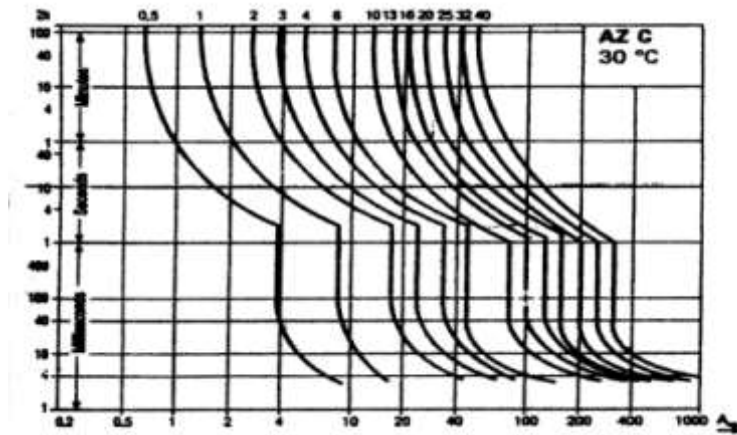
תרגיל דוגמא:

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 (%)	$\cos \phi$	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.

$$I_{nM1} = \frac{P_{M1} * 736}{\sqrt{3} * Un * \eta_{M1} * \cos \varphi_{M1}} = \frac{7.5 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.9 * 0.92} = 9.623A$$

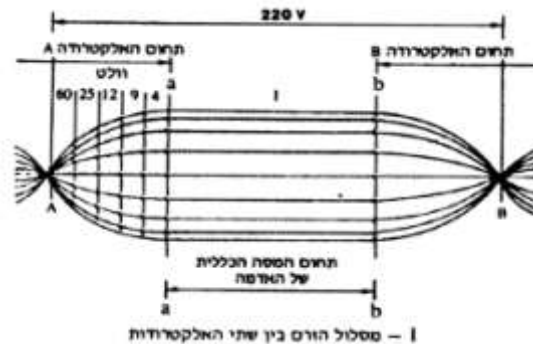
$$I_{nM2} = \frac{P_{M2} * 736}{\sqrt{3} * Un * \eta_{M2} * \cos \varphi_{M2}} = \frac{3 * 736}{\sqrt{3} * 400 * 0.85 * 0.92} = 4.075A$$

$$\vec{I}_{nT} = \vec{I}_{nM1} + \vec{I}_{nM2} = 9.623 \angle 23.07^\circ + 4.075 \angle 23.07^\circ = (13.698 \angle 23.07^\circ)A$$

- 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.

פרק 6-הארקות והגנות בפני התחשמלות

מסה כללית של האדמה:



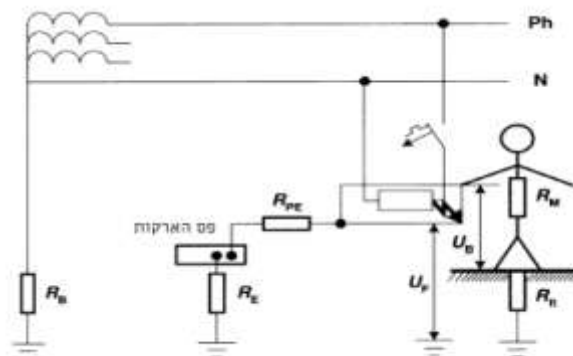
תחום האדמה המרוחק מאלקטרודת הייחוס במידה כזאת, שהמתח בין נקודות כלשהן בתחום זה הנו זניח. כאשר קיים מתח בין 2 אלקטרודות באדמה A ו-B, עובר בניהם זרם / מתח הנמדד בין האלקטרודה A לבין נקודה כלשהי באדמה, הנמצאת בין 2 אלקטרודות, גדל ככל שמתרחקים מהאלקטרודה A. זהו תחום השפעת האלקטרודה ואורכו נחשב שווה לעומק באלקטרודה (בקירוב). התחום בין הנקודות a ו-b שבו המתח לא משתנה נקרא "המסה הכללית של האדמה".

מתח תקלה:

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

מתח מגע:

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



כאשר:

- R_B - התנגדות הארקה שיטה.
- R_E - התנגדות אלקטרודת הארקה.
- R_{PE} - התנגדות מוליך הארקה.
- R_M - התנגדות גוף האדם.
- R_{FI} - התנגדות הרצפה.
- U_F - מתח תקלה.

קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

U_B - מתח מגע.

השפעת זרם חשמלי על גוף האדם:

התחשמלות היא מעבר של זרם מעל רמה מסוימת דרך גוף האדם. עוצמת זרם החשמול תלויה במתח המגע ובהתנגדות גוף האדם, אך התנגדות גוף האדם אינו ערך קבוע ומשתנה כפונקציה של מתח המגע. הטבלה הבאה מציגה עבור כל אחד ממתחי המגע הצפויים במתח נמוך את עכבת גוף האדם המתאימה, ואת זרם החשמול המותר שעדין לא יגרום להיווצרות תופעות פיזיקאליות מזיקות לגוף האדם :

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

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

מטרות מערכת הארקה:

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

נזקי התחשמלות:

- התכווצויות בלתי רצוניות של שרירים.
- פגיעה במערכת העצבים.
- כוויות.
- מוות.

רמת הנזק מושפעת מהעוצמת ומשך הזמן של הזרם הזורם דרך גוף האדם. לפי סטטיסטיקה שנערכה נקבע כי זרם העולה על 30mA במשך לפחות 5sec גורם לנזק בלתי הפיך לגוף האדם. לשם כך אנו זקוקים להגנות להגנה בפני התחשמלות.

אמצעי הגנה בפני חשמוול

אמצעי הגנה בפני חשמוול המותרים לשימוש במדינת ישראל הם:

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

1. הארקת הגנה

הרעיון בהארקת ההגנה ליצור מסלול חלופי לזרם התקלה. מסלול זה צריך להיות בעל התנגדות נמוכה מאוד ביחס להתנגדות גוף האדם כך שבעת תקלה רוב הזרם יעבור במסלול זה ולא דרך גוף האדם.

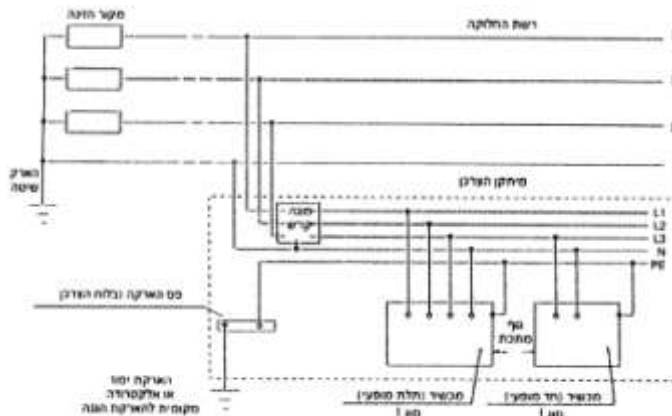
להתנגדות הנמוכה של מסלול התקלה יש חשיבות נוספת והיא להפעיל את ההגנות במהירות וזאת כתוצאה מזרם קצר גבוה העובר במסלול התקלה.

מסלול התקלה הוא ממקור המתח למתקן דרך הגוף התקול וחזרה למקור.

מקור מתח למתקן הוא השנאי. הצד השניוני של השנאי מחובר בצורת כוכב ונקודת הכוכב של השנאי מחוברת לאדמה באמצעות אלקטרודה. חיבור זה נקרא הארקת שיטה.

להארקת השיטה 2 תפקידים:

1. לאפשר את מסלול התקלה של זרם הקצר.
2. כאשר העומסים במתקן אינן סימטריות בין הפאזות השונות קיימת תזוזת בנקודת האפס במתקן כך שנוצר מצב שבו המתחים בין הפאזות לבין האפס במתקן אינו נשמר ותפקיד הארקת השיטה לדאוג לייצוב המתח במתקן בכך דואגת שהמתח על כל צרכן במתקן נשמר המתח הנומינאלי של השנאי. באופן מעשי הארקת השיטה מבוצעת בשנאי וכן על מוליך האפס לאורך הרשת.



לכל גוף מתכתי במתקן יש צורך לחבר מוליך הארקה כדי לאפשר את מסלול התקלה. מוליך הארקה זה מחובר דרך פס השוואת פוטנציאלים באמצעות אלקטורודה לאדמה. בזמן תקלה המתח מהשנאי דרך מוליך המופע מופיע על גוף הצרכן. מכיוון שגוף הצרכן מחובר לאדמה נוצר זרם תקלה זרם זה דרך מסת האדמה חוזר לשנאי לנקודת הכוכב.

כתוצאה מהתנגדות הנמוכה של מסלול התקלה מתפתח זרם תקלה גבוה הגורם בזמן קצר מאוד להפעלת ההגנות ובכך לגרום לניתוק המתח לצרכן התקול.

בעבר השתמשו הצנרת המים המתכתית במתקן כאלקטרודה לחיבור מוליכי הארקה של המתקן לאדמה כיוון שצנרת זו טמונה באדמה ויתרונה הגדול בעצם קיומה ובך היא הבטיחה מסלול תקלה לאדמה צורה זולה. עם השנים החלו להשתמש בצנרת מחומרים בעלי הולכה חשמלית גרועה (כדוגמת צנרת פלסטיק) וכתוצאה מכך פגעו באיכות הארקה הגנה. כדי לפתור בעיה זו מצאו פיתרון מעשי זול וזאת להשתמש בברזלי הזיון של הבניין כאלקטרודה לחיבור לאדמה. פתרון זה נקרא הארקה יסוד והוגדרו בחוק החשמל קובץ של תקנות עבור חיבור זה.

הארקה יסוד- מטרתה לבנות רצף חשמלי בין המבנה לאדמה בעל התנגדות נמוכה שאינו עולה על 5Ω .

הארקה היסוד בנויה מ-3 חלקים עיקריים:

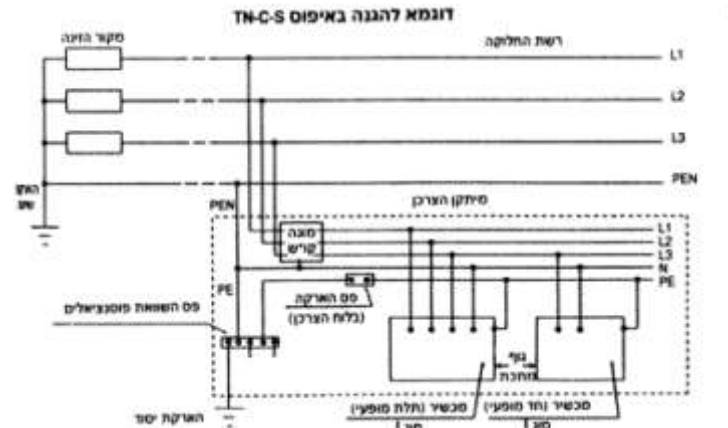
1. אלקטרודת הארקה היסוד- הם בעצם ברזלי הזיון הנמצאים בכלונסאות המבנה לפי המתואר בתקנות החוק החשמל.
2. טבעת הגישור- חיבור (כדוגמא באמצעות ריתוך) של ברזלי הזיון כלפי עצמם וכלפי אלקטרודת היסוד, וזאת בתנאים העיקריים הבאים:
 - א. יש להבטיח פחות מ-10 מ' מכל נקודה בתווך לטבעת הגישור.
 - ב. יש להוציא 5 יציאות מטבעת הגישור 1 לכל כיווני 4 רוחות השמים ו-1 לפס השוואת הפוטנציאליים.
 3. פס השוואת הפוטנציאליים- פס נחושת מלבני בהתאם לתקנה בחוק החשמל ומטרתו אמצעי חיבור בין כל חלקי המתכת במבנה לצורך השוואת הפוטנציאל שלהם לאדמה.

2. שיטת האיפוס

כפי שהוסבר השימוש בהארקה ההגנה מותנה בכך שלולאת התקלה תהיה נמוכה מאוד והיא תלויה גם מגודל המפסק הראשי של המתקן. כך שככל שהמפסק הראשי גדול יותר התנגדות לולאת התקלה צריכה להיות נמוכה יותר לאפשר את הפעלת ההגנות בזמן. ובנוסף התנגדות לולאת התקלה מושפעת גם מסוג צפיפות ורמת הלחות של הקרקע עצמה. באופן מעשי לעיתים יש קושי רב בהשגת רמת התנגדות תקינה של לולאת התקלה. הפתרון הפשוט והזול להתגבר על כך הוא שיטת האיפוס ובאופן מעשי יש לחבר את מוליך האפס הראשי של המתקן לפס השוואת הפוטנציאליים ובכך לרתום את מוליך האפס למסלול לולאת התקלה ובכל לשמור על רמת התנגדות נמוכה המבוססת על רצף התנגדות מוליכים בלבד שהם כידוע נמוכות מאוד ובכך שיתפתח זרם קצר גבוה שיבטיח את הפעלת ההגנות של המעגל.

חסרונה של שיטה זו בשימוש במוליך האפס של בעל הרשת ואין באפשרותנו להבטיח את שלמותו בכל עת. כך שעם קריעתו לא נדע כי נחשפנו לסכנת התחשמלות. ולכן החוק מחייב ששימוש בשיטת האיפוס היא בנוסף להארקה ההגנה וזאת בתנאים הבאים:

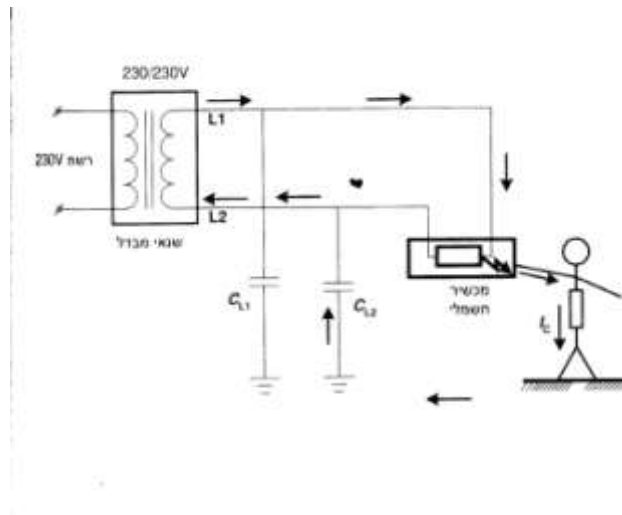
- א. התנגדות הארקה ההגנה (בלבד ללא שיטת האיפוס) לא תעלה על 20Ω .
- ב. באישור בעל הרשת (לדוגמא ח"ח) אשר מבטיח חתך מתאים למוליך האפס.
- ג. קיימת במתקן השוואת פוטנציאליים של כל חלקי המתכת.
- ד. חיבור שיטת האיפוס בהתאם לתקנות.



3. הפרד מגן

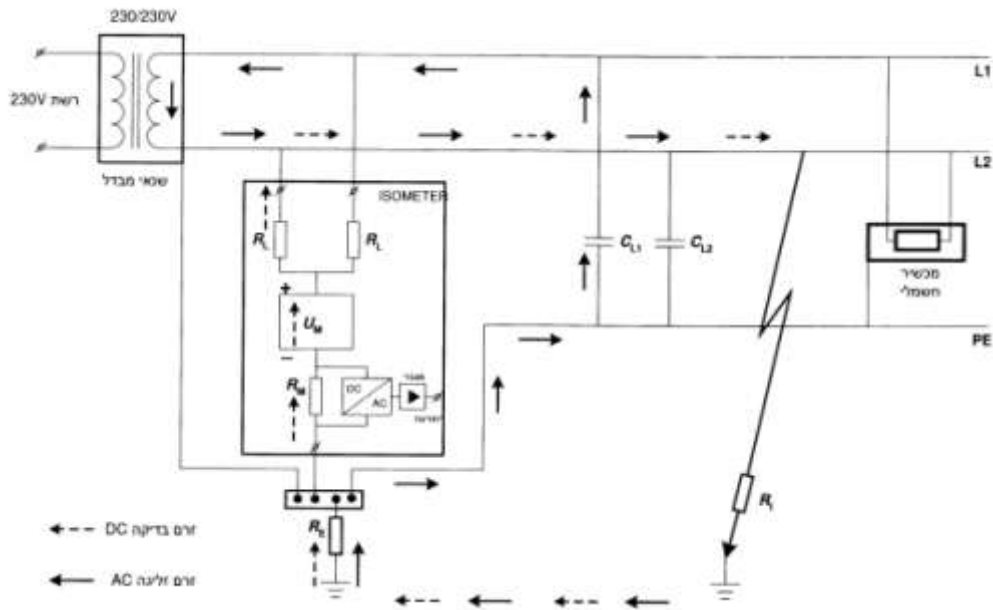
הרעיון בשיטה זו למנוע אפשרות של סגירת מעגל תקלה דרך האדמה ע"י הפרדת הצרן מהארקת השיטה. התנאים בשימוש בשיטה זו הם:

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



4. זינה צפה

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



כל הגופים המתכתיים מגושרים בניהם באמצעות מוליך ההגנה PE אשר מאורק לאלקטרודה הארקה או לפס השוואת הפוטנציאלים. הודות להיעדרות הארקת שיטה, לא נוצר מעגל לולאת תקלה במקרה של ליקוי בבידוד, אך מופיע זרם קיבולי לאדמה.

לדוגמא-אם מתרחש ליקוי בבידוד מוליך מופע L2, הזרם יזרום מהשנאי דרך האדמה למוליך ההגנה PE ודרך קיבוליות הרשת C_{L1} ובחזרה לשנאי. זרם הזליגה זה יכול לגרום להיווצרות מתח תקלה השווה למפל המתח על ההתנגדות בין הארקה לבין המסה הכללית של האדמה R_E. המשגוח מצויד במקור מתח U_M אשר במקרה של תקלה בבידוד יגרום לזרימת זרם DC דרך מוליך הרשת L2, האדמה, ההתנגדות הארקה ובחזרה למשגוח. על הנגד R_M ייווצר מפל מתח, שערכו תלוי בהתנגדות הבידוד R_i- ככל שהתנגדות הבידוד נמוכה יותר כך המתח על נגד R_M יהיה גדול יותר. תפקיד המשגוח הוא להתריע כאשר התנגדות הבידוד יורדת מתחת לערך מסוים. הסכנות בשימוש בשיטה זו הם:

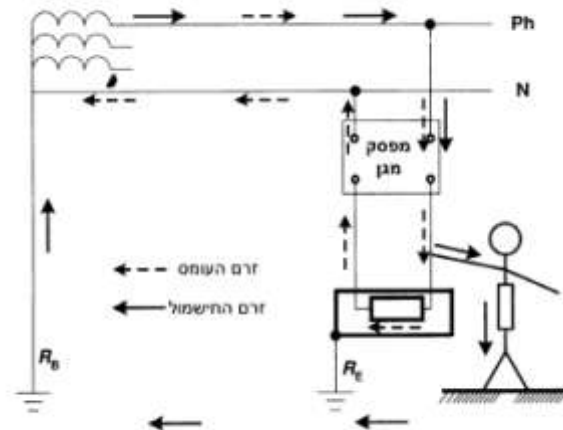
- יש צורך בייצוב מתח (כיוון שאין הארקת שיטה).
- ברגע שיש יותר מתקלה אחת בו זמנית יש סכנת התחשמלות.
- תקלות מסוימות בצרכן לא תפעיל את ההגנות ולא יהיה ניתן לדעת על קיומה של התקלה.

התנאים לשימוש בשיטה זו הם:

- שימוש באזור מוגבל תחת השגחה רצופה של חשמלאי מורשה.
- שימוש בצידוד עזר המתריע בעת הופעת תקלה כגון "משגוח".

שיטה זו נפוצה בשימוש בהם נדרשת אמינות הספקה גבוהה כגון חדרי ניתוח ועוד.

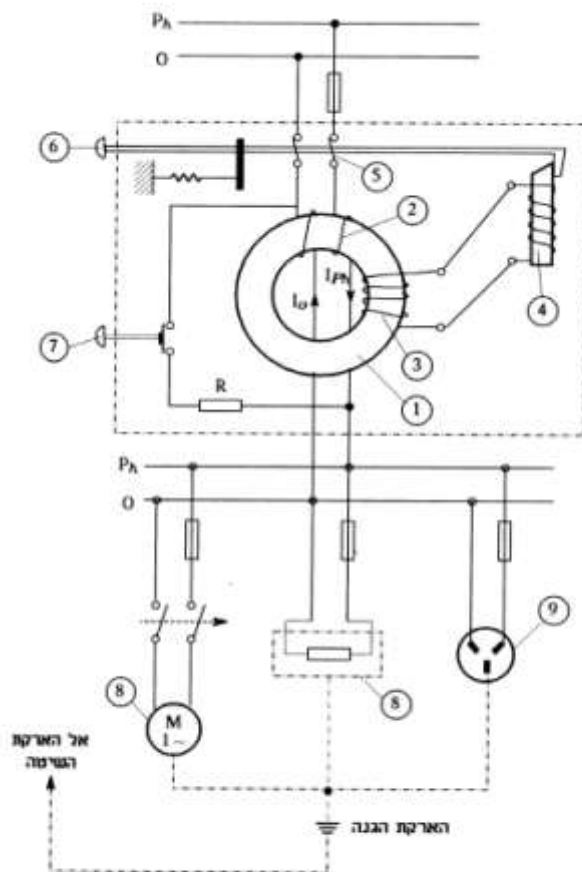
5. מפסק מגן בפני זרם דלף (ממסר הפחת)



עקרון פעולת ממסר הפחת כמתואר באיור הבא:

פתרון

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



$$I_{ph} = I_0$$

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

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

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

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

הערות להתקנת ממסר הפחת:

- א. במתקן ביתי יש חובה להתקנת ממסר פחת על כל המעגלים.
- ב. במתקנים שאינם ביתיים התקנת ממסרי הפחת נתונה לשיקול דעתו של המתכנן השיקולים להתקנת ממסר פחת הם:
 1. מה הסיכוי להתחשמלות בהתאם ליעוד המתקן והמשתמש.
 2. מה הסיכוי שבמעגל קיימת זליגה טבעית.
 - ג. ניתן אומנם במצבים אלו להשתמש בממסר פחת בעל רגישות נמוכה יותר אומנם פחת זה אינו מגן בפני התחשמלות אך הוא יתריע בפני תקלות העלולות לגרום להתחשמלות.
 - ד. יש להקפיד שהזרם הנומינאלי של ממסר הפחת יהיה שווה או גדול מהזרם הנומינאלי של ההגנה שמעליו.
 - ה. בהתאם לתקנות בחוק החשמל.

הגנה בלעדית על ידי מפסק מגן:

ישנם מקרים אשר בהם התקנות מתירות שימוש במפסק מגן כהגנה בלעדית. המצב השכיח ביותר לשימוש כזה הוא כאשר ערך עכבת לולאת התקלה גבוה מידי, והתנאי של ניתוק האוטומטי בפרק זמן שלא יעלה על 5 שניות אינו מתקיים. במקרה זה לא ניתן ליישם את אמצעי ההגנה "שיטת האיפוס" או "הארקת הגנה".

שימוש במפסק מגן פותר את הבעיה מאחר זרם הפעלתו קטן מאוד. במקרים מסוימים מתקנים מפסק מגן רגיל, בעל זרם הפעלה של 0.03A או 0.3A, אך ברוב המקרים משתמשים ביחידות משולבות אשר זרם הפעלתם ניתן לכיול בגבולות רחבים. התנאי לשימוש במפסק מגן כהגנה בלעדית הוא אחד מהשניים:

א. בזמן קצר בין מופע לאדמה יתפתח זרם קצר פי עשר לפחות מזרם ההפעלה של מפסק המגן, על מנת להבטיח הפסקת הזרם למתקן בצורה בטוחה $I_{kph} \geq 10 * I_{\Delta n}$.
באופן מעשי לאחר מדידת עכבת לולאת התקלה מכיילים את זרם ההפעלה של המפסק מגן לעשירית מזרם הקצר החד פזי הצפוי המתקן.

ב. התנגדות בין אלקטרודת ההארקה לבין המסה הכללית של האדמה לא תעלה על הערך המחושב- $R_E = \frac{U_B}{I_{\Delta n}}$, כאשר U_B הוא מתח המגע המותר, על פי התקנות במתקנים רגילים $U_B = 50V$, במתקנים בהם קיימת סכנה מוגברת כגון חצרים רפואיים או חקלאיים $U_B = 24V$ וזה על מנת להבטיח את התנאי שמתח המגע לא יעלה על הערכים המסוכנים.

6. בידוד מגן

מטרת השיטה למנוע הופעתו של מתח על חלק נגיש של גוף המכשיר גם בזמן תקלה בו. בשיטה זו משתמשים חשמליים בעלי בידוד כפול. ובכשירים אלו יש איסור לחבר הארקה על מנת למנוע העברת פוטנציאל באמצעות מוליך הארקה.

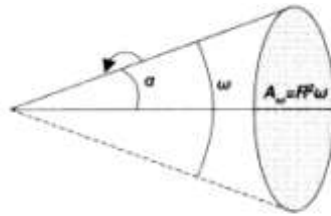
7. מתח נמוך מאוד

מטרת השיטה למנוע הופעת מתח העולה על 50V. בשיטה זו נמנעת היווצרות מתח מגע הגדול מ-50V. ובהעדרות הארקה שיטה נמנעת סגירת לולאת תקלה .

פרק 7-תאורה

מונחים בפוטומטריה ויחידות מדידה

- א. שטף אור-לומן
כמות האור המוקרנת בשנייה אחת ממקור אור בכל כיוון או כמות האור הנקלטת במשך שנייה אחת במשטח מכל כיוון. מסומן ב- ϕ [lumen]
ב. נצילות אורית-
מספר הלומנים המופק לכל ווט מושקע במקור האור. $\eta E = \frac{\phi}{p} \left[\frac{lm}{w} \right]$
ג. רמת הארה-לוקס
שטף אור המאיר יחידת שטח. $E = \frac{\phi}{A} [lux]$
ד. אחידות ההארה-
היחס בין רמת הארה המינימאלית לרמת הארה הממוצעת על מישור עבודה מסוים. $U = \frac{E_{min}}{E_{ave}}$
ה. זווית מרחבית- סטרדיאן
קונוס שקו היוצר שלו יותר זווית α עם ציר הקונוס.



$$\omega = 2\pi(1 - \cos \alpha) [sr]$$

(זווית מרחבית של כדור מלא: $\omega = 4\pi$)

- ו. עוצמת האור-קנדלה
שטף המוקרן ממקור אור בזווית מרחבית ω בכיוון נתון.

$$I = \frac{\phi}{\omega} \left[\frac{lm}{sr} = cd \right]$$

- ז. בהיקות-קנדלה למ"ר
היחס בין עוצמת האור של מקור או משטח מחזיר אור לבין שטחו של המשטח שממנו מוחזר או מוקרן האור.

$$L = \frac{I(cd)}{A(m^2)} = \frac{\rho * E}{\pi} \left[\frac{cd}{m^2} = nit \right]$$

כאשר ρ - מקדם החזרה.

ח. טמפרטורת צבע –קלוין

מתארת את מראה הצבע של הנורות (ככל שהערך גבוה יותר כך הצבע קר יותר).

כאשר:

$CCT \leq 3000^{\circ}K$ צבע האור נחשב "חם".

$CCT \geq 4000^{\circ}K$ צבע האור נחשב "קר".

לדוגמא עבור נורות פלורוסנט:

3000°K-Warm White , 4000°K-Cool White , 6000°K-Day Light

ט. גורם התאמת הצבע-CR(%)

מידת ההתאמה בין הרכב הצבעים של הנורה לבין הרכב הצבעים של אור השמש.

מקורות אור

א. נורת ליבון-

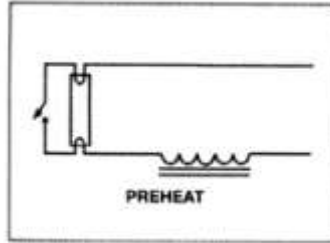
מבנה: תיל טונגסטן.
מילוי: גז אציל ארגון בתוספת 7% חנקן.
טמפ' עבודה: 2650°C - 3150°C .
אורך חיים: תלוי במתח ההזנה קטן ב- 50% אם המתח עולה ב-5% 1000-2000 שעות.
זרם הדלקה: פי 15-20 מזרם העבודה.
נצילות אורית: נמוכה $\left[\frac{lm}{w}\right]$ 10-15.
צבע אור: קרוב לצבע אור השמש.
שטף אור: נמוכה
לדוגמא-לנורה 75W שטף אור של 950 lumen.
לנורה 100W שטף אור של 1380 lumen.
לנורה 150W שטף אור של 2100 lumen.

ב. נורת הלוגן-

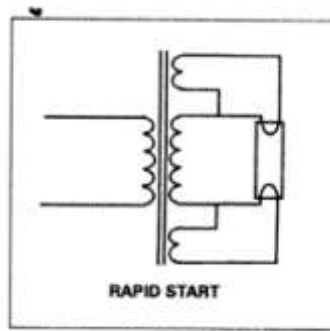
מבנה: תיל טונגסטן בתוך שפופרת קוורץ.
מילוי: גז אציל ארגון בתוספת 7% חנקן ובתוספת יוד.
עקרון הפעולה: מולקולות היוד מבצעות העברת אטומי טונגסטן הנפלטות מתיל הלהט ובחזרה אליו. הודות לכך אורך החיים והנצילות האורית של נורת הלוגן גדולים יותר בהשוואה לנורה הרגילה.
אורך חיים: 2000-4000 שעות.
נצילות אורית: נמוכה אך טובה יותר מנורת הליבון $\left[\frac{lm}{w}\right]$ 15-25.
צבע אור: קרוב לצבע אור השמש.
שטף אור: נמוכה
לדוגמא-לנורה 1000W שטף אור של 22000 lumen.
לנורה 2000W שטף אור של 44000 lumen.

ג. נורת פלורוסנטית-

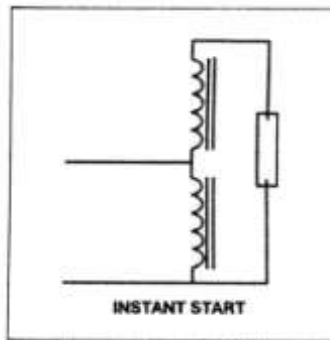
מבנה: שפרפרת זכוכית עם ציפוי פלורוסנטי
מילוי: גז אציל בתוספת כספית.
אלקטרודות: טונגסטן עם ציפוי חומר פולט אלקטרונים.
לחץ גז: כ- 10^{-5} ATMs.
אורך חיים: טובולריות 7500-24000 שעות.
קומפקטיות 10000-20000 שעות.
שיטות הצתה:
1. הצתה עם חימום מוקדם Preheat Start- בשיטה זו לסטרטר תפקיד כפול: חימום מוקדם של אלקטרודות הנורה ואחר כך יצירת מתח יתר להצתת הנורה. פולס מתח היתר נוצר ע"י פתיחת מגע תרמי של הסטרטר אשר מפסיק את הזרם הזורם דרך המשנק. פתיחת המגע נמשכת כשנייה והזרם בזמן זה הוא כ-פי 2 מהזרם הרגיל של הנורה.
כל הצתה גורמת לבלאי אלקטרודות ואורך החיים של הנורה קשור למספר שעות עבודה לכל הדלקה, הצתות תכופות מקצרות את אורך החיים באופן משמעותי.



2. הצתה Rapid Start- בשיטה זו אין סטרטר והנורה נדלקת באופן טבעי, ע"י יוניזציה גז בקצוות עקב הפרשי פוטנציאלים בין האלקטרודות לגוף התאורה המוארק. אורך חייה של הנורה המופעלת בשיטה זו גדול בהרבה.

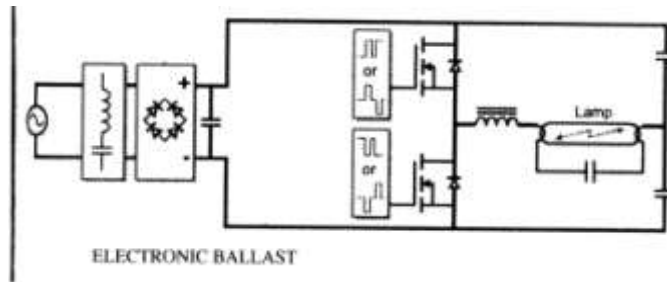


3. הצתה Instant Start- בשיטה זו המשנק מספק פולס מתח גבוה על מנת להצית את הנורה תוך זמן פחות מ-0.05s, ללא חימום מוקדם של האלקטרודות. פליטת האלקטרונים בנורה חד פינית היא "פליטה קרה" אשר נגרמת ע"י שדה אלקטרומגנטי ולא ע"י טמפ' גבוהה של האלקטרודות.



לזרם בנורה ובמשנק אופי השראי, מקדם ההספק מאוד נמוך בממוצע $\cos\phi=0.4-0.5$ ויש צורך לשיפור את מקדם ההספק. באופן כללי ניתן לבחור את הקבל לפי הכלל: $1\mu F$ לכל 10W של הספק הנורה.

4. הצתה אלקטרונית- משנק אלקטרוני מספק לנורה מתח בצורת פולסים מלבניים התדירות גבוהה 20-60KHz. שיטה זו מאפשרת חסכון של אנרגיה של כ-5% והגדלת הנצילות האורית של הנורה ב-10% ויותר והארכת חייה הנורה באופן ניכר. שיטה זו מאפשרת שימוש בדימרים לוויסות עוצמת האור ומונעת את תופעת הסטרובוסקופית. כמו כן אין צורך בקבל לשיפור מקדם ההספק.

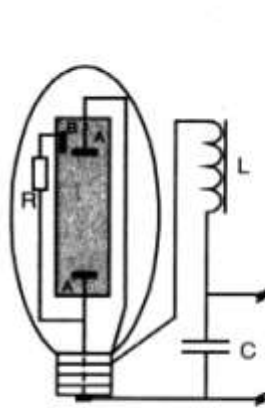


נורות HID

- ד. נורת כספית בלחץ גבוה-
 מבנה: שפרפרת קוורץ בתוך אגס זכוכית.
 מילוי השפופרת: כספית וגז ארגון.
 לחץ: $\frac{1}{10} \text{ ATMs}$.
 עקרון פעולה: פריקת זרם דרך אדי כספית.
 הצתה: באמצעות אלקטרודת עזר.
 זמן הצתה: 5-7 דקות, הצתה מחודשת לאחר כיבוי 3-6 דקות.
 נצילות אורית: נמוכה יחסית $25-55 \left[\frac{\text{lm}}{\text{w}} \right]$.
 אורך חיים: 16000-24000 שעות.
- ה. נורת כספית עם האלידים -Metal-Halide-
 מבנה: תוספת תרכובת של יוד עם מתכת, כמו נתרן אל תוך שפופרת הקוורץ.
 הצתה: אפשרות א- באמצעות אלקטרודת עזר. זמן הצתה 3-4 דקות זמן הצתה מחודשת-10-20 דקות.
 נצילות אורית: גבוהה $55-115 \left[\frac{\text{lm}}{\text{w}} \right]$.
 אורך חיים: 6000-20000 שעות.
- ו. נורת נתרן לחץ גבוה-HPS-
 מבנה: שפרפרת קראמית עם תערובת כספית ונתרן בתוך מעטה זכוכית.
 לחץ: $\frac{1}{1.5} \text{ ATMs}$.
 עקרון פעולה: פריקת זרם דרך אדי נתרן.
 הצתה: בעזרת פולסי מתח גבוה.
 זמן הצתה: 3-4 דקות הצתה מחודשת 1 דקה.
 נצילות אורית: גבוהה $60-140 \left[\frac{\text{lm}}{\text{w}} \right]$.
 אורך חיים: 16000-24000 שעות.
- ז. נתרן לחץ נמוך-LPS-
 מבנה: שפרפרת פריקה המכילה נתקן מוצק ותערובת גז ניאון וארגון.
 לחץ: כ- 10^{-5} ATMs .
 זמן הצתה: 7-10 דקות הצתה מוחדשת 3-12 שניות.
 נצילות אורית: גבוהה $100-185 \left[\frac{\text{lm}}{\text{w}} \right]$.
 אורך חיים: 14000-18000 שעות.

מעגלי הפעלה לנורות HID

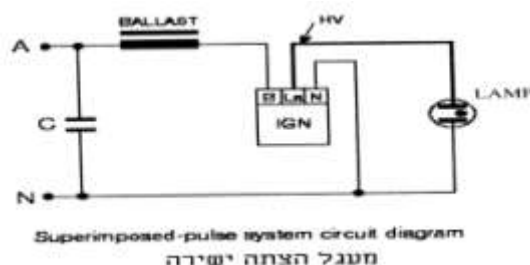
1. שיטת הצתה ע"י אלקטרודת עזר- בתוך שפרפרת הפריקה מותקנת אלקטרודת עזר המחוברת למעגל החשמלי של הנורה באמצעות נגד הצתה. לאחר חיבור המתח טמפרטורת הנורה נמוכה והתנגדותה גבוהה ואין תנאים לפריקת המטען בגז בין האלקטרודות הראשיות. הפריקה הראשונית מתחילה בין האלקטרודה הראשית לבין אלקטרודת העזר הודות למרחק הקטן שביניהן. הקשת החשמלית מחממת את הנורה וגורמת לריבוי נושאי המטען התוך השפופרת. כתוצאה מכך התנגדות הגז בין 2 האלקטרודות הראשיות קטנה והפריקה עוברת למסלול הרגיל שבניהם.



A – אלקטרודות ראשיות. תפקידן להעביר זרם פריקה בתוך הנורה.
B – אלקטרודת עזר. תפקידה ליצור קשת פריקה ראשונית בזמן הצתת הנורה כאשר התנגדותה גבוהה.
R – נגד הצתה. תפקידו להגביל את זרם ההצתה ולהפסיק את מעגל ההצתה כאשר הנורה נדלקת והתנגדותה ירדה.
L – נטל השראי. תפקידו לייצב את זרם העבודה.
C – קבל לשיפור מקדם ההספק.
הגז הוא חנקן, תפקידו בידוד תרמי של שפופרת הקשת.

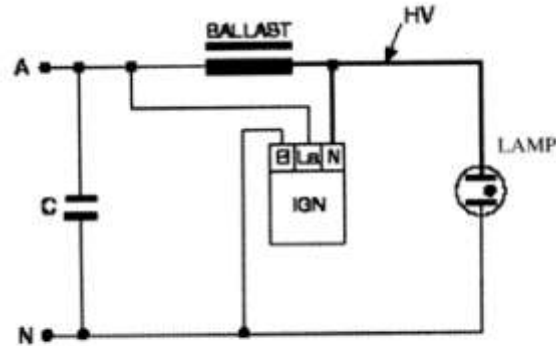
2. בנורות HID חדשות לחץ הגז יחסית גבוה והן דורשות מתח הצתה גדול ממתח העבודה. מעגל הפעלה טיפוסי כולל מצת ומשנק שתפקידם לספק לנורה פולס מתח גבוה ולשמור על יציבות זרם הנורה לאחר הפעלתה.
ישנם 2 סוגי מצתים:

א. הצתה ישירה- המצת מייצר פולס מתח גבוה של כ- 2-5KV בתדירות 2-3 פולסים במשך חצי מחזור של זרם הרשת. לאחר הפעלתה הנורה מקבלת זרם עבודה מיוצב באמצעות המשנק. בשיטה זו נדרש משנק סטנדרטי רגיל המיועד למתח נמוך. בסוף חיי הנורה כאשר המצת מנסה להציתה ללא הצלחה לא יכול להיגרם נזק למשנק.



ב. בהצתה באמצעות משנק- הנורה מופעלת ע"י פולס מתח גבוה מתוך המשנק. תפקיד המצת במעגל למתג את הנורה, תחילה למתח הגבוה, ולאחר שהוצתה בטור עם המשנק המייצב את זרם הנורה.

בשיטת הפעלה זו נדרש משנק מיוחד בעל בידוד למתח גבוה וחוזק דיאלקטרי המספיק בכדי לעמוד בפולסי המתח. ניסיונות חוזרים של המצת להצית את הנורה בסוף חייה עלולים לגרום לנזק גם למשנק. לכן רצוי שהמצת יצויד בטיימר אשר יפסיק את ההצתות לאחר זמן מסוים.



Impulser System Circuit Diagram

מעגל הצתה באמצעות משנק

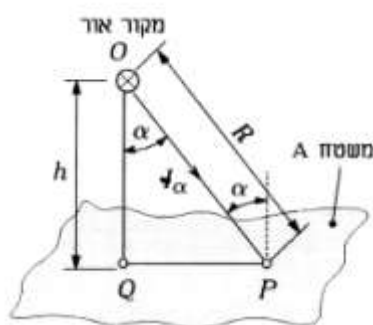
תכנון תאורה בשיטה נקודתית-תאורת חוץ

בשיטה זו ניתן לחשב רמת הארה בנקודות מסוימות של המשטח מואר, כאשר מספר מקורות האור הוא קטן. בחישובים מתייחסים רק לאור הנופל על המשטח באופן ישיר ולא מתחשבים בהחזרות אור מקירות, תקרה וכו'. ולכן שיטה זו מתאימה לחישובי תאורת חוץ.

עבור מקור אור נקודתי יחיד

משתמשים בנוסחה:

$$E_p = \frac{I_\alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} [lux]$$



רמת ההארה בנקודה P על משטח A	E_p	[Lux]
עוצמת האור בכיוון α	I_α	[cd]
הגובה בין מקור האור למשטח	h	[m]
הזווית בין PO לקו האנכי העולה בנקודה P על משטח A	α	[°]

עבור מספר מקורות אור

משתמשים בנוסחה:

שיטות חישוב עוצמת האור בכיוון זווית α

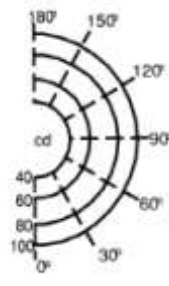
א. כאשר נתון מקור אור בעל עוצמת אור אחידה ניתן לחשב את עוצמת האור בכל כיוון לפי

$$I_\alpha = \frac{\phi}{\omega} [cd]$$

כאשר: $\phi [lm]$ - שטף הנורה.

ω - הזווית המרחבית של פיזור האור (כאשר $\omega = 4\pi$ עבור כדור מלא

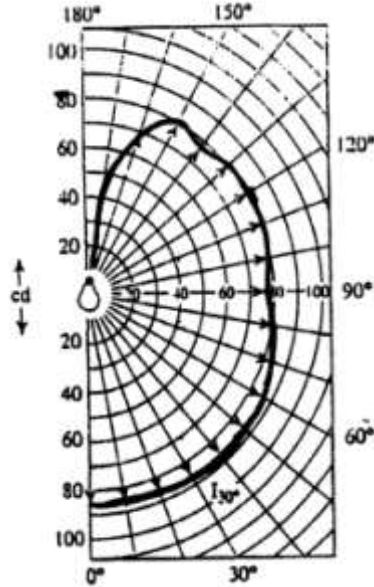
ו- $\omega = 2\pi$ עבור חצי כדור וכו').



במקרה זה עוצמת האור שווה בכל זווית והעקום הפולארי מתואר ע"י עיגול.

ב. באמצעות עקום פולארי הנתון ע"י יצרך גוף תאורה ניתן לקבוע את עוצמת האור בכל זווית. בדרך כלל עקומות פולאריות נתונות עבור שטף של 1000 lm אפשר לחשב את עוצמת האור עבור נורה מסוימת לפי הנוסחה:

$$I_{\alpha} = I_{\alpha}/1000lm * \frac{\phi}{1000}$$

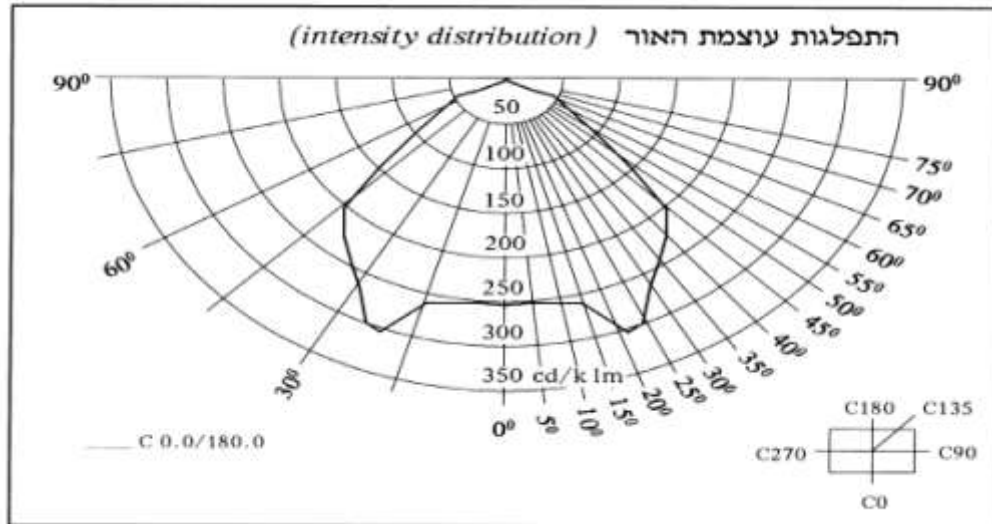


קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

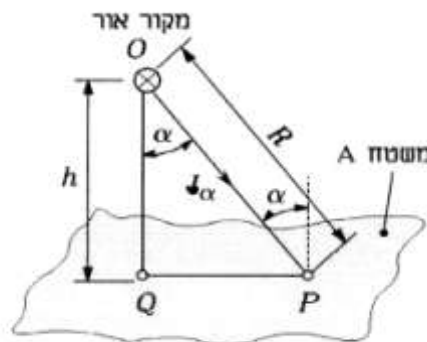
תרגיל דוגמא 1:

גוף תאורה שהעקום הפולארי שלו לכל 1000 lm מתואר באיור, מותקן בגובה 14 מ'. בגוף מותקנת נורת Metal Halide בעל שטף אורי של 20000 lm.

חשב את עוצמת ההארה על הקרקע בנקודה הנמצאת 5.6 מ' מבסיס העמוד.



פתרון לתרגיל דוגמא 1:



$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{l}{h}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5.6}{14}\right) = 21.8^\circ$$

$$I_\alpha = 300 \frac{\text{cd}}{1000\text{lm}} - 21.8^\circ \text{ עבור זווית } 1000/\text{lm} \text{ ל-} 20000 \text{ lm}$$

ולכן-

$$I_\alpha = \frac{I_\alpha}{1000\text{lm}} * \frac{\phi}{1000} = 300 * \frac{20000}{1000} = 6000\text{cd}$$

ולכן עבור נורה בעלת שטף של 20000 lm

$$E_p = \frac{I_\alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{6000 * \cos^3 21.8}{14^2} = 24.5 [\text{lux}]$$

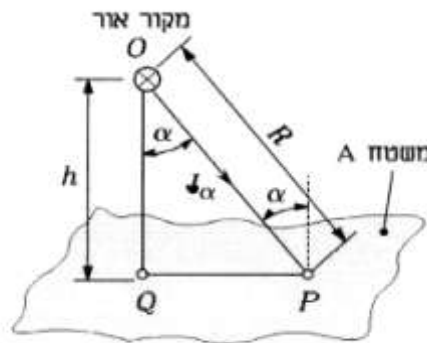
תרגיל דוגמא 2:

בחדר שגובהו 2.8 מ' תלוי מקור אור על כבל שאורכו 0.8 מ' מהתקרה. חשב את רמת ההארה בנקודה על הרצפה הנמצאת במרחק אופקי של 2.5 מ' מהקו האנכי של מקור האור לרצפה.

נתוני עוצמת האור:

זווית α	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
עוצמת האור- $I(cd)$	36	40	45	51	62	86	86	83	78	63

פתרון לתרגיל דוגמא 2:



$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{h'} = \tan^{-1} \frac{2.5}{(2.8 - 0.8)} = 51.34^\circ$$

לפי טבלת נתוני עוצמת האור, עבור זווית 51.34° - $I\alpha = 86 \text{ cd}$

ולכן-

$$E_p = \frac{I\alpha * \cos^3 \alpha}{h'^2} = \frac{86 * \cos^3 51.34}{2^2} = 5.24 \text{ [lux]}$$

תכנון תאורה פנים בשיטת מקדמי ניצול מתקן התאורה

שיטה זו מיועדת לתכנון תאורת פנים, תוך התחשבות בהחזרות אור מקירות תקרה ורצפה. מטרת התכנון: לחשב את מספר הנורות הנדרש לקבלת רמת הארה רצויה ולקבוע מרחקים בין הנורות.

אין תקנים רשמיים לגבי רמת ההארה הנדרשת ולכן ניתן להשתמש בתקנים של ארגונים לאומיים ובין לאומיים שונים כמו CIE- הנציבות הבין-לאומית לתאורה.

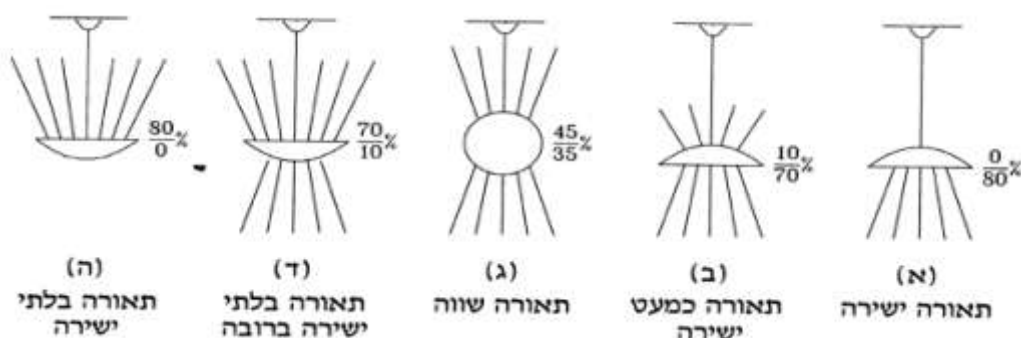
בטבלה מובאות המלצות מ- LESNA LIGHTING HANDBOOK לגבי רמת ההארה הממוצעות של תאורת פנים עבור מתקני תאורה שונים:

רמת ההארה lx	יעוד	רמת ההארה lx	יעוד
100	מחסנים	500	תעשייה
200	ללא פעילות	1000	הרכבות ברמה נמוכה
500	פעילים, מוצרים גדולים	2000	הרכבות ברמה בינונית
	פעילים, מוצרים קטנים		הרכבות ברמה גבוהה
50	חניונים	300	מסחר
100	כללי	800	פעילות נמוכה
500	רמפות, פניות	1000	פעילות בינונית
	כניסות		פעילות גבוהה
5000	תעשיית בגדים	500	לימודים
1000	גזירה, תפירה	1000	כיתות לימוד, ספריה
500	מוסכי רכב	500	בתי דפוס
	תעשיית טקסטיל	500	נגריות
		250	כנסים, תערוכות

דרישות התקן החדש של CIE (2001) לתאורת משרדים

סוג החדר	דרישות רמת ההארה E_{ave} (lx)	דרישת גורם התאמת הצבע CRI (%)
סרטוט טכני	750	80
סרטוט ממוחשב	500	80
חדרי ועידה	500	80
מיון, צילום מסמכים	300	80
דלפק קבלה	300	80
ארכיונים	200	80

סוגי תאורה:



בחירת סוג נורה וסוג גוף תאורה לתאורת פנים:

לתאורת פנים מומלץ להשתמש בנורות פלורוסנט כאשר הן מותקנות עד גובה 4 מ' מעל המשטח המואר.

שימוש ברפלקטורים פראבוליים מונע עייפות עיניים החזרת אור ממסכי מחשב ונצילות אורית גבוהה יותר של גוף התאורה.

להתקנה גופי תאורה מעל גובה 4 מ' מומלץ להשתמש בנורות מסוג HID (למעט שימוש בנורות נל"ג עקב גורם התאמת הצבע הנמוך).

חישובי תאורת פנים:

תאורת פנים

תאורה ישירה

$$R_c = \frac{2W+L}{6h'}$$

תאורה בלתי ישירה

$$R_c = \frac{2W+L}{4h'}$$

$$\phi = \frac{E \cdot A \cdot 100}{K \cdot CU}$$

$$n = \frac{E \cdot A \cdot 100}{K \cdot CU \cdot \phi}$$

מקדם האולם	R_c	
רוחב האולם	W	[m]
אורך האולם	L	[m]
גובה ממשטח העבודה (ראה איורים)	h'	[m]
שטח רצפת האולם ($A=W \cdot L$)	A	[m ²]
מקדם הפחתה	K	
שטף אור נדרש	ϕ	[lm]

רמת ההארה הנדרשת	E	[Lux]
נצילות מתקן התאורה	CU	[%]
נצילות אורית	η	$\left[\frac{lm}{W} \right]$
הספק מקור האור	P	(W)
כמות הנורות באולם	n	(י"ח)

9

השם פרטי חשבוני ודו"ח doc...

כאשר:

k- מקדם הפחתה המתחשב בבילאי הנורות ובהשפעת האבק אשר בקירוב מסוים

נמצא בתחום 0.3-0.85 בהתאם לסוג הגוף בעזרת טבלת מקדמי הפחתה

של יצרני גופי התאורה.

CU- מקדם ניצול מתקן התאורה ב-% אשר מתחשב בהחזרות אור מהקירות,

תקרה ורצפה. למציאת מקדם ניצול מתקן התאורה ניתן להשתמש בטבלאות

המסופקות בקטלוגים ע"י יצרני גופי התאורה.

קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

טבלת מקדמי הפחתה k

מקדמי הפחתה K

סוג התאורה		תאורת ליבון		תאורת כספית		תאורה פלואורסצנטית	
מצב האבק		מועט	מרובה	מועט	מרובה	מועט	מרובה
סוג גופי תאורה	גופים לתאורה ישירה	0.85	0.6	0.8	0.6	0.75	0.55
	גופים לתאורה שווה	0.75	0.4	0.7	0.4	0.7	0.37
	גופים לתאורה בלתי ישירה	0.7	0.35	0.65	0.35	0.6	0.3

מקדמי נצילות (CU%) עבור מתקני תאורה שונים:

מס'	סוג גוף תאורה (עוצמת האור של נורה 100%)	חלוקת עוצמת האור	המרחק המקסימלי * בין יחידות התאורה המרחק	קווקס		75			50			30		
				קווקס	קווקס	50	30	10	50	30	10	30	10	
														מקדם הנצילות CU%
				R_C										
1			$s = 1.3h'$ גורם ההפחתה 0.7	0.6	29	24	20	28	22	19	21	19		
				0.8	37	31	27	35	29	25	28	25		
				1.0	41	35	31	39	34	30	32	29		
				1.25	46	40	36	42	37	34	36	32		
				1.5	50	44	39	46	41	37	39	35		
				2.0	55	50	44	51	46	42	43	40		
				2.5	60	54	49	55	50	46	48	45		
				3.0	63	57	52	58	53	49	50	47		
				4.0	68	62	57	62	57	54	54	52		
				5.0	70	65	60	65	60	56	56	54		
2			$s = 1.3h'$ גורם ההפחתה 0.7	0.6	37	32	28	37	32	28	31	28		
				0.8	46	41	36	45	40	37	40	37		
				1.0	50	46	43	49	46	43	45	43		
				1.25	54	50	47	53	50	47	48	47		
				1.5	58	54	50	56	52	50	52	50		
				2.0	62	59	56	61	58	56	57	56		
				2.5	67	64	60	65	63	60	62	60		
				3.0	69	66	63	67	64	63	64	62		
				4.0	72	69	67	70	68	66	67	65		
				5.0	74	71	69	72	69	68	68	67		

קורס - מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

מס'	סוג גוף תאורה (עוצמת האור של נורה 100%)	חלוקת עוצמת האור	המרחק המקסימלי בין יחידות התאורה המרחק	קוק	75			50			30	
				קוקר	50	30	10	50	30	10	30	10
				R_c	מקדם הנצילות CU%							
3			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.7	0.6	29	25	22	26	23	20	20	19
				0.8	36	32	29	32	29	26	26	24
				1.0	40	36	33	35	32	30	30	28
				1.25	44	40	37	39	36	34	32	31
				1.5	47	43	39	41	38	36	34	32
				2.0	51	48	44	45	42	40	37	36
				2.5	55	51	48	48	45	43	40	39
				3.0	58	54	51	50	47	45	42	40
				4.0	61	58	55	52	50	49	44	43
				5.0	63	60	57	55	52	50	46	44
4			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.6	0.6	16	12	11	10	9	7	5	4
				0.8	20	16	14	13	11	10	6	6
				1.0	23	20	17	15	13	11	8	6
				1.25	27	23	20	18	15	14	9	8
				1.5	29	25	22	20	17	15	10	9
				2.0	33	29	26	22	19	18	11	10
				2.5	36	32	30	24	22	20	13	12
				3.0	39	35	32	26	23	22	14	13
				4.0	43	40	37	28	26	25	15	14
				5.0	45	42	39	30	28	26	17	15
5			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.55-0.80	0.6	37	31	127	36	31	27	31	27
				0.8	45	41	38	45	40	37	40	37
				1.0	49	45	42	49	45	42	45	42
				1.25	53	49	46	53	49	46	48	46
				1.5	56	53	49	55	52	49	51	49
				2.0	61	58	55	60	57	55	56	55
				2.5	66	63	60	64	62	60	62	60
				3.0	67	65	62	66	64	62	63	61
				4.0	71	68	66	69	67	65	66	64
				5.0	72	70	67	71	68	67	67	66

מס'	סוג גוף תאורה (עוצמת האור של נורה 100%)	חלוקת עוצמת האור	המרחק המקסימלי בין היחידות התאורה המרחק	מקדם הנצילות CU%								
				75		50		30				
				קוקר	50	30	10	50	30	10	30	10
				R_c								
6			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.55-0.70	0.6	35	31	28	34	31	28	30	28
				0.8	43	39	37	42	39	37	39	37
				1.0	46	44	42	46	44	42	43	42
				1.25	50	47	45	49	47	45	46	45
				1.5	53	50	47	51	49	47	49	47
				2.0	56	54	51	56	54	51	53	51
				2.5	61	58	56	59	57	56	56	54
				3.0	62	60	57	61	58	57	58	56
				4.0	64	62	61	63	61	60	60	59
				5.0	65	63	61	64	62	61	61	60
				7			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.65-0.85	0.5	24	19	16	22
0.8	29	25	22					27	23	20	20	19
1.0	33	28	26					30	26	24	24	21
1.25	37	32	29					33	29	26	26	24
1.5	40	36	31					36	32	29	29	26
2.0	45	40	36					40	36	33	32	29
2.5	48	43	39					43	39	36	34	33
3.0	51	46	42					45	41	38	37	34
4.0	55	50	47					49	45	42	40	38
5.0	57	53	49					51	47	44	41	40
8			$s = 1.2h$ גורם ההפחתה 0.50-0.80					0.6	16	13	11	12
				0.8	20	16	15	15	13	11	8	7
				1.0	23	20	17	17	14	13	10	8
				1.25	26	23	20	20	17	15	11	10
				1.5	29	26	22	22	19	17	12	11
				2.0	32	29	26	24	21	19	13	12
				2.5	36	32	30	26	24	22	15	14
				3.0	38	35	32	28	25	24	16	15
				4.0	42	39	36	30	29	27	18	17
				5.0	44	41	39	33	30	29	19	18

תרגיל דוגמא 3:

תכנן תאורה כיתת לימוד שמידותיו 8X15m גובה התקרה h=3.2m גובה השולחנות 0.8m. השתמש בגופי תאורה פלורוסנט 2X36W עם רפלקטור. רמת ההארה הנדרשת 500 lux. התייחס לכך שמקדם ההחזרה של התקרה 75% ואילו של הקירות 10%, רמת אבק נמוכה.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

חישוב מקדם האולם-

$$Rc = \frac{2W + L}{6h'} = \frac{2 * 8 + 15}{6 * (3.2 - 0.8)} = 2.15$$

לפי הטבלה נוכל לראות כי עבור גופים לתאורה ישירה פלורוסנטי לרמת אבק נמוכה k=0.75. וכן עבור מקדם אולם Rc המחושב הערך הקרוב ביותר הוא 2 ובהצטלבות עם נתוני החזר מהתקרה 75% ומהקירות 10% נקבל נצילות של 56%

חישוב כמות הנורות-

בקטלוג יצרן הנורות לפי סוג הנורה הספקה ומקדם מסירת הצבע ניתן לקבל את שטף הנורה.

בתרגיל זה עבור נורה 36W בעל מקדם מסירת צבע של 85% ניתן לראות מהקטלוג כי: $\Phi=3350 \text{ lm}$. נחשב את מספר הנורות:

$$n = \frac{E * A * 100}{k * CU * \phi} = \frac{500 * 8 * 15 * 100}{0.75 * 56 * 3350} = 42.64 \text{ נורות}$$

גוף התאורה כולל 2 נורות ולכן כמות גופי התאורה הוא 21 יח'.

קביעת מיקום גופי התאורה-

כדי למנוע הפרשים ניכרים ברמת ההארה יש למקם את גופי התאורה בצורה סימטרית תוך כדי שמירת מרחקים שווים בין הגופים. מרחק בין גופי תאורה סמוכים לא יהיה גדול מגובה התקנת הגופים מעל המשטח המואר. מרחק בין גוף תאורה קיצוני לקיר יהיה ממחצית עד שליש מהמרחק בין הגופים.

למרות שחישבנו 21 יח' גופי תאורה כיוון שהחדר הוא מלבני נתייחס ל-20 גופים ונחלק את הגופים ל-4 שורות, 5 ג'ת בכל שורה, נחשב את המרחקים.

קביעת המרחק בין גופי התאורה (x)-

אורך של ג'ת 36w הוא 1.2 m ולכן האורך הכללי של 5 גופי תאורה הוא: $5 * 1.2 = 6m$

אורך הכולל של המרחקים בין הגופים הוא: $15 - 6 = 9m$.

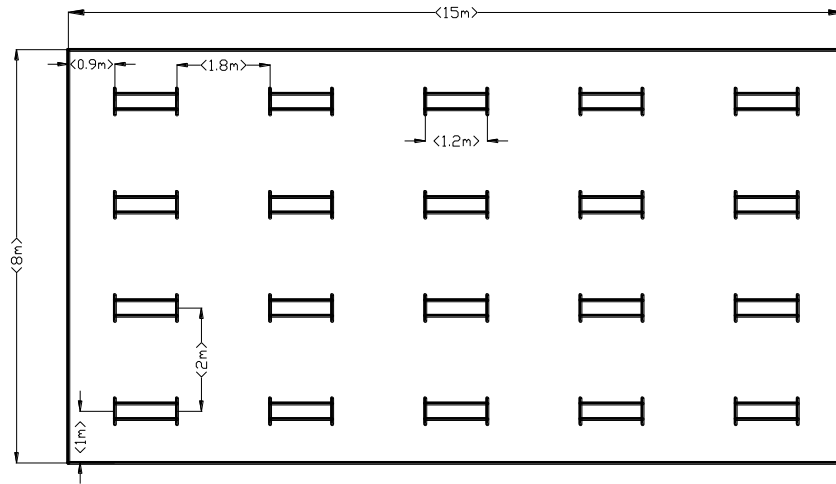
ולכן לקביעת המרחק בין הגופים נחשב באמצעות הביטוי:

$$4x + \frac{2 * 2x}{2} = 9m \quad \text{ומכאן ש-} x = 1.8m$$

קביעת המרחק בין השורות (y)-

את המרחק בין השורות נחשב באמצעות הביטוי:

$$3y + \frac{2y}{2} = 8m \quad \text{ומכאן ש- } y=2m$$



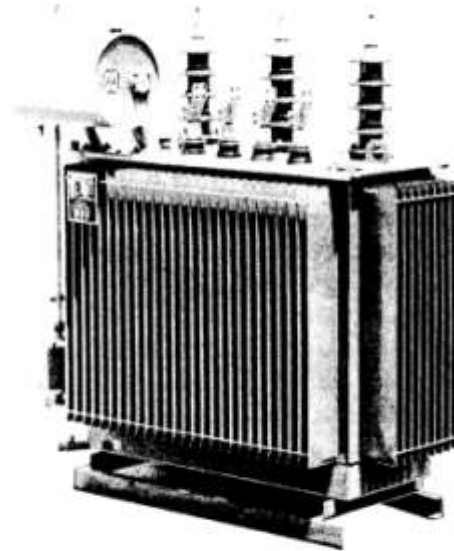
פרק 8- נספחים

שנאי רשת (באדיבות חב' אלקו תעשיות)

Technical data

General data

Rated primary voltage :	22 kV
Tapping range :	±5% (up to 630 kVA) ±2X2.5% (800 - 1600 kVA)
Rated secondary voltage :	0.4/0.231 kV
Rated Frequency :	50 Hz
Connection group :	Dyn 11
Insulating voltage level	
Power frequency :	50 kV
Lightning impulse (BIL) :	125 kV
Cooling :	Oil natural - Air Natural (ONAN)
Oil temperature rise :	60°C
Winding temperature rise :	65°C
Tolerances and testing acc. to I.E.C. 76	



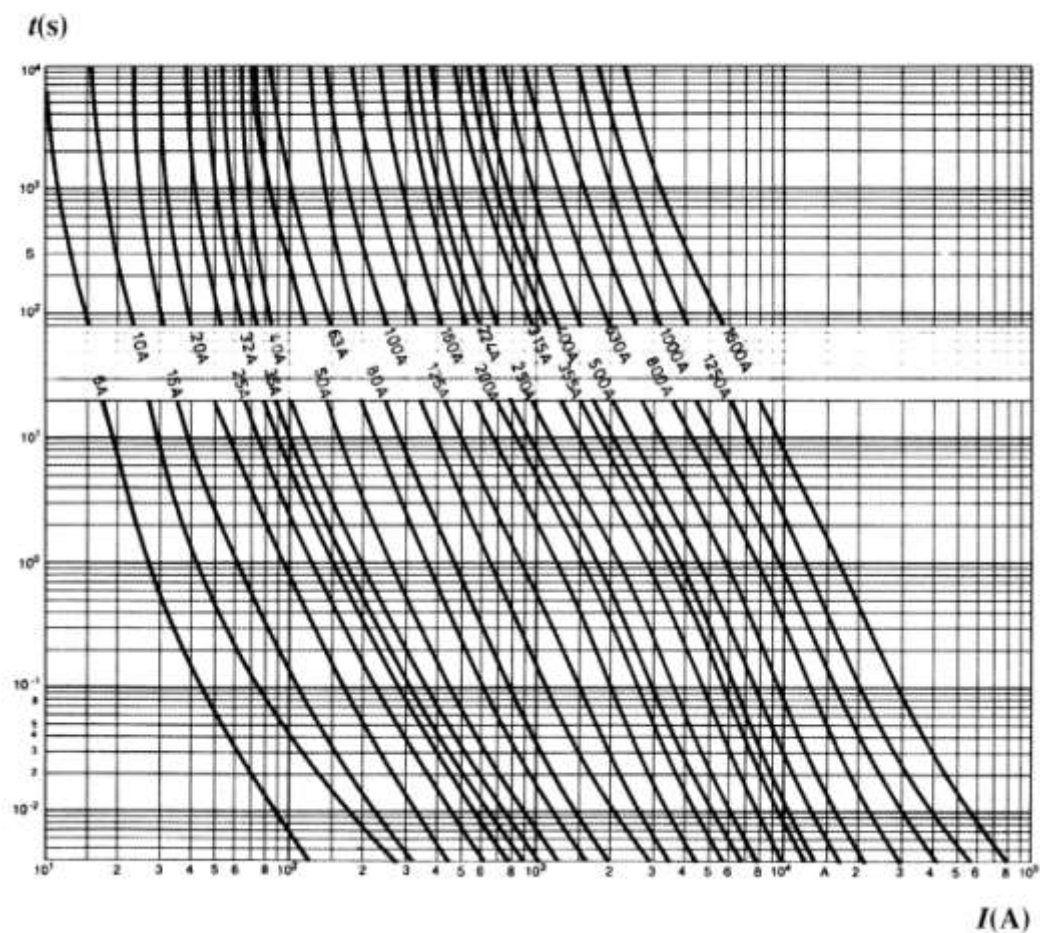
S_n	ΔP_{fe}	$\Delta P_{cu n}$	$U_k \%$	$U_r \%$	$U_x \%$	$\eta_{\beta=1}$	$\Delta U \%_{\beta=1}$	$I_0 \%$
-------	-----------------	-------------------	----------	----------	----------	------------------	-------------------------	----------

Electrical data

Rating kVA	LOSSES - kW		Sh.C. impedance %	Er %	Ex %	Efficiency at full load		Regulation at full load		I ₀ %
	No-Load	Load ^{at 75°C}				at cosθ=1 %	at cosθ=0.8 %	at cosθ=1 %	at cosθ=0.8 %	
50	0.165	0.98	4.7	1.96	4.272	97.76	97.22	2.051	4.156	2.1
100	0.23	1.76	4.4	1.76	4.033	98.05	97.57	1.841	3.851	1.7
160	0.30	2.33	4.4	1.456	4.152	98.38	97.99	1.542	3.686	1.5
250	0.45	3.33	4.4	1.332	4.194	98.51	98.15	1.420	3.614	1.3
400	0.645	4.67	4.4	1.168	4.242	98.69	98.37	1.257	3.516	1.2
630	0.90	5.46	4.4	0.867	4.314	99.00	98.75	0.960	3.325	1.0
800	1.20	8.50	5	1.063	4.886	98.80	98.51	1.182	3.835	0.9
1000	1.35	10.30	5	1.03	4.893	98.85	98.57	1.15	3.814	0.8
1250	1.50	11.30	5	0.904	4.918	98.99	98.74	1.025	3.731	0.7
1250	1.50	11.30	6	0.904	5.932	98.99	98.74	1.08	4.37	0.7
1600	1.70	14.70	6	0.919	5.929	98.99	98.74	1.095	4.38	0.6

HRC נתיכי

אופיין gL/gG כושר ניתוק: 120 kA



קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

מפסק אוטומטי זעיר (מא"ז) (באדיבות חב' Moeller)

אופייני C, B כושר ניתוק: 10 kA

FAZ Miniature Circuit-Breakers

Switching Capacity 10 kA (IEC/EN 60 898)

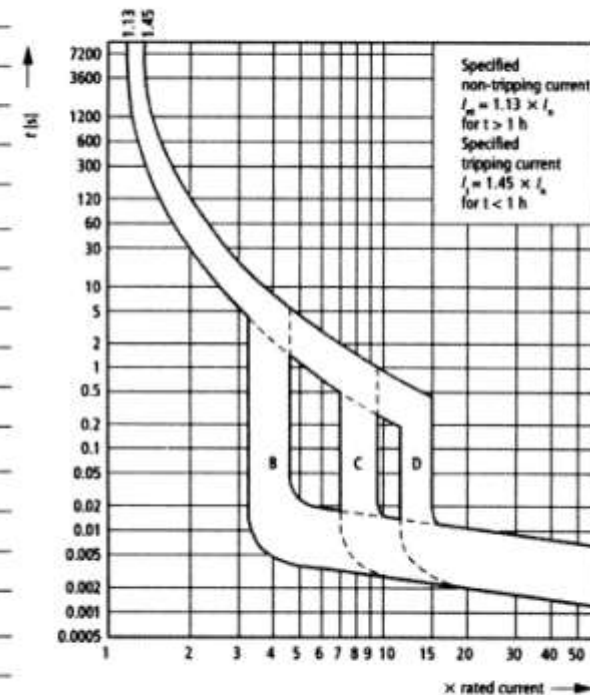
Characteristic	1-pole			2-pole With 2 protected poles		3-pole With 3 protected poles	
	Rated current I_n A	Type Article no.	Price See Price List	Std. pack	Type Article no.	Price See Price List	Type Article no.
FAZ miniature circuit-breakers							
B Response current of short-circuit release $3-5 \times I_n$	4	FAZ-B4H 214570					
	6	FAZ-B6 211352					
	10	FAZ-B10 211358					
	13	FAZ-B13 211364					
	16	FAZ-B16 211370					
	20	FAZ-B20 211376					
	25	FAZ-B25 211382					
	32	FAZ-B32 211388					
	40	FAZ-B40 211394					
	50	FAZ-B50 211400					
	63	FAZ-B63 211406					
C Response current of short-circuit release $5-10 \times I_n$	0.5	FAZ-C0,5 211474					
	1	FAZ-C1 211480					
	2	FAZ-C2 211486					
	3	FAZ-C3 211492					
	4	FAZ-C4 211498					
	6	FAZ-C6 211504					
	10	FAZ-C10 211510					
	13	FAZ-C13 211516					
	16	FAZ-C16 211522					
	20	FAZ-C20 211528					
	25	FAZ-C25 211534					
	32	FAZ-C32 211540					
	40	FAZ-C40 211546					
	50	FAZ-C50 211552					
	63	FAZ-C63 211558					

FAZ tripping characteristics at 30 °C: B, C, D to IEC/EN 60 898

Specified non-tripping
 $I_{0.13} = 1.13 \times I_n$
 for $t > 1$ h
 Specified tripping current
 $I_{0.45} = 1.45 \times I_n$
 for $t < 1$ h

× rated current

FAZ tripping characteristics at 30 °C: B, C, D to IEC/EN 60 898



מפסק אוטומטי מגנטי תרמי (מאמ"ת) להגנה על מנועים עד 63 A הגנה תרמית מתכווננת

PKZM0, PKZM4 Motor-Protective Circuit-Breakers Motor-Protective Circuit-Breakers

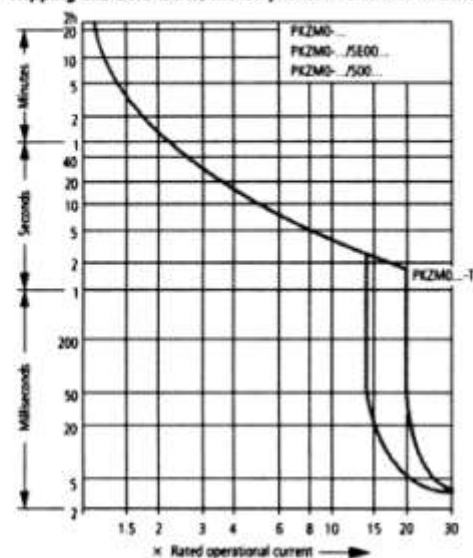
Max. AC-3 motor rating					Rated uninterrupted current I_n A	Setting range	
220 V	380 V	440 V	500 V	660 V		Overload release	Short-circuit release
230 V	400 V			690 V			
240 V	415 V						
kW	kW	kW	kW	kW		I_r A	I_{sc} A
Motor-protective circuit-breakers ¹⁾ , Type "1" and Type "2" coordination							
—	—	—	—	0.06	0.16	0.1 – 0.16	2.2
—	0.06	0.06	0.06	0.12	0.25	0.16 – 0.25	3.5
0.06	0.09	0.12	0.12	0.18	0.4	0.25 – 0.4	5.6
0.09	0.12	0.18	0.25	0.25	0.63	0.4 – 0.63	8.8
0.12	0.25	0.25	0.37	0.55	1	0.63 – 1	14
0.25	0.55	0.55	0.75	1.1	1.6	1 – 1.6	22
0.37	0.75	1.1	1.1	1.5	2.5	1.6 – 2.5	35
0.75	1.5	1.5	2.2	3	4	2.5 – 4	56
1.1	2.2	3	3	4	6.3	4 – 6.3	88
2.2	4	4	4	7.5	10	6.3 – 10	140
4	7.5	9	9	12.5	16	10 – 16	224
5.5	9	11	12.5	15	20	16 – 20	280
5.5	12.5	12.5	15	22	25	20 – 25	350

Motor-protective circuit-breakers¹⁾, Type "1" and Type "2" coordination



PKZM0 Motor-Protective Circuit-Breakers Tripping Characteristics

Tripping characteristics, motor-protective circuit-breakers



16	10 – 16	224
25	16 – 25	350
32	24 – 32	448
40	32 – 40	560
50	40 – 50	700
56	50 – 56	812
63	63 – 55	882

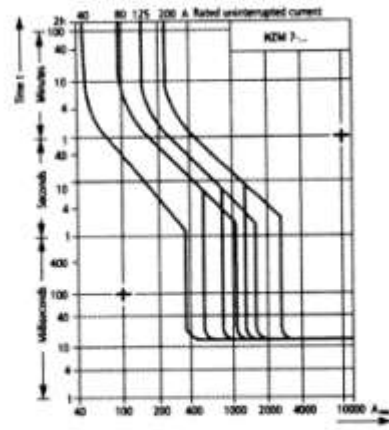
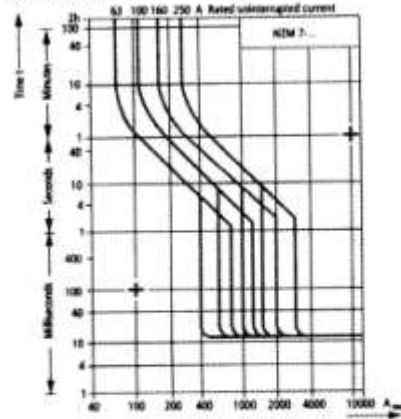
מפסק אוטומטי מגנטי תרמי (מאמ"ת) עד 200 A
 כושר ניתוק: 35 kA (דגם N), 65 kA (דגם S), 100 kA (דגם H)
 הגנה תרמית ומגנטית מתכווננות

NZM7 Circuit-Breakers, 3-pole
 Motor Protection, Circuit-Breakers without Overload Release

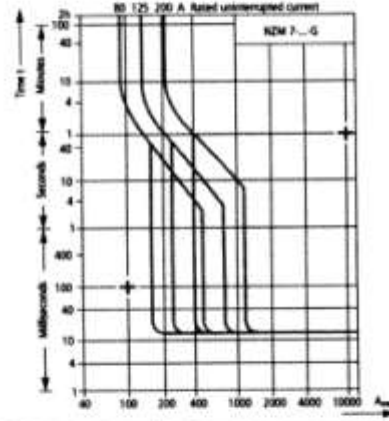
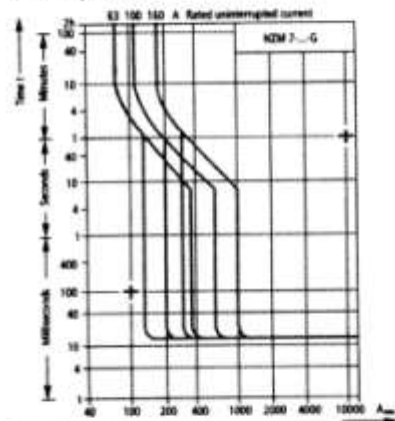
					Normal switching capacity 35 kA at 400 V 50/60 Hz	
					Type	Article no.
Motor data		Rated current		Setting ranges		
AC-3		Operational	Uninterrupted	Overload releases	Short-circuit releases, non-delayed	
380 V		I_n	I_n	I_n	I_{sc}	
400 V		I_n	I_n	I_n	I_{sc}	
415 V		I_n	I_n	I_n	I_{sc}	
P		I_n	I_n	I_n	I_{sc}	
kW		I_n	I_n	I_n	I_{sc}	
Circuit-breakers for motor protection, 3-pole						
With phase-failure sensitivity ¹⁾						
Adjustable overload releases						
Adjustable non-delayed short-circuit releases						
	With terminals	15	29.3	40	25 - 40	9 - 14 × I_n NZM7-40N-M 049032
		18.5	36	40	25 - 40	NZM7-40N-M 049032
		22	41	63	40 - 63	6 - 14 × I_n NZM7-63N-M 049033
		30	55	63	40 - 63	NZM7-63N-M 049033
		37	68	80	63 - 80	NZM7-80N-M 049034
		45	81	100	80 - 100	NZM7-100N-M 049035
		55	99	125	80 - 125	NZM7-125N-M 049036
		75	139	160	125 - 160	NZM7-160N-M 049037
		90	161	200	160 - 200	6 - 12 × I_n NZM7-200N-M 049038
		110	196	200	160 - 200	NZM7-200N-M 049038
	With M8 bolt connection and cable lug cover	15	29.3	40	25 - 40	9 - 14 × I_n NZM7-40N-M-M8 065820
		18.5	36	40	25 - 40	NZM7-40N-M-M8 065820
		22	41	63	40 - 63	6 - 14 × I_n NZM7-63N-M-M8 065821
		30	55	63	40 - 63	NZM7-63N-M-M8 065821
		37	68	80	63 - 80	NZM7-80N-M-M8 065822
		45	81	100	80 - 100	NZM7-100N-M-M8 065823
		55	99	125	80 - 125	NZM7-125N-M-M8 065824
		75	134	160	125 - 160	NZM7-160N-M-M8 065825
		90	161	200	160 - 200	6 - 12 × I_n NZM7-200N-M-M8 065826
		110	196	200	160 - 200	NZM7-200N-M-M8 065826

NZM7 Circuit-Breakers Tripping Characteristics

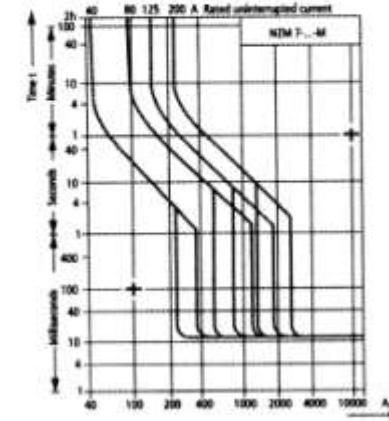
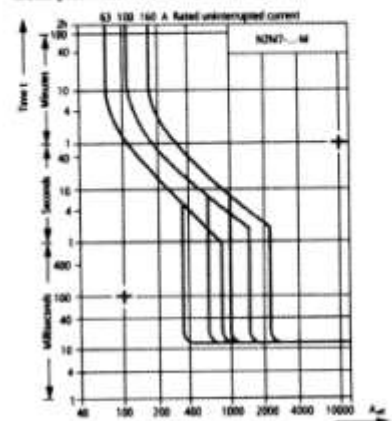
System protection



Generator protection



Motor protection



מפסק אוטומטי מגנטי תרמי (מאמ"ת) עד 630 A

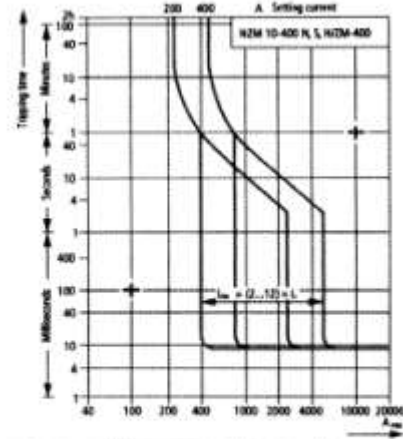
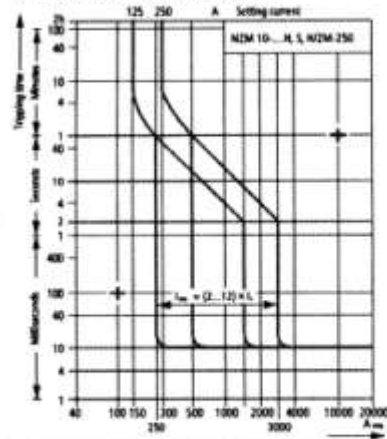
כושר ניתוק: 45 kA (דגם N), 65 kA (דגם S), 100 kA (דגם H)
הגנה תרמית ומגנטית מתכווננות, סלקטיביות-זמן

NZM10 Circuit-Breakers, 3-pole System, Generator and Motor Protection

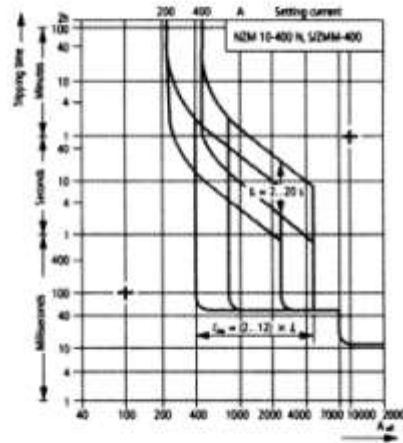
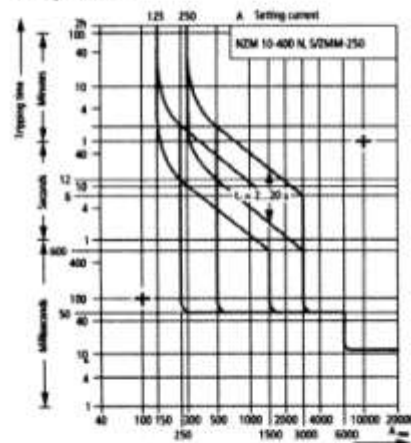
					Normal switching capacity 45 kA at 400 V 50/60 Hz
					Type
					Article no.
Rating data		Setting ranges:			
Rated uninter- rupted current I_n A	Motor data	Overload releases		Short-circuit releases	
	AC-3				
	380 V 400 V 415 V P kW			Delayed	Non-delayed
		I_r A		I_{ms} A	
Circuit-breakers for system and generator protection					
Adjustable overload releases					
Adjustable non-delayed short-circuit releases					
	250	—	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_n$
	400	—	200 – 400	—	
	630	—	300 – 630	—	
					NZM10-400N/ZM-250 047818
					NZM10-400N/ZM-400 034730
					NZM10-630N/ZM-630 034731
Circuit-breakers with time selectivity					
Adjustable overload releases					
Time delay setting to overcome current peaks ($t_r = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 17, 20$ s).					
Overload release can be de-activated ($t_r = \infty$).					
Adjustable delayed short-circuit releases					
($t_s = 10, 10, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000$ ms) – 20%					
Adjustable non-delayed short-circuit releases					
	250	—	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_n$
	400	—	200 – 400	—	
	630	—	300 – 630	—	
					NZM10-400N/ZMV-250 047823
					NZM10-400N/ZMV-400 034738
					NZM10-630N/ZMV-630 034739
Circuit-breakers for motor protection					
Adjustable overload releases					
Time delay setting to overcome current peaks ($t_r = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 17, 20$ s).					
Overload release can be de-activated ($t_r = \infty$).					
Adjustable short-circuit releases					
	250	110	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_n$
	250	132	125 – 250	—	
	400	160	200 – 400	—	
	400	200	200 – 400	—	
	630	250	300 – 630	—	
	630	315	300 – 630	—	
					NZM10-400N/ZMM-250 047821
					NZM10-400N/ZMM-250 047821
					NZM10-400N/ZMM-400 034732
					NZM10-400N/ZMM-400 034732
					NZM10-630N/ZMM-630 034733
					NZM10-630N/ZMM-630 034733

NZM10 Circuit-Breakers Tripping Characteristics

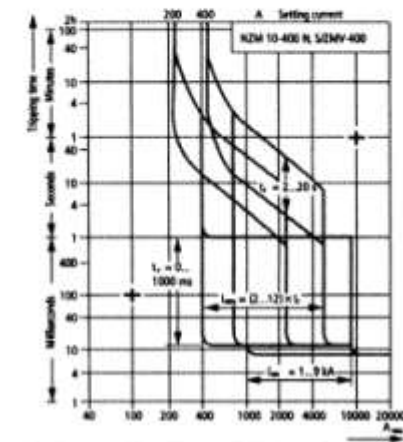
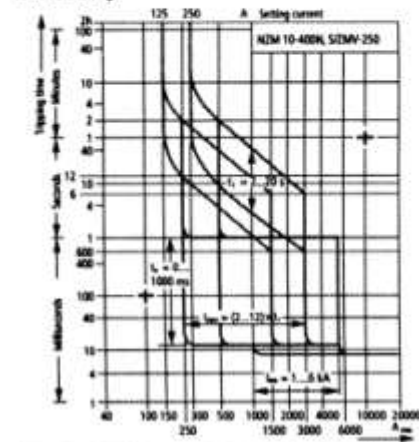
System protection, generator protection



Motor protection



Time selectivity



סוללות קבלים לשיפור מקדם-הספק (באדיבות חב' קצנשטיין אדלר ושות')

קבלים תלת פאזיים גיליים



מק"ט	דגם	הספק ב- 400V 50Hz KVAR	הספק ב- 440V 50Hz KVAR	גודל פריקה KΩ	מידות (מ"מ) גובהXקוטר
26-1057	MKPg-5	5	6.25	300	75X176
26-1073	MKPg-7.5	7.5	9.1	300	75X176
26-1099	MKPg-10	10	12.5	300	75X230
26-1108	MKPg-12.5	12.5	15	300	85X230
26-1115	MKPg-15	15	18.3	180	95X230
26-1339	MKPg-20	20	25	180	100X230
26-1347	MKPg-25	25	30	120	116x230
26-1350	MKPg-30	30	-	120	116x280

קבלים תלת פאזיים בקופסא

מק"ט	דגם	הספק ב- 400V 50Hz KVAR	הספק ב- 440V 50Hz KVAR	גודל פריקה KΩ	מידות (מ"מ) עצגור
26-1214	MKPg - BOX -5 KVAR	5	6.25	300	180X430X160
26-1222	MKPg - BOX -7.5 KVAR	7.5	9.1	300	180X430X160
26-1230	MKPg - BOX -10 KVAR	10	12.5	300	180X430X160
26-1246	MKPg - BOX -12.5 KVAR	12.5	15	300	180X430X180
26-1255	MKPg - BOX -15 KVAR	15	18.3	180	180X430X160
26-1263	MKPg - BOX -20 KVAR	20	25	180	180X430X180
26-1271	MKPg - BOX -25 KVAR	25	30	120	180X430X160
26-1289	MKPg - BOX -30 KVAR	30	-	120	280X480X160
26-1297	MKPg - BOX -40 KVAR	(2X20) 40	50	2X180	280X430X160
26-1313	MKPg - BOX -50 KVAR	(2X25) 50	60	2X120	280X430X160
26-1321	MKPg - BOX -60 KVAR	(2X30) 60	-	2X120	280X480X160

קורס - מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

מנועים אסינכרוניים תלת-פאזיים רוטור-כלוב (באדיבות חב' יונה אושפיז מנועים)
מהירות סינכרונית: 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm, 3000 rpm

RATINGS AND PERFORMANCES

400V-50Hz

Speed SYN.	Output		Frame Type	Weight Kg.	Rated Speed RPM	Rated Current Amp.	η %	Power Factor	GD ² Kgm ²	Ist In	Mst Mn	Mmax Mn
1500	0.37	0.5	K71	11	1350	1.04	71.0	0.72	0.004	3.7	2.1	2.5
	0.55	0.75	K71 ⁽¹⁾	12	1390	1.46	74.0	0.74	0.005	4.2	2.2	2.7
	0.55	0.75	K80	15	1410	1.4	76.5	0.75	0.007	4.7	2.2	2.7
	0.75	1	K80	16	1410	1.8	77.0	0.78	0.010	4.8	2.2	2.7
	1.1	1.5	K80 ⁽²⁾	17	1410	2.6	78.0	0.79	0.012	5.3	2.1	2.7
	1.1	1.5	K90S	20.5	1420	2.5	79.5	0.80	0.015	5.2	2.1	2.7
	1.5	2	K90L	22	1420	3.3	81.5	0.80	0.017	5.7	2.1	2.8
	2.2	3	K90L ⁽¹⁾	25	1420	4.8	82.8	0.80	0.023	6.2	2.2	2.7
	2.2	3	K100L ⁽²⁾	30	1425	4.7	83.7	0.81	0.030	6.3	2.2	2.7
	3	4	K100L	33	1430	6.2	84.0	0.82	0.040	6.4	2.2	2.8
	4	5.5	K112M	40	1430	8.2	85.8	0.83	0.058	6.5	2.3	2.7
	5.5	7.5	K112M ⁽²⁾	43	1430	11	86.5	0.83	0.065	6.8	2.4	2.7
	5.5	7.5	K132S	66	1430	11	87.4	0.84	0.096	7.0	2.2	2.8
	7.5	10	K132M	73	1440	14	88.0	0.85	0.123	6.5	2.2	3.0
	9.2	12.5	K132M	77	1450	18	88.6	0.84	0.14	7.0	2.3	3.0
	11	15	K160M	125	1450	21	89.8	0.84	0.34	6.5	2.2	2.4
	15	20	K160L	140	1455	27	91.2	0.85	0.45	6.5	2.0	2.5
	18.5	25	K180M	195	1460	34	91.2	0.86	0.57	6.5	2.0	2.5
	22	30	K180L	210	1460	41	91.7	0.85	0.64	6.5	1.9	2.5
	30	40	K200L	247	1470	54	92.8	0.85	0.85	7.0	2.0	2.6
	37	50	K225S	370	1470	67	93.7	0.85	2.09	7.0	2.0	2.5
	44	60	K225M	375	1470	79	94.2	0.87	2.56	7.0	2.0	2.5
	55	75	K250M	500	1475	98	94.4	0.87	2.88	7.0	2.0	2.5
	75	100	KN280M	670	1475	131	94.8	0.87	5.3	7.0	2.0	2.5
	90	125	KN280M	700	1480	165	95.0	0.88	6.8	7.0	2.0	2.5
	110	150	KN315S	950	1480	193	95.4	0.87	9.8	7.0	2.0	2.5
	132	180	KN315M	1050	1480	234	95.8	0.87	12.6	7.0	2.0	2.6
	160	220	KN315M	1150	1480	284	95.9	0.87	16	7.0	1.7	2.6
	200	270	KN315L	1400	1490	338	95.8	0.89	18	6.5	1.3	2.6
	250	340	KN355M	1800	1485	422	96.2	0.90	37	7.2	1.6	2.5
	315	430	KN355L ⁽³⁾	2050	1490	522	96.5	0.91	45	6.5	1.1	2.4
η - Efficiency Ist - Starting current In - Rated current				Mst - Starting torque Mn - Rated torque Mmax - Maximum torque	Terminals: up to 3HP - 6 terminals - 230V Δ / 400 VY above 3 HP - 6 terminals - 400V Δ / 690V Y							

קורס- מתקני חשמל ורשת-חשמלאי ראשי

נורות פלורסנט (באדיבות געש תאורה)

תאור	הספק P(W)	בית נורה	שטף אור ϕ (lm)	מקדם מסירת צבע Ra	טמפ' צבע °K	קוטר D(mm)	אורך L(mm)	אורך חיים H(h)
פלואורסנט לבן חם	18	TL-T8	1,150	50	2,900	26	590	12,000
	36	TL-T8	2,850	50	2,900	26	1,200	12,000
	58	TL-T8	4,500	50	2,900	26	1,500	12,000
פלואורסנט לבן קר	6	TL-T5	240	85	4,000	16	288	12,000
	8	TL-T5	450	85	4,000	16	517	12,000
	14	TL-T5	1,350	85	4,000	16	549	15,000
HIGH EFFICIENCY	21	TL-T5	2,100	85	4,000	16	849	15,000
	28	TL-T5	2,900	85	4,000	16	1,149	15,000
	35	TL-T5	3,650	85	4,000	16	1,449	15,000
HIGH OUTPUT	24	TL-T5	2,000	85	4,000	16	549	15,000
	39	TL-T5	3,500	85	4,000	16	849	15,000
	54	TL-T5	5,000	85	4,000	16	1,419	15,000
HIGH OUTPUT	80	TL-T5	7,000	85	4,000	16	1,449	15,000
	18	TL-T8	1,150	65	4,100	26	590	12,000
	36	TL-T8	2,850	65	4,100	26	1,200	12,000
	58	TL-T8	4,500	65	4,100	26	1,500	12,000
	20	TL-T12	1,150	60	4,100	38	590	12,000
	40	TL-T12	2,800	60	4,100	38	1,200	12,000
	65	TL-T12	4,400	60	4,100	38	1,500	12,000
	105	TL-T12	8,600	60	4,100	38	2,400	12,000
פלואורסנט אור יום	6	TL-T5	220	60	6,000	16	212	12,000
	8	TL-T5	300	60	6,000	16	320	12,000
	14	TL-T5	1,300	85	6,000	16	549	15,000
HIGH EFFICIENCY	21	TL-T5	2,000	85	6,000	16	849	15,000
	28	TL-T5	2,750	85	6,000	16	1,149	15,000
	35	TL-T5	3,500	85	6,000	16	1,449	15,000
HIGH OUTPUT	24	TL-T5	1,900	85	6,000	16	549	15,000
	39	TL-T5	3,400	85	6,000	16	849	15,000
	54	TL-T5	4,900	85	6,000	16	1,419	15,000
HIGH OUTPUT	80	TL-T5	6,650	85	6,000	16	1,449	15,000
	18	TL-T8	1,050	70	6,200	26	590	12,000
	36	TL-T8	2,500	70	6,200	26	1,200	12,000
	58	TL-T8	4,000	70	6,200	26	1,500	12,000
	20	TL-T12	1,050	70	6,200	38	590	12,000
	40	TL-T12	2,500	70	6,200	38	1,200	12,000
	65	TL-T12	4,000	70	6,200	38	1,500	12,000
	105	TL-T12	8,600	70	6,200	38	2,400	12,000
פלואורסנט לבן חם	18	TL-T8	1,350	85	3,000	26	590	15,000
	36	TL-T8	3,350	85	3,000	26	1,200	15,000
	58	TL-T8	5,200	85	3,000	26	1,500	15,000
RABO TRIPHOSPHOR	18	TL-T8	1,350	85	4,000	26	590	15,000
	36	TL-T8	3,350	85	4,000	26	1,200	15,000
	58	TL-T8	5,200	85	4,000	26	1,500	15,000

HID נורות

תיאור	הספק P(W)	בית נורה	שטף אור ϕ (lm)	מקדם מסירת צבע Ra	טמפ' צבע °K	קוטר D(mm)	אורך L (mm)	אורך חיים (h)
כספית לחץ גבוה	80	E27	3,700	45	4,000	70	136	8,000
	125	E27	6,200	45	4,000	75	170	8,000
	250	E40	12,700	45	4,000	90	226	8,000
	400	E40	22,000	45	4,000	120	290	8,000
מסל הליד אונטו רגולטור	175	Mogul	14,000	65	4,100	130	220	15,000
	250	Mogul	21,000	65	4,250	130	220	15,000
	400	Mogul	36,000	65	4,000	180	300	15,000
	1,000	Mogul	110,000	65	3,800	240	400	12,000
	1,500	Mogul	150,000	65	4,000	240	400	12,000
מסל הליד אליפטי	100	E27	8,500	70	3,200	54	138	10,000
	150	E27	13,000	70	3,200	54	138	10,000
	250	E40	17,000	70	4,000	90	226	10,000
	400	E40	31,000	70	3,900	120	290	10,000
מסל הליד לינארי	70	RX7s	5,500	80	4,200	20	114	5,000
	70	RX7s	5,000	75	3,000	20	114	5,000
	150	RX7s	11,250	85	4,200	23	132	5,000
	150	RX7s	13,000	75	3,000	23	132	5,000
	250	Fe2	20,000	85	4,200	25	163	5,000
	250	Fe2	20,000	80	3,000	25	163	5,000
	400	Fe2	35,000	90	5,400	31	206	5,000
מסל הליד PREFOCUS	35	G12	3,400	80	3,000	20	90	8,000
MASTER COLOR	70	G12	6,600	80	3,000	20	90	8,000
	150	G12	14,000	80	3,000	20	100	8,000
מסל הליד PREFOCUS	35	G12	3,400	80	3,000	25	84	5,000
	70	G12	5,500	85	4,200	25	84	5,000
	70	G12	5,200	85	3,000	25	84	5,000
	150	G12	12,600	85	4,200	25	84	5,000
	150	G12	12,000	80	3,000	25	84	8,000
מסל הליד PREFOCUS	70	PG12-2	5,300	85	4,200	32	149	5,000
	150	PGX12-2	12,000	85	4,200	37	149	5,000
מסל הליד טובולרי	250	E40	19,000	90	5,400	47	257	8,000
	400	E40	33,000	90	5,400	47	286	8,000
גלג טובולרי	70	E27	5,500	25	2,000	50	154	10,000
	100	E40	8,500	25	2,000	50	210	10,000
	150	E40	15,000	25	2,000	50	210	20,000
	250	E40	28,000	25	2,000	60	257	20,000
	400	E40	48,000	25	2,000	60	280	20,000
	1,000	E40	130,000	25	2,000	60	380	7,000
גלג אליפטי	50	E27	3,500	25	2,000	70	156	10,000
	70	E27	5,600	25	2,000	70	156	10,000
	100	E40	9,500	25	2,000	75	186	10,000
	150	E40	14,500	25	2,000	90	226	20,000
	250	E40	27,000	25	2,000	90	226	20,000
	400	E40	48,000	25	2,000	120	280	20,000

גודל חיבור החשמל לצרכנים מסחריים ותעשייתיים

גודל חיבור החשמל התקני במתח נמוך של צרכן מסחרי ותעשייתי נקבע לפי כלל הצרכנות 02-02-02, והוא בהתאם למפורט בטבלה שלהלן.
ניתן להזמין רק גודל חיבור חשמל בהתאם לפירוט שלהלן.

גודל החיבור המוזמן על ידי הצרכן (אמפר)	נתיך חברת החשמל – זרם נקוב (אמפר)
40 x 1	63 x 1
25 x 3	35 x 3
40 x 3	63 x 3
63 x 3	80 x 3
80 x 3	100 x 3
100 x 3	125 x 3
125 x 3	160 x 3
160 x 3	200 x 3
200 x 3	250 x 3
250 x 3	315 x 3
315 x 3	400 x 3
400 x 3	500 x 3
500 x 3	630 x 3
630 x 3	800 x 3
800 x 3	910 x 3
910 x 3	1000 x 3