

מתקני חשמל והספק

הנדסאי חשמל

נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים

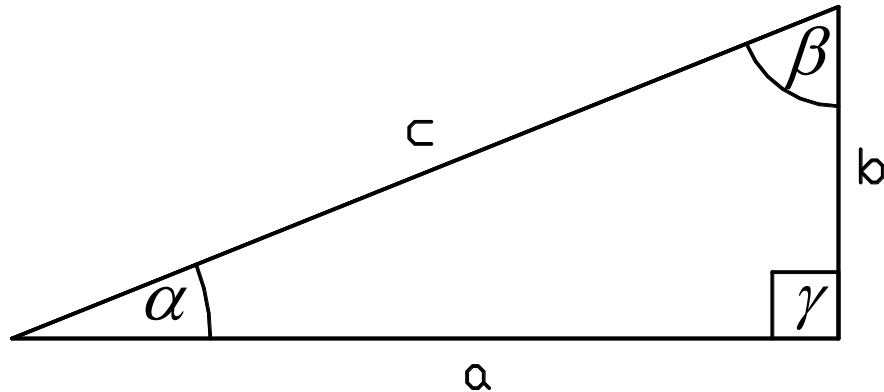
2020

תוכן עניינים:

פרק 1 – זרמים והספקים בזרם חילופין	עמ' 3-10
פרק 2 – חישובי רשתות	עמ' 11-57
פרק 3 – זרמי קצר	עמ' 58-69
פרק 4 - העמסה והגנה על מוליכים	עמ' 70-92
פרק 5 - שיפור גורם ההספק	עמ' 93-101
פרק 6 - ציוד בלוח חשמל	עמ' 102-108
פרק 7- הארקות והגנות בפני התחשמלות	עמ' 109-117
פרק 8- מערכות הספק למתח גבוה ועליון	עמ' 118-146
פרק 9- תאורה	עמ' 147-166
פרק 10- נספחים	עמ' 167-179

פרק 1- זרמים והספקים בזרם חילופין

מבוא-משפט פיתגורס



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

זרמים והספקים בזרם חילופין

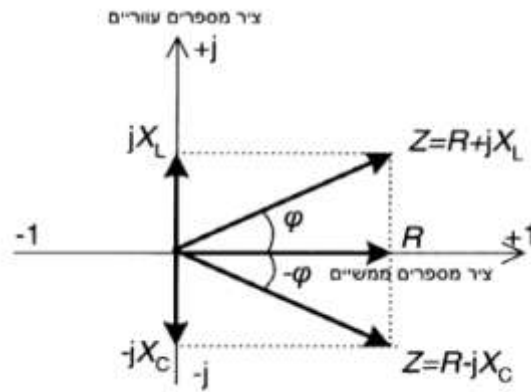
באופן כללי צרכן הזרם חילופין מאופיין ע"י העכבה Z. העכבה בנויה מ-2 רכיבים: הרכיב האפקטיבי R הוא התנגדות האומית הנובעת מהתנגדותם האומית של מוליכי הצרכן הרכיב הראקטיבי X הוא ההיגב שמבטא את השפעות השדות המגנטי והחשמלי המופיעים בצרכן.

ההיגב X יכול להיות אחד מ-2 הסוגים הבאים:

א. היגב השראי X_L לצרכנים הכוללים סלילים אשר אוגרים בתוכם שדה מגנטי.

ב. היגב קיבולי X_C לצרכנים הכוללים קבלים אשר אוגרים בתוכם שדה חשמלי.

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



עבור צרכן בעל אופי השראי-

מקובל לרשום את ההיגב האשראי עם סימן "+".

זווית העכבה φ מתקבלת לפי הביטויים:

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

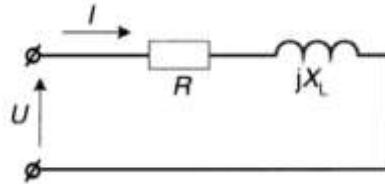
$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{X_L}{Z} \right)$$

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

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

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

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי השראי:



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

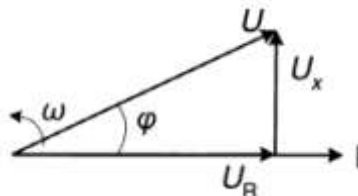
מפל מתח במעגל טורי מתחלק ביחס ישר להתנגדותם של רכיבי המעגל ומחושב בהתאם

לחוק אום: $U_X = I * jX_L = j * I * X_L$, $U_R = I * R$

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

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

הזרם:



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

השעון במהירות זוויתית $\omega = 2\pi f$ (rad/sec)

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

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

מסוג זה נקרא "עומס מפגר".

עבור צרכן בעל אופי קיבולי-

מקובל לרשום את ההיגב הקיבולי עם סימן "-".

זווית העכבה φ מתקבלת לפי הביטויים:

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

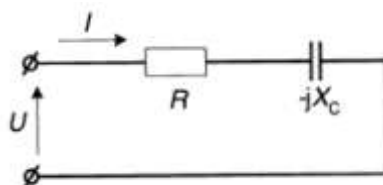
$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{-X_C}{Z} \right)$$

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

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

$$R - jX_C = Z \angle -\varphi$$

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי קיבולי:

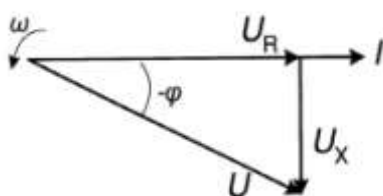


את הזרם נחשב בהתאם לחוק אום: $\vec{I} = \frac{\vec{U}}{Z}$ כאשר העכבה מושבת לפי: $Z = R - jX_C$.

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

לחוק אום: $U_R = I * R$, $U_X = I * (-jX_C) = -j * I * X_C$.

כיוון שווקטור המתח U_R זהה לכיוון וקטור הזרם I , וווקטור המתח U_X מפגר לאחר הזרם בזווית של 90° , ניתן לשרטט דיאגרמה פאזורית של המעגל כאשר וקטור הייחוס הוא וקטור הזרם:



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

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

משולש הספקים:

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

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

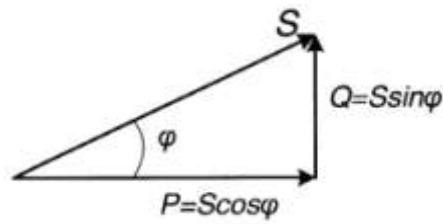
הביטוי $S = U * I$ מסמן הספק מדומה (מלא) של הצרכן והוא שווה לסכום הקומפלקסי של

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

ניתן להציג מערכת זו בעזרת משולש ההספקים:



ההספק המדומה נמדד ביחידות (VA).

ניתן על-פי משפט פיתגורס לקבוע את הביטויים הבאים:

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

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

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

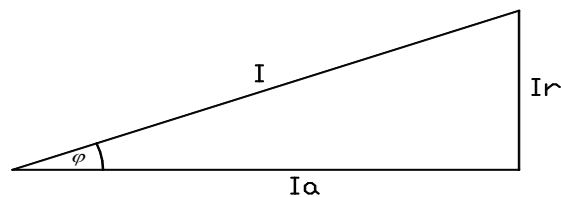
$$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$$

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

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

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

משולש הזרמים



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

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

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

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

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

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

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

מערכת תלת מופעית חיבור צרכן בחיבור כוכב ובחיבור משולש

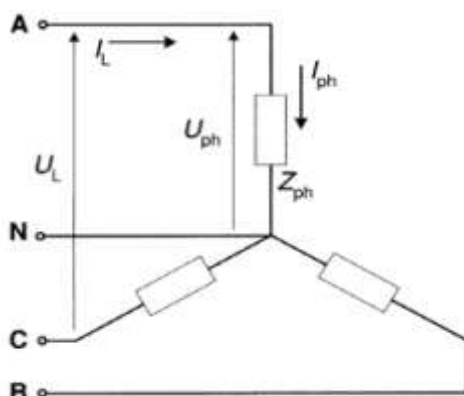
חיבור צרכן בחיבור כוכב

במערכת תלת פאזית ישנם 2 סוגי מתחים:

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

ב. 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 הקומפלוקסי 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-

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

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

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

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

ב. נחשב את העכבות הפאזיים-

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

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

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

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

חישוב המתח בנקודת הכוכב-

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

חישוב מתחים הפאזיים-

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

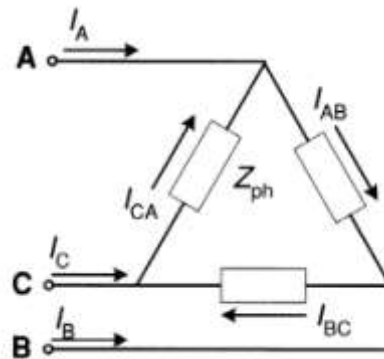
$$\vec{U}_{B_{ph}}' = \vec{U}_{B_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -120^\circ} - 121.628^{\angle -139^\circ} = 122.514^{\angle -101.14^\circ} V$$

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

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

חיבור צרכן בחיבור משולש

בחיבור משולש פאזות הצרכן מתחברות בין המוליכים הקווים.



בחיבור זה המתחים הפאזיים שווים למתחים הקווים:

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

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

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

זרמים יחושבו לפי חוק אום:

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

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

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

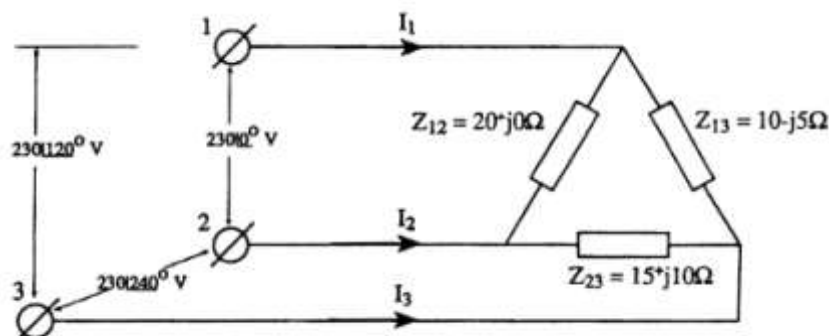
הספקים נחשב:

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

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

תרגיל דוגמא:

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



- חשב את הזרמים הקווים.
- חשב את סכום הזרמים הקווים.
- חשב את ההספקים הראקטיבי והאקטיבי בכל מופע ואת ההספק העומס הכולל.
- חשב את מקדם ההספק של העומס.

א. חישוב הזרמים הפאזיים:

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

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

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

נחשב את הזרמים הקווים לפי הפרש הזרמים הפאזיים:

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

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

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

ב. חישוב סכום הזרמים הקווים:

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

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

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

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

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

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

ד. חישוב מקדם ההספק של העומס:

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

פרק 2-חישובי רשתות

קיימים שיקולים שונים לבחירת שטח חתך מוליכים:

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

בחירת שטח חתך המוליכים לפי שיקול חוזק מכני

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

בתקנות החשמל מוגדרים החתכים המינימאליים של המוליכים במתקן מתח נמוך:

- א. למוליך 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: $X_0 = 0.2 - 0.3 \Omega/\text{Km}$

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

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

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

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

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 הבאות:
א. עבור רשת חד פאזית-

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = I * R_L * \cos \varphi_2 \pm I * X_L * \sin \varphi_2$$

$$\Delta U_{max} = I(R_L * \cos \rho \pm X_L * \sin \rho)$$

ב. עבור רשת תלת פאזית-

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = \sqrt{3} * I * R_L * \cos \varphi_2 \pm \sqrt{3} * I * X_L * \sin \varphi_2$$

$$\Delta U = \sqrt{3} * I(R_L * \cos \varphi_2 \pm X_L * \sin \varphi_2)$$

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

שילבי 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.

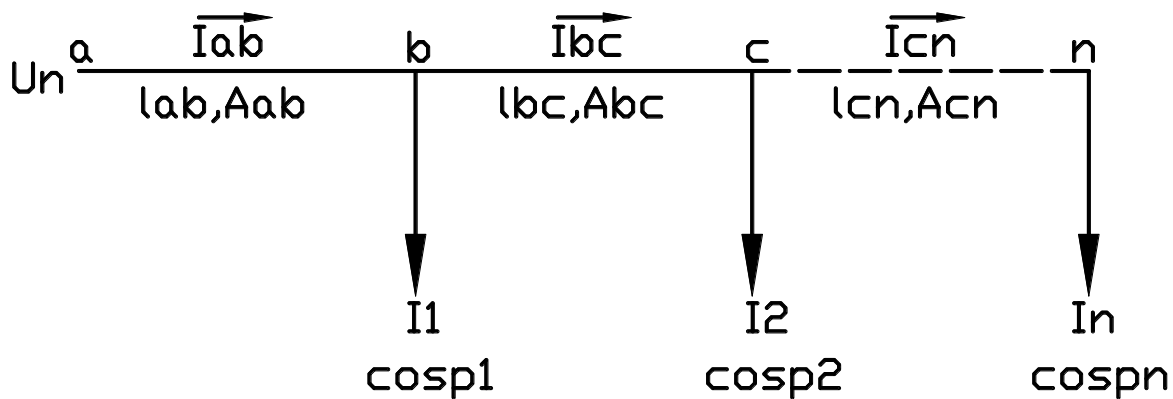
ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $\Delta U_a\%$ לפי הנוסחה: $\Delta U_a\% = \Delta U\% - \Delta U_r\%$

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

נוסחאות

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 ρ התנגדות הסגולית של המוליכים בהתאם לסוג החומר



כאשר:

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

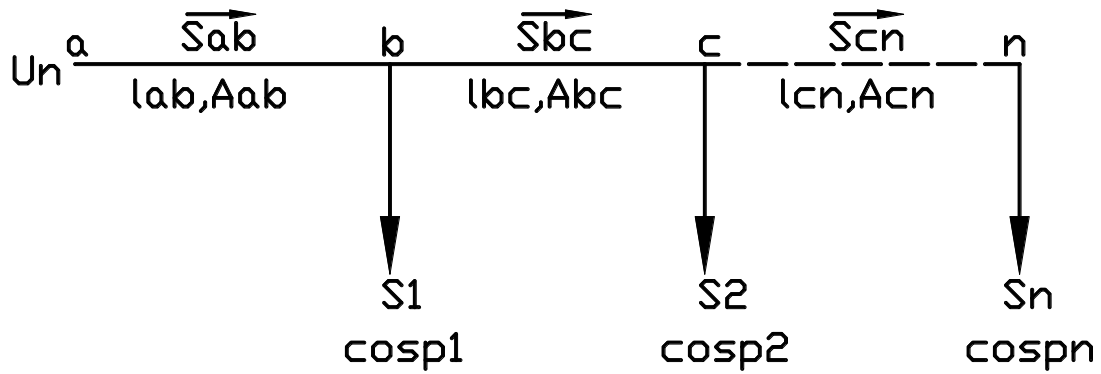
$$\vec{I2} = I_{a2} \mp jI_{r2}$$

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

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

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

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



כאשר:

$$\begin{aligned}\vec{S1} &= P1 + jQ1 \\ \vec{S2} &= P2 + jQ2 \\ \vec{Sn} &= Pn + jQn \\ \vec{Scn} &= \vec{Sn} \\ \vec{Sbc} &= \vec{Scn} + \vec{S2} \\ \vec{Sab} &= \vec{Sbc} + \vec{S1}\end{aligned}$$

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

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

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:

$$\Delta Umax = \Delta Uab + \Delta Ubc + \Delta Ucn$$

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

$$\Delta Umax\% = \frac{200 * \rho}{A * Un} * \sum Ia * l + \frac{Xo}{10Un} * \sum Ir * l$$

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

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	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta U_a = \frac{2\rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta U_a = \frac{2\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$
תלת מופעית	זרמי קטעים	$\Delta U_r = \frac{\sqrt{3}X_o}{1000} \sum_{i=1}^n \bar{I}rli * li$	$\Delta U_a = \frac{\sqrt{3} * \rho}{A} \sum_{i=1}^n Iali * li$
	הספקי קטעים	$\Delta U_r = \frac{X_o}{1000Un} \sum_{i=1}^n Qli * li$	$\Delta U_a = \frac{\rho}{A * Un} \sum_{i=1}^n Pli * li$

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

$$\begin{aligned}\Delta U_{max} &= \Delta U_a + \Delta U_r \\ \Delta U_{max} &= \frac{2 * \rho}{A} * \sum Ia * l + \frac{X_o}{1000} * \sum Ir * l \\ \Delta U_a &= Ro * Ia * l \\ \Delta U_r &= Xo * Ir * l \\ Ro &= \frac{\rho}{A} \\ R &= \frac{\rho}{A} * l\end{aligned}$$

תרגילי דוגמא ברשת זרם ישר

תרגיל דוגמא 1

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

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

א. חשב את שטח החתך של המוליך.

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. כיוון $\cos\varphi=1$

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

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

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$

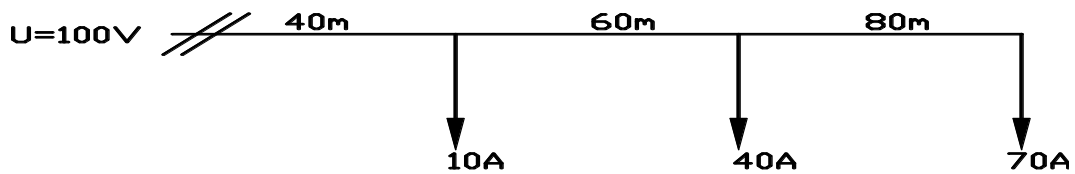
$$\Delta U_{max}\%' = \frac{200\rho}{A' * Un} * I * l = \frac{200}{16 * 115 * 58} * 30 * 40 = 2.249\%$$

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

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

תרגיל דוגמא 2

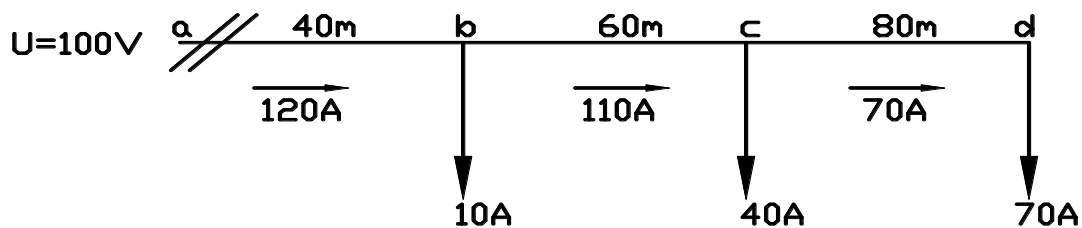
נתונה הרשת הבאה:



נתון כי $\rho = \frac{1}{34}$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 2



א. כיוון $\cos\varphi=1$

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

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

$$A = 250mm^2$$

ב.

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

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

$$\Delta Uac\% = 2.235\%$$

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

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

ג.

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

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

תרגיל דוגמא ברשת מתח חילופין חד פאזי

תרגיל דוגמא 1

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

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

- א. חשב מה שטח החתך הדרוש למוליך עבור מפל מתח מקסימאלי של 3%.
ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב עבורו את המתח הנופל על הצרכן.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $70mm^2$.

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

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

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

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

תרגיל דוגמא 2

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

חשב את מתח המקור.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

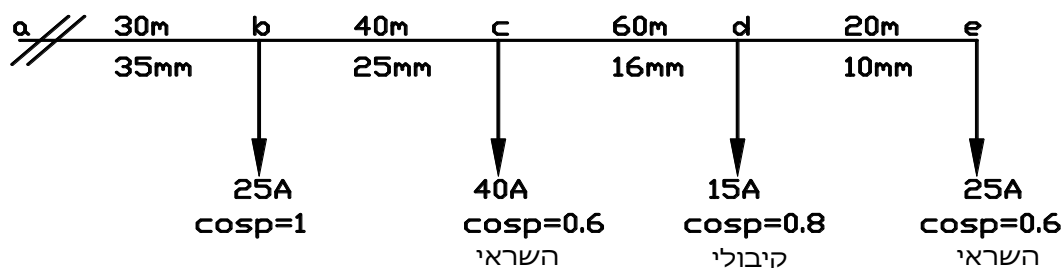
$$I_{La} = \frac{PL}{UL} = \frac{15 * 10^3}{220} = 68.182A$$

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

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

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

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



נתון כי:

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

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

$$U_n = 200V$$

א. חשב את המתח הנופל על הצרכנים.

ב. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

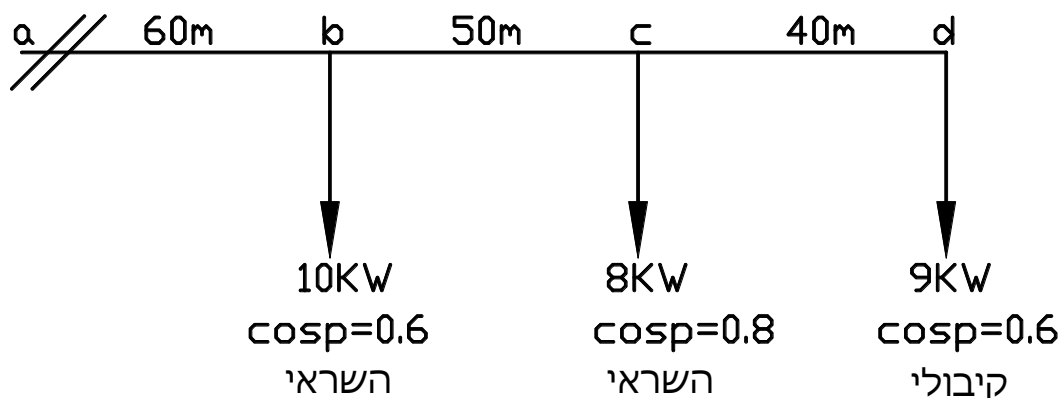
$$\Delta U_{max} = \sum \Delta U = \Delta U_{ab} + \Delta U_{bc} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{de} =$$

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

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

תרגיל דוגמא 4

נתונה הרשת הבאה:



נתון כי:

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

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

$$U_n = 240V$$

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 4

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$.

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

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

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

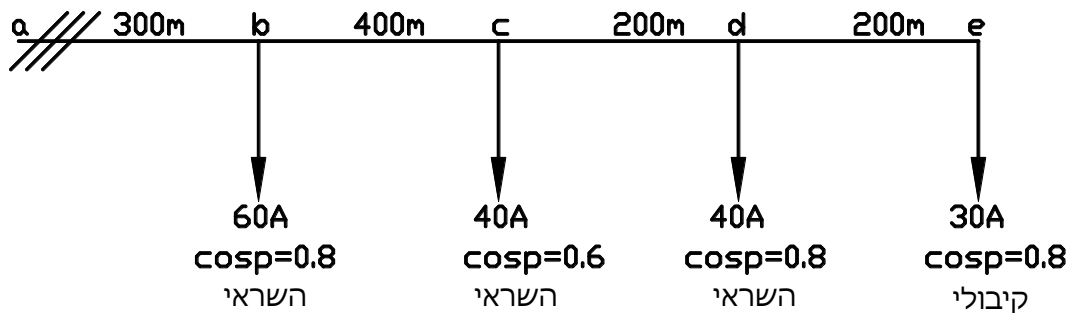
$$Uc = Un - \Delta U(ac) = 240 - 10.343 = 229.657V$$

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

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

תרגיל דוגמא ברשת מתח חילופין תלת פאזי

תרגיל דוגמא 1



נתון כי:

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

$$Un = 400V$$

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

כיוון ש-Xo לא נתון לכן:

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

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

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

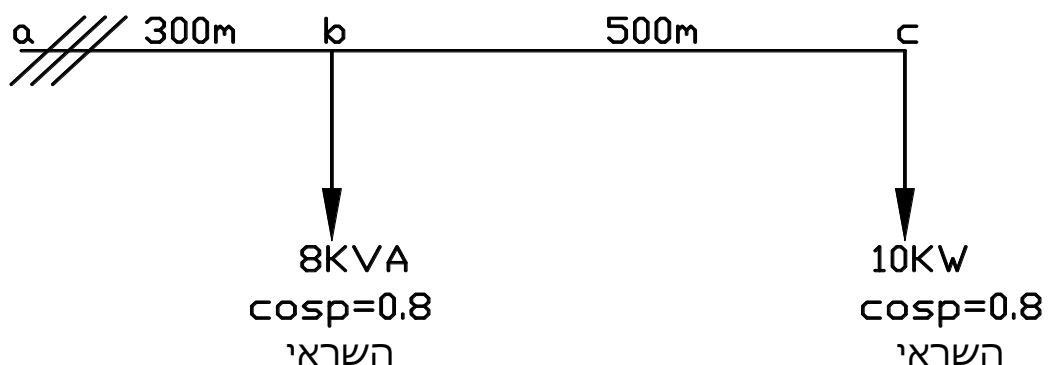
ב. נבחר שטח חתך מסחרי של $150mm^2$.

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

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

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

תרגיל דוגמא 2



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

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 2

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

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

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

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

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

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

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

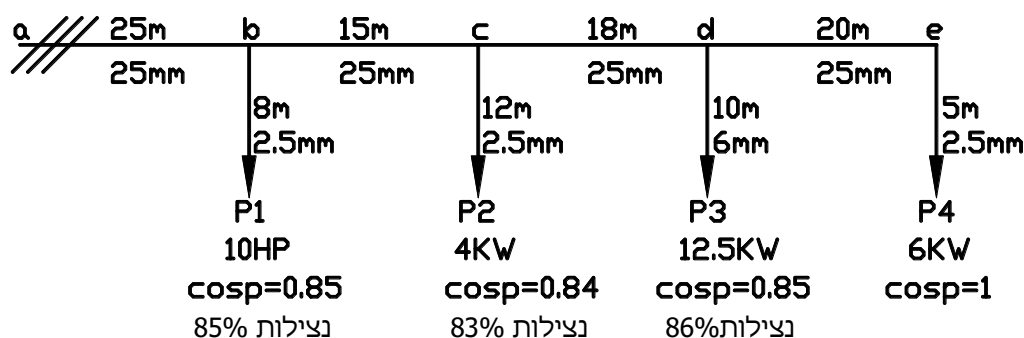
$$A = \frac{100 \rho}{\Delta U_a \% * U_n^2} * \sum P * l = \frac{100 \rho}{\Delta U_a \% * U_n^2} * (P_{ab} * l_{ab} + P_{bc} * l_{bc}) =$$

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

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

נבחר בשטח חתך מסחרי של $95 mm^2$.

תרגיל דוגמא 3



הקו התלת מופעי המתואר בתרשים מזין שלושה מנועים ותנור תלת מופעי

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

חשב: את הפסדי המתח עבור כל אחד מהצרכנים כאשר $U_n = 400V$.

פתרון תרגיל דוגמא 3

$$P1 = \frac{P_b}{\eta_b} = \frac{10 * 736}{0.85} = 8658.82 W$$

$$P2 = \frac{P_c}{\eta_c} = \frac{4000}{0.83} = 4819.28 W$$

$$P3 = \frac{P_d}{\eta_d} = \frac{12500}{0.86} = 14534.9 W$$

$$P4 = \frac{P_e}{\eta_e} = \frac{6000}{1} = 6000 W$$

$$P_{de} = P4 = 6000 W$$

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

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

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

נתון כי ניתן להזניח את ההשראות בקו, והמשמעות היא:

$$\Delta U = \Delta U_a$$

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

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

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

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

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

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

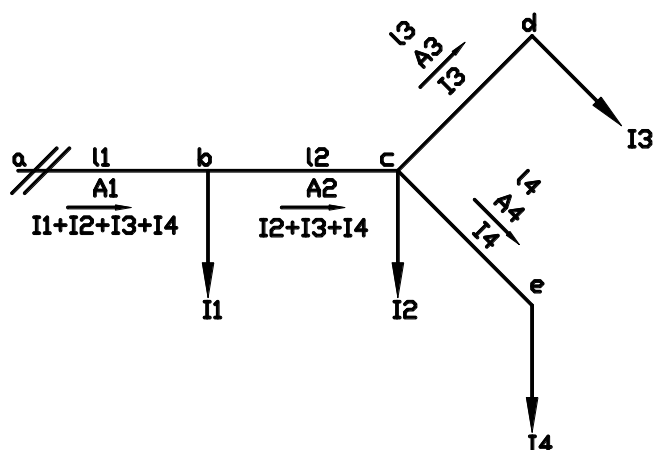
$$\Delta U(a-3) = \frac{1}{400 * 34} * \left(\frac{34013 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{14534.9 * 10}{6} \right) = 6.49V$$

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

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

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

רשת מתפצלות

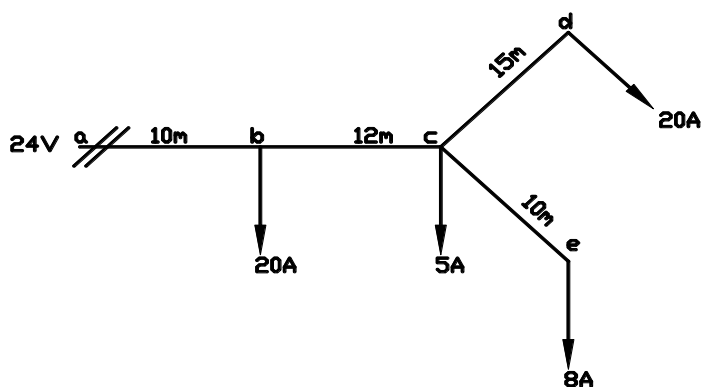


$$\Delta U_{max}(ad) = \frac{2\rho}{A(ad)} * \sum (I(ad) * l(ad))$$

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

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מביניהם.

תרגיל דוגמא



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

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

פתרון לתרגיל דוגמא

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

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

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

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

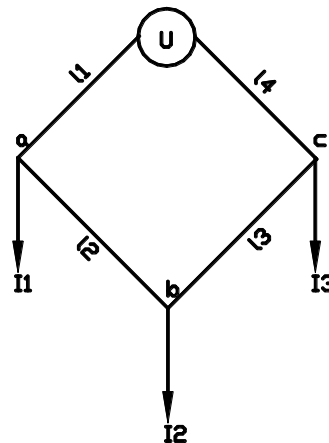
$$A = \frac{200\rho}{\Delta U_{max\%} * U_n} * \sum I * l$$

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

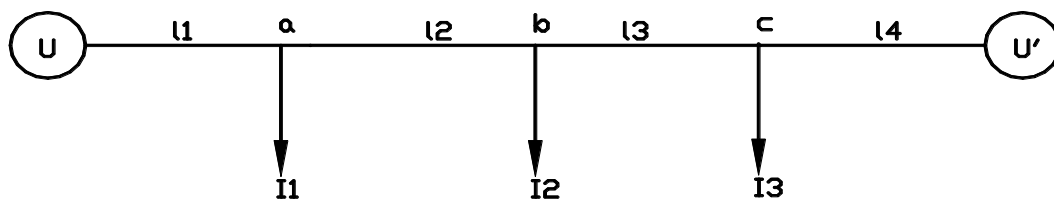
$$A(ae) = \frac{200}{3 * 24 * 57} * (53 * 10 + 33 * 12 + 8 * 10) = 49.025mm^2$$

על פי החישוב ניתן לראות כי שטח הגדול האחיד של קטע רשת ad הוא גדול יותר 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':

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

או

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

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

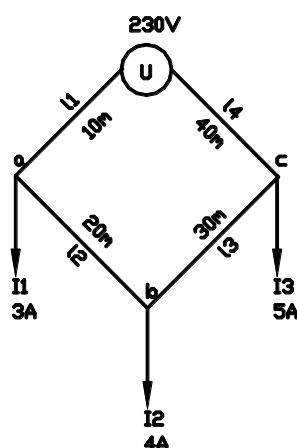
$$I_{ab} = I_u - I_1$$

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

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

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

תרגיל דוגמא 1



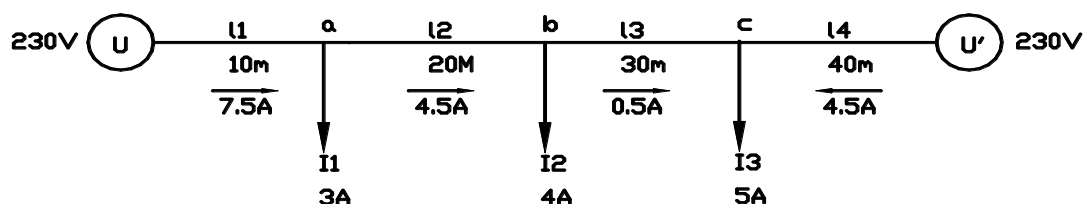
נתון כי:

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

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

חשב ומצא את הנקודה ברשת שבה המתח הוא מינימאלי.

פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

א

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

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

ולכן

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

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

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

הסימן השלילי מעיד כי בקטע זה כיוון הזרם הפוך.

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

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

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

אפשרות 2-

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

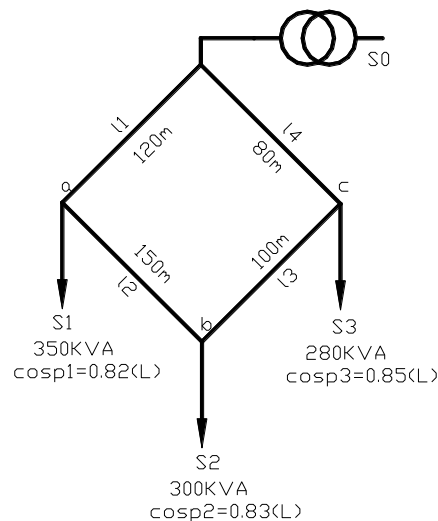
$$\Delta U_{uc} = \frac{2}{4 * 58} * 7.5 * 10 + 4.5 * 20 + 0.5 * 30 = 1.552V$$

המתח בנקודה השפך-

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

תרגיל דוגמא 2

באיור הבא מתוארת מערכת הספקת חשמל תלת מופעית במתח נמוך-

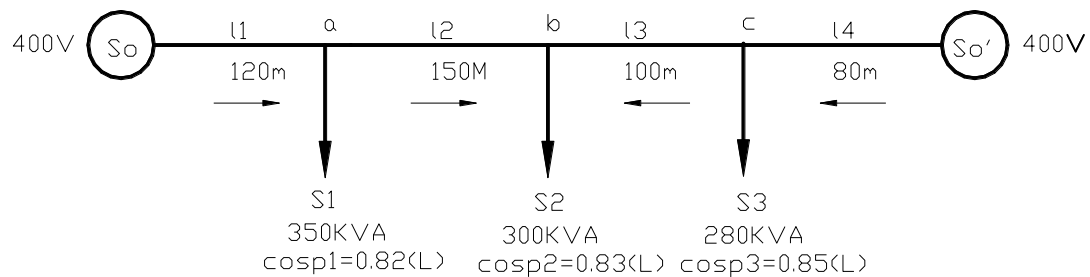


נתון כי המוליכות הסגולית של המוליכים- $g = 35 \left[\frac{m}{\Omega mm^2} \right]$ מתח הרשת 400V.

ההיגב האשראי של המוליכים זניח.

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

ב. חשב את המתח בנקודת השפך.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

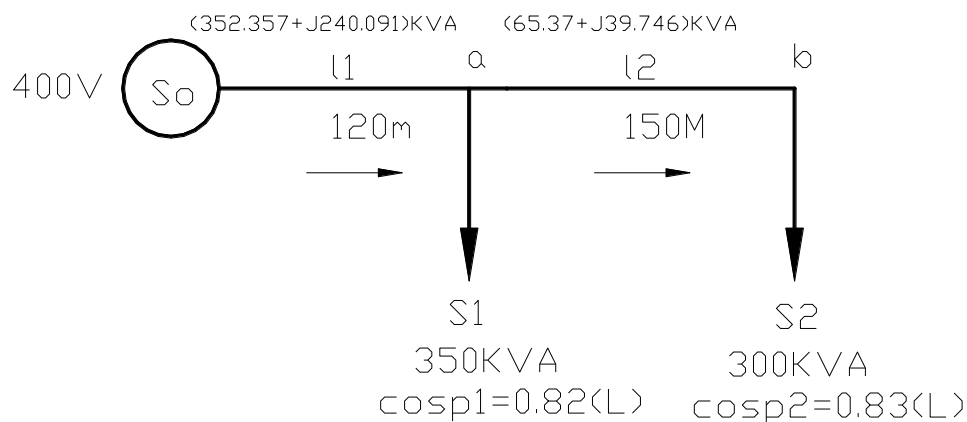
סימן שלילי בזווית או זווית הגדולה מ- $\pm 90^\circ$ מעידה על שינוי כיוון הזרם (נקודת השפך). ועל מנת

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

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

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

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



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

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

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

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

נבחר שטח חתך מסחרי של $240 mm^2$.

ב.

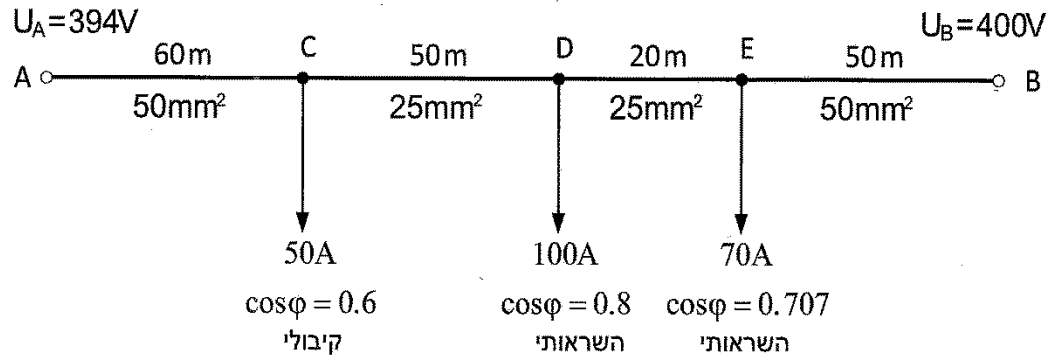
$$\Delta U_{ob} = \frac{\rho}{A * Un} * \sum P * l = \frac{\rho}{A * Un} * (P_{oa} * l_{oa} + P_{ab} * l_{ab}) =$$

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

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

תרגיל דוגמא:

באיור לשאלה נתונה רשת תלת מופעית המוזנת בשני קצוותיה במתחים שונים. מוליכי הרשת עשויים מנחושת $\left(\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}\right)$. השראות המוליכים ניתנת להזנחה.



- חשב את הזרמים (מבוטאים כביטוי מרוכב) שהיו זורמים ברשת, אילו 2 מתחי הזינה היו זהים ושווים ל- 400V.
- חשב את הזרם שהיה זורם ברשת, ללא צרכנים, ומתחי הזינה היו כנתון באיור לשאלה.
- חשב את הזרמים האמיתיים הזורמים הרשת (מבוטאים כביטוי מרוכב).
הארה: פתרון סעיף זה הוא סיכום של סעיפים א ו- ב בכל קטע וקטע.
- באיזה נקודה המתח מזערי? ומה ערכו של המתח המזערי?

פתרון לתרגיל דוגמא:

א.

$$I_C = 50 \angle 53.13 = 30 + j40 \text{ A}$$

$$I_D = 100 \angle -36.87 = 80 - j60 \text{ A}$$

$$I_E = 70 \angle -45 = 49.49 - j49.49 \text{ A}$$

$$I_{AC} = \frac{(49.49 - j49.49) * 50 + (80 - j60) * 70 + (30 + j40) * 120}{60 + 50 + 20 + 50} =$$

$$I_{AC} = 64.858 - j10.414 \text{ A}$$

$$I_{BE} = \frac{(30 + j40) * 60 + (80 - j60) * 110 + (49.49 - j49.49) * 130}{60 + 50 + 20 + 50} =$$

$$I_{BE} = 94.632 - j59.076 \text{ A}$$

$$I_{CD} = I_{AC} - I_C = (64.858 - j10.414) - (30 + j40) = 34.858 - j50.414 \text{ A}$$

$$I_{ED} = I_{BE} - I_E = (94.632 - j59.076) - (49.49 - j49.49) = 45.142 - j9.586 \text{ A}$$

נקודת השפך היא נקודת מפגש הזרמים והוא בנקודה D.

ב.

חישוב התנגדות הקטעים:

$$R_{AC} = \frac{\rho * l}{A} = \frac{60}{57 * 50} = 0.021 \Omega$$

$$R_{DC} = \frac{\rho * l}{A} = \frac{50}{57 * 25} = 0.035 \Omega$$

$$R_{DE} = \frac{\rho * l}{A} = \frac{20}{57 * 25} = 0.014 \Omega$$

$$R_{EB} = \frac{\rho * l}{A} = \frac{50}{57 * 50} = 0.0175 \Omega$$

$$I_0 = \frac{U_B - U_A}{\sqrt{3} * R_T} = \frac{400 - 394}{\sqrt{3} * (0.021 + 0.035 + 0.014 + 0.0175)} = 39.59 + j0 \text{ A}$$

כיוון הזרם מהמקור הגדול לקטן ז"א מנק' B לנק' A

ג.

$$I_{BE} = I_{BE} + I_0 = (94.632 - j59.076) + (39.59 + j0) = 134.222 - j59.076 \text{ A}$$

$$I_{ED} = I_{BE} - I_E = (134.222 - j59.076) - (49.49 - j49.49) = 84.732 - j9.586 \text{ A}$$

$$I_{DC} = I_{ED} - I_D = (84.732 - j9.586) - (80 - j60) = 4.732 + j50.414 \text{ A}$$

$$I_{AC} = I_{AC} - I_0 = (64.858 - j10.414) - (39.59 + j0) = 25.268 - j10.414 \text{ A}$$

נקודת השפך החדשה היא נקודת מפגש הזרמים והוא בנקודה C.

ד.

$$\Delta U_{AC} = \sqrt{3} * \rho * \Sigma \left(\frac{I_a l}{A} \right) = \frac{\sqrt{3}}{57} * \frac{25.268 * 60}{50} = 0.921$$

$$U_C = U_A - \Delta U_{AC} = 394 - 0.921 = 393.079 \text{ V}$$

לבדיקה נחשב את המתח בנקודת השפך C מכיוון מקור B

$$\Delta U_{BC} = \frac{\sqrt{3}}{57} * \left(\frac{134.222 * 50}{50} + \frac{84.732 * 20}{25} + \frac{4.732 * 50}{25} \right) =$$

$$\Delta U_{BC} = 6.426 \text{ V}$$

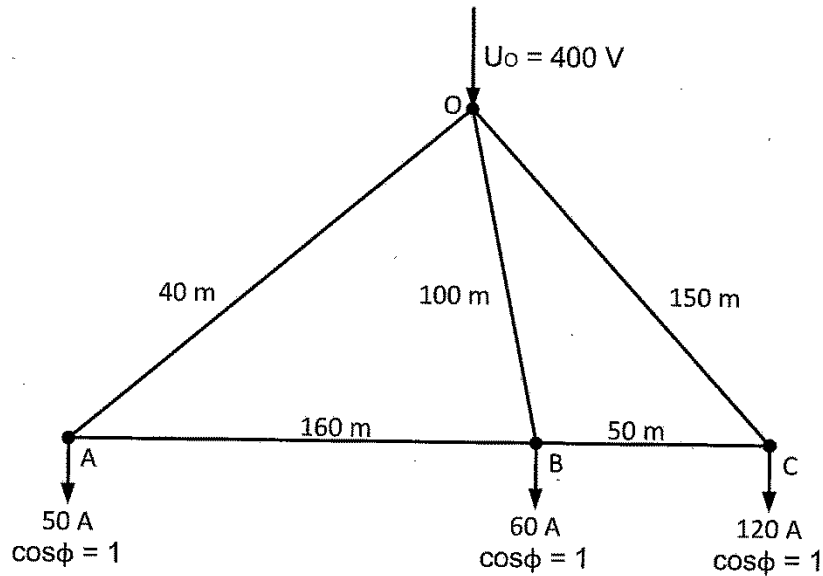
$$U_C = U_B - \Delta U_{BC} = 400 - 6.426 = 393.574 \text{ V}$$

תרגיל דוגמא:

באיור לשאלה נתונה רשת תלת-מופעית, המוזנת בנקודה O במתח 400 V. מוליכי הרשת עשויים נחושת

$$\left(\gamma = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right) \text{ בחתך } 16 \text{ mm}^2.$$

הערה: השראות המוליכים ניתנות להזנחה.



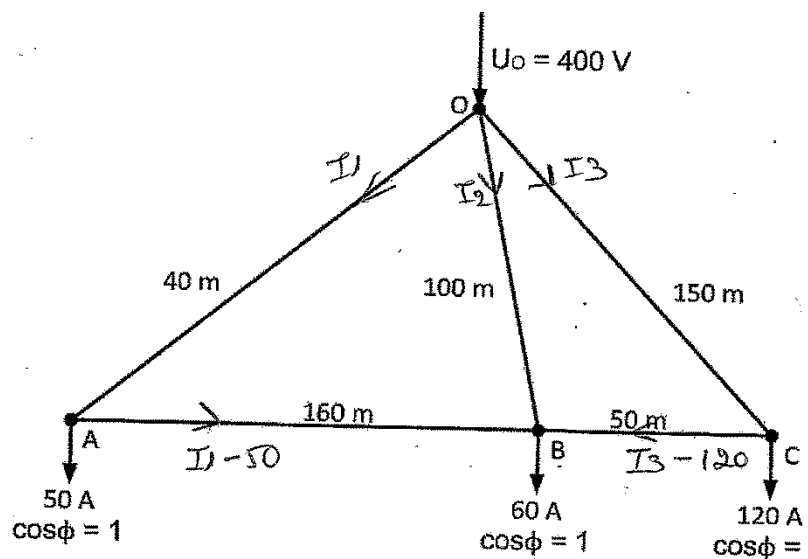
א. חשב את הזרמים הזורמים בכל אחד מקטעי הרשת.

ב. באיזו נקודה המתח ברשת מזערי?

ג. מהו ערכו של המתח המזערי?

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. נקבע באופן שרירותי את כיווני הזרמים בענפים השונים:



$$I_1 + I_2 + I_3 = 50 + 60 + 120 = 230$$

$$40I_1 + 160(I_1 - 50) = 100I_2$$

$$150I_3 + 50(I_3 - 120) = 100I_2$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 230$$

$$40I_1 + 160I_1 - 8000 = 100I_2$$

$$150I_3 + 50I_3 - 6000 = 100I_2$$

$$1I_1 + 1I_2 + 1I_3 = 230$$

$$200I_1 - 100I_1 + 0I_3 = 8000$$

$$0I_1 - 100I_2 + 200I_3 = 6000$$

נחשב 3 משוואות עם 3 נעלמים באמצעות המחשבון ונקבל:

$$I_1 = 80A$$

$$I_2 = 80A$$

$$I_3 = 70A$$

$$I_{OA} = 80A$$

$$I_{OB} = 80A$$

$$I_{OC} = 80A$$

$$I_{AB} = I_1 - 50 = 80 - 50 = 30A$$

$$I_{CB} = I_3 - 120 = 70 - 120 = -50A \Rightarrow I_{BC} = 50A$$

ב.

נקודת השפך הוא בנקודה C, ובנקודה זו המתח הינו מזערי.

ג.

$$\Delta U_{OC} = \frac{\sqrt{3} * \rho}{A} * \Sigma(I_a l) = \frac{\sqrt{3} *}{57 * 16} * 70 * 150 = 19.94V$$

$$U_C = U_O - \Delta U_{OC} = 400 - 19.94 = 380.06 V$$

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול הפסדי הספק

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

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

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

שלבי החישוב:

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית או פולארית.

ב. חישוב שטח אחיד של מוליכי הרשת.

נוסחאות:

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

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

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

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

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

ρ - התנגדות סגולית של חומר המוליך:

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

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

l - המרחק מהמקור ועד לצרכן (m).

A - שטח החתך של המוליך (mm²).

אם ידוע שטח החתך האחד 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:

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

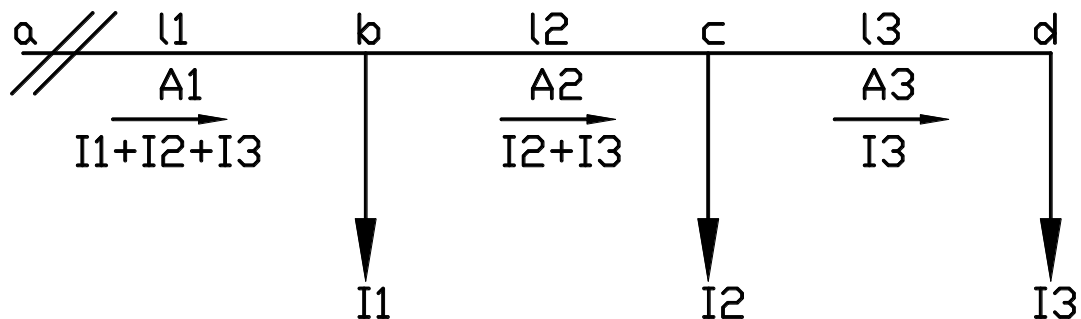
את הפסדי ההספק בוואטים ניתן לחשב לפי:

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

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	$\Delta P = \frac{\rho}{A * Un^2} \sum_{i=1}^n S_{li}^2 * l$

ברשת זרם ישר



$$I_{cd} = I_3$$

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

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

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

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

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

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

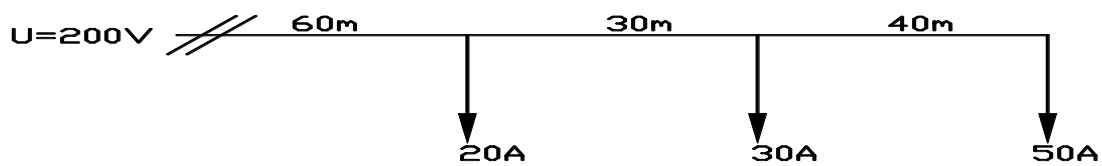
$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

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

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

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת חשמל במתח ישר המתוארת באיור הבא:



נתון:

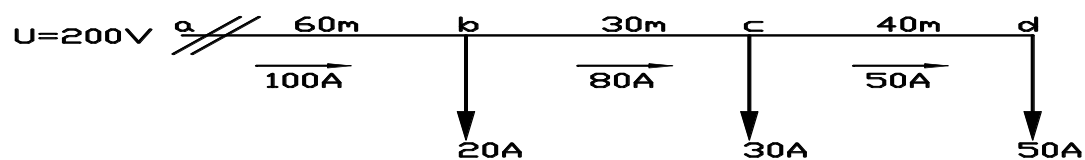
$$\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

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

מה איבוד ההספק המקסימאלי ברשת ?

האם הרשת כלכלית אם לא הצע פתרון לשיפור ?

פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

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

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

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

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

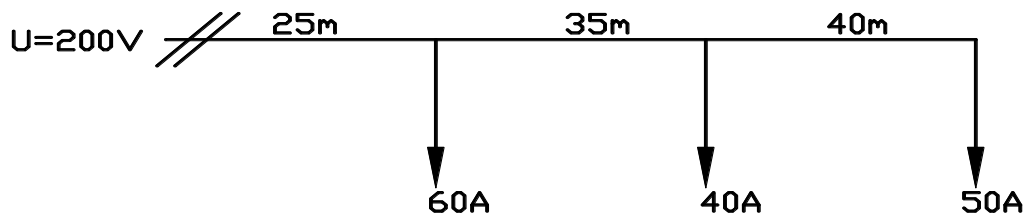
$$P_n = U_n * I_n = 200 * 100 = 20KW$$

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

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:



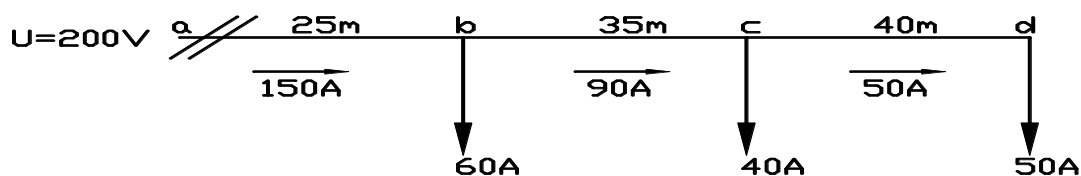
נתון:

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

א. חשב שטח חתך אחד לרשת עבור איבודי הספק מקסימאליים של 6%.

ב. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את איבודי ההספק מקסימאליים באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2



א.

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

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

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

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

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

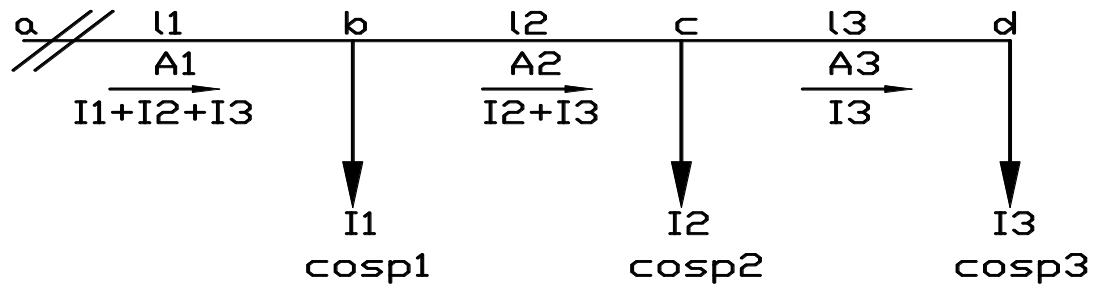
$$A = \frac{200}{6 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 30.92mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של $35mm^2$

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

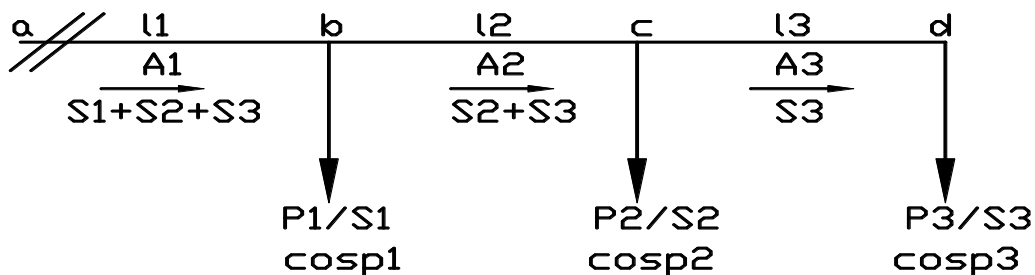
$$\Delta P\% = \frac{200}{35 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 5.3\%$$



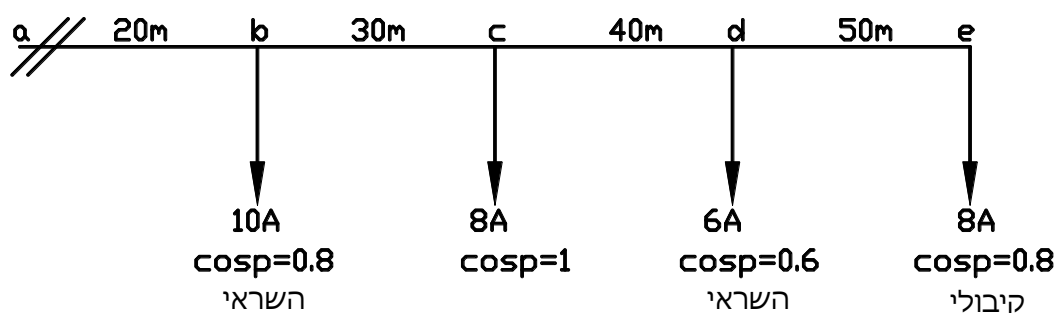
$$\begin{aligned} \vec{I_{cd}} &= \vec{I_3} \\ \vec{I_{bc}} &= \vec{I_2} + \vec{I_3} \\ \vec{I_{ab}} &= \vec{I_1} + \vec{I_2} + \vec{I_3} \\ \Delta P_{cd} &= \Delta P_{cd} = \frac{2 * \rho_3}{A_3} * I_{cd}^2 * l_3 \\ \Delta P_{bc} &= \frac{2 * \rho_2}{A_2} * I_{bc}^2 * l_2 \\ \Delta P_{ab} &= \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1 \\ \Delta P_{max} &= \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd} \end{aligned}$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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



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



נתון:

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

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

$$U = 250V$$

- חשב את הזרם בכל אחד מקטעי הרשת
 - חשב את שטח החתך האחיד של מוליכי הרשת עבור איבודי הספק מקסימאליים של 1.2%.
 - קבע שטח חתך מסחרי וחשב לפיו את איבודי ההספק בקטע bc ואת סכום איבודי ההספק הכלליים ברשת.
- פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג. נבחר שטח חתך מסחרי של $25mm^2$.

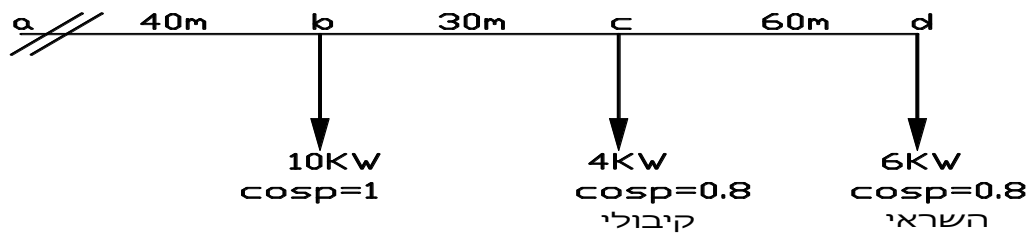
$$\Delta P_{bc} = \frac{2\rho}{A} * I_{bc}^2 * l_{bc} = \frac{2}{25 * 34} * 18^2 * 30 = 22.78W$$

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

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

$$U = 250V$$

א. חשב את שטח האחיד והמסחרי של הרשת

ב. חשב את הפסדי ההספק ברשת באחוזים.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

נבחר שטח חתך מסחרי של $16mm^2$.

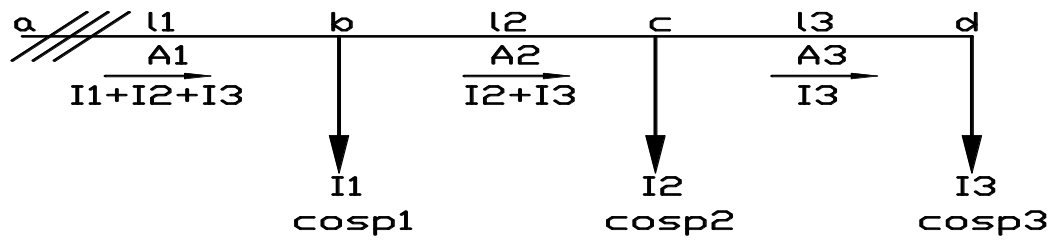
ב.

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

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

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

ברשת מתח חילופין תלת פאזית



$$\vec{lcd} = \vec{l3}$$

$$\vec{lbc} = \vec{l2} + \vec{l3}$$

$$\vec{labc} = \vec{l1} + \vec{l2} + \vec{l3}$$

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

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

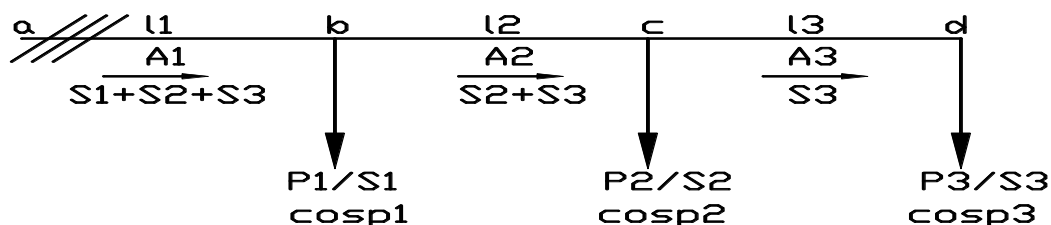
$$\Delta Pab = \frac{3 * \rho^1}{A1} * lab^2 * l1$$

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

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



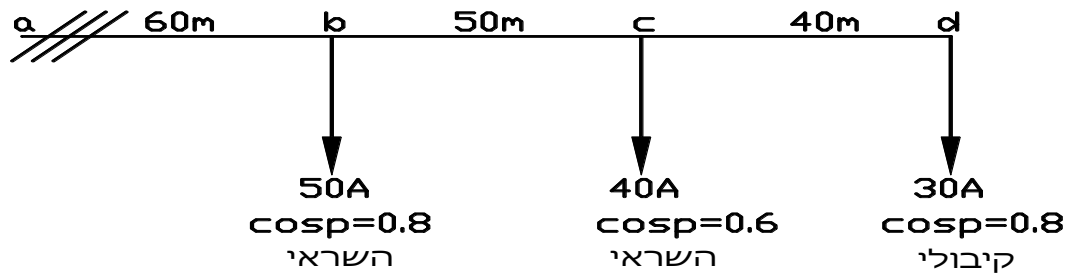
$$S = \sqrt{3} * U * I$$

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

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

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

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



נתון:

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

$$UL = 400V$$

- 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג.

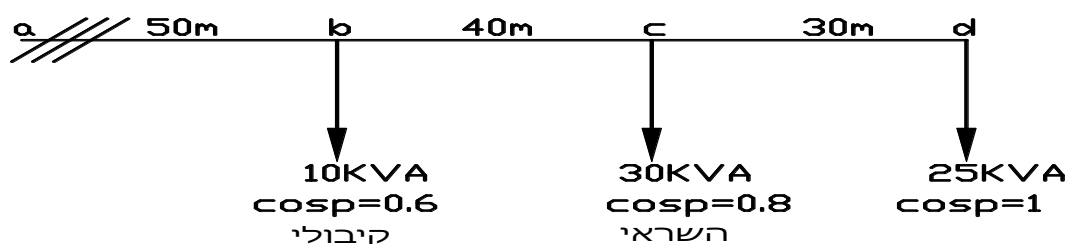
נבחר שטח חתך מסחרי $25 mm^2$.

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

$$UL = 400V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג.

נבחר שטח חתך מסחרי $50 mm^2$.

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

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

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.

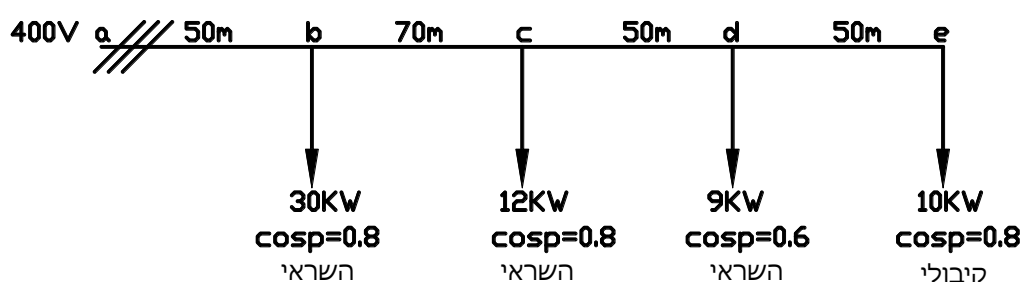
יש לציין כי לא ניתן לבחור חתך מוליך ללא בחירת גודל וסוג המאבטח המגן עליו. נרחיב בנושא זה בפרק הדן בהגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר.

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:

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

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).

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

לפי שיטת ההתקנה נבחר בטבלה 90.7 . עם מקדם תיקון ל- I_z עבור 3 כבלים של 0.82.

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

זרם מרבי (A) I_z מתמיד	שטח חתך נבחר בהתאם לתנאי (mm ²)	זרם מחושב כולל מקדם תיקון (A) $I_{b'} = \frac{I_b}{c}$	זרם מחושב (A) I_b	קטע רשת
31	2.5	$I_{b'} = \frac{18.042}{0.82} = 22$	18.042	de
40	4	$I_{b'} = \frac{28.182}{0.82} = 34.368$	28.182	cd
52	6	$I_{b'} = \frac{48.802}{0.82} = 59.515$	48.802	bc
122	25	$I_{b'} = \frac{102.234}{0.82} = 124.676$	102.234	ab

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

נציג את זרמי הקטעים בצורה קרטזית:

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

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

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

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

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

$$\Delta U_a\% = \frac{\sqrt{3} * 100}{400 * 57} * \left[\frac{14.437 * 50}{2.5} + \frac{27.424 * 50}{4} + \frac{44.744 * 70}{6} + \frac{88.045 * 50}{25} \right] =$$

$$\Delta U_a\% = 10.1\%$$

מפל מתח זה אינו עומד בדרישת התרגיל- מפל מתח מקסימאלי של 5%

הפתרון לכך הוא-להגדיל את שטחי החתך של הקטעים ולחשב שוב את המפל מתח

לדוגמא.

$$\Delta U_a\% = \frac{\sqrt{3} * 100}{400 * 57} * \left[\frac{14.437 * 50}{4} + \frac{27.424 * 50}{10} + \frac{44.744 * 70}{16} + \frac{88.045 * 50}{35} \right] =$$

$$\Delta U_a\% = 4.86\%$$

מצב זה עומד בדרישות התרגיל.

תרגיל דוגמא 2

מפעל צורך הספק של 150KW במתח שלוב 400V, במקדם הספק של 0.85 השראי. המפעל מוזן משנאי חלוקה קרוב באמצעות כבל A רב גידי תלת פאזי העשוי נחושת. הכבל טמון במישרין בקרקע עם כיסוי מגן מלוחות ביטון. נתוני הכבל: אורך 120m בחתך 150mm^2 הגיבו האשראי $X_o = 0.02 \frac{\Omega}{\text{km}}$ 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 הגיבו 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:

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

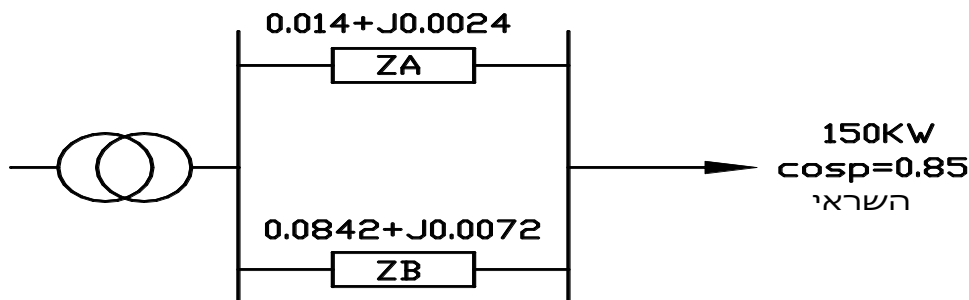
$$X_A = \frac{X_{oA}}{1000} * l_A = \frac{0.02}{1000} * 120 = 0.0024\Omega$$

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

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

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

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



נחשב את זרם העומס:

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

נחשב את הזרמים בכל כבל לפי כלל מחלק הזרם:

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

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

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:

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

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.

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מינימום חומר

שיקול של מינימום חומר מאפשר לבחור שטחי חתך לא אחידים לקטעי הרשת אשר מבטיחים תנאי שימוש בכמות מינימאלית של נחושת (או אלומיניום), כאשר מפל המתח הכללי ברשת לא עובר את מפל המתח המקסימאלי המותר.

לפי עיקרון זה, מקדם הרשת הוא היחס בין שטח החתך של כל קטע ברשת, לבין השורש הריבועי של הרכיב האקטיבי של זרם או הספק הקטע ויהיה מספר קבוע לכל קטעי הרשת:

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

שלבי חישוב

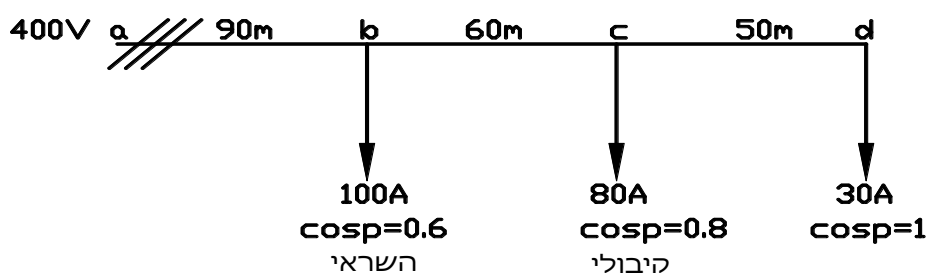
- א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת, בצורה קרטזית.
- ב. חישוב מפל המתח הראקטיבי $\Delta U_r\%$.
- ג. חישוב מפל המתח האקטיבי המותר $\Delta U_a\%$.
- ד. חישוב מקדם הרשת k_I או k_P .
- ה. חישוב שטחי החתך של קטעי הרשת.

נוסחאות

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

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת תלת פאזית הבאה:



נתון:

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נחשב את זרמי הקטעים ונציגם בצורה קרטזית-

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

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

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

נחשב את מפל המתח האקטיבי המותר-

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

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

נחשב את מקדם הרשת $-k_I$

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

נחשב את שטחי החתך של קטעי הרשת לפי-

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

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

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

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

ב. נבחר שטחי חתך סטנדרטים-

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

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

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

נחשב את הפסדי ההספק-

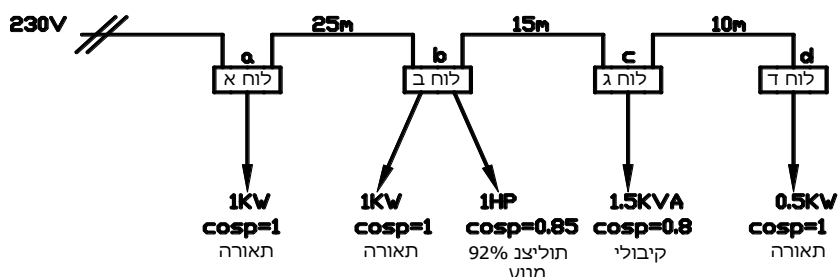
$$P_n = P_{ab} = \sqrt{3} * I_{a_{ab}} U_n = \sqrt{3} * 154 * 400 = 106.694 KW$$

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה מערכת לוחות חלוקה חד מופעיים כפי שמתואר באיור הבא:



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

זניח. מפל המתח המרבי הוא 4%.

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

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

שטחי חתך מסחריים.

.א

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

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

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

$$I_{ab} = I_{bc} + I_{b2} + I_{b1} = I_{bc} + \frac{P_{b2}}{Un * \cos \varphi_{b2} * \eta_{b2}} + \frac{P_{b1}}{Un * \cos \varphi_{b1}} =$$

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

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

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

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

.ב

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

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

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

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

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

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

נבחר שטחי חתך מסחריים:

שטח חתך מינימאלי על פי תקנות החשמל עבור מתח נמוך-

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

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

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

$$A_T = 4 mm^2$$

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

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

$$C_w = C_k$$

הוצאות הרשת לאחר הפעלת כוללים 2 מרכיבים:

א. עלות הפסדי אנרגיה שנתית במוליכי הקו C_w .

מרכיב זה תלוי באיבודי ההספק בקו ובתעריף של האנרגיה החשמלית:

$$C_w = \Delta W * M$$

כאשר:

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

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

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

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

כאשר:

8700- מספר השעות בשנה.

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

R_L - התנגדות מוליך הרשת (Ω).

I - זרם העומס ברשת (A).

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

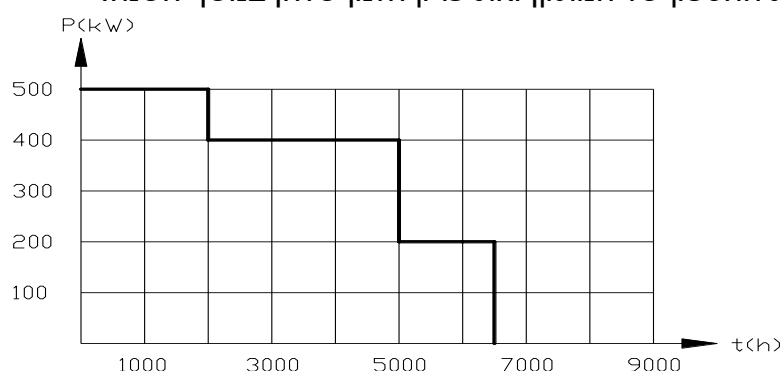
$$\Delta W = 3 * I_{max}^2 * R_L * \frac{T_{max}}{1000}$$

כאשר:

I_{max} - זרם העומס המרבי (A).

T_{max} - זמן שימוש בהספק מרבי (h).

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



ניתן לראות מהדיאגרמה כי ההספק המרבי הוא 500kW.

את הזרם המרבי ניתן לחשב לפי-

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

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

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

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

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

ניתן לבטא את התנגדות המוליכים גם:

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

כאשר:

l - אורך הקו (m).

A - שטח החתך של המוליך (mm^2).

וניתן לבטא את הפסדי האנרגיה השנתית במוליכי הקו גם:

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

ב. עלות השנתית של ריבית והפחת C_k .

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

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

כאשר:

$K\%$ ריבית ופחת שנתיים (%).

B - עלות הרשת (ש).

ההשקעה בבניית הרשת תלויה בשטח החתך המוליכים ביחס ישר:

$$B = b * l$$

כאשר:

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

A - שטח החתך של מוליכי הרשת (mm^2).

l - אורך מוליכי הרשת (m).

לסיכום, העלות השנתית של הריבית והפחת:

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

כאמור לפי כלל קלויין:

$$C_w = C_k$$

ניתן לבטא זאת גם:

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

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

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

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

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

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

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

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

ג. רישום המשוואה:

$$C_w = C_k$$

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

תרגיל דוגמא

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

א. מתח הרשת $400[V]$.

ב. ההספק הנדרש $30[KVA]$.

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

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

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

ו. הריבית והפחת השנתיים 13.5% .

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

ח. אורך הכבל $200[m]$.

ט. העומסים הפאזיים הם סימטריים ומאוזנים.

פתרון לתרגיל דוגמא

מהנתונים ניתן להבין כי הצרכן עובד בעומס קבוע של:

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

נחשב את הזרם המקסימאלי:

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

נבטא את עלות הפסדי האנרגיה:

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

נבטא את עלות הריבית והפחת השנתית:

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

נרשום את המשוואה ונחלץ את שטח החתך:

$$C_w = C_k$$

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

חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול צפיפות זרם

בשיקול זה קימות 2 אפשרויות:

א. שיקול צפיפות זרם כלכלית.

ב. שיקול צפיפות זרם אחידה.

שיקול צפיפות זרם כלכלית

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

צפיפות הזרם היא היחס בין הזרם לשטח החתך

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

כאשר:

I - זרם בקו $[A]$.

A - שטח חתך הקו $[mm^2]$.

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

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

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

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

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

כאשר:

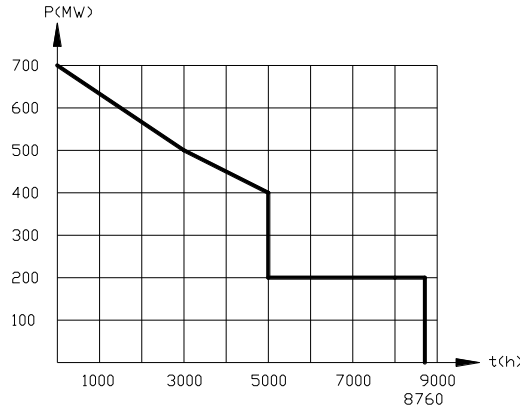
Un_{ec} - המתח הנקוב המומלץ $[kV]$.

l - אורך הקו $[km]$.

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

תרגיל דוגמא

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



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

פתרון לתרגיל דוגמא

נחשב את כמות האנרגיה לפי-

$$W = \sum P * t$$

עבור ההספק הנצרך המתואר בדיאגרמה נחשב את כמות האנרגיה לפי-

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

נחשב את הזמן השימוש בהספק המרבי לפי-

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

לפי הטבלה ניתן לקבוע שצפיפות הזרם הכלכלית היא-

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

נחשב את המתח המומלץ לפי-

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

צפיפות זרם אחידה

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

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

שלב חישוב

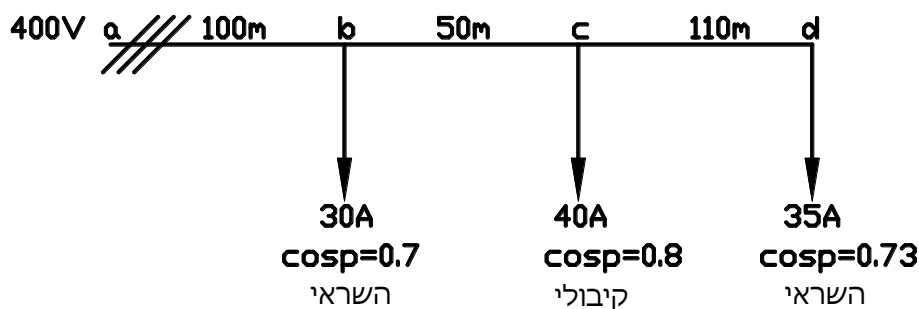
- הצגת זרמי הקטעים הרשת בצורה קרטזית ובצורה פולארית.
- חישוב מפל המתח הראקטיבי $Ur\%$.
- חישוב מפל מתח אקטיבי מותר $Ua\%$.
- חישוב צפיפות זרם אחידה j .
- חישוב שטחי חתך של הרשת.

נוסחאות

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

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת עילית תלת פאזית עשויה ממוליכי נחושת הבאה:



נתון:

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

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

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא

א. הצגת זרמי הקטעים בצורה פולארית וקרטזית:

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

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

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

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

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

חישוב מפל המתח הראקטיבי:

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

חישוב מפל המתח האקטיבי:

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

חישוב צפיפות הזרם האחידה:

$$j = \frac{\Delta U_a\% * U_n}{\sqrt{3} * 100 \rho * \sum_{i=1}^n l_i * \cos \varphi_{li}} = \frac{4.17 * 400}{\sqrt{3} * 100 * \frac{1}{57} * (110 * 0.73 + 50 * 1 + 100 * 0.96)} = 2.43 \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

חישוב שטחי החתך של הקטעים השונים:

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

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

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

ב. בחירת שטחי חתך מסחריים:

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

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

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

חישוב המתח בנקודה d:

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

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

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

$$\Delta U_{ad} = \Delta U_{aad} + \Delta U_{rad} = 15.655 + 3.308 = 18.963V$$

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

פרק 3-זרמי קצר

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

במערכת תלת מופעית מבחינים ב-4 סוגים של קצר:

- 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 מוליכים.
- 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:

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

- רכיב מחזורי (סינוסואידלי)- i_k – רכיב זה קיים כל הזמן מרגע התחלת הקצר ועד לניתוקו-

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

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

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

הערך הרגעי של זרם הקצר מוגדר-

$$i = i_k + i_a$$

כאשר:

I_k - זרם קצר תלת מופעי (A).

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

Z_k - עכבת הקצר (Ω).

$$Z_k = R_k + jX_k$$

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

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

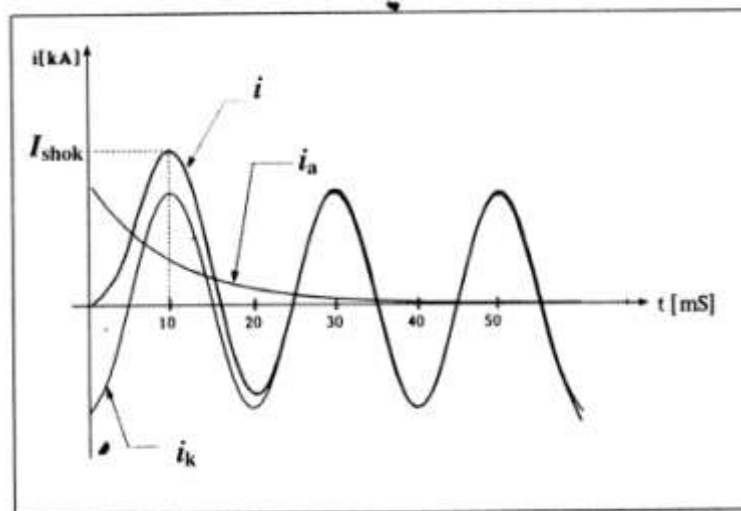
$$\varphi_k = \varphi_U - \varphi_{Ik}$$

τ - קבוע הזמן של מעגל הקצר (s).

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

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

$$\omega = 2\pi f$$



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

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

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

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

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

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

נחבר את הרכיבים ונחשב את הערך הרגעי של זרם הקצר:

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

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

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

אם הקצר מתרחש כאשר המתח בפאזה עובר דרך נקודת האפס, בנקודה זו זווית המתח תהיה- $a = 0$, נציב בנוסחה ולכן:

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

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

ומכאן:

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

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

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

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

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

כעבור $10ms$ מרגע התחלת הקצר מגיע זרם הקצר לערכו המרבי, זרם קצר זה מוגדר כזרם ההלם שניתן לחשב אותו לפי:

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

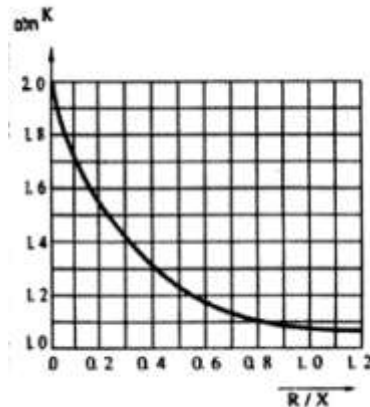
הביטוי בסוגריים נקרא מקדם ההלם והוא תלוי ביחס בין ההתנגדות לבין ההיגב האשראי של מעגל הקצר:

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

ערכי מקדמי ההלם מובאים בטבלה:

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

ניתן לראות את מקדם ההלם גם בגרף הבא:



את זרם ההלם מחשבים לפי:

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

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

חישוב זרם קצר תלת מופעי

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

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

כאמור זרם קצר תלת מופעי מחשבים לפי:

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

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

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

חישוב עכבת הקצר Z_k

עכבת הקצר הנה עכבת המסלול הקצר ממקור המתח (שנאי, גנראטור) ועד למקום הקצר. לקביעת כושר הניתוק של המאבטח מחשבים את זרם הקצר בלוח החשמל בו הוא מותקן. כל מרכיב הרשת מוצג על ידי רכיבים טוריים של מעגל תמורה, כאשר עכבת הקצר הנה

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

א. שנאי מוצג על ידי העכבה-

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

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

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

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

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

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

כאשר:

ΔP_{cu} - הפסדי נחושת נקובים (W).

Sn - הספק נקוב של השנאי (VA).

$U_k \%$ - מתח הקצר (%).

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

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

Un - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

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

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

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

כאשר:

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

l - אורך הקו (m).

A - שטח החתך של מוליכי הקו (mm^2).

$$R_L = r_0 * l$$

$$X_L = x_0 * l$$

כאשר:

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

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

l - אורך הקו (km).

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

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

כאשר:

Un - המתח הנקוב של הקו (V).

Un' - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

Z_k - עכבת הקו (Ω).

$-Z_k'$ עכבת הקו המשוקפת למתח בנקודת הקצר (Ω) .
ג. מערכת אספקה במתח גבוה מוצגת ע"י ההיגב JX_s

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

כאשר:

$-S_k$ הספק הקצר של המערכת (VA) .

$-Un$ המתח הנקוב בנקודת הקצר (V) .

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

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

שלב חישוב של זרם תלת מופעי:

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

ב. חישוב העכבות של כל רכיבי המעגל.

ג. חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודת הקצר הראשונה.

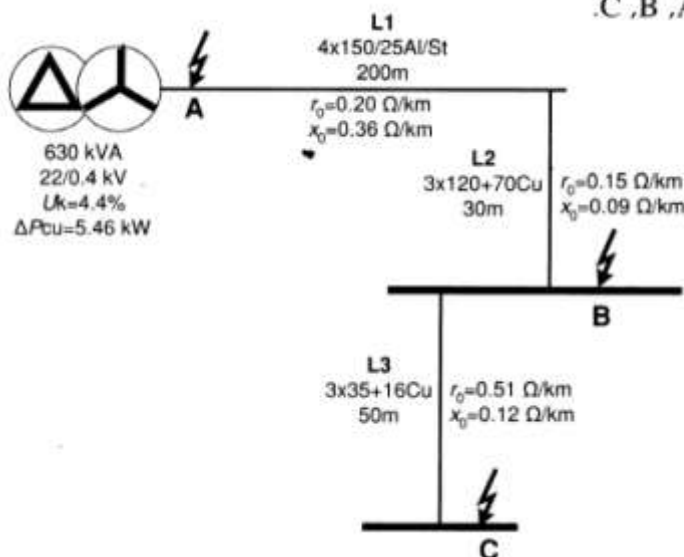
ד. חישוב עכבת הקצר וזרם הקצר בנקודה השנייה וכך הלאה.

תרגיל דוגמא 1

נתון תרשים של מתקן חשמלי במתח נמוך

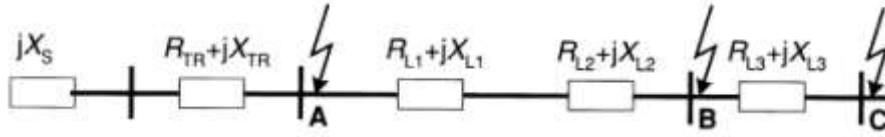
הלוח הראשי של המתקן מוזן מרשת עלית $L1$ של חב' חשמל על ידי כבל $L2$. לוח משנה "א" מוזן מהלוח הראשי על ידי כבל $L3$.

חשב את זרמי הקצר בנקודות A, B, C.



פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נציג את הרשת על ידי מעגל תמורה:



ב. נחשב את עכבות רכיבי הרשת:

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

1. חישוב היגב מערכת Xs מצד המתח הגבוה-

הספק הקצר המוכרז במתח 22kV הוא 500MVA ולכן:

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

$$R_s = 0 \text{ (מוזנח)}$$

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

2. חישוב עכבת השנאי $-Z_{TR}$

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

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

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

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

3. חישוב עכבת הקו $-Z_{L1}$

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

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

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

4. חישוב עכבת הקו $-Z_{L2}$

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

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

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

5. חישוב עכבת הקו $-Z_{L3}$

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

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

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

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

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

$$I_{kA} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_{kA}} = \frac{400}{\sqrt{3} * 11.48 * 10^{-3}} = 20.116kA$$

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

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

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

$$I_{kB} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{400}{\sqrt{3} * 97.84 * 10^{-3}} = 2.36kA$$

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

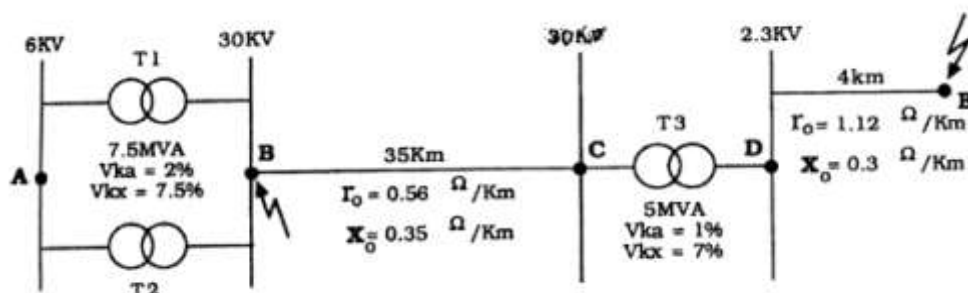
$$Z_{kC} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L2} = 2.2 + j11.27 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 + 25.5 + j6 =$$

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

$$I_{kC} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_{kC}} = \frac{400}{\sqrt{3} * 116.8 * 10^{-3}} = 1.977kA$$

תרגיל דוגמא 2

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

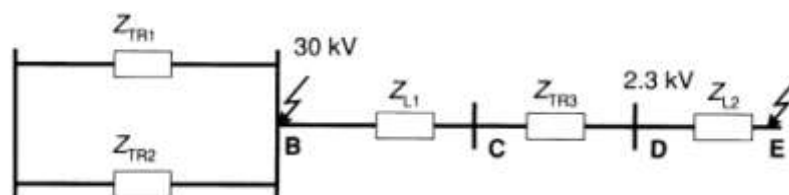


א. חשב את זרמי הקצר התלת פאזיים בנקודות B ו- E.

ב. חשב את גודל הסליל שיש לחבר בטור לשנאי T3 בצד המתח הנמוך על מנת להקטין את זרם הקצר בנקודה E ל-200A בלבד.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. נציג את מעגל התמורה של הרשת:



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

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

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

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

$$I_{kB} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 4.657} = 3.718kA$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I_{KE} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_{KE}} = \frac{2.3 * 10^3}{\sqrt{3} * 4.813} = 275.9A$$

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

$$Z'_{KE} = \frac{Un}{\sqrt{3} * I_{KE}} = \frac{2.3 * 10^3}{\sqrt{3} * 200} = 6.639\Omega$$

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

$$6.639 = 4.613 + j(1.372 + X_L)$$

$$6.639 = \sqrt{4.613^2 + (1.372 + X_L)^2}$$

$$6.639^2 = 4.613^2 + (1.372 + X_L)^2$$

$$(1.372 + X_L)^2 = 6.639^2 - 4.613^2$$

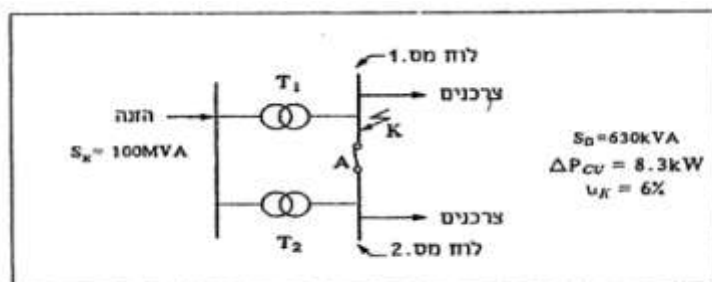
$$1.372 + X_L = \sqrt{6.639^2 - 4.613^2} = 4.774$$

$$X_L = 4.774 - 1.372$$

$$X_L = 3.402\Omega$$

תרגיל דוגמא 3

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



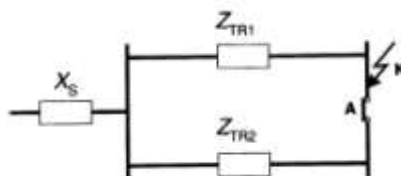
טבלה מס' 1

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 3

א. נציג את מעגל התמורה של הרשת-



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

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

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

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

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

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

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

$$I_k = \frac{Un}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 9.187 \cdot 10^{-3}} = 25.138 kA$$

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

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

לפי טבלת מקדם ההלם המצורפת נמצא-

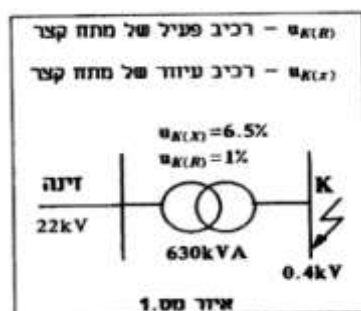
$$k_{shok} \approx 1.5$$

ולכן:

$$I_{shok} = \sqrt{2} * k_{shok} * \frac{I_k}{2} = \sqrt{2} * 1.5 * \frac{25.138 * 10^3}{2} = 26.663 kA$$

תרגיל דוגמא 4

בפסי הצבירה 0.4kV של תחנת השנאה 22kV/0.4kV מתרחש קצר תלת מופעי. העומס המועבר לעומס לפני ההפרעה דרך השנאי הוא בעל מקדם הספק של $\cos\varphi=1$. 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}

א. חשב את הערך האפקטיבי של זרם הקצר התמידי.

ב. מהו ערכו של רכיב הזרם הישר (במופע R) ברגע התרחשות הקצר

ג. חשב את ערכו הרגעי של הזרם (במופע R) בנקודת הקצר כעבור 80ms מרגע

התרחשות התקלה. תדירות הרשת היא 50Hz.

פתרון לתרגיל דוגמא 4

א.

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

$$k_{shok} \approx 1.6$$

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

ב. על פי נתוני התרגיל זווית המתח היא- $\alpha = 0^\circ$

נחשב את זווית המופע של עכבת הקצר-

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

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

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

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

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

רק רכיב אחד והוא הרכיב המחזורי ואותו נחשב-

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

מכיוון שהיחידות של התדירות המעגלית ω הן rad/s ולכן יש גם להעביר את הזווית φ_k ליחידות rad וזאת לפי הביטוי-

$$\varphi(rad) = \varphi(deg) * \frac{2\pi}{360} = 81.25 * \frac{2\pi}{360} = 1.418 (rad)$$

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

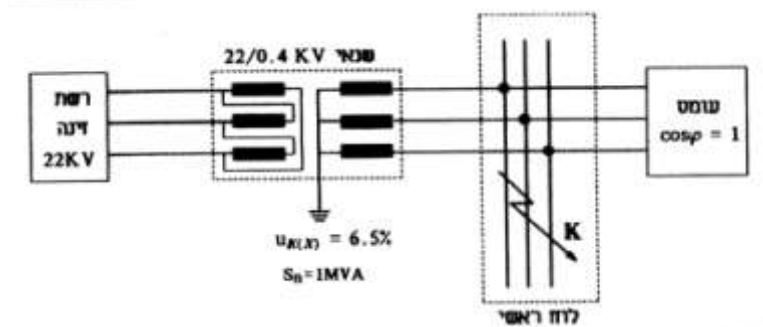
$$i_k = \sqrt{2} * 13.709 * 10^3 * \sin(2\pi * 50 * 80 * 10^{-3} - 1.418) = -19.162kA$$

תרגיל דוגמא 5

שנאי רשת בעל הספק נקוב של 1000KVA מזין לוח ראשי 400V כמתואר באיור. מקדם

ההספק של העומס הוא $\cos \varphi = 1$.

מתרחש קצר תלת מופעי בפסי הצבירה של הלוח. הקצר מתרחש ברגע שגל המתח במופע S (בצד המתח הנמוך) הוא בעל ערך רגעי מקסימאלי.



א. חשב את הערכים האפקטיביים של זרמי הקצר התמידי בנקודת הקצר ובמופע קו הזינה 22kV.

ב. חשב את הספק הקצר המועבר דרך השנאי.

ג. באיזה מהמופעים רכיב "זרם ישר" בזרם הקצר הוא מזערי ?

הערות:

1. ההתנגדות האומית של השנאי זניחה.

2. עכבת רשת הזינה זניחה יחסית לעכבת השנאי.

3. סדר הופעת המופעים היא- $R \Rightarrow S \Rightarrow T$.

פתרון לתרגיל דוגמא 5

א. חישוב זרם הקצר המתמיד בנקודת הקצר-

$$U_k \% = U_x \% = 6.5\%$$
$$Z_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100S_n} = \frac{6.5 * 400^2}{100 * 1 * 10^6} = 10.4m\Omega$$
$$I_k = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} * 10.4 * 10^{-3}} = 22.205kA$$

חישוב זרם הקצר המתמיד במופעי קו הזינה 22Kv-

$$Z'_{22kV} = Z_{400V} * \left(\frac{U'n}{Un}\right)^2 = 10.4 * 10^{-3} * \left(\frac{22 * 10^3}{400}\right)^2 = 31.46\Omega$$
$$I'_k = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{22 * 10^3}{\sqrt{3} * 31.46} = 403.742A$$

ב. חישוב הספק בקצר המועבר דרך השנאי-

$$S_k = \sqrt{3} * I_k * Un = \sqrt{3} * 22.205 * 10^3 * 400 = 15.384MVA$$

ג. כיוון שנתון שגל המתח במופע S הוא בערכו המקסימאלי ברגע התרחשות הקצר ניתן

להבין מכך ש- $\alpha=90^\circ$ ומכיוון שמזניחים את ההתנגדות האומית של השנאי ניתן לומר

שעכבת השנאי היא בעלת אופי השראי טהור ולכן $\varphi_k = 90^\circ$ ולכן-

$$i_{a0} = -\sqrt{2} * I_k * \sin(a - \varphi_k) = -\sqrt{2} * I_k * \sin(90^\circ - 90^\circ) = 0A$$

מכאן ניתן להבין שזרם הקצר של רכיב "זרם הישר" המזערי יהיה במופע S.

פרק 4-העמסה והגנה על מוליכים

סוגי הגנות

קיימים 3 סוגים עיקריים של מאבטחים:

- 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 הזרם הצפוי במוליך לבין גודל המאבטח וכן שטח החתך של המוליך. תמיד צריך להתקיים התנאים הבאים:

1.

$$I_b \leq I_n \leq I_z'$$

2.

$$I_2 \leq 1.45 I_z'$$

3.

$$I_z' = I_z * C$$

כאשר:

I_b - הזרם הצפוי במוליך.

I_n - הערך הנומינאלי של המאבטח.

I_z - הזרם המרבי שמותר להעביר במוליך.

I_z' - הזרם המרבי המותר להעביר במוליך המתוקן.

C - מקדם תיקון משוקלל.

I_2 - זרם הבדיקה הגבוה של המאבטח שהוא נתון יצרן:

$$I_2 = 1.75 I_n \quad 10A < I_n \leq 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_2 = 1.6 I_n \quad I_n > 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$I_2 = 1.45 I_n \quad \text{עבור מא"זים}$$

$$I_2 = 1.3 I_n \quad \text{עבור מאמ"תים הניתנים לכיוון}$$

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

$$10A < I_n \leq 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$1.75 I_n \leq 1.45 I_z'$$

$$\frac{1.75 I_n}{1.45} \leq I_z'$$

$$1.2 I_n \leq I_z'$$

$$I_n > 25A \quad \text{עבור נתיכים}$$

$$1.6 I_n \leq 1.45 I_z'$$

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

$$1.1 I_n \leq I_z'$$

עבור מא"זים:

$$1.45 I_n \leq 1.45 I_z'$$

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

$$1 I_n \leq I_z'$$

עבור מאמ"תים :

$$1.3I_n \leq 1.45I_z'$$

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

$$0.9I_n \leq I_z'$$

ניתן לסכם את התנאים בצורה הבאה:

עבור נתיכים $10A < I_n \leq 25A$:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1.2I_n \leq I_z'$

עבור נתיכים $I_n > 25A$:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1.1I_n \leq I_z'$

עבור מא"זים:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $1I_n \leq I_z'$

עבור מאמ"תים:

תנאי ראשון: $I_b \leq I_n \leq I_z'$

תנאי שני: $0.9I_n \leq I_z'$

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

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

קיימים דגמים שונים של מא"זים שהעיקרים שבניהם:

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

דגם B – מיועד לצידוד תאורה (3-5In).

דגם C – מיועד למנועים (5-10In).

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

המא"זים מיועדים לזרמים נומינאליים של 0.5A-63A. מא"ז קיימים בשוק כ- חד קוטביים, דו קוטביים, תלת קוטביים או בעלי 4 קטבים

(השימושיים ביותר- 2A,4A,6A,10A,16A,20A,25A,32A,40A,50A,63A)

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

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

למא"זים יש נתון הנקרא כושר ניתוק (מיתוג) והוא מגדיר החוזק המכאני של המא"ז או

לחילופין מה הזרם המרבי שניתן להעביר דרך המא"ז מבלי שיינזק (לדוגמא בזרם קצר).

קיים בשוק בגדלים 3KA, 6KA, 10KA, 15KA

קיימים דגמים שונים של מאמ"תים שהעיקרים שבניהם:

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

מפסק הספק (ברקר) – אביזר גדול פיזית מיועד לזרמים נומינאליים 25A-6300A כוללים הגנות תרמיות ומגנטיות ניתנות לכיוון וקיים 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 לדוגמא לצורך סלקטיביות מיועד לזרמים נומינאליים 1A-1600A וקיים בשוק עם כושר ניתוק של עד 120KA.

תרגיל דוגמא

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

פתרון לתרגיל דוגמא

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

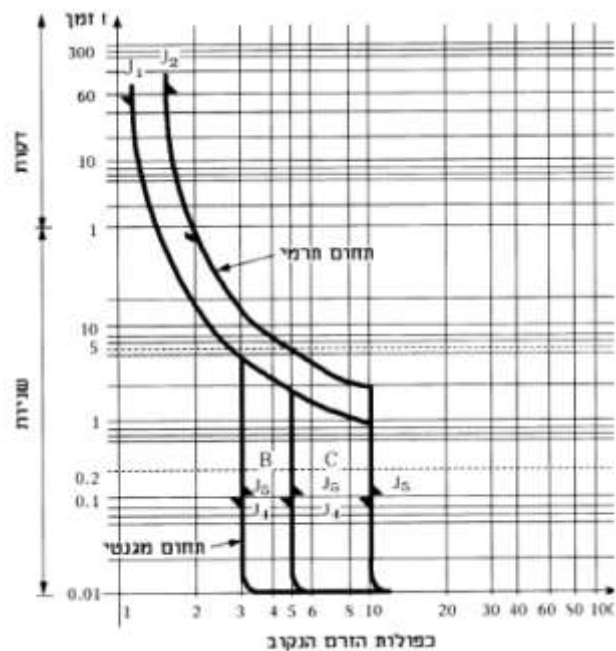
$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$1I_n \leq I_z$$

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

באיור נתון אופיין זרם של מא"ז לפי התקן הישראלי. הציר האנכי (ציר-Y) הוא ציר הזמן בשניות ובדקות, הציר האופקי (ציר-X) הוא ציר הזרם בכפולות הזרם הנקוב של המא"ז. באופיין ניתן לראות שזרם האי-פעולה של המא"ז שווה ל- $1.13 \times I_n$, שזהו "זרם הבדיקה הנמוך" 1. המאבטח לא יפעל אם זרם זה יזרום דרכו במשך שעה. זרם הפעולה של המא"ז שווה ל- $1.45 \times I_n$ שזהו "זרם הבדיקה הגבוה" 2. המאבטח חייב לפעול אם זרם זה יזרום דרכו במשך שעה. התחום התרמי-הגנה בפני זרמי יתר-הניתוק נעשה באופן איטי לאחר זמן התלוי בעוצמת זרם היתר. ככל שזרם היתר גדל (בכפולות של I_n) הזמן לניתוק קטן. התחום המגנטי-הגנה בפני זרם קצר-הניתוק נעשה באופן מהיר מאוד וניתן לראות באופיין כי עבור מא"ז מסוג B בזרם קצר הגדול מ- $3I_n$ ועבור מא"ז מסוג C בזרם קצר הגדול מ- $5I_n$ וזאת בזמן הקטן מ-5 שניות כהגדרת החוק אך גדול מ-0.1 שניות. עבור זרמי קצר גדולים יותר ניתן לראות כי מא"ז מסוג B ינתק זרם קצר הגדול מ- $5I_n$ ומא"ז מסוג C ינתק זרם קצר הגדול מ- $10I_n$ בפחות מ-0.1 שניות.

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני העמסת יתר

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 31 שיטות ההתקנה

בתוספת השלישית 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.
- 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 $2.5 \frac{\text{km}}{\text{w}}$.
 3. התקנת עד 3 מוליכים מבודדים או 3 כבלים חד גדיים ללא רווח בניהם למעט מוליכי הארקה, בהתקנה חשופה לתנועת לאוויר.
 4. התקנת עד כבל רב גדי אחד בהתקנה חשופה לאוויר במידה ותנאי הסביבה אינם רגילים יש צורך בשימוש במקדמי תיקון לקביעת הזרם המרבי המתמיד במוליך I_z .

מקדמי תיקון

1. כאשר טמפרטורת האוויר הסביבתית שונה מ- 35°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה שבתקנות החשמל.
2. כאשר טמפרטורת הקרקע הסביבתית שונה מ- 30°C יש להכפיל את הערכים של הזרם המתמיד המרבי I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה 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 I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה 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 I_z שבתוספת הראשונה במקדם המתאים מהטבלה שבתקנות החשמל.

תרגיל דוגמא 1

נתונים 6 מפוחים תלת פאזיים זהים בעלי הנתונים הבאים:

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

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

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

ב. נקבע את סוג וגודל המאבטח.

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

ג. נמצא בתוספת השניה- לפי שיטת ההתקנה כבלים נחושת בידוד $90^{\circ}C$ טבלה 90.4.

ד. נמצא בטבלה המתאימה חתך מוליך בעל זרם מתמיד מרבי גדול או שווה

ערך הנדרש- שטח חתך- $I_z=19A$; $1.5mm^2$.

נבצע תיקון ל- I_z בהתאם למקדמי התיקון-

$$I_z' = I_z * C1 * C4 = 19 * 0.91 * 0.72 = 12.448A$$

נבחן את המוליך הנבחר ב-2 התנאים:

$$I_b \leq I_n \leq I_z' \Rightarrow 1.8 < 2 < 12 \Rightarrow o.k.$$

$$0.9I_n \leq I_z' \Rightarrow 0.9 * 2 < 12 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר כבל של $4X1.5 N2XY$ עבור כל מפוח המאובטח 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 הגנת (הניתן לכוונון) בעל זרם בסיסי $I_u = 160$ בעל כיוון ההגנה התרמית $I_r = 125 \div 160A$, נכוון את המאבטח ל-150A.

על פי שיטת ההתקנה שבתוספת השנייה נבחר בטבלה 90.6 וניתן לראות שעבור זרם מתמיד של 153A יש להשתמש בכבל בעל שטח חתך של $95mm^2$. נבדוק אם בחירה זו

עומדת ב-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$145.275 \leq 150 \leq 153 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מאמ"ת:

$$0.9I_n \leq I_z$$

$$0.9 * 150 \leq 153 \Rightarrow o.k.$$

תרגיל דוגמא 3

12 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 סגורה על גבי הקיר, 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 נבחר בטבלה 90.4 ונבחר בכבל שעל שטח חתך 1.5mm^2 שהוא שטח חתך מינימאלי מותר במתח נמוך, ונבחן את התאמתו ל-2 התנאים.

$$C_4 = 0.45 \text{ כיוון ש-10 הכבלים מונחים במקובץ לכן-}$$

$$C_1 = 0.91 \text{ וכיוון שהטמפרטורה האופפת היא } 45^{\circ}\text{C} \text{ לכן-}$$

לכן I_z לאחר התיקון הוא:

$$I'_z = I_z * C_1 * C_4 = 19 * 0.91 * 0.45 = 7.78A$$

נבדוק אם בחירה זו עומדת ב-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I'_z$$

$$1.8 = 1.8 < 7.78 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מאמ"ת:

$$0.9I_n \leq I_z$$

$$0.9 * 1.8 < 7.78 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג הגנת מנוע מכוייל ל- $1.8A$ וכבל בעל שטח חתך של 1.5mm^2 עבור כל מפוח.

קביעת גודלת סוג מאבטח ושטח חתך כבל ההזנה-

$$I_{b(total)} = \sum I_b = 12 * 1.8 = 21.6A$$

נבחר מאבטח מסוג מא"ז בעל אופיין C:

$$I_u = 25A$$

על פי שיטת ההתקנה נבחר בטבלה 90.6 ונבחר בכבל שעל שטח חתך 6mm^2 שהוא שטח חתך מינימאלי מותר במתח נמוך, ונבחן את התאמתו ל-2 התנאים:

תנאי ראשון:

$$I_b \leq I_n \leq I_z$$

$$18 < 25 < 33 \Rightarrow o.k.$$

תנאי שני עבור מא"ז B או C:

$$1I_n \leq I_z$$

$$1 * 25 < 33 \Rightarrow o.k.$$

לסיכום נבחר במאבטח מסוג מא"ז $25A$ בעל אופיין C וכבל בעל שטח חתך של 6mm^2 .

תכנון מעגלים מהיבט ההגנה בפני זרם קצר

בהגנה בפני זרמי קצר יש לבדוק את התאמת המאבטח למקום התקנתו ולשטח החתך המעגל המוגן. את הבדיקה מבצעים לאחר קביעת סוג וגודל המאבטח, סוג וחתך המוליכים כפי שהוסבר.

תקנות החשמל מחייבות קיום 2 תנאים לגבי תפקיד של מאבטח בהגנת מוליכים בפני קצר: א. כושר הניתוק של המאבטח יהיה גדול מזרם הקצר המרבי הצפוי לעבור דרכו. כושר ניתוק של מאבטחים נתון בקטלוגים, לגבי מפסקים אוטומטים מתכווננים התקן מבדיל בין 2 נתונים:

1. כושר ניתוק בסיסי I_{cu} (kA).

2. כושר ניתוק בשרות I_{cs} (%), באחוזים ביחס לכושר הניתוק הבסיסי. זוהי יכולת המאבטח להפסיק 2 קצרים ברצף (במקרה הפעלה חוזרת אוטומטית). לצורך בדיקת כושר הניתוק הנדרש של מאבטח יש לחשב את זרם הקצר התלת מופעי $I_{k(max)}$ במקום התקנתו כפי שנלמד. ניתן לרשום את התנאי:

$$I_{cu} > I_{k(max)}$$

באופן מעשי גודל זרם הקצר התלת מופעי בפסי צבירה של לוח חשמל מגדיר את כושר הניתוק של כל המאבטחים בלוח זה. כושר ניתוק של מאבטח יכול להיות קטן מהנדרש בתנאי שלפניו מותקן מאבטח אחר בעל כושר ניתוק מספיק שיפעל מהר יותר. (עקרון זה מכונה "הגנה עורפית") ב. זמן ניתוק קצר על ידי מאבטח יהיה קטן מהערך המחושב על פי הנוסחה הבאה אך לא יותר מ- 5 שניות (לפי התקנות):

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

כאשר:

t - הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר (s).

k - מקדם הנתון בתקנות ערכו תלוי בסוג החומר המוליך וסוג הבידוד.

סוג הבידוד		
חומר המוליך	בידוד 70°C	בידוד 90°C
נחושת	115	143
אלומיניום	76	94

S - שטח חתך המוליך (mm^2).

$I_{k(min)}$ - זרם קצר חד מופעי הצפוי בנקודה המרוחקת ביותר של המעגל (A).

משמעות בדיקה זו היא לבדוק שטמפרטורת מוליכי המעגל לא תעלה על ערך המרבי המותר בעת קצר בהתאם לתקנות:

1. 160°C לבידוד 70°C.

2. 250°C לבידוד 90°C.

אם הזמן t המחושב לפי הנוסחה הנ"ל קטן מ- 0.1 s יש לבדוק את התנאי הנוסף:

$$k^2 * S^2 \geq \int_0^t I^2 dt$$

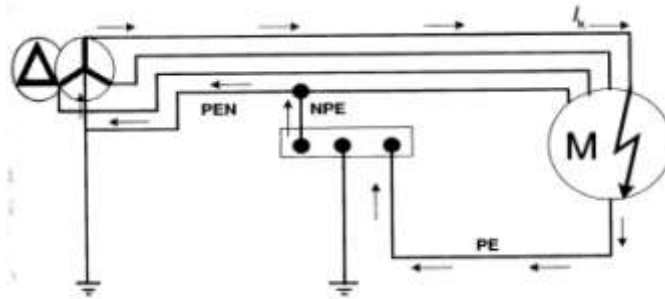
כאשר $I^2 dt$ הוא נתון יצרן המאבטח המבטא את הים החום המרבי שהמאבטח מעביר למוליכים.

שלב: תכנון:

א. חישוב זרם קצר תלת מופעי הצפוי במקום התקנת המאבטח וקביעת כושר

הניתוק הנדרש לפי התנאי: $I_{cu} > I_{k(max)}$

ב. חישוב זרם קצר חד מופעי הנקודה המרוחקת של המעגל- $I_{k(min)}$



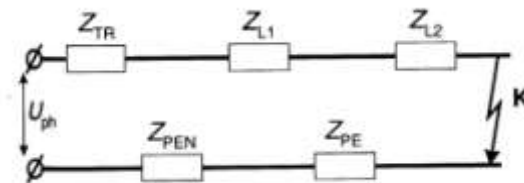
בתרשים מסומן מסלול הזרם קצר חד פאזי בין מוליך המופע לגוף המכשיר במתקן המוגן בשיטת "איפוס", כאשר:

PE - מוליך הארקה המעגל הסופי.

NPE - מוליך המחבר בין פס השוואת הפוטנציאלים לבין מוליך האפס של הרשת.

PEN - מוליך האפס של הרשת.

ניתן להציג את מעגל זרם הקצר על ידי מעגל תמורה:



כאשר:

Z_{TR} - עכבת הקצר של השנאי.

Z_{L1} - עכבת מוליך המופע של קו ההזנה מהשנאי עד ללוח הראשי.

Z_{L2} - עכבת מוליך המופע של המעגל הסופי.

Z_{PE} - עכבת מוליך הארקה.

Z_{PEN} - עכבת מוליך האפס של הרשת.

אם ידועים נתוני השנאי, אורכי וחתכי המוליכים ניתן לחשב את זרם הקצר החד מופעי לפי:

$$I_{k(min)} = \frac{U_{ph}}{Z_T}$$

כאשר:

U_{ph} - מתח מופעי (230V).

Z_T - העכבה השקולה של מעגל הקצר: $Z_T = Z_{TR} + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{PE} + Z_{PEN}$

הערות:

1. במקרה של קצר בין מוליך המופע למוליך האפס החישוב יהיה זהה כיוון שאורך וחתך מוליך האפס במעגל הסופי זהים לזה של מוליך הארקה: $Z_N = Z_{PE}$
 2. יש להתחשב בעליית התנגדות המוליכים לפני הקצר עקב טמפרטורת העמסה ולשם כך יש להכפיל את התנגדויות של המוליכים במקדם $k=1.3$.
- כאשר גודל ומיקום השנאי אינם ידועים, ניתן לחשב את זרם הקצר המזערי בסוף המעגל הסופי במתקנים המוגנים בשיטת האיפוס לפי הנוסחה:

$$I_{k(min)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5(R_{ph} + R_N)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5\rho} * \frac{S_{ph} * S_N}{l(S_{ph} + S_N)}$$

כאשר:

U_{ph} - מתח מופעי (230V).

0.8- מקדם נפילת המתח ב- 20% בעת הקצר.

1.5- מקדם עליית התנגדות המוליכים לפני הקצר.

R_{ph}, S_{ph} - התנגדות וחתך מוליך המופע (Ω, mm^2).

R_N, S_N - התנגדות וחתך מוליך המופע (Ω, mm^2).

l - אורך מוליכי המעגל (m).

ג. חישוב משך הזמן המרבי לניתוק הקצר:

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2$$

ד. בדיקת זמן ניתוק t_{br} של זרם הקצר $I_{k(min)}$ על ידי המבטח.

ניתן לבדוק את זמן הניתוק על פי אופיין המבטח. זמן זה חייב להיות קטן מהזמן המחושב, ולא יותר מ-5 שניות:

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

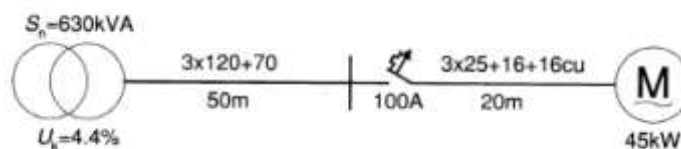
באופן מעשי צריך לוודא, שזרם הקצר $I_{k(min)}$ נמצא בתחום אלקטרו-מגנטי (מידי) של

המבטח. בתחום זה המבטח פועל תוך זמן הקטן מ- 0.1s.

אם תנאי זה לא מתקיים, במקרה של קצר לאדמה מותר להתקין בנוסף למאבטח גם מפסק מגן (ממסר פחת). זרם הקצר חייב להיות לפחות פי 10 גדול מזרם ההפעלה של מפסק המגן.

תרגיל דוגמא 1

מנוע תלת פאזי מוזן מלוח חשמל ראשי כמתואר באיור הבא:

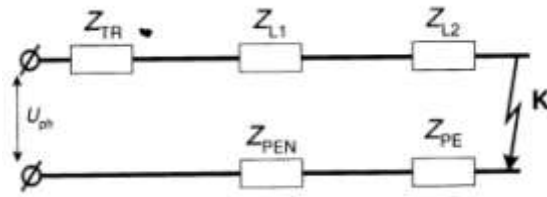


כל הכבלים מנחושת בעלי בידוד של 90°C .

$$U_n = 400V, x_0 = 0.08 \left[\frac{\Omega}{km} \right], \rho = 0.018 \left[\frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

תכנן את מעגל המנוע מהיבט הגנה בפני זרם קצר, בתנאי שבלוח הראשי של המתקן בוצע איפוס.

פתרון לתרגיל דוגמא 1
מעגל התמורה של המעגל-



חישוב זרם הקצר התלת מופעי המקסימאלי $I_{k(max)}$ בפסי הצבירה של הלוח-

$$Z_{TR} = X_{TR} = \frac{U_k \% * Un^2}{100 * Sn} = \frac{4.4 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 11.175m\Omega$$

$$R_{L1} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{50}{120} = 7.5m\Omega$$

$$X_{L1} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 50 = 4m\Omega$$

$$Z_{L1} = R_{L1} + jX_{L1} = (7.5 + j4)m\Omega$$

$$Z_k = Z_{TR} + Z_{L1} = jX_{TR} + R_{L1} + jX_{L1} =$$

$$Z_k = j11.175 + 7.5 + j4 = 7.5 + j15.175 = 16.927m\Omega$$

$$I_{k(max)} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} * 16.927 * 10^{-3}} = 13.643kA$$

מסקנה: כושר הניתוק הנדרש של המאבטח 15kA.

נחשב את זרם הקצר החד מופעי בקצה המעגל $I_{k(min)}$ כדי לבדוק אם מוליכי המעגל מוגנים גם בפני זרם קצר.

$$R_{L2} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{20}{25} = 14.4m\Omega$$

$$X_{L2} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 20 = 1.6m\Omega$$

$$Z_{L2} = R_{L1} + jX_{L1} = (14.4 + j1.6)m\Omega$$

$$R_{PE} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{20}{16} = 22.5m\Omega$$

$$X_{PE} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 20 = 1.6m\Omega$$

$$Z_{PE} = R_{L1} + jX_{L1} = (22.5 + j1.6)m\Omega$$

$$R_{PEN} = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{50}{70} = 12.86m\Omega$$

$$X_{PEN} = x_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 50 = 4m\Omega$$

$$Z_{PEN} = R_{L1} + jX_{L1} = (12.86 + j4)m\Omega$$

$$Z_{kT} = 1.3 * R_T + jX_T =$$

$$Z_{kT} = 1.3 * (R_{L1} + R_{L2} + R_{PE} + R_{PEN}) + j(X_{TR} + X_{L1} + X_{L2} + X_{PE} + X_{PEN}) =$$

$$Z_{kT} = 1.3 * (7.5 + 14.4 + 22.5 + 12.86) + j(11.175 + 4 + 1.6 + 1.6 + 4) =$$

$$Z_{kT} = 74.438 + j22.375 = 77.728m\Omega$$

$$I_{k(min)} = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} * 77.728 * 10^{-3}} = 2.971kA$$

חישוב הזמן המרבי לניתוק זרם קצר דרך מוליך הארקה של מעגל המנוע שעל פי הנתונים:
 $k=115$, 16mm^2 -S עבור מוליך נחושת 70°C .

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2 = \left(\frac{115 * 16}{2.971 * 10^3} \right)^2 = 0.397s$$

בדיקת זמן הניתוק של זרם קצר 2.663kA ע"י מאבטח 100A -

$$\frac{I_k}{I_u} = \frac{2.971 * 10^3}{100} = 29.71 \text{ היחס בין הזרמים:}$$

עבור מאבטח מסוג מאמ"ת ניתן לראות מנתוניו כי זמן הניתוק המידי שלו היא בתחום

$$(6 - 14) * I_u$$

זאת אומרת שהוא יפעל מידי $t_{br} \leq 0.1s$ בכל כיוול של ההגנה.

ומכאן שהמבטח עומד גם בתנאי-

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

$$5s \geq 0.1s \leq 0.397s$$

מסקנה : המעגל מוגן בפני זרם קצר.

תרגיל דוגמא 2

מנוע תלת פאזי מוזן מלוח חשמל מאופס במתח נמוך על ידי כבל נחושת בעל בידוד 90°C

בחתך $(3 \times 70 + 35)\text{mm}^2$ באורך ההתנגדות הסגולית של המוליכים $\frac{0.0175 \frac{\Omega * \text{mm}^2}{m}}{m}$.

מעגל המנוע מוגן באמצעות מפסק אוטומטי $I_n=160\text{A}$. זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בפסי

הצבירה של הלוח 15kA . בדוק האם המעגל מוגן בפני זרם קצר.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

לפי נתון זרם הקצר הצפוי בפסי הצבירה בלוח נקבע כי כושר הניתוק של המאבטח 15kA .

כיוון שלא קיימים נתוני השנאי והמוליכים אליו נחשב את הקצר החד מופעי בנקודה

המרוחקת של המעגל לפי:

$$I_{k(min)} = \frac{0.8 * U_{ph}}{1.5\rho} * \frac{S_{ph} * S_N}{l(S_{ph} + S_N)} = \frac{0.8 * 230}{1.5 * 0.0175} * \frac{70 * 35}{60 * (70 + 35)} = 2.726\text{kA}$$

נחשב את הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר כאשר $k=143$ עבור בידוד 90°C .

$$t = \left(\frac{k * S}{I_{k(min)}} \right)^2 = \left(\frac{143 * 35}{2.726 * 10^3} \right)^2 = 3.37\text{sec}$$

בדיקת זמן הניתוק של זרם קצר 2.726kA ע"י מאבטח 160A -

$$\frac{I_k}{I_u} = \frac{2.726 * 10^3}{160} = 17.08 \text{ היחס בין הזרמים:}$$

עבור מאבטח מסוג מאמ"ת ניתן לראות מנתוניו כי זמן הניתוק המידי שלו היא בתחום

$$(6 - 14) * I_u$$

זאת אומרת שהוא יפעל מידי $t_{br} \leq 0.1s$ בכל כיוול של ההגנה.

ומכאן שהמבטח עומד גם בתנאי-

$$5s \geq t_{br} \leq t$$

$$5s \geq 0.1s \leq 3.37s$$

מסקנה : המעגל מוגן בפני זרם קצר.

בדיקת מבטח לעמידה בזרם התנעה

מכשירי חשמל רבים צורכים בזמן הפעלתם זרם העולה פי כמה וכמה על הזרם הנקוב. בבחירת מבטח להגנת מעגלים הכוללים מכשירים בעלי זרמי מעבר גבוהים יש להתחשב בהשפעות זרמים אלו על המבטח. פרמטר חשוב נוסף- משך זמן זרם מעבר. להלן צרכנים שונים עם זרמי מעבר אופייניים וההתייחסות בבחירת גודל המבטח: (כאשר הזרם הנקוב של הצרכן מסומן ב- I_n , והזרם הנקוב של המבטח מסומן I_u).

סוג הצרכן	זרם מעבר ($\times I_n$)	משך זמן זרם המעבר (s)	התייחסות בבחירת גודל מבטח
נורות ליבון	15-20	0.001	אין
נורות פריקה ללא קבלים לשיפור $\cos \varphi$	1-1.6	0.002	אין
נורות פריקה עם קבלים לשיפור $\cos \varphi$	15-20	0.002	מומלץ לבחור מא"ז מסוג "C" לפי: $I_u \geq 1.3 * I_n$
קבלים לשיפור $\cos \varphi$	30-60	0.002	נדרש בתקנות לבחור מבטח לפי: $I_u \geq 1.43 * I_n$
שנאי חלוקה	10-15	0.002-0.004	בחירת נתיך מתח גבוה לפי: $I_u \geq (1.4 - 2) * I_n$
מנוע השראה	5-7	2-5	מומלץ לבדוק לפי התנאי: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$

התנאי לבחירת מבטח למעגל מנוע: $I_5'' \geq 1.3 * I_{st}$
משמעותו בדיקת אי פעולת המבטח בזרם העולה ב-30% על זרם התנעת המנוע תוך זמן של 5 שניות.

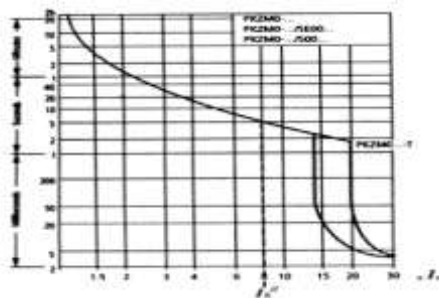
ערכים של זרם התנעה מופיעים בקטלוגים של מנועים ככפולות הזרם הנקוב:

$$I_{st} = (5 - 7) * I_n$$

זרם I_5'' ניתן לקבל מאופיינים של המבטחים.
לדוגמא: אם במעגל מנוע מותקן מא"ז, ניתן לראות באופיין המא"ז שהזרם המינימאלי העלול להפעיל את המא"ז תוך זמן של 5 שניות שהוא הזרם הנקוב כפול 3 (ראה אופיין מא"זים). 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":



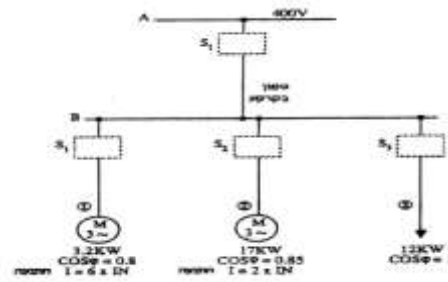
הגנה על מנוע והגנה על מוליכי מעגל המנוע

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:

- א. מנוע ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכיול- ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר המנוע מוזן באמצעות מעגל בלעדי ומעגל הפיקוד נמצא בלוח המזין. ההגנה על המנוע ועל מוליכי המעגל בפני זרם העמסת יתר ובפני זרם קצר מתבצעת ע"י המפסק. יש לכייל את ההגנה התרמית של המפסק לזרם המנוע, זרם זה יהווה את הזרם הנקוב של המבטח, ולפיו מתכננים את חתך מוליכי המעגל, בנוסף בודקים את התאמת המפסק להגנה על המעגל בפני זרם קצר.
- ב. מנוע מוגן ע"י ממסר יתרת זרם (O.L.) ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מא"ז או נתיך- ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר מעגל הפיקוד נמצא ליד המנוע. במקרה זה מכיילים את ממסר יתרת זרם לזרם המנוע והוא מגן על המנוע ומוליכי המעגל בפני זרם יתר ואת חתך מוליכי המעגל מחשבים לפי זרם הכיול של הממסר. מא"ז או נתיך מגנים על מוליכי המעגל בפני זרם קצר בלבד ויש לבדוק את התאמתם להגנה זו, ולאחר בודקים את עמידות המא"ז או הנתיך לזרם התנעת המנוע ואת תנאי הסלקטיביות בינם לבין הממסר.
- ג. מנוע מוגן ע"י מפסק אוטומטי הניתן לכוונון או ממסר יתרת זרם ומוליכי המעגל מוגנים ע"י מפסק אוטומטי או מא"ז- ניתן לתכנן מעגל בצורה כזו כאשר הוא מזין מספר מנועים. במקרה זה מפסק המותקן בראש המעגל מגן על מוליכי המעגל בפני זרם יתר ובפני זרם קצר על פי הכללים הרגילים. ואילו מפסקים מתכוונים מגנים על כל מנוע בנפרד בפני זרם יתר וזרם קצר, ויש לבדוק את תנאי הסלקטיביות 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.

- בחר את שטחי החתך של הכבלים בהתאם לדרישות הצרכן והזרמים המותרים
- בחר את סוג וגודל המבטחים S1-S4 הדרושים להבטחת הצרכנים והמוליכים.

פתרון לתרגיל דוגמא

חישוב הזרם המתמיד-

$$I_{b1} = \frac{P_1}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_1} = \frac{3.2 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 5.774A$$

$$I_{b2} = \frac{P_2}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_2} = \frac{17 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.85} = 28.868A$$

$$I_{b3} = \frac{P_3}{\sqrt{3} * Un * \cos \varphi_3} = \frac{12 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 17.321A$$

$$\vec{I}_T = \vec{I}_{b1} + \vec{I}_{b2} + \vec{I}_{b3} =$$

$$\vec{I}_T = (5.775 \angle 36.87^{\circ}) + (28.868 \angle 31.79^{\circ}) + (17.321 \angle 0^{\circ}) = (50.089 \angle 21.89^{\circ})A$$

לפי שיטת ההתקנה עבור הזנות הצרכנים 1-3 המותקנים בתוך צינור, נבחר בטבלה -90.2:

עבור צרכן 1- נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג הגנת מנוע בגודל

(4-6.3)A נכיל אותו ל-6A

נבחר בשטח חתך 1.5mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 16A$ ובבדוק התאמתו לפי

התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_N \leq I_z \Rightarrow 5.8 < 6 < 16 \Rightarrow o.k.$$

ובבדוק התאמתו לפי התנאי השני:

$$0.9I_n \leq I_z \Rightarrow 0.9 * 6 = 5.4 < 16A \Rightarrow o.k.$$

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 A(24-32) נכיל אותו ל-30A ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:
נבחר בשטח חתך 6mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 36A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_N \leq I_z \Rightarrow 28.868 < 30 < 36 \Rightarrow o.k.$$

ומידת התאמתו לפי התנאי השני:

$$0.9I_n \leq I_z \Rightarrow 0.9 * 30 = 27 < 36A \Rightarrow o.k.$$

נבדוק התאמתו לזרם ההתנעה:

$$I_{st} = 2 * I_n = 2 * 28.868 = 58A$$

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:

נבחר בשטח חתך 2.5mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 21A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_N \leq I_z \Rightarrow 17.321 < 20 < 21 \Rightarrow o.k.$$

ומידת התאמתו לפי התנאי השני:

$$1I_n \leq I_z \Rightarrow 1 * 20 = 20 < 21A \Rightarrow o.k.$$

עבור ההזנה הראשית- לפי שיטת ההתקנה עבור ההזנה הראשית הטמונה באדמה נבחר בטבלה -90.6 :

נבחר הגנה בהתאם לזרם המחושב, נבחר בהגנה מסוג מא"ז בגודל 63A ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

נבחר בשטח חתך 16mm^2 שעל פי הטבלה $I_z = 73A$ ונבדוק התאמתו לפי התנאי הראשון:

$$I_b \leq I_N \leq I_z \Rightarrow 50.089 < 63 < 73 \Rightarrow o.k.$$

ומידת התאמתו לפי התנאי השני:

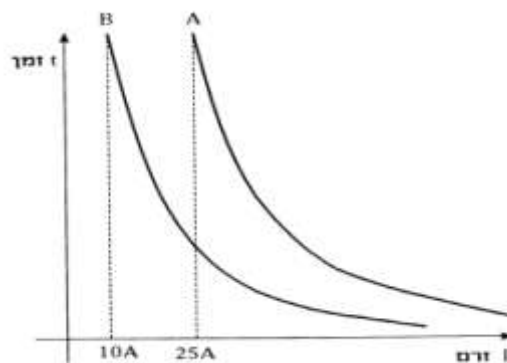
$$1I_n \leq I_z \Rightarrow 1 * 63 = 63 < 73A \Rightarrow o.k.$$

סלקטיביות בהפעלת מאבטחים

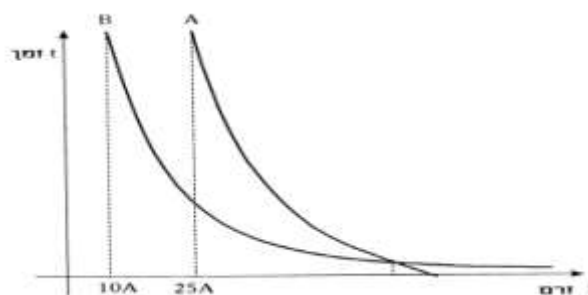
סלקטיביות זרם

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:

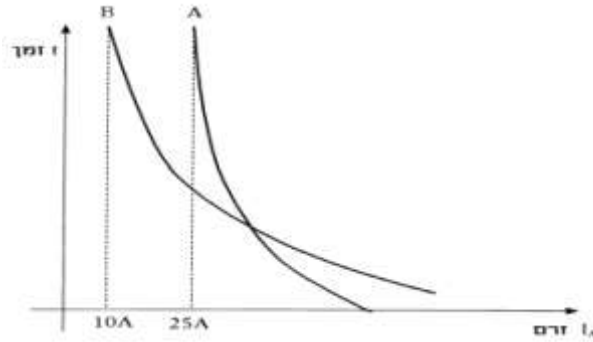
- במקרה של תקלה במערכת התקני ההגנה בפני זרם יתר צריכים לפעול ולנתק רק את המעגל המושפע מהתקלה.
 - זרמי מעבר של העומסים אינו צריך לגרום לניתוק המעגל.
 - מערכת סלקטיבית צריכה להיות מתוכננת כך שאם המאבטח הקרוב למקום התקלה אינו פועל צריך המאבטח המותקן לפניו לפעול ולנתק את הזרם המעגל.
- כאשר לא קיימת נקודת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



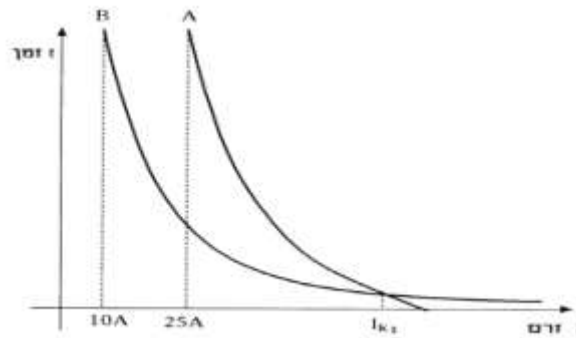
דוגמא לסלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים (רק בתחום ההגנה התרמית):



דוגמא לחוסר סלקטיביות זרם חלקית בין 2 מאבטחים:



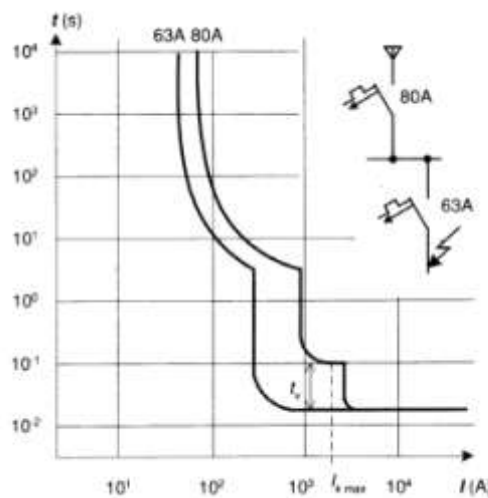
דוגמא לסלקטיביות בין 2 נתיכים אם זרם הקצר במתקן קטן מ- I_{k1} .



סלקטיביות זמן

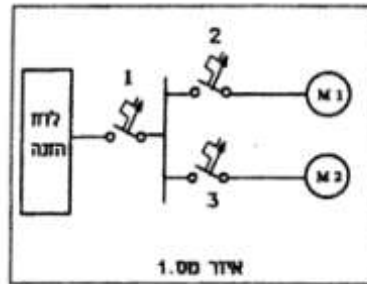
בכדי להגיע לסלקטיביות מלאה בין 2 מאבטחים יש צורך גם להתייחס לסלקטיביות בזמן. ז"א שתגובת ההגנה המגנטית של המפסק המותקן במעלה המעגל צריכה להיות איטית יותר ביחס למאבטח המותקן בקרבת התקלה. ישנם מאת"ים עם אפשרות כיול לזמן תגובה מגנטי עבור זרמי הקצר. זמן זה מוגדר t_v .

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:

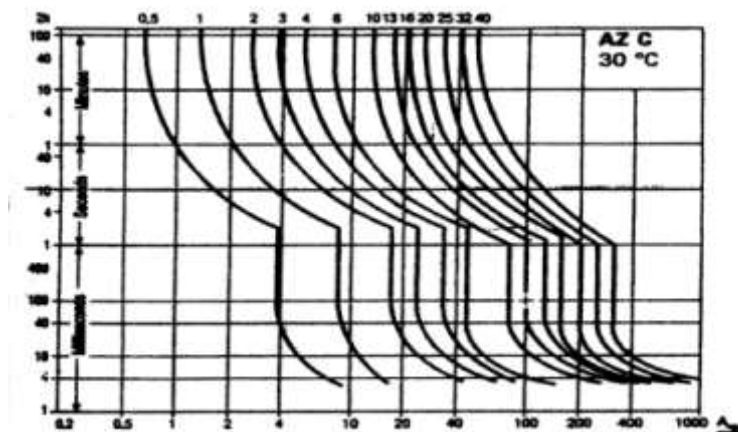
2 מנועים תלת מופעיים ובעלי מתח נקוב של 400V מוזנים ממקור בעל מתח נקוב של 400V, כמתואר באיור מס' 1. נתוני המנועים כמפורט בטבלה.



זמן התנעה (sec)	זרם התנעה (A)	נצילות (%)	$\cos \varphi$	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.

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

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

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

ב. עבור מאבטח 2- על פי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 10A עומד בזרם ההתנעה של 30A במשך 10sec ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.

עבור מאבטח 3- על פי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 6A עומד בזרם ההתנעה של 18A במשך 10sec ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.

עבור מאבטח 1- על מנת ליצור סלקטיביות מאבטח 1 צריך להיות גדול ממאבטחים 2 ו-3 ולפי האופיין ניתן לראות כי מאבטח בגודל 16A עומד בזרם ההתנעה של 30A במשך 10sec שהוא זמן ההתנעה הארוך מבין 2 המנועים ומתאים בעמידה בזרם קצר של 200A במשך זמן שאינו עולה על 5sec וכן מתאים גם מבחינת התנאי הראשון.

חישוב זמן השהייה המרבי לניתוק זרם קצר

כאשר ההגנה מידית של מפסק פועלת בהשהייה על מנת להבטיח תנאי סלקטיביות עם מפסק אחר, המותקן במורד המעגל, יש לבדוק האם מוליכי המעגל עומדים בהלם החום של זרם הקצר.

את הבדיקה מבצעים לפי הנוסחה הבאה:

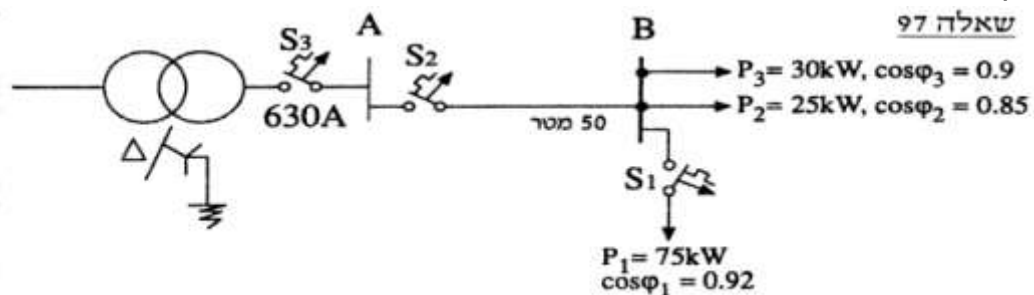
$$t = \left(\frac{k * S}{I_k} \right)^2$$

כאשר:

- t הזמן המרבי המותר של ניתוק הקצר (S).
 - k מקדם הנתון התקנות. ערכו תלוי בסוג חומר המוליך ובסוג הבידוד.
 - S שטח המוליך (mm^2).
 - I_k זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בסוף המעגל המוגן (A).
- אחר כך יש לוודא שזמן ניתוק הקצר אינו גדול מהזמן המרבי המותר: $t_{br} \leq t$.

תרגיל דוגמא 1

נתון המעגל הבא:



- מתח הקו הנומינאלי 400V.
- העכבה הכוללת עד מפסק S3 היא: $(0.005 + j0.01)\Omega$.
- ההתנגדות הסגולית של נחושת: $\rho = \frac{1}{57} \left[\frac{\Omega \text{mm}}{\text{m}} \right]$.
- א. בחר חתך הכבל העשוי נחושת ומזין את לוח משנה B לפי העמסה מותרת. הכבל מותקן על מגש מחורר המותקן על הקיר בה הטמפרטורה האופפת 35°C .
- ב. הגדר את מפסקים S1 ו-S2. הסבר אילו נתונים מגדירים מפסק ואיך חשבת אותם.
- ג. צפיפות הזרם המרבית המותרת הכבל נחושת הנתון בזמן תקלה (קצר) היא: $143 \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} * \text{sec} \right]$. נתון כי השהייה בפתיחת המפסק S1 בזמן קצר מלא היא 0.03sec.
- מה היא השהייה המרבית המותרת בפתיחת מפסק S2 בזמן קצר מלא ליד מפסק S1.
- האם לדעתך יש סלקטיביות של זמני השהייה של 2 המפסקים.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נחשב את הזרם בכבל המזין את לוח B:

$$S_T = S_1 \angle \varphi_1 + S_2 \angle \varphi_2 + S_3 \angle \varphi_3 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} + \frac{P_2}{\cos \varphi_2} + \frac{P_3}{\cos \varphi_3} =$$

$$S_T = \left(\frac{75}{0.92} + \frac{25}{0.85} + \frac{30}{0.9} \right) * 10^3 = 144.267 KVA$$

$$I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{144.267 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 208.231 A$$

גודל המפסק 250A ומכוייל ל-250A.

הזרם המתמיד המרבי הדרוש לפי התנאי השני:

על פי שיטת ההתקנה נבחר את מטבלה 90.7 שטח חתך מוליך של 95mm².

ב. המפסק האוטומטי S1:

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_1} = \frac{75 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} = 117.666 A$$

גודל המפסק 125A ומכוייל ל-125A.

חישוב זרם הקצר התלת מופעי על פס B (בהזנחת היגב הכבל):

$$R = \rho * \frac{l}{A} = \frac{1}{57} * \frac{50}{95} = 0.00923 \Omega$$

$$Z_{KB} = Z_{KA} + R = 0.005 + j0.01 + 0.00923 = (0.01423 + j0.01) \Omega$$

$$I_{kB} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_{KB}} = \frac{400}{\sqrt{3} * (0.01423 + j0.01)} = 13.278 KA$$

מכאן ניתן לקבוע שכושר הניתוק של המפסק S1 הוא: $I_{cus1} \geq 15 KA$

המפסק האוטומטי S2:

$$I_b = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_1} + \frac{P_2}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_2} + \frac{P_3}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_3} =$$

$$I_b = \frac{75 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} + \frac{25 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.85} + \frac{30 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.9} = 208.231 A$$

גודל המפסק 250A ומכוייל ל-250A.

חישוב זרם הקצר התלת מופעי על פס A:

$$I_{kA} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_{kA}} = \frac{400}{\sqrt{3} * (0.005 + j0.01)} = 20.656 KA$$

מכאן ניתן לקבוע שכושר הניתוק של המפסק S2 הוא: $I_{cus2} \geq 21 KA$

ג. חישוב ההשהיה המותרת בניתוק מפסק S2:

$$t_{S2} = \left(\frac{k * S}{I_{kS1}} \right)^2 = \left(\frac{143 * 95}{15 * 10^3} \right)^2 = 0.82 sec$$

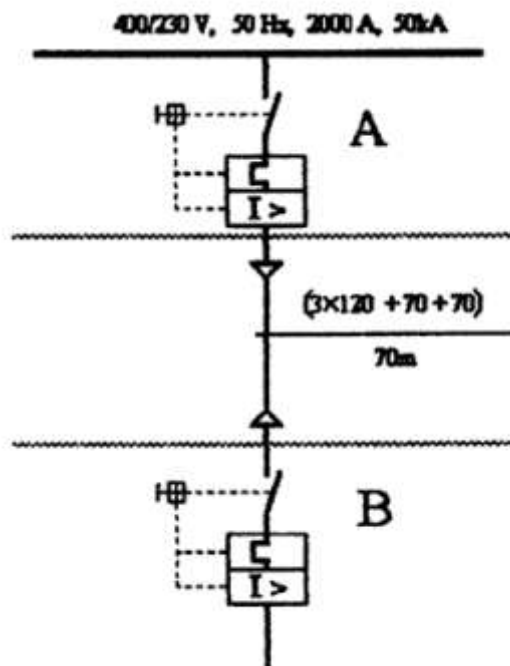
וזאת ההשהיה המרבית שניתן לכייל במפסק S2. מכיוון שהיא גדולה מהשהיית

מפסק S1 (הנתונה 0.03sec) קיימת סלקטיביות בין המפסקים.

תרגיל דוגמא 2

באיור הבא מתואר חיבור קו הזנה למכונה. מפסק A נמצא בלוח הראשי. הניזון משני שנאים זהים. לכל אחד מהשנאים הספק נקוב של 630KVA. יחס מתחים 22/0.4 KV. מתח הקצר 4% מהמתח הנקוב.

מפסק B נמצא בלוח המשנה של המכונה. הכבל עשוי נחושת עם בידוד ל-90°. הזרם המרבי המתמיד של הכבל 313A. (ניתן להזניח את ההיגב האשראי של הכבל). הזרם המרבי שהמכונה צורכת בעבודה רגילה הוא 227A. בהפעלת המכונה הזרם עולה לערך של עד 400A, עד סיום תהליכי ההתנעה של המנועים במכונה, שנמשכים כ-3 שניות לכל היותר.



בחר את המאבטחים A ו-B לכל מאבטח ציין את הנתונים הבאים: מתח, זרם, כושר ניתוק, זמן השתיה מותר לניתוק זרם הקצר, תחום כיוון הגנה בפני עומס יתר, תחום כיוון הגנה בפני זרם קצר.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. המתח הנקוב של 2 המפסקים הוא 400V.

ב. קביעת הזרמים הנקובים וכיוול ההגנה התרמית:

מפסק B- מגן על המכונה הצורכת 227A ולכן גודל המפסק הנדרש על פי התנאי

הראשון: $I_n \geq I_b = 250A$ ומכאן גודל הכיוול ההגנה התרמית 230A.

נבדוק את תנאי ההתנעה לפי אופיין המפסק: זרם של 400A יגרום לניתוק המפסק תוך זמן של 1min שזה זמן הגדול יותר מ-3sec זמן ההתנעה המרבי של המנועים.

מפסק A- מגן על הכבל בפני העמסת יתר ובפני זרם קצר.

ולכן זרם הכיוול התרמי חייב להיות: $I_n \leq \frac{I_z}{0.9} = \frac{313}{0.9} = 348A$

ומכאן נבחר במפסק בגודל 400A המכיל ל-350A.

ג. כושר ניתוק של המפסקים:

חישוב זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בהדקי המפסק A:

$$X_{kA} = Z_{kA} = \frac{Z_{TR}}{2} = \frac{U_{k\%} * U_n^2}{2 * 100 * S_n} = \frac{4 * 400^2}{2 * 100 * 630 * 10^3} = (J5.079)m\Omega$$

$$I_{kA} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} * J5.078 * 10^{-3}} = 45.478KA$$

ומכאן כושר הניתוק של מפסק A: 50KA

חישוב זרם הקצר התלת מופעי הצפוי בהדקי המפסק B:

$$R = \rho * \frac{l}{A} = 0.0175 * \frac{70}{120} = 10.208m\Omega$$

$$Z_{KB} = Z_{KA} + R = (10.208 + J5.079)m\Omega$$

$$I_{kB} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_{kB}} = \frac{400}{\sqrt{3} * (10.208 + J5.079) * 10^{-3}} = 20.254KA$$

ומכאן כושר הניתוק של מפסק B: 21KA

ד. חישוב זמן ההשהיה המותר לפתיחת מפסק A:

לפי תקנות החשמל עבור כבל נחושת בעל בידוד 90° - k=143

$$t_A = \left(\frac{k * S}{I_{kA}} \right)^2 = \left(\frac{143 * 120}{21 * 10^3} \right)^2 = 0.667sec$$

עבור מפסק B אין צורך בהשהיה

קיימת סלקטיביות בין המפסקים כיוון שמספיק זמן השהיה של 0.1 sec כדי להבטיח

תנאי סלקטיביות בין המפסקים.

ה. תחום כיוון הגנה בפני זרם יתר:

מפסק B: ניתן לכייל את ההגנה המידית שלו לכל זרם העולה מעל זרם התנעת

המכונה. $I_{mB} > 400A$ ניתן לקבוע שעל פי הנתונים הקטלוגים

$$I_{mB} = 2 * I_r = 2 * 230 = 460A$$

מפסק A: כיוון שהסלקטיביות בין 2 המפסקים היא סלקטיביות זמן כיוון שקיימת השהייה

בפתיחת מפסק A. לכן ניתן לכייל את ההגנה המידית של מפסק A לפי יחס זהה ל-B:

$$I_{mA} = 2 * I_r = 2 * 350 = 700A$$

פרק 5-שיפור גורם ההספק

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

יתכן מצב בו משתנים תנאי העבודה של הצרכן ההשראתי וגורם ההספק שלו קטן (כדוגמא שהמנוע לא עובד בעומס הנקוב שלו או שעובד בריקם). כתוצאה מכך הזרם בצרכן עולה וגורם לכך שההפסדים בהתנגדות האומית של הקווים גדלים כיוון שהם תלויים בעוצמת הזרם בריבוע לפי הנוסחה $P = r * I^2$.

בשל עליית הזרם יתכן כי מוליכי הרשת השנאים והגנראטורים לא יעמדו בתנאים אלה כיוון שהספקם המדומה שלהם עלה לפי הנוסחה $S = U * I$ והגדלתם יגרום לייקור הרשת. החוק מחייב להתקין במתקן אמצעי שיפור גורם ההספק עבור צרכנים השראתיים עד רמה של 0.92.

הדרכים הטבעיות לשיפור גורם ההספק:

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

ב. למנוע מצב בו מנועים אסינכרוניים עובדים בריקם.

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

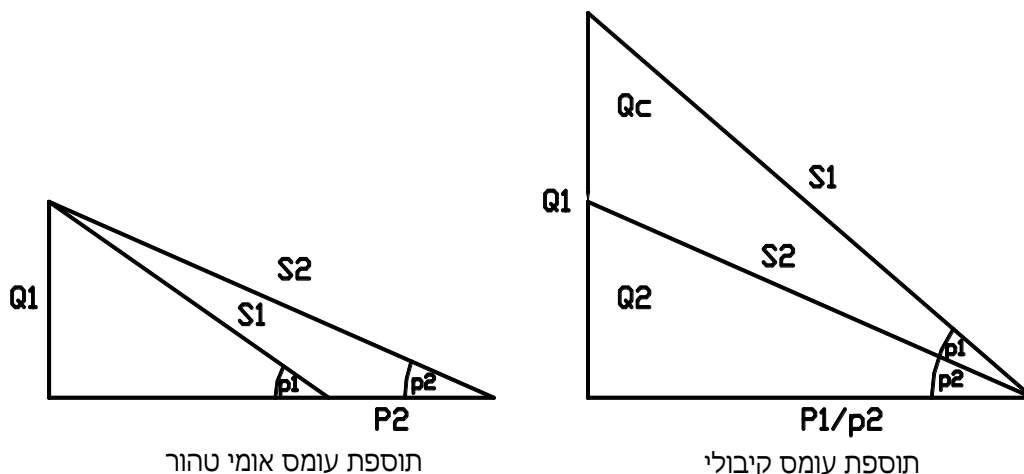
הדרכים המלאכותיות לשיפור גורם ההספק:

א. התקנת סוללות קבלים לעומסים השראתיים.

ניתן להגביל צריכה ריאקטיבית מהרשת ע"י שימוש בקבלים אשר מהווים מקור מקומי של אנרגיה ריאקטיבית ובכך לשפר את גורם ההספק.

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

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



שיטות התקנת קבלים לשיפור גורם ההספק

א. שיטה יחידנית:

לכל צרכן מחובר קבל לשיפור גורם ההספק.
יתרונות בשיטה זו- התקנה היחידנית משפרת את ההספק גם בקווים של המעגלים הסופיים ובכך מתקבלת תועלת מרבית.
חסרונות בשיטה זו- כמות הקבלים היא מרבית (עלות).
אין שליטה על מצב הקבלים (בלאי).
אין קיזוז טבעי של לגורם ההספק ע"י צרכנים אומים.
ממומלץ להשתמש בשיטה זו כאשר ההספק של צרכן בודד מהווה חלק משמעות מההספק הכולל של המתקן.

ב. שיטה קבוצתית:

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

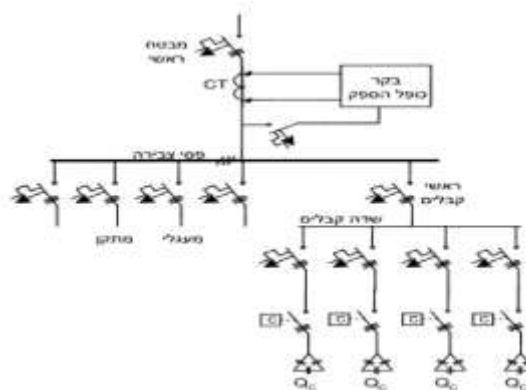
ממומלץ להשתמש בשיטה זו כאשר משטר העבודה של הצרכנים קבוע וכן שהמתקן פרוש על שטח גדול (אורך קווי ההזנה ללוחות המשנה ארוכים).

ג. שיטה מרכזית:

בלוח הראשי (או משני) מותקנות סוללות קבלים ובקר כופל הספק. הבקר מחשב באופן רציף את מקדם ההספק של המתקן באמצעות מדידת זרם, מתח והזווית ביניהם. בהתאם לתוצאות המדידה, הבקר ממתג את סוללות הקבלים באמצעות מגענים.

יתרונות בשיטה זו- כמות הקבלים המתקן היא יחסית מינימאלית.
אודות לבקר אין חשש למקם חסר או יתר.
חסרונות בשיטה זו- השיפור אינו כולל את הקווים הפנים במתקן.
עלות גבוהה.

שיטה זו היא השימושית ביותר.



חישוב הספק וקיבול סוללת הקבלים:

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

בחיבור קבלים משולש-

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

בחיבור קבלים בכוכב-

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

כאשר:

Q_c -הספק של סוללות הכבלים (Var).

P -הספק המתקן (W).

φ -זווית המופע לפני השיפור.

φ -זווית המופע הרצויה לאחר השיפור.

C -קיבול הקבל (F).

Un -מתח שלוב נקוב (V).

Un_{ph} -מתח מופעי נקוב (V).

f -תדר הרשת (Hz).

תכנון קו הזנה לסוללת הקבלים:

את שטח החתך של המוליכים וגודל המבטח בוחרים לפי זרם הקבל המחושב לפי-

$$I_c = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * Un}$$

בעת בחירת מוליכים ואמצעי מיתוג והגנה יש להתחשב בזרם ההתנעה הגבוה אשר מופיע בזמן חיבור של קבל לא טעון למקור המתח. מסיבה זו נקבע בתקנות החשמל: "מוליכים במעגל זינה לקבל יוגנו בפני זרם קצר על ידי מאבטח בעל זרם הנקוב השווה לזרם הנקוב של הקבל כפול 1.43 לזרם הנקוב הגבוה יותר, הקרוב ביותר מתוך הסדרה התקנית של מאבטחים".

זאת אומרת יש לבחור מבטח מעגל לפי- $I_n \geq 1.43 * I_c$.

לעומת זאת לפי לשון התקנה: "אין מניעה שחתך המוליכים במעגל הזינה של הקבל יתאים לזרם הנקוב של הקבל ולא לזרם של המבטח במעגל הזינה".
זאת אומרת שמותר לבחור את חתך המוליכים לפי התנאי- $I_z \geq I_c$ בהתאם לשיטה תקנת מוליכי המעגל.

תרגיל דוגמא 1

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

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

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

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

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

תרגיל דוגמא 2

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

פתרון לתרגיל דוגמא 2

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

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

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

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

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

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

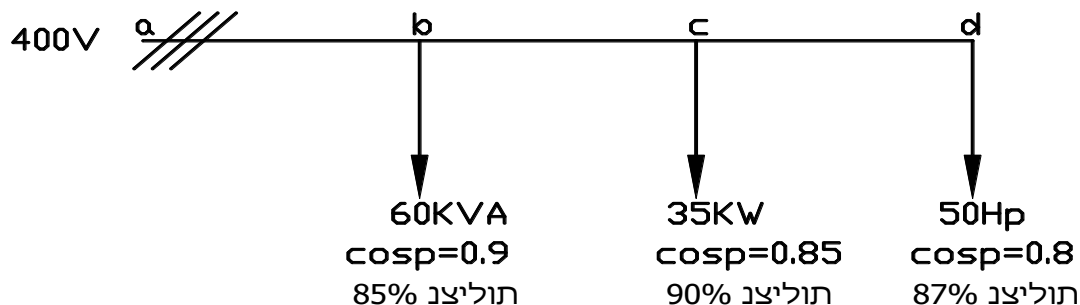
$$\tan \varphi_{\text{קיים}} = \frac{QT}{PT} = \frac{12.84 * 10^3}{12 * 10^3} = 1.07$$

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

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

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.

א.

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

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

$$Pb = \frac{Sb' * \cos \rho b}{\eta b} = \frac{60 * 10^3 * 0.9}{0.85} = 63.529KW$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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.

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

ג.

$$C_\Delta = \frac{Q_C}{Un^2 * 6\pi f} = \frac{48.927 * 10^3}{400^2 * 6\pi * 50} = 324.457 \mu F$$

$$C_Y = \frac{Q_C}{Un^2 * 2\pi f} = \frac{48.927 * 10^3}{400^2 * 2\pi * 50} = 973.372 \mu F$$

ד. נבחר בסוללת קבלים מסחרית בגודל 50KVar

$$I_c = \frac{Q_C}{\sqrt{3} * Un} = \frac{50 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 72.16 A$$

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

$$I_n \geq 1.43 * 72.16 = 103.2 A$$

נבחר בגודל מבטח מסחרי בגודל 125A

ה. את שטח החתך של המוליכים נבחר לפי התנאי: $I_z \geq I_c$ לפי שיטת התקנה "א" טבלה

$$I_z = 70.1 - \text{נבחר בשטח חתך } 25 \text{ mm}^2 \text{ שעבורו } - 82$$

נגדי פריקה

לפי תקנות החשמל: "קבל יצויד באמצעים מתאימים לפריקת מטענו. אמצעי הפריקה יבטיחו כי דקה אחת לכל היותר לאחר ניתוקו של הקבל מהזינה לא יישאר בין הדקיו מתח העולה על 50V".

הדרישה נועדה להבטיח היעדרות מתח על הקבל לאחר הניתוק מטעמי בטיחות ובנוסף למנוע תופעות מעבר חמורות בזמן חיבור חוזר של הקבל לרשת. ניתן לחשב את מתח פריקת הקבל לפי:

$$U_c = U_{max0} * \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

כאשר:

U_c - המתח על הקבל כעבור זמן t (V).

U_{max0} - המתח המקסימאלי בקבל בתחילת הפריקה (V).

t - זמן הפריקה (s).

R - התנגדות נגד הפריקה (Ω).

C - קיבול הקבל (F).

שינוי נושא נוסחה:

$$R = \frac{t}{-\ln \left(\frac{U_c}{U_{max0}} \right) * C}$$

תרגיל דוגמא

צריכת האנרגיה השנתית של מתקן היא 1200MWh ו- 850MVar.
 המתקן מופעל 6106 שעות בשנה. מתח הרשת 400V/50Hz.
 יש צורך להתקין סוללת קבלים לשיפור גורם ההספק ל-0.92.
 א. חשב את מקדם ההספק של המתקן לפני השיפור.
 ב. חשב את הספק סוללת הקבלים לצורך השיפור הנדרש.
 ג. חשב את ערך נגדי הפריקה בהבטחת דעיכת מתח הקבל ל-24V תוך דקה מרגע הפסקת המתח לסוללת הקבלים (הקבלים מחוברים במשולש).

פתרון לתרגיל דוגמא

א.

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{850}{1200} = 0.708$$

$$\cos \varphi_T = \cos(\tan^{-1} 0.708) = 0.816$$

ב.

$$P = \frac{W_p}{h} = \frac{1200 * 10^6}{6106} = 196.528 \text{ KW}$$

$$Q_c = P_T(\tan \varphi_{\text{קיי}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}) = 196.528 * 10^3 [0.708 - \tan(\cos^{-1} 0.92)] = 55.421 \text{ KVar}$$

ג.

$$C_\Delta = \frac{Q_c}{Un^2 * 6\pi f} = \frac{55.421 * 10^3}{400^2 * 6\pi * 50} = 367.522 \mu F$$

$$R = \frac{t}{-\ln\left(\frac{U_c}{U_{max0}}\right) * C} = \frac{60}{-\ln\left(\frac{24}{400 * \sqrt{2}}\right) * 367.522 * 10^{-6}} = 51.663 \text{ K}\Omega$$

חישוב פרק זמן להחזרת השקעה בהתקנת סוללת קבלים

כאשר בלוח חשמל מותקנת סוללת קבלים לשיפור מקדם ההספק היא גורמת להקטנת הזרם בקו המזין וכתוצאה מכך לירידת הפסדי ההספק בקו.
 ניתן לחשב רווח כלכלי מהתקנת סוללת הקבלים באופן הבא:
 אם הפסדי ההספק בקו לפני התקנת הקבלים היו ΔP_1 ולאחר ההתקנה ΔP_2 , ניתן לחשב את החיסכון באנרגיה השנתית באופן הבא: $\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) * t$ כאשר t - שעות צריכה בשנה.

אם נכפיל את האנרגיה בתעריף החשמל M , נקבל את החיסכון הכספי השנתי:
 $CW = \Delta W * M$. החיסכון הכספי בסוף שנת ה- n תתקבל על ידי: $CW_n = \Delta W * M * n$.
 מצד שני עלות ההשקעה היא: $B = b * Q_c$. כאשר Q_c -הספק סוללת הקבלים, b -מחיר של 1KVar, בהתחשב בריבית והפחת השנתיים $K\%$, ניתן לחשב את עלות ההשקעה בסוף שנת ה- n על ידי הביטוי: $C_{Qn} = b * Q_c \left(1 + \frac{K\%}{100} * n\right)$.

פרק הזמן להחזרת ההשקעה הוא מספר שנים n , שבהם החיסכון הכספי משתווה לעלות ההשקעה: $CW_n = C_{Qn}$. למציאת פרק הזמן הנדרש להחזר ההשקעה יש לפתור את המשוואה עבור הנעלם n .

תרגיל דוגמא

במתקן חשמלי הפסדי ההספק בקטע הרשת שבין המונה של ח"ח לבין הלוח הראשי מהווים 2.8% מההספק הפעיל הנצרך. מקדם ההספק של עומס המתקן הוא 0.8 (השראי). המתקן מופעל 5500 שעות בשנה לפי עומס קבוע. המחיר של כל קו"ט"ש הוא 32 אג'. לצורך שיפור מקדם ההספק ל-0.92 הותקנה בלוח סוללת קבלים בעלת הספק נקוב של 45KVar. מחירה הסגולי של סוללת הקבלים היא: $\frac{65 \text{ ₪}}{\text{KVar}}$. המתח הנקוב של רשת הזינה התלת מופעית הוא 400V. הריבית והפחת השנתיים בגין ההשקעה בסוללת הקבלים מהווים 13% ממחיר הסוללה.

- א. חשב את ההספק הפעיל הנצרך ע"י המתקן.
- ב. חשב את הזרמים הקווים ברשת הזינה לפני ואחרי שיפור גורם ההספק.
- ג. פי כמה פחתו ההפסדים בקו המזין את לוח הראשי לאחר חיבור סוללת הקבלים.
- ד. חשב את הפרק הזמן להחזרת ההשקעה הכרוכה בהרכבת סוללת הקבלים.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. חישוב ההספק הפעיל-

$$P = \frac{Q_c}{\tan \varphi_{\text{קיים}} - \tan \varphi_{\text{רצוי}}} = \frac{45 * 10^3}{\tan(\cos^{-1} 0.8) - \tan(\cos^{-1} 0.92)} = 138.888 \text{ KW}$$

ב. חישוב הזרמים לפני ואחרי השיפור-

$$I_{\text{לפני}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_{\text{קיים}}} = \frac{138.888 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.8} = 250.584 \text{ A}$$

$$I_{\text{אחרי}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U_n * \cos \varphi_{\text{אחרי}}} = \frac{138.888 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.92} = 217.9 \text{ A}$$

ג. חישוב בכמה פחתו ההפסדים-

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{\Delta P_{\text{אחרי}}}{\Delta P_{\text{לפני}}} = \frac{I_{\text{אחרי}}^2 * R}{I_{\text{לפני}}^2 * R} = \left(\frac{I_{\text{אחרי}}}{I_{\text{לפני}}} \right)^2 = \left(\frac{217.9}{250.584} \right)^2 = 0.756 = 75.6\%$$

מכאן שההפסדים פחתו ב- 100% - 75.6% = 24.4%

ד. חישוב פרק הזמן להחזרת ההשקעה-

$$\Delta P_1 = 2.8\% * P = \frac{2.8}{100} * 138.888 * 10^3 = 3.889 \text{ KW}$$

$$\Delta P_2 = 75.6\% * \Delta P_1 = \frac{75.6}{100} * 3.889 * 10^3 = 2.94 \text{ KW}$$

החיסכון באנרגיה השנתית-

$$\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) * t = 10^3 * (3.889 - 2.94) * 5500 = 5219.5 \text{ KWh}$$

החיסכון הכספי בסוף שנת ה-

$$Cw_n = \Delta W * M * n = 5219.5 * 0.32 * n = (1670.24 * n) \text{ ₪}$$

מצד שני עלות ההשקעה בסוף שנת ה-

$$C_{Qn} = b * Q_c \left(1 + \frac{K\%}{100} * n \right) = 65 * 45 * \left(1 + \frac{13}{100} * n \right) = [2925 * (1 + 0.13 * n)] \text{ ₪}$$

חישוב מספר השנים להחזר ההשקעה-

$$Cw_n = C_{Qn}$$

$$1670.24 * n = 2925 * (1 + 0.13 * n)$$

$$1670.24 * n = 2925 + 380.25 * n$$

$$1670.24 * n - 380.25 * n = 2925$$

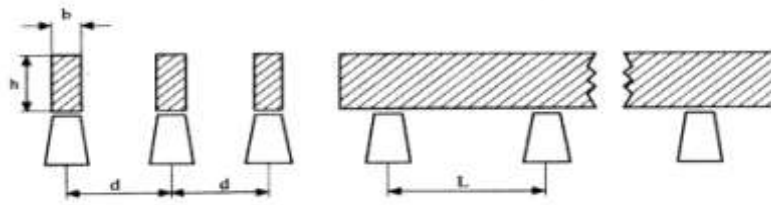
$$1289.99 * n = 2925$$

$$n = \frac{2925}{1289.99} = 2.267_{\text{שנים}}$$

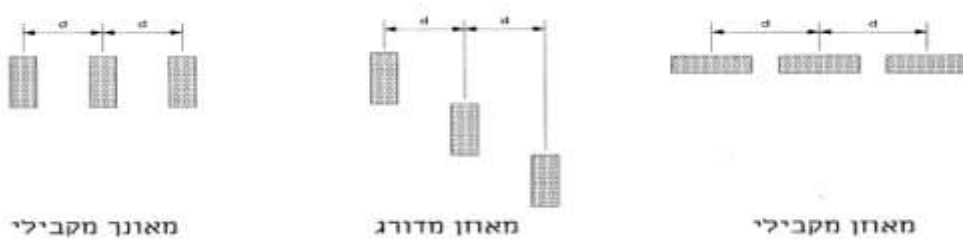
פרק 6-ציוד בלוח חשמל

חישוב פסי צבירה בלוח

בדרך כלל בלוחות חשמל משתמשים בפסי צבירה מנחושת בצורה מלבנית, כשהם מחוזקים ע"י מבודדי תמיכה. המרחק בין נקודות החיזוק של הפסים חייב להתאים לכוחות האלקטרו דינמיים, העשויים להתפתח בזמן מעבר זרמי קצר. המרחק המקובל בין פסים של מופעיים שונים בלוחות למתח נמוך $d = 10\text{cm}$ ולא פחות מ- 3cm .



שיטות התקנה פסי צבירה:



לצורך קביעת חתך פסי הצבירה, המרחקים ביניהם, חוזק המבודדים וכו' יש לערוך סדרת חישובים.

שלב החישוב:

- בחירת שטח חתך של פסי הצבירה מבחינת העמסת מותרת- בשלב זה קובעים את חתך הפס $S(\text{mm}^2)$, גובהו $h(\text{mm})$, ורוחבו $b(\text{mm})$.
הנתון הקובע הוא הזרם הנתון של המפסק הראשי בלוח החשמל I_n .
הזרם המתמיד המרבי I_z של פסי הצבירה בחתכים השונים נתון בקטלוגים של היצרנים. יש לבחור את החתך לפי התנאי: $I_z \geq I_n$.

- בדיקת עמידות הפס בהלם תרמי- בשלב הזה בודקים האם החתך הנבחר מספיק בכדי לעמוד בהעמסה תרמית בזרמי קצר. חתך הפס המינימאלי שיעמוד בהלם תרמי נתון מחושב ע"י הנוסחה הבאה:

$$S = \sqrt{\frac{I_k^2 * t}{k^2}}$$

כאשר:

- S שטח חתך של הפס (mm^2).
- I_k זרם קצר התלת מופעי הצפוי על פסי הצבירה (A).
- t זמן ניתוק הקצר ע"י המפסק הראשי, כאשר המפסק פועל ללא השהיה ניתן לקבוע כי: $t = 0.1\text{s}$. (מומלץ לבדוק את עמידות הפס בזרם קצר לזמן של 3s).
- k מקדם המאפיין את צפיפות הזרם בשניה. עבור נחושת גליוה: $k = 155$. יש לבדוק שחתך הפס הנבחר בסעיף א' אינו קטן מחתך המינימאלי המחושב בסעיף זה, ולהגדילו במידה ויש צורך.
- ג. בדיקת עמידות הפסים בפני כוחות אלקטרו דינמיים-

בשלב זה קובעים את המרווח המקסימאלי (L) בין 2 המבודדים (בין 2 נקודות החיזוק) של פס אחד. העברת זרם דרך פסי הצבירה יוצרת כוחות אלקטרו דינמיים בין הפסים המותקנים במקביל. ניתן לחשב את הכוח הפועל על פס אחד בעת העברת זרם הלאם לפי הנוסחה הבאה:

$$F = \frac{1.76 * I_{shok}^2 * L}{d * 100}$$

כאשר:

-F הכוח הפועל על פס הצבירה בקטע שבין 2 מבודדים (kgf) (ק"ג כוח).

-L מרווח בין 2 מבודדים של פס אחד (cm).

-I_{shok} זרם הלאם (kA).

-d מרחק בין פסים של מופעים שונים (cm).

הכוח F מפעיל על הפס מאמץ כפיפה σ (סיגמא).

$$\sigma = \frac{F * L}{12 * W}$$

כאשר:

-σ מאמץ כפיפה שפועל על הפס (kg/cm²).

-W מומנט ההתנגדות (cm³), הנתון ע"י הנוסחה $W = 0.17 * b^2 * h$ כאשר הפסים מותקנים המצב מאונך ו- $W = 0.17 * b * h^2$ כאשר הם מותקנים במצב מאוזן.

-h גובה הפס (cm).

-b עובי הפס (cm).

תנאי לעמידת פסי הצבירה בפני כוחות האלקטרו דינמיים הוא שמאמץ הכפיפה לא יעלה על הערך המרבי המותר לנחוש: $\sigma_{max} = 2500 \left(\frac{gk}{cm^2} \right)$.

לפי תנאי זה ניתן לחשב את המרחק המרבי בין 2 מבודדים של פס אחד:

$$L_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} * 12 * W * d * 100}{1.76 * I_{shok}^2}}$$

לאחר הצבת הערכים נקבל עבור הפסים המותקנים במאונך:

$$L_{max} = 538 * \frac{b}{I_{shok}} * \sqrt{h * d}$$

על המרחק הנבחר בין החיזוקים להיות קטן מהערך המחושב בסעיף זה.

ד. בדיקת עמידות פסי הצבירה בפני תהודה-

בשלב זה בודקים האם מידות הפס והמרחק בין החיזוקים לא יגרמו לתופעת תהודה במערכת פסי הצבירה. לשם כך יש לחשב את תדירות התהודה הטבעית של פסי הצבירה לפי הנוסחה:

$$f_0 = \frac{112}{L^2} * \sqrt{\frac{E * J}{G}}$$

כאשר:

-f₀ תדירות הטבעית של הפס (Hz).

-L המרחק בין המבודדים (cm).

-E מודול האלסטיות השווה ל- $1.1 * 10^6 \text{ (gk/cm}^2\text{)}$ עבור נחושת.

J- מומנט האינרציה המחושב לפי: $J = \frac{b^3 \cdot h}{12} (cm^4)$ עבור התקנה במאונך.

$J = \frac{h^3 \cdot b}{12} (cm^4)$ עבור התקנה במאוזן.

G- משקל 1cm פס צבירה (kg/cm).

המשקל הסגולי של נחושת הוא: $\left(\frac{gk}{cm^3}\right) g_0 = 8.9 \cdot 10^{-3}$ מכאן :

$$G = g_0 \cdot h \cdot b$$

לאחר הצבת הערכים נקבל את הנוסחה הבאה:

$$f_0 = 3.6 \cdot 10^5 \cdot \frac{b}{L^2}$$

כוחות התהודה המסוכנים ביותר מתפתחים בתדרים השווים לתדר הרשת ולמכפלתו. יש לבדוק שהתדירות הטבעית של הפסים אינה בתחומים:

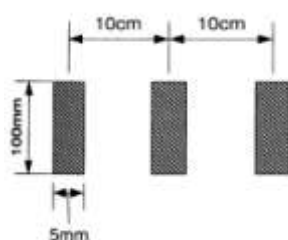
45-60Hz ו- 80-110Hz. אם מסתבר שהתדירות הטבעית נמצאת באחד מהתחומים המסוכנים, יש לשנות את המרחק L בין המבודדים ושוב לבדוק את החישוב.

תרגיל דוגמא 1

חשב את פסי הצבירה ללוח חשמל ראשי במתקן למתח נמוך. המפסק הראשי בלוח: 1000A, המפסק מכויל לזמן ניתוק 0.3s, עכבת הקצר עד למפסק: $Z_k = j5.08m\Omega$.

פתרון לתרגיל דוגמא 1

נקבע לפי קטלוג היצרן את מידת הפס עבור זרם צפוי 1000A לפי התנאי: $I_z \geq I_n$.
 $b=5mm$, $h=100mm$. נבחר במרחק סטנדרטי בין הפסים $d=10cm$.



נבדוק עמידות הפסים בהלם תרמי:

$$I_k = \frac{Un}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 5.08 \cdot 10^{-3}} = 45.46KA$$

נחשב שטח החתך הנדרש (עבור פס נחושת גלוי, $k=155$)

$$S = \sqrt{\frac{I_k^2 \cdot t}{k^2}} = \sqrt{\frac{(45.46 \cdot 10^3)^2 \cdot 0.3}{155^2}} = 160.642mm^2$$

שטח החתך של הפס שבחרנו הוא: $A = b \cdot h = 5 \cdot 100 = 500 mm^2$
 מסקנה: הפסים עומדים בפני זרם הלם.

נחשב את המרחק בין המבודדים בתנאי עמידות בפני כוחות אלקטרו דינמיים:

נחשב את זרם ההלם הצפוי- $I_{shok} = \sqrt{2} \cdot k \cdot I_k$

את מקדם ההלם ניתן למצוא לפי הטבלה לפי היחס: $\frac{R_k}{X_k}$

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{0}{5.08} = 0 \Rightarrow k = 2$$

$$I_{shok} = \sqrt{2} \cdot k \cdot I_k = \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 45.46 \cdot 10^3 = 128.58KA$$

$$L_{max} = 538 * \frac{b}{I_{shok}} * \sqrt{h * d} = 538 * \frac{0.5}{128.58} * \sqrt{10 * 10} = 20.92cm$$

כיוון ש- 20.92 cm היא לא מידה סטנדרטית, נבחר במידה סטנדרטית וכן גם ליתר ביטחון:
L=15cm

נבדוק את עמידות הפסים בפני תהודה:

$$f_0 = 3.6 * 10^5 * \frac{b}{L^2} = 3.6 * 10^5 * \frac{0.5}{15^2} = 800Hz$$

ניתן לראות שאין סכנת תהודה.

תרגיל דוגמא 2

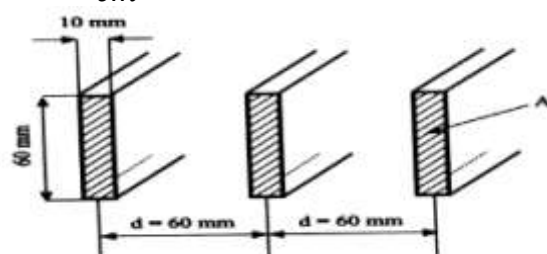
לוח ראשי מוזן משנאי תלת מופעי על ידי קו הזנה שאורכו 100m. הקו מורכב מכבלי נחושת

$$X_0 = 0.08 \frac{\Omega}{km} \quad 3 \times (4 \times 185) mm^2$$

$$S = 630KVA ; 22/0.4kV ; U_{k\%} = 4\% ; U_{r\%} = 1.2\%$$

נתוני השנאי: פסי צבירה כמתואר באיור בעלי הנתונים הבאים:

$$\sigma = 1200 \frac{kg}{cm^2} ; d = 60mm ; A = 10 \times 60 mm^2$$



א. חשב את זרם הקצר בפסי הצבירה בלוח.

ב. קבע את אורך המרבי של פס הצבירה בין 2 מבודדים שיבטיח עמידה בפני מאמץ מכני.

ג. קבע את זמן התגובה המרבי של מערכת ההגנה בלוח.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א. חישוב עכבת הכבל-

$$R_L = \rho * \frac{l}{A} = 0.018 * \frac{100}{3 * 185} = 3.243 m\Omega$$

$$X_L = X_0 * l = \frac{0.08}{1000} * 100 = 8 m\Omega$$

$$Z_L = R_L + jX_L = (3.243 + j8) m\Omega$$

חישוב עכבת השנאי-

$$R_{TR} = \frac{U_{r\%} * Un^2}{100 * Sn} = \frac{1.2 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 3.048 m\Omega$$

$$Z_{TR} = \frac{U_{k\%} * Un^2}{100 * Sn} = \frac{4 * 400^2}{100 * 630 * 10^3} = 10.159 m\Omega$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = \sqrt{10.159^2 - 3.048^2} = 9.69 m\Omega$$

$$Z_{TR} = R_{TR} + jX_{TR} = (3.048 + j9.69) m\Omega$$

$$Z_k = Z_L + Z_{TR} = 3.243 + j8 + 3.048 + j9.69 = 6.291 + j17.69 = (18.775 \angle 70.42^\circ) m\Omega$$

$$I_k = \frac{Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{400}{\sqrt{3} * 18.775 * 10^{-3}} = 12.3 kA$$

ב. חישוב אורך מרבי של פסי הצבירה-

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{6.291}{17.69} = 0.355 \Rightarrow k \approx 1.35$$

$$I_{shok} = \sqrt{2} * k * I_k = \sqrt{2} * 1.35 * 12.3 * 10^3 = 23.483 KA$$

$$W = 0.17 * b^2 * h = 0.17 * 1^2 * 6 = 1.02 cm^2$$

$$L_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} * 12 * W * d * 100}{1.76 * I_{shok}^2}} = \sqrt{\frac{1200 * 12 * 1.02 * 6 * 100}{1.76 * 23.483^2}} = 95.29 cm$$

ג. חישוב זמן מרבי לניתוק ההגנה למניעת פגיעה בפסי הצבירה-

$$t = \left(\frac{k * S}{I_k} \right)^2 = \left(\frac{155 * 10 * 60}{12.3 * 10^3} \right)^2 = 57.168 sec$$

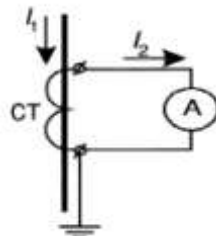
למרות התוצאה שקבלנו הזמן המרבי לניתוק ההגנה יהיה 5s בהתאם לתקנה.

מדידות זרם ומתח

לצורך מדידת זרמים ומתחים גדולים באמצעות מכשירי מדידה סטנדרטיים המיועדים לזרמים ומתחים נמוכים, משתמשים בשנאי מדידה. למדידה מסוג זה קוראים מדידה משנית, לעומת מדידה ראשונית, כאשר מכשיר המדידה מחובר ישירות למעגל הנמדד.

מדידת זרם

שנאי מדידה המיועד למדידת זרם נקרא "משנה זרם" (CT), ותפקידו להפריד בין מעגל הזרם החזק לבין מעגל האמפרמטר. יישום משנה הזרם מעלה את אמינות המעגל לזרם חזק מאחר ומכשיר המדידה אינו מותקן ישירות במעגל, ומאפשר שימוש במוליכים בעלי שטח חתך קטן לחיבור האמפרמטר. כמו כן ניתן להתקין מכשיר מדידה במרחק מסוים מהמעגל הנמדד או מספר מכשירי מדידה בחיבור טורי אם יש צורך.



מקדם השנאה של משנה זרם:

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{N_2}{N_1}$$

מקדם השנאה של "משנה זרם" הוא יחס הזרמים בראשוני ובמשני. לפי בחירת מקדם ההשנאה של משנה הזרם יש לבחור סקלה של האמפרמטר, כאשר הזרם המרבי של סקלת האמפרמטר יהיה לא פחות מהזרם המרבי של המעגל הנמדד.

זרם המשני של "משנה הזרם" מותאם עם מכשירי המדידה הסטנדרטיים ושווה ל- 5A.

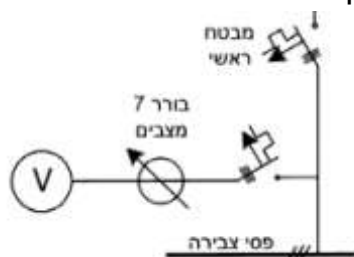
מאחר והתנגדות של האמפרמטר נמוכה, משנה הזרם פועל בתנאים הקרובים לקצר. הסליל המשני חייב להיות מחובר למכשיר המדידה. אם מסיבה כל שהיא מעגל הסליל המשני יפתח, שטף בליבת השנאי יעלה פי כמה וכמה. שטף זה יכול לגרום להשראת מתח גדול בסליל המשני ולפריצת הבידוד וכן לגרום להתחממות השנאי עקב עליית הפסדי הברזל. מסיבה זו על פי תקנות החשמל (העמסה והגנה על מוליכים) אסור להתקין מבטח או מפסק במעגל המשני של משנה הזרם.

משנה הזרם מהווה מקור מתח ועל פי תקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה בפני חשמול) יש להתקין הארקת שיטה באחד מהדקיו.

מדידת מתח

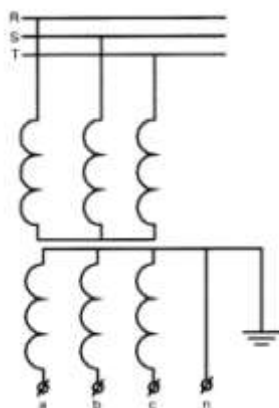
מדידת מתח במתקנים למתח נמוך:

במתקנים למתח נמוך משתמשים למדידת מתח במדידה ראשונית, כאשר הוולטמטר מחובר ישירות למתח המתקן. באמצעות בורר 7 מצבים מתאפשר מדידת מתחים פאזיים וקווים של המתקן באמצעות מכשיר מדידה אחד. מעגל הוולטמטר חייב להיות מוגן פני זרם יתר ע"י מאבטח בעל כושר ניתוק מתאים.



מדידת מתח במתקנים למתח גבוה:

למדידת מתח במתקן למתח גבוה משתמשים ב"משנה מתח" (PT). אשר מהווה שנאי תלת מופעי עם חיבור סלילים Y/y ותפקידו להפריד בין מעגל מתח גבוה לבין מעגל הוולטמטר. ישום זה מאפשר מדידת מתחים גבוהים ע"י מכשירים סטנדרטיים אשר יכולים להיות מרוחקים מהרשת הנמדדת ומאפשרת שימוש במוליכים בעלי בידוד למתח נמוך.



מקדם השנאה של משנה מתח:

$$\frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{N_1}{N_2}$$

מקדם השנאה של "משנה מתח" הוא יחס המתחים בראשוני ובמשני. לפני בחירת מקדם השנאה של משנה מתח יש לבחור את סקלה הוולטמטר כאשר המתח המרבי של סקלת הוולטמטר לא תהיה פחות מהמתח הקווי של הרשת הנמדדת. מתח המשני הנקוב של "משנה המתח" מתואם עם מכשירי מדידה סטנדרטיים ושווה ל- 100V או 110V.

כדי להגן על מעגלי המדידה בפני אפשרות פריצת מתח גבוה, חובה להאריק את נקודת הכוכב של הסליל המשני.

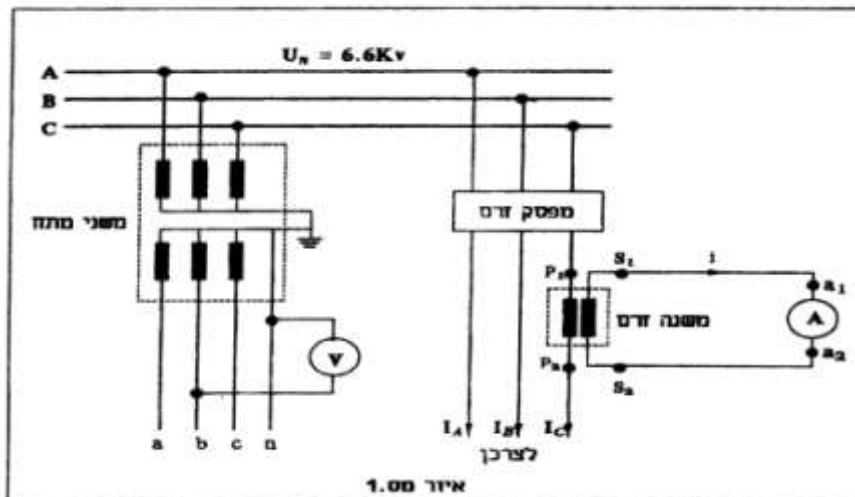
תרגיל דוגמא 1

באיור מס' 1 מתוארת סכמה עקרונית להזנת מכשירי מדידה באמצעות שנאי מדידה: משנה זרם ומשנה מתח.

הזרם הנקוב של האמפרמטר הוא 5A ותחום הסקאלה שלו 0-200A.

המתח הנקוב של הוולטמטר הוא 100V ותחום הסקאלה שלו 0-7KV.

הזרם הנקוב של הצרכן הוא 95A.



- א. מה צריך להיות קריאת 2 מכשירי המדידה בזמן הפעלת הצרכן לפי הספקו הנקוב?
 ב. איזה יחס השנאה צריך להיות עבור השנאים.

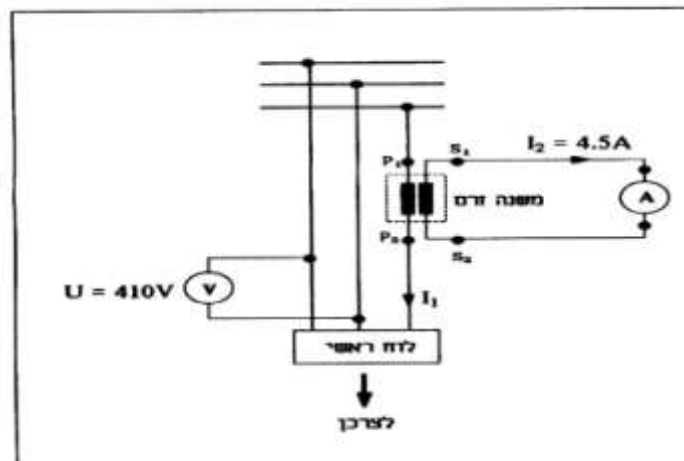
פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. $95A, 3.81KV$

ב. $PT = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1n}}{U_{2n}} = \frac{7000}{100}, CT = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{200}{5}$

תרגיל דוגמא 2

באחד המופעים של קו זינה ללוח ראשי תלת מופעי מורכב משנה זרם בעל יחס השנאה של-
 $1/100$ הזרם במשני של השנאי $I_2 = 4.5A$. המתח השלוב הנמדד בלוח באמצעות
 הוולטמטר הוא $410V$.



- א. חשב מה הזרם שיורה האמפרמטר.
 ב. חשב מה ההספק המדומה המועבר מהלוח הראשי לצרכן.

פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.

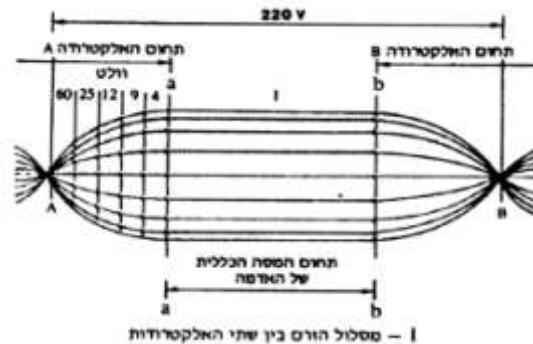
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \Rightarrow \frac{100}{1} = \frac{I_{1n}}{4.5} \Rightarrow I_{1n} = 100 * 4.5 = 450A$$

ב.

$$S_n = \sqrt{3} * U_n * I_{1n} = \sqrt{3} * 410 * 450 = 319.563KVA$$

פרק 7-הארקות והגנות בפני התחשמלות

מסה כללית של האדמה:



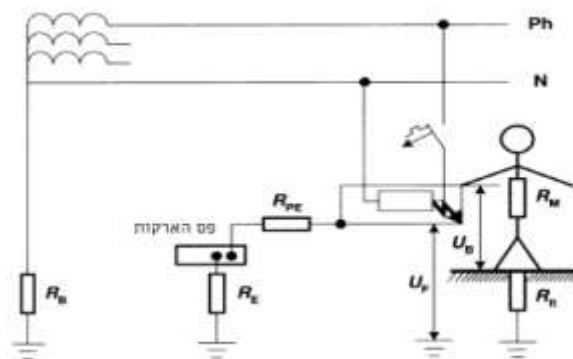
תחום האדמה המרוחק מאלקטרודת הייחוס במידה כזאת, שהמתח בין נקודות כלשהן בתחום זה הנו זניח. כאשר קיים מתח בין 2 אלקטרודות באדמה A ו-B, עובר בניהם זרם /. מתח הנמדד בין האלקטרודה A לבין נקודה כלשהי באדמה, הנמצאת בין 2 אלקטרודות, גדל ככל שמתרחקים מהאלקטרודה A. זהו תחום השפעת האלקטרודה ואורכו נחשב שווה לעומק 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 הארקות שיטה.

R_E - התנגדות אלקטרודת הארקה.

R_{PE} - התנגדות מוליך הארקה.

R_M - התנגדות גוף האדם.

R_{fi} - התנגדות הרצפה.

U_F - מתח תקלה.

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 חשמול 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.

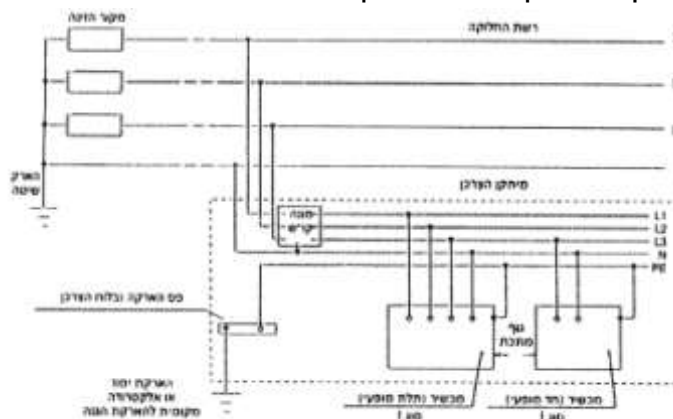
1. הארקת הגנה

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.
להארכת השיטה 2 תפקידים:

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



לכל גוף מתכתי במתקן יש צורך לחבר מוליך הארקה כדי לאפשר את מסלול התקלה. מוליך הארקה זה מחובר דרך פס השוואת פוטנציאלים באמצעות אלקטרודה לאדמה.

בזמן תקלה המתח מהשנאי דרך מוליך המופע מופיע על גוף הצרכן. מכיוון שגוף הצרכן מחובר לאדמה נוצר זרם תקלה זרם זה דרך מסת האדמה חוזר לשנאי לנקודת הכוכב.

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

בעבר השתמשו הצנרת המים המתכתית במתקן כאלקטרודה לחיבור מוליכי הארקה של המתקן לאדמה כיוון שצנרת זו טמונה באדמה ויתרונה הגדול בעצם קיומה ובך היא הבטיחה

מסלול תקלה לאדמה צורה זולה. עם השנים החלו להשתמש בצנרת מחומרים בעלי הולכה חשמלית גרועה(כדוגמת צנרת פלסטיק) וכתוצאה מכך פגעו באיכות הארקת הגנה. כדי לפתור בעיה זו מצאו פיתרון מעשי וזול וזאת להשתמש בברזלי הזיון של הבניין כאלקטרודה לחיבור לאדמה. פתרון זה נקרא הארקת יסוד והוגדרו בחוק החשמל קובץ של תקנות עבור חיבור זה.

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

הארקת היסוד בנויה מ-3 חלקים עיקריים:

1. אלקטרודת הארקת היסוד- הם בעצם ברזלי הזיון הנמצאים בכלונסאות המבנה לפי המתואר בתקנות החוק החשמל.
2. טבעת הגישור- חיבור (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

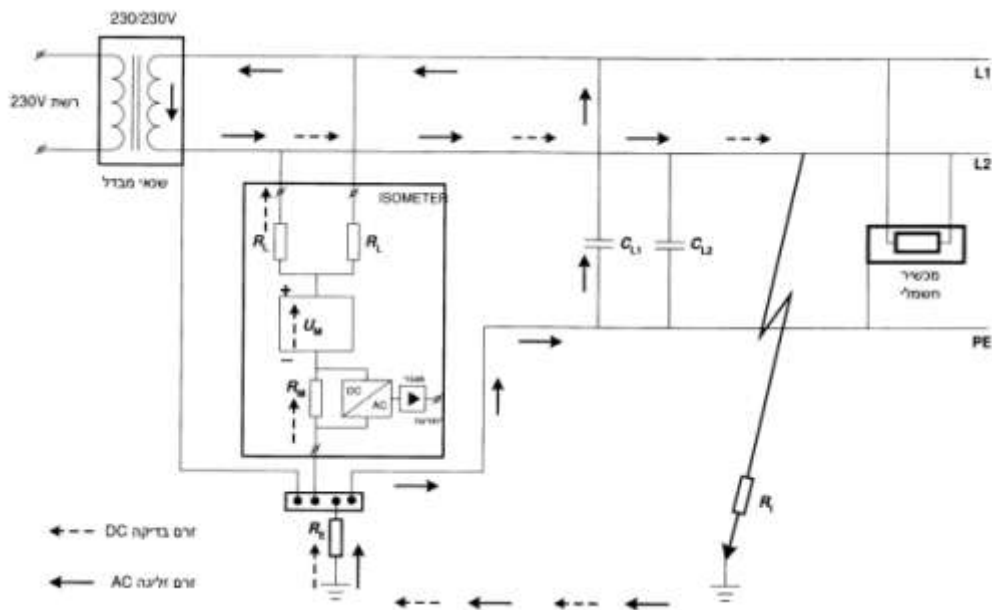
כפי שהוסבר השימוש בהארקת ההגנה מותנה בכך שלולאת התקלה תהיה נמוכה מאוד והיא תלויה גם מגודל המפסק הראשי של המתקן. כך שכולל שהמפסק הראשי גדול יותר התנגדות לולאת התקלה צריכה להיות נמוכה יותר לאפשר את הפעלת ההגנות בזמן. ובנוסף התנגדות לולאת התקלה מושפעת גם מסוג צפיפות ורמת הלחות של הקרקע עצמה. באופן מעשי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

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

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

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 ביניהם 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 CL1 ובחזרה לשנאי. זרם הזליגה זה יכול לגרום להיווצרות מתח תקלה השווה למפל המתח על ההתנגדות בין הארקה לבין המסה הכללית של האדמה RE. המשגוח מצויד במקור מתח UM אשר במקרה של תקלה בבידוד יגרום לזרימת זרם DC דרך מוליך הרשת L2, האדמה, התנגדות הארקה ובחזרה למשגוח. על הנגד RM ייווצר מפל מתח, שערכו תלוי בהתנגדות הבידוד Ri- ככל שהתנגדות הבידוד נמוכה יותר כך המתח על נגד RM יהיה גדול יותר. תפקיד המשגוח הוא להתריע כאשר התנגדות הבידוד יורדת מתחת לערך מסוים.

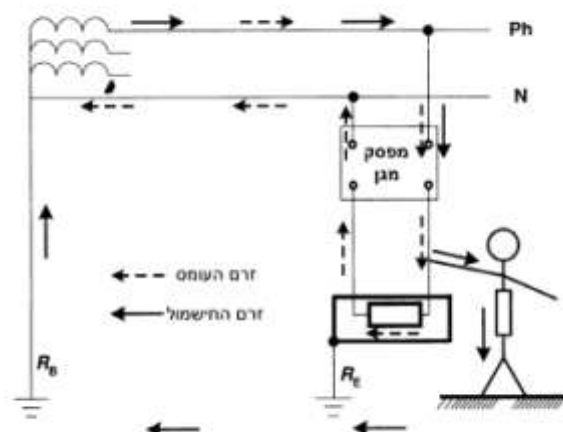
הסכנות בשימוש בשיטה זו הם:

- 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 בציוד עזר המתריע בעת הופעת תקלה כגון "משגוח".
- שיטה זו נפוצה בשימוש בהם נדרשת אמינות הספקה גבוהה כגון חדרי ניתוח ועוד.

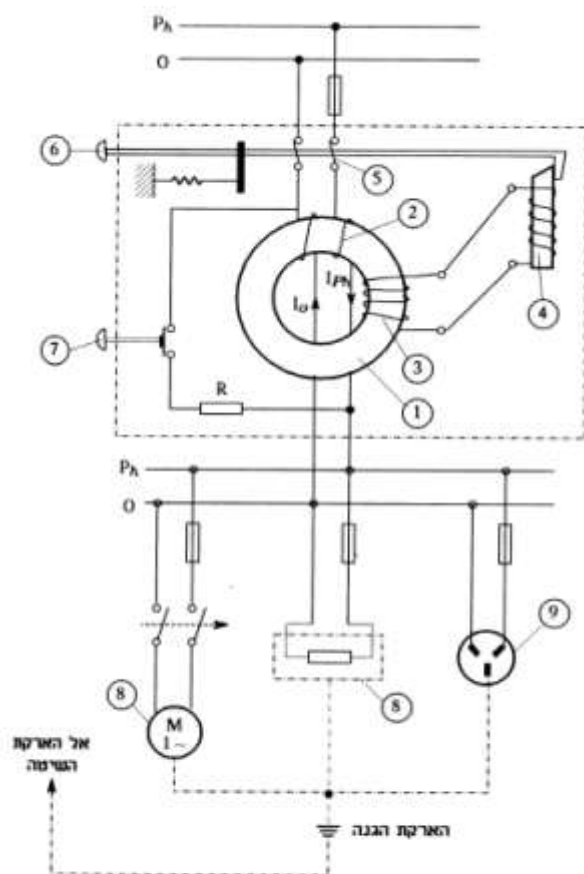
5. מפסק מגן בפני זרם דלף (ממסר פחת)



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 מושג 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 שמועדים 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 במקרים 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 פאזי 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. הפרד 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

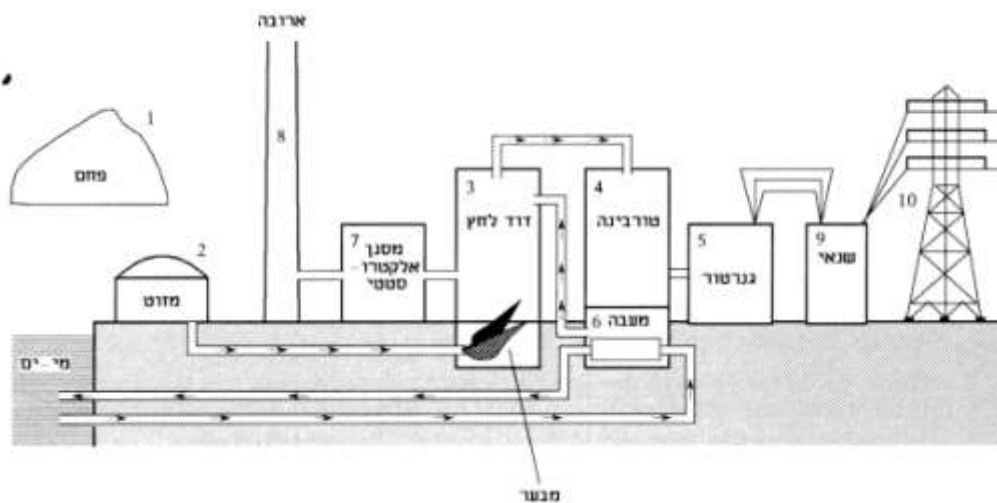
מטרת השיטה למנוע הופעת מתח העולה על 50V. בשיטה זו נמנעת היווצרות מתח מגע הגדול מ-50V. ובהעדרות הארקת שיטה נמנעת סגירת לולאת תקלה .

פרק 8 מערכות הספק למתח גבוה ועליון

משק החשמל בישראל מבוססת על תחנות כוח המקושרות זו לזו. תחנות הכוח מייצרות חשמל באמצעות גנרטורים המונעים באמצעות טורבינות. באמצעות מערכת תשתית ארצית ומערכות חלוקה מועבר החשמל לכל חלקי הארץ ומסופק לצרכניים.

מבנה עקרוני של תחנת כוח תרמית

הדלק המשמש לייצור החשמל (פחם [1] או דלק נוזלי [2]) מוזרק בתוספת אוויר לדוד השריפה הגדול [3], נשרף ומפיק חום. קירות הדוד מכוסים באלפי מטרים של צינורות שבהם זורמים מים נוזלי מלחים. החום הגבוה, המגיע ל-1,000 מעלות צלסיוס, הופך את המים לקיטור. בטמפרטורה גבוהה זו, הצינור אל להבי הטורבינה [4], ומסובב אותן במהירות של 3,000 סיבובים בדקה. ציר הטורבינה מסובב את ציר הגנרטור [5] המייצר את החשמל. בכך לא תמה דרכו של הקיטור. הוא מקורר באמצעות מים במחליפי חום מיוחדים הנקראים מעבים [6], מתעבה למים, ומוזרם לשימוש חוזר בדוד השריפה. השריפה הנוצרת בדוד מועברים דרך מסנני שיקוע אלקטרוסטטיים [7] אל הארובה הגבוהה [8], ונפלטת בגובה רב. המסננים האלקטרוסטטיים משמשים רק כאשר ייצור החשמל נעשה בפחם, ותפקידם לקלוט את רוב רובו של האפר המרחף הנוצר בתהליך השריפה. החשמל הנוצר בגנרטור מועבר לשנאים גדולים [9], ומהם אל המערכת הארצית [10], המעבירה ומחלקת את החשמל לכל חלקי הארץ.



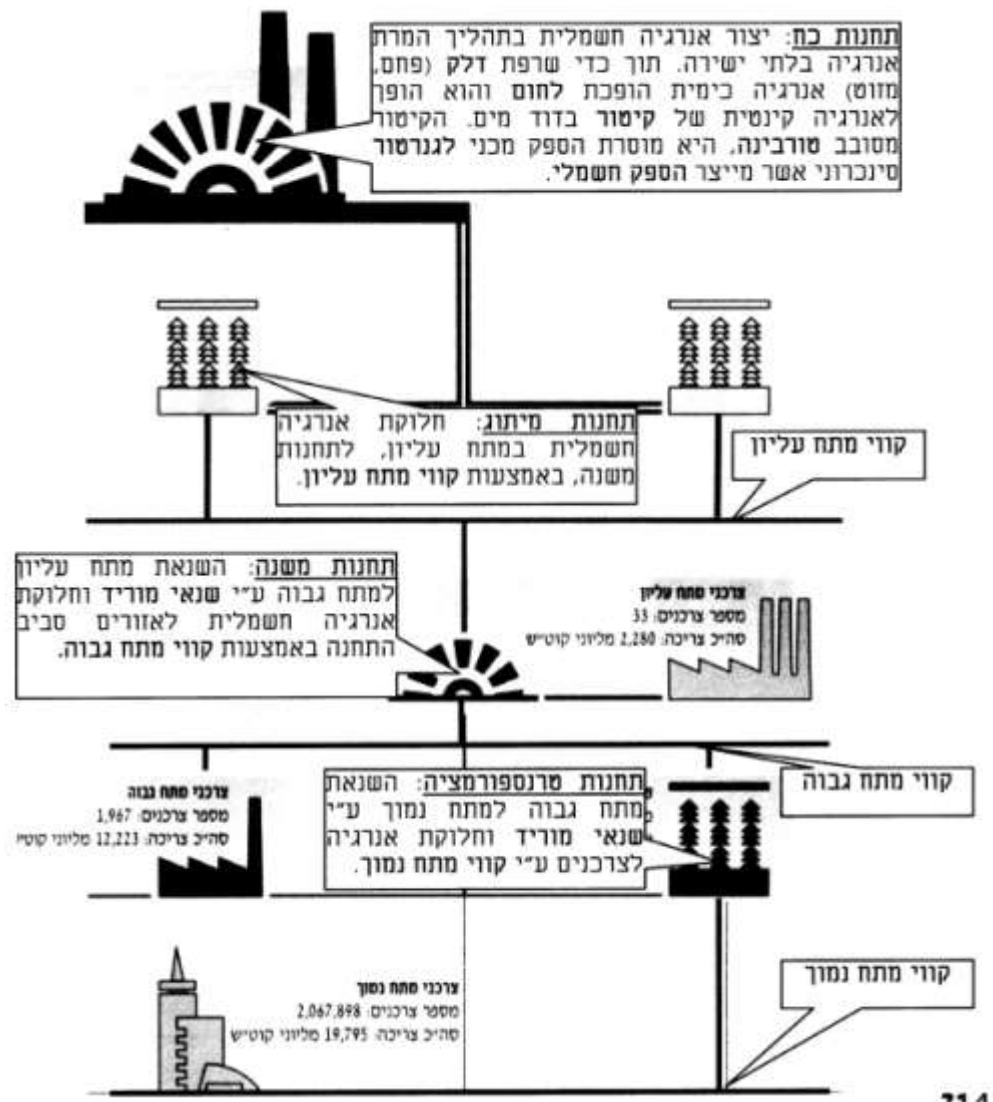
מערכות חלוקה ארצית

המתח החשמלי (כ"מ) המופק מהגנרטורים בתחנת הכוח הוא לרוב ברמה של 20KV ומגיע לשנאי בתחום תחנת הכוח המעלה את המתח הזה לרמת מתח עליון של 110KV או 161KV או 400KV. משם הוא מועבר ברשת הארצית עד לתחנת המיתוג האזורית, ומורד לרמה של מתח גבוה לרוב 22KV. משם הוא ממותג לתחנת השנאה וחלוקה באזור מסוים, ובאמצעות שנאי הנמצא בקרבת הצרכן הסופי מורד מתח זה למתח נמוך של 400V שלוב או 230V מופעי ומסופק לצרכן..

רמות מתחים ברשת הארצית

- מתח נמוך 400V.
- מתח גבוה 12.6KV, 22KV, 33KV.
- מתח גבוה מאוד 72KV.
- מתח עליון 110KV, 161KV.
- מתח על עליון 400KV.

מבנה מערכת הספק ארצית



רשתות חשמל

קימות 2 שיטות להעברת אנרגיה חשמלית ברשת הארצית:
באמצעות רשת עילית-

יתרונות השיטה:

- פשוטה יותר להקמה, זולה יותר.
 - ניתן לשדרג אותה בקלות יותר ובעלויות זולות יותר.
- ניתן להעביר דרכה מתח עליון והספקים גבוהים למרחקים בהפסדים קטנים יחסית

חסרונות השיטה:

- מפגע לנזף ולסביבה
 - א. חשופה לברקים ותקלות.
 - ב. מסוכנת יותר.
 - ג. גוזלת שטחי קרקע נרחבת.
- באמצעות רשת תת קרקעית-

יתרונות השיטה:

- אינה נראת לעין אסתטית.
- אינה יקרה הרבה בהקמה עם מקימים אותה מראש באזור.
- בטוחה יותר.
- גוזלת פחות קרקע.

חסרונות השיטה:

- יקר מאוד להעברת מתח גבוה.
- יקרה פי 3 להקמה באזור בנוי.
- קשה ויקרה יותר לשדרוג.

מעגלי תמורה של מרכיבי מערכת הספק

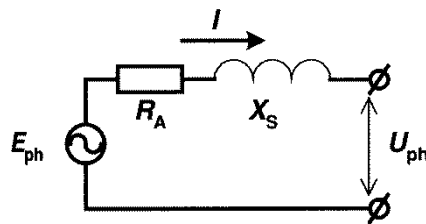
מרכיבי מערכת הספק למתח גבוה ומת עליון הם:

- גנראטורים סינכרוניים.
- שנאים.
- קווים (עליות ותת קרקעיים).
- קבלים לשיפור מקדם ההספק.

לצורך הקלה בחישובים ניתן להציג את כל מרכיב במערכת ע"י מעגל תמורה המהווה חיבור טורי, מקבילי או מעורב של מרכיבים פשוטים כגון נגד, סליל וקבל. מעגל התמורה משקף את מרכיב המערכת בצורה הנכונה כאשר זרמים, מתחים והספקים מחושבים באמצעותו שווים בקירוב מסוים לערכים הנמדדים בפועל. מעגל תמורה מציג מופע אחד של מרכיב במערכת התלת מופעית. רכיבים אומים של מעגלי התמורה מבטאים הפסדי הספק ממשי במערכת.

גנראטור סינכרוני

גנראטור סינכרוני מוצג על ידי מעגל תמורה מקורב "Γ" (גמה). את רכיבי המעגל: X_s - היגב סינכרוני ו- R_A - התנגדות העוגן ניתן לחשב על-פי תוצאות של ניסוי בקצר.



ההספק הנקוב של גנראטור ברשת הארצית מגיע לכמה מאות MVA. במעגל התמורה של הגנראטור בגודל כזה ניתן להזניח את הרכיב האקטיבי R_A .

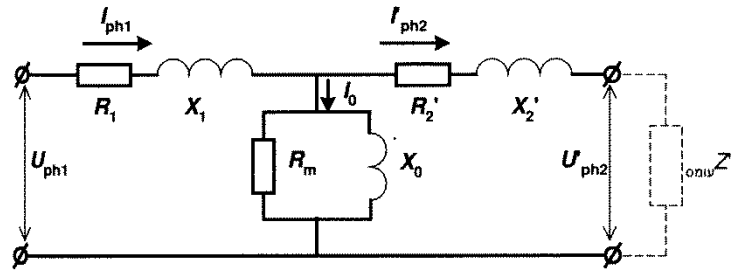
שנאי

מעגל תמורה "T" כולל רכיבים של הסליל הראשוני (R_1, X_1) , רכיבים משוקפים של הסליל המשני (R'_2, X'_2) וענף המיגנוט (R_m, X_0) . את התנגדות הסלילים R_1, R_2 ואת ההיגבים X_1, X_2 ניתן לחשב על-פי תוצאות של ניסוי בקצר, ואת הערכים המשוקפים מקבלים באמצעות יחס מספרי כריכות:

$$R'_2 = R_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad X'_2 = X_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

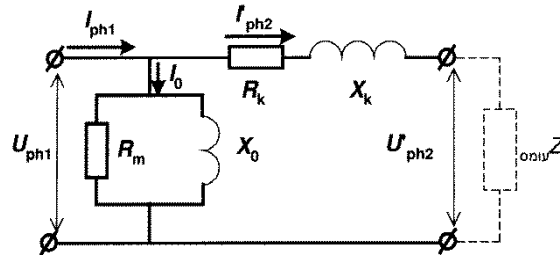
קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

ואת הרכיבים של ענף המגנט R_m, X_0 מקבלים בניסוי ריקם.



מעגל תמורה "Γ" (גמה) פשוט יותר, אך פחות מדויק. הרכיבים של הסליל הראשוני והסליל המשני מחוברים במעגל זה יחד:

$$R_k = R_1 + R'_2, \quad X_k = X_1 + X'_2$$

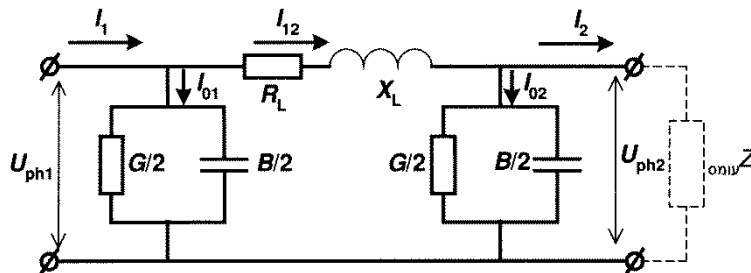


כאמור הרכיבים הטוריים מתקבלים בניסוי בקצר והרכיבים המקביליים מתקבלים בניסוי בריקם.

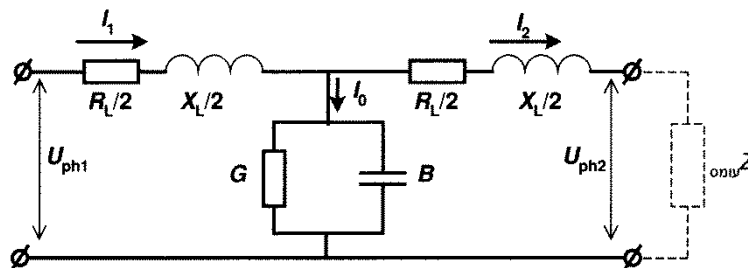
ההתנגדות R_k מבטאת את הפסדי ההספק בסלילים ΔP_{cu} וההתנגדות R_m מבטאת את הפסדי ההספק בברזל ΔP_{fe} .

קו עילי או תת-קרקעי:

קו מוצג על ידי מעגל תמורה π (פאי):



או על ידי מעגל תמורה "T":



הרכיבים הטורים: של מעגל התמורה הם R_L - התנגדות הקו, ו- X_L -היגב הקו. התנגדות הקו תלויה באורך, שטח החתך ובסוג החומר ניתן לחשבו לפי הביטויים:

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

היגב הקו תלוי באורך ובסוג הרשת וניתן לחשבו לפי הביטוי:

$$X_L = x_o * l$$

הרכיבים המקבילים: של מעגלי התמורה הם G- המוליכות האומית ו- B- המוליכות הקיבולית (מתירות) של הקו.

יחידות המדידה של המוליכות האומית והמוליכות הקיבולית היא Simmens

$$\Omega^{-1} = S_m$$

המוליכות האומית נותנת ביטוי ל-2 תופעות:

א. תופעת זליגה דרך הבידוד לאדמה. בקו תת קרקעי ערך הזליגה תלוי בטיב בידוד הכבל, ברשת עילית הוא תלוי במצב ניקיון המבודדים.

ב. תופעת קורונה- זוהי תופעת פריקת מטען חשמלי באוויר בלחץ אטמוספרי, כאשר שדה חשמלי בין אלקטרודות (תילים, חודים) אינו אחיד. התופעה מלווה בזמזום ובעירה ליד החלקים החשמליים וגורמת להפסדי הספק בקו. תופעה זו קיימת רק ברשת עלית ולא קיימת ברשת תת קרקעית.

הגורמים המשפיעים על תופעת הקורונה:

1. מתח בין מוליכי הרשת (מתחת לגבול תחתון מסוים).
2. קוטר ומבנה המוליך (סביב מוליך שזור צפיפות שדה החשמלי גדול יותר).
3. מרחק בין מוליכי המופעים.
4. מזג האוויר (לחות מגבירה את התופעה).
5. לחץ אטמוספרי וטמפר' האוויר.

מתירות B (מוליכות קיבולית) מבטאת את קיבוליות הרשת לפי הביטוי:

$$B = \frac{1}{X_c} = \omega * C = \omega * C_0 * l$$

כאשר: l -אורך הקו ב- Km.

C_0 -קיבולית סגולית $\mu F / Km$.

הקיבוליות הסגולית תלויה במרחק בין מוליכי הרשת לאדמה ביחס הפוך ולכן קיבוליות הכבלים גבוהה יותר מקיבוליות הרשת העלית.

דרך המוליכות הקיבולית זורמים זרמים פאזיים לאדמה, במצב תקין של הרשת סכום הזרמים של 3 המופעים שווה ל-0.

תרגיל דוגמא 1:

קו תמסורת עילי תלת מופעי מזין עומס 70MW בגורם הספק 0.8 מפגר. מתח העומס השלוב

132KV ותדר הרשת 50Hz. נתוני הקו: אורכו 100 ק"מ, התנגדות כל מוליך לפאזה $0.15 \frac{\Omega}{km}$,

היגב הקו ההשראי $0.38 \frac{\Omega}{km}$ והקיבול בין כל מוליך מופע לאדמה הוא $0.0084 \frac{\mu F}{km}$.

קבע את הפרמטרים של מעגל התמורה מסוג T של הקו, וחשב את:

א. זרם מתח ומקדם ההספק בתחילת הקו.

ב. נצילות הקו.

ג. כיצד ניתן לשפר את כושר העברת ההספק של הקו?

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

בהיעדרות המוליכות האומית ניתן להזניחה ולכן:

$$R_L = r_o * l = 0.15 * 100 = 15\Omega$$

$$R_{L1} = R_{L2} = \frac{R_L}{2} = \frac{15}{2} = 7.5\Omega$$

$$X_L = x_o * l = 0.38 * 100 = 38\Omega$$

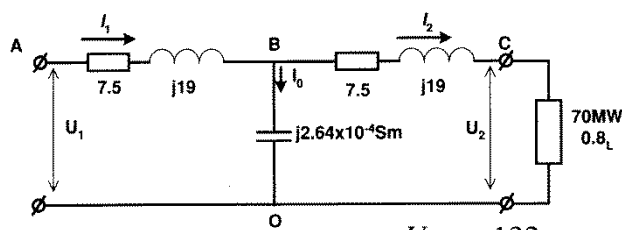
$$X_{L1} = X_{L2} = \frac{X_L}{2} = \frac{38}{2} = 19\Omega$$

$$B = \omega * C_o * l = 2\pi * 50 * 0.0084 * 100 = 2.64 * 10^{-4} Sm$$

$$I_{2ph} = I_{2L} = \frac{P_2}{\sqrt{3} * U_2 * \cos \rho} = \frac{70 * 10^6}{\sqrt{3} * 132 * 10^3 * 0.8} = 383A$$

$$U_{2ph} = \frac{U_{2L}}{\sqrt{3}} = \frac{132 * 10^3}{\sqrt{3}} = 76.2KV$$

נשרטט את מעגל התמורה מסוג "T" ונרשום את הערכים של הפרמטרים:



א.

$$\Delta U_{BC} = \overrightarrow{I_{2ph}} * \overrightarrow{Z_{BC}} = 383 \angle -36.9^\circ * (7.5 + j19) = 7.8 \angle 31.5^\circ KV$$

$$\overrightarrow{U_{BO}} = \overrightarrow{U_{2ph}} + \Delta U_{BC} = (76.2 \angle 0^\circ + 7.8 \angle 31.5^\circ) * 10^3 = 83 \angle 2.8^\circ KV$$

$$\overrightarrow{I_0} = \overrightarrow{U_{BO}} * B = 83 \angle 2.8^\circ * 10^3 * 2.64 * 10^{-4} = 21.9 \angle 92.8^\circ A$$

$$\overrightarrow{I_1} = \overrightarrow{I_2} + \overrightarrow{I_0} = 383 \angle -36.9^\circ + 21.9 \angle 92.8^\circ = 369 \angle -34.3^\circ A$$

$$\Delta U_{AB} = \overrightarrow{I_{1ph}} * \overrightarrow{Z_{AB}} = 369 \angle -34.3^\circ * (7.5 + j19) = 7.54 \angle 34.2^\circ KV$$

$$\overrightarrow{U_{1ph}} = \overrightarrow{U_{BO}} + \Delta U_{AB} = (83 \angle 2.8^\circ + 7.54 \angle 34.2^\circ) * 10^3 = 89.5 \angle 5.3^\circ KV$$

$$\rho_1 = \rho_{U1} - \rho_{I1} = 5.3 - (-34.5) = 39.6^\circ$$

$$\cos \rho_1 = \cos 39.6 = 0.77$$

ב.

$$U_{1L} = \sqrt{3} * U_{1ph} = \sqrt{3} * 89.5 * 10^3 = 155KV$$

$$P_1 = \sqrt{3} * I_{L1} * U_{L1} * \cos \rho_1 = \sqrt{3} * 369 * 155 * 10^3 * 0.77 = 76.3MW$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{70}{76.3} = 0.918$$

ג.

ניתן לשפר את כושר העברת ההספק בקו ע"י שיפור הנצילות וזאת ע"י שיפור גורם ההספק.

תרגיל דוגמא 2

נתוניו של קו תלת מופעי במתח עליון להולכת אנרגיה חשמלית הם:

התנגדות סגולית: $0.03 \frac{\Omega}{km}$

היגב השראי סגולי: $0.38 \frac{\Omega}{km}$

קיבוליות סגולית: $8 * 10^{-3} \frac{\mu F}{km}$

איבודי הקורונה: $2 \frac{KW}{km}$

מתח ותדירות הרשת: $161KV$, $50Hz$

אורך הקו: $30km$

מצב ניקיון המבודדים: נקי מאוד.

א. שרטט את מעגל התמורה של הקו וחשב את הפרמטרים במעגל זה.

ב. חשב את איבודי ההספק הפעיל כאשר בקו מועבר עומס של $100MVA$.

ג. חשב את ההספק העיוור המופק ע"י הקו.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

$$R_L = r_o * l = 0.03 * 30 = 0.9 \Omega$$

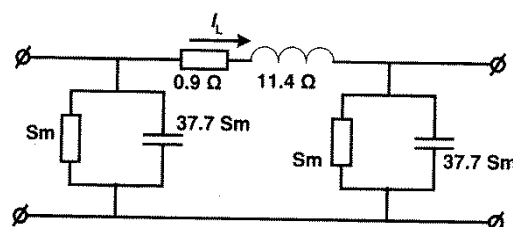
$$X_L = x_o * l = 0.38 * 30 = 11.4 \Omega$$

$$B = \omega * C_0 * l = 2\pi * 50 * 8 * 10^{-3} * 30 = 75.4 Sm$$

$$\frac{B}{2} = \frac{75.4}{2} = 37.7 Sm$$

$$G = \frac{\Delta P_{cor}}{3 * U_{ph}^2} = \frac{2 * 10^3 * 30}{3 * \left(\frac{161 * 10^3}{\sqrt{3}}\right)^2} = 2.31 * 10^{-6} Sm$$

$$\frac{G}{2} = \frac{2.31 * 10^{-6}}{2} = 1.155 * 10^{-6} Sm$$



ב.

$$I_{ph} = I_L = \frac{S}{\sqrt{3} * U_2} = \frac{100 * 10^6}{\sqrt{3} * 161 * 10^3} = 359A$$

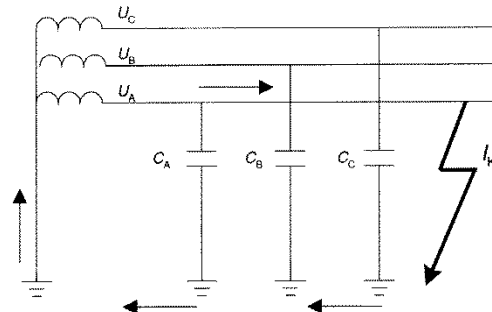
$$\Delta P = 3 * I_{ph}^2 * R_L = 3 * 359^2 * 0.9 = 348KW$$

$$Q_L = 3 * I_{ph}^2 * X_L = 3 * 359^2 * 11.4 = 4.4MVar$$

שיטות הארקת נקודת האפס ברשתות חלוקה

ברשתות חלוקה נפוצות מספר שיטות הארקת נקודת האפס. ההבדלים בין השיטות הן הרמת הבטיחות, אמינות אספקת החשמל ובהתנהגות הרשת בקצר חד מופעי לאדמה.

א. מערכת עם נקודת האפס מוארקת ישירות (הארקת שיטה):



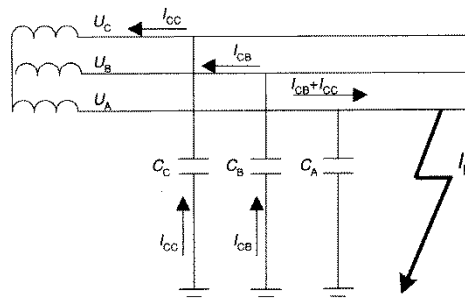
במצב תקין של הרשת המתחים בין מוליכי הקו לאדמה שווים למתח המופעי של הרשת.

בזמן קצר חד מופעי לאדמה נוצר "מעגל לולאת תקלה" והוא בעל עכבה נמוכה הנסגר דרך האדמה. במעגל תקלה זה מתפתח זרם קצר גבוה הגורם לניתוק אוטומטי של הרשת באמצעות אמצעי ההגנה. השיטה זו משתמשים ברשתות למתח נמוך וברשתות למתח גבוה עד 12.6KV.

ב. מערכת עם נקודת האפס מוארקת דרך נגד או סליל:

בשיטה זו נקודת הכוכב מוארקת באמצעות נגד או סליל בעל ערך נמוך שתפקידו להגדיל את עכבת לולאת התקלה ולהגביל את זרם הקצר לאדמה. לשיטה זו שימוש חלקי ברשתות תת קרקעיות למתח גבוה.

ג. מערכת עם נקודת האפס מבודדת מהאדמה (זינה צפה):



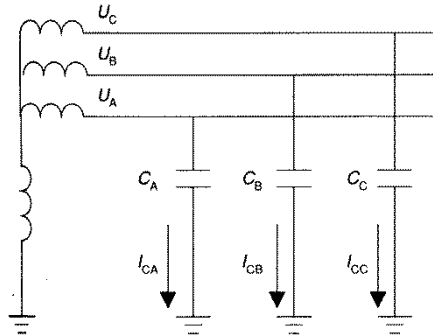
בשיטה זו בזמן קצר לאדמה לא נוצר מסלול לולאת תקלה וזרם הקצר אינו זורם, אך נוצר זרם קיבולי יחסית קטן.

יתרונות השיטה: במצב קצר חד מופעי לאדמה הרשת יכולה להמשיך לפעול מתח המגע אינו מגיע לערכים מסוכנים.

חסרונות השיטה: עליית מתח בפאזות התקינות בזמן קצר. נדרשות שיטות וציוד מיוחד לאיתור וניתוק התקלה וקיימת אפשרות להתפתחות קצר חד מופעי לקצר דו מופעי.

בשיטה זו משתמשים ברשתות למתח נמוך בתוספת משגוח המתריע על ירידה בבידוד ובמקרה של סכנה מנתק את המתח. שיטה זו אינה שימושית בארץ למתח גבוה.

ד. מערכת עם נקודת האפס מוארקת דרך סליל כיבוי (סליל פטרסון):
 עקרון הפעולה של סליל פטרסון מבוסס על קיזוז זרם קיבולי בזמן הופעת קצר חד מופעי
 כלפי האדמה וזאת באמצעות זרם אשראי הזורם בסליל. כיוון הזרם הקיבולי מבחינה
 וקטורית מנוגד לזרם הזורם בסליל המשמעות היא זרם קצר זה הינו קטן וזאת הסיבה
 שסליל הפטרסון נקרא גם "סליל כיבוי".



בין מוליך המופע של רשת עילית לבין האדמה קיימת קיבוליות התלויה באורך הרשת ובגובה
 המוליך מעל האדמה. עקב כך זורמים זרמים קיבוליים מהרשת לאדמה ובחזרה למקור
 המתח. במצב תקין הסכום הוקטורי של 3 הזרמים המופעים הללו שווה ל-0.

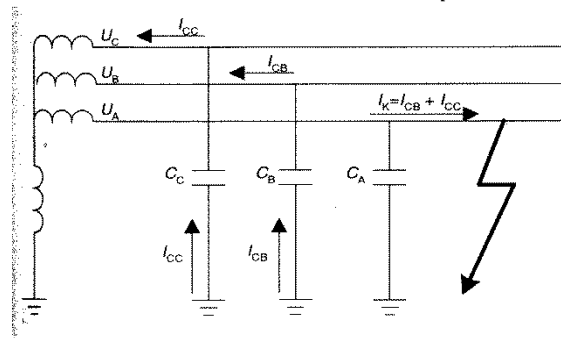
$$\vec{I}_{CA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = 0A$$

המתח בין מוליכי הרשת לאדמה הינו מתח מופעי וכן:

$$\vec{I}_{CA} + \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = \frac{U_{ph}}{-jX_C}$$

לכן במצב תקין של הרשת גם המתח על הסליל שווה ל-0V.
 בעת קצר לאדמה במופע A לדוגמא, מופיע על הסליל מתח U_A השווה למתח המופעי של
 הרשת. המתחים על המופעים התקנים כלפי האדמה גדלים עד לערכו הקווי של מתח
 הרשת:

$$U'_B = U'_C = \sqrt{3} * U_{ph}$$



ערך הזרם הקיבולי במופע A שווה ל-0 ואילו במופעים B ו-C הזרמים גדלים ביחס $\sqrt{3}$.

$$\vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = \frac{U_L}{-jX_C} = \sqrt{3} * I_C$$

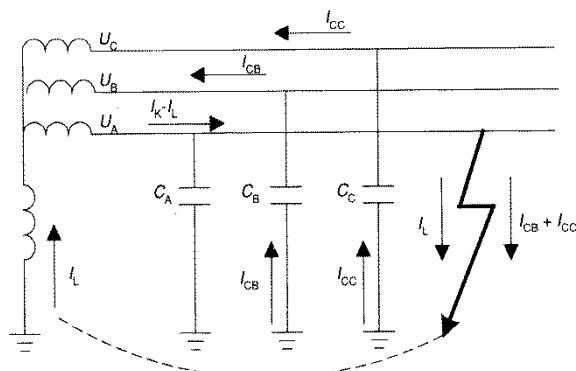
המתח על הקיבול C_A במופע A המקוצרת שווה ל-0V. והזרם דרכו גם שווה ל-0A.
 הסכום של הזרמים במופעים האחרים I_{CB}, I_{CC} מהווה את זרם הקצר החד מופעי לאדמה,
 אשר הוא גדול פי 3 מהזרם המופעי הקיבולי במצב תקין:

$$I_k = \vec{I}_{CB} + \vec{I}_{CC} = 3 * I_C$$

המתח U_A המופיע על הסליל והאופי ההשראי של הסליל גורמים לזרם ההשראי I_L שזורם דרך הסליל, זורם גם דרך מוליך המופע המקוצר עד למקום הקצר ובחזרה לסליל דרך האדמה. זרם השראי זה מקזז את זרם הקצר הקיבולי בנקודת הקצר:

$$\vec{I}_L = \frac{U_{ph}}{jX_L}$$

אם היגב הסליל X_L נבחר כך ש- $I_L = I_c$ סכום הזרמים הווקטורי בנקודת הקצר יהיה שווה ל-0: $\vec{I}_C + \vec{I}_L = 0A$



יתרונות השיטה: ערך קטן של זרם הקצר לאדמה ואפשרות לשנותו ע"י כיול הסליל. מתח מגע נמוך כך שמאפשר כיבוי עצמי ומהיר של הקשת הנוצרת בעת קצר.

חסרונות השיטה: עלית המתח במופעים התקינות בעת התרחשות הקצר. קושי בכיול הסליל עקב קיבוליות המשתנה של הרשת. קושי באיתור וניתוק התקלה, נדרשות שיטות מיוחדות לשם כך. בשיטה זו משתמשים ברשתות למתח גבוה, סליל הכיבוי מותקן בנקודת הכוכב של השנאים בתחנות משנה.

תרגיל דוגמא 1:

רשת תלת מופעית לחלוקת אנרגיה במתח גבוה 22KV ובתדירות 50Hz מוזנת ע"י מקור זינה בעלת נקודת אפס מוארקת דרך סליל פטרסון.

האורך הכללי של הרשת הוא 50Km והקיבוליות הסגולית הפאזית היא $5 \cdot 10^{-9} \frac{F}{Km}$.

א. חשב את זרמי הזליגה הקיבוליים כלפי האדמה במצב תקין.

ב. חשב מהוא ערכו של זרם הקצר במקרה של קצר במוליך אחד המופעים לאדמה.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 12.7 \text{ KV}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_0 \cdot l} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-9} \cdot 50} = 12.7 \text{ K}\Omega$$

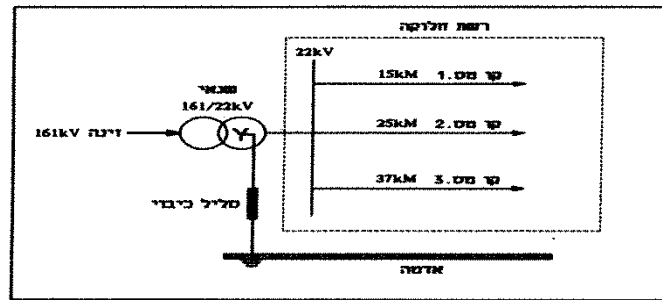
$$I_c = \frac{U_{ph}}{X_C} = \frac{12.7}{12.7} = 1A$$

ב.

$$I_k = 3 \cdot I_c = 3 \cdot 1 = 3A$$

תרגיל דוגמא 2:

רשת תלת מופעית לחלוקת אנרגיה מוזנת באמצעות שנאי כמתואר באיור:



השנאי המזין מוארק דרך סליל כיבוי שמכיל לקזז ב- 100% את הזרם הקיבולי של הרשת. הקיבוליות הסגולית של הרשת היא: $6 \cdot 10^{-9} \frac{F}{Km}$. מתח הרשת הוא 22KV והתדירות הרשת 50Hz.

- חשב את זרמי הזליגה הקיבוליים הפאזיים במצב תקין.
- חשב את זרם התקלה במקרה של קצר חד מופעי ברשת.
- מה ערכם של הפוטנציאלים השלובים והפוטנציאלים כלפי האדמה במקרה של קצר במופע R.

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

א.

$$U_{ph} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 12.7 \text{ KV}$$

$$C_{Tph} = C_0 \cdot \sum l = 6 \cdot 10^{-9} \cdot (15 + 25 + 37) = 0.462 \mu F$$

$$X_{Cph} = \frac{1}{\omega C_{Tph}} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{Tph}} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0.462 \cdot 10^{-6}} = 6.89 \text{ K}\Omega$$

$$I_{Cph} = \frac{U_{ph}}{X_{Cph}} = \frac{12.7}{6.89} = 1.843 \text{ A}$$

ב.

כיוון שהסליל מכיל לקיזוז של 100% של הזרם הקיבולי לכן:

$$X_{Cph} = X_{Lph}$$

במופע המקוצר זרם הקצר דרך האדמה שווה ל-

$$I_{kT} = \overrightarrow{I_{Cph}} + \overrightarrow{I_{Lph}} = \frac{U_{ph}}{-jX_{Cph}} + \frac{U_{ph}}{jX_{Lph}} = \frac{12.7}{-j6.89} + \frac{12.7}{j6.89} = 0 \text{ A}$$

במופעים הלא מקוצרים זרם הקצר דרך האדמה שווה ל-

$$I_k = 3 \cdot I_C = 3 \cdot 1.843 = 5.529 \text{ A}$$

ג.

המתחים השלובים בזמן קצר במופע R לאדמה שווים ל-

$$U_{R-S} = U_{S-T} = U_{T-R} = 22 \text{ KV}$$

המתחים הפאזיים בזמן קצר במופע R לאדמה שווים ל-

$$U_{R-N} = 0 \text{ V}$$

$$U_{S-N} = U_{T-N} = U_L = 22 \text{ KV}$$

העמסת שנאים

שנאים הם אחד המרכיבים החשובים ביותר ברשת הארצית, תפקידם לשנות את מתח וזרם האנרגיה החשמלית. ההספק החשמלי המועבר מתחנות הכוח לצרכנים עובר דרך מספר שנאים המותקנים בתחנת הכוח, תחנות משנה ויחידות השנאה קצה. כיוון שפסדי השנאי מהווים חלק ניכר מהפסדי הרשת הכוללים לכן ההספקים של כל שנאי הרשת גדול פי 3 מהספק הגנראטורים.

לשנאי 2 סוגי הפסדי הספק:

הפסדי הברזל: ΔP_{fe} שהם הפסדים קבועים ואינם תלויים בעומס השנאי והם מתוארים במעגל התמורה באמצעות הרכיב המקבילי R_0 . כנלמד ניתן להגדיר את הפסדי הברזל כאיבודי הריקים של השנאי.

הפסדי נחושת: ΔP_{cu} שהם ההפסדים המשתנים והם תלויים בעומס השנאי והם מתוארים במעגל התמורה באמצעות הרכיב הטורי R_k . כנלמד ניתן להגדיר את הפסדי הנחושת כאיבודי הקצר או העומס וניתן לחשבם לפי הביטוי:

$$\Delta P_{cu} = \beta^2 * \Delta P_{cun}$$

כאשר β הוא מקדם העמסה של השנאי הנתון לפי הביטוי:

$$\beta = \frac{S}{S_n}$$

נצילות של שנאי: נתונה לפי הביטוי:

$$\eta = \frac{\beta * S_n * \cos \varphi_2}{\beta * S_n * \cos \varphi_2 + \Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun}}$$

נצילות מרבית: נתונה ע"י הביטוי:

$$\beta_{\eta_{max}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}}$$

לשנאי חלוקה סטנדרטי עומס הנצילות המקסימאלי הוא כ- 40% מהספקו הנקוב-

$$\beta_{\eta_{max}} = 0.4$$

כאשר מחברים 2 שנאים זהים לעבודה מקבילית ההפסדים שלהם מצטברים.

ניתן להשוות את נצילות שנאי אחד בעומס מסוים β מול נצילות משותפת של 2 שנאים באותו עומס, כאשר כל אחד מהם מעביר מחצית העומס ומקדם העמסה של כל אחד מהם שווה ל- $\frac{\beta}{2}$. במקרה זה הפסדי הנחושת של כל אחד מהשנאים יהיה לפי הביטוי הבא:

$$\Delta P_{cu} = \left(\frac{\beta}{2}\right)^2 * \Delta P_{cun} = \frac{\beta^2}{4} * \Delta P_{cun} = \frac{\Delta P_{cu}}{4}$$

ניתן לסכם את הפסדי שנאי אחד מול הפסדי 2 שנאים המחוברים במקביל בטבלה הבאה:

הפסדים	שנאי אחד	שני שנאים זהים
ΔP_{fe}	ΔP_{fe}	$2 \times \Delta P_{fe}$
ΔP_{cu}	ΔP_{cu}	$2 \times (\Delta P_{cu} / 4) = \Delta P_{cu} / 2$
ΔP_T	$\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}$	$2 \times \Delta P_{fe} + \Delta P_{cu} / 2$

מטבחה ניתן לראות כי בחיבור 2 שנאים במקביל אומנם הפסדי הנחשת קטנים פי 2 אך הפסדי הברזל גדולים פי 2 וכן בעומסים נמוכים אין הדבר כדאי. ניתן למצוא את העומס שבו כדי לחבר שנאים בעבודה מקבילית לפי התנאי שבעומס זה ההפסדים של שנאי אחד שווים להפסדים של 2 שנאים:

$$\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu} = 2 * \Delta P_{fe} + \frac{\Delta P_{cu}}{2}$$

$$\Delta P_{cu} = 2 * \Delta P_{fe}$$

משמעות הביטוי הנ"ל כי בעומס מסוים זה הפסדי הנחשת של השנאי שווים לפעמים הפסדי הברזל של השנאי.

ניתן לרשום את הביטוי הנ"ל גם בצורה הבאה:

$$\beta^2 * \Delta P_{cun} = 2 * \Delta P_{fe}$$

ובשינוי נושא נוסחה נקבל כי:

$$\beta = \sqrt{2} * \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}} = \sqrt{2} * \beta_{\eta_{max}}$$

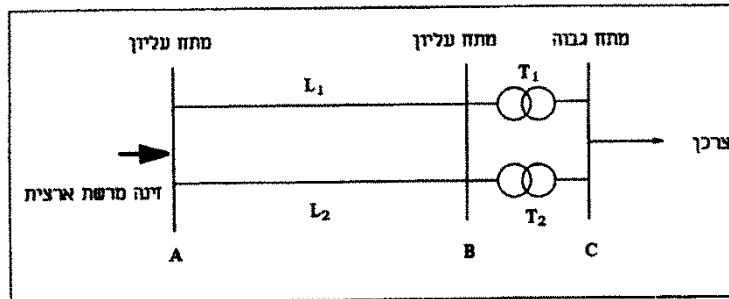
לסיכום ניתן לומר כי מבחינה כלכלית כדאי לחבר 2 שנאים במקביל כאשר מקדם העמסה של

$$\beta = \sqrt{2} * \beta_{\eta_{max}}$$

שנאי אחד עולה מעל הערך:

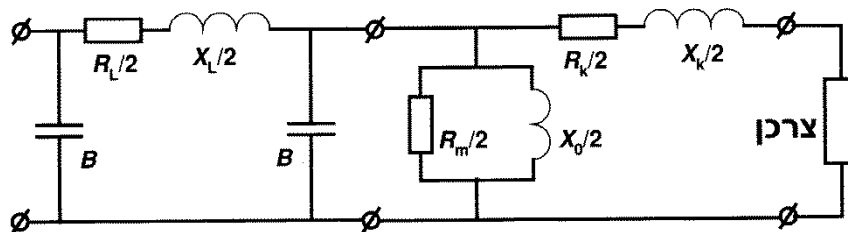
מעגל תמורה של חיבור 2 שנאים זהים במקביל

נתון צרכן מתח גבוה מוזן מרשת ארצית באמצעות 2 מעגלים ארוכים L_1, L_2 בעלי פרמטרים זהים ובהנחה שלא קיימים הפסדי קורונה. בתחנת משנה של הצרכן מותקנים 2 שנאים T_1, T_2 המחוברים במקביל בעלי פרמטרים חשמליים זהים, המזינים את הצרכן.



שרטט את מעגל התמורה של המעגל הנ"ל.

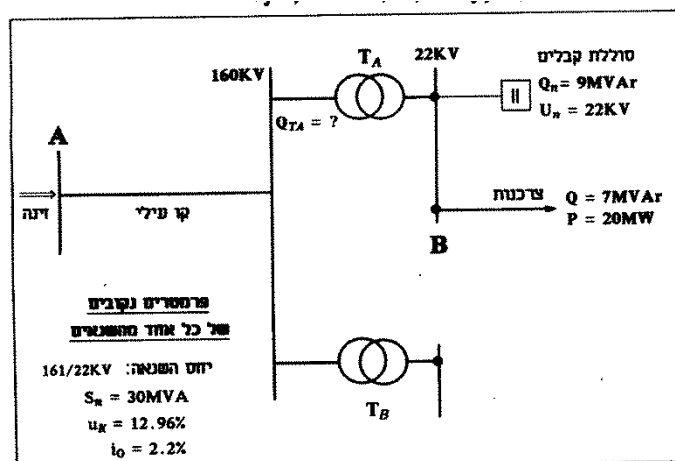
מעגל הקווים מתח עליון יתואר באמצעות מעגל תמורה π ואילו השנאים יתוארו באמצעות מעגל תמורה Γ .



מעגל התמורה של 2 שנאים זהים המחוברים במקביל ניתן לתיאור ע"י מעגל תמורה של שנאי אחד שבו ערכי העכבות מהווה מחצית העכבה של שנאי אחד. הדבר נכון גם לגבי הרכיבים הטורים של הקווים, לעומת זאת עבור הרכיבים המקביליים של הקווים, שהם מוליכויות יש להכפיל את ערכם.

תרגיל דוגמא 1:

תחנת משנה 161/22KV מוזנת מהרשת באמצעות קו מתח עליון כמתואר באיור הבא:



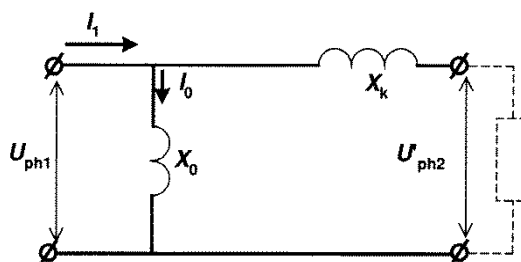
א. חשב את ההספק העיוור Q_{TA} המועבר בין רשת הזינה לבין השנאי T_A וציין את כיוון של הספק זה.

ב. שרטט מעגל תמורה של המערכת בין נקודת הזינה "A" ועד לנקודה "B".

פתרון תרגיל דוגמא 1:

א. לשנאים בעלי הספקים גדולים (500KVA ומעלה) משקל הרכיבים האומיים זניח ביחס לרכיבים ההיגבים וכן ניתן להזניחם).

נשרטט את מעגל התמורה של שנאי T_A :



חישוב עכבת השנאי:

$$X_k = Z_k = \frac{U_{k\%} * U_{1n}^2}{100 * S_n} = \frac{12.96 * (161 * 10^3)^2}{100 * 30 * 10^3} = 112\Omega$$

חישוב העומס על השנאי:

$$S = (20 + j7 - j9) * 10^6 = (20 - j2)MVA (C)$$

חישוב הזרם בכניסה לשנאי:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{(20 - j2) * 10^6}{\sqrt{3} * 161 * 10^3} = 72.529A$$

חישוב הספקו היגבי הקצר של השנאי:

$$Q_k = 3 * I_{1ph}^2 * X_k = 3 * 72.529^2 * 112 = 1.768MVar$$

חישוב זרם המגנוט(הריקם) של השנאי:

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{30 * 10^6}{\sqrt{3} * 161 * 10^3} = 107.581A$$

$$I_0 = 2.2\% * I_{1n} = \frac{2.2}{100} * 107.581 = 2.367A$$

חישוב את ההספק ההיגבי של ענף המגנט:

$$Q_0 = 3 * I_0 * U_{1ph} = 3 * 2.367 * \frac{161 * 10^3}{\sqrt{3}} = 0.66 MVar$$

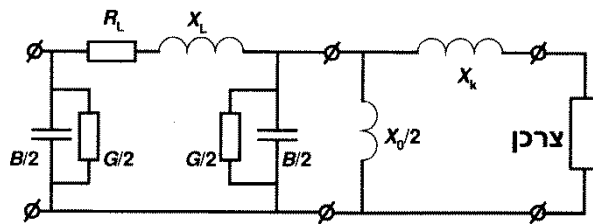
חישוב ההספק ההיגבי הנצרך מהרשת ע"י שנאי T_A :

$$Q_{TA} = Q_{ומ} + Q_k + Q_0 = (-2 + 1.768 + 0.66) * 10^6 = 0.428 MVar$$

להספק היגבי זה אופי חיובי לכן כיוונו לתוך השנאי ז"א השנאי צורך הספק היגבי.

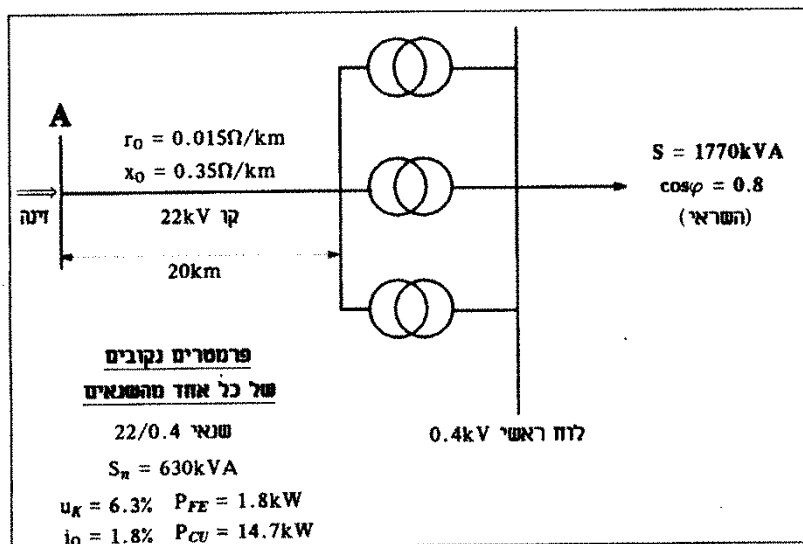
ב.

שנאי T_B מחובר לרשת אך אינו עמוס כלל כך שהשפעתו על מעגל התמורה רק בענף המגנט (הרכיב המקבילי X_0) ולכן מעגל התמורה הכולל יראה כך:
כאשר מעגל הקווים מתח עליון יתואר באמצעות מעגל תמורה π ובהנחה שקיימים בקו הפסדי קורונה ואילו השנאים יתוארו באמצעות מעגל תמורה Γ .



תרגיל דוגמא 2:

לוח ראשי מוזן באמצעות 3 שנאים זהים בעלי תמסורת של 22/04 KV כמתואר באיור. ההספק הנצרך 1770KVA במקדם הספק השראי 0.8.



א. חשב את ההספקים הפעיל והעיוור המועברים בקו המתח הגבוה.

ב. חשב את איבודי ההספק הפעיל והעיוור בקו המתח הגבוה.

ג. בהנחה שלא קיימים הפסדי קורונה בקו המתח גבוה, שרטט את מעגל התמורה של המערכת בין נקודת הזינה A לבין הלוח הראשי כאשר מעגל הקו מתח גבוה יתואר באמצעות מעגל תמורה π ואילו השנאים יתוארו באמצעות מעגל תמורה Γ .

א.

$$\beta = \frac{S}{S_n} = \frac{1770/3}{630} = \frac{590}{630} = 0.937$$

$$\Delta P_{TR} = (\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu}) = (\Delta P_{fe} + \beta^2 * \Delta P_{cun})$$

$$\Delta P_{TR} = (1.8 + 0.937^2 * 14.7) * 10^3 = 14.706Kw$$

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{630 * 10^3}{\sqrt{3} * 22 * 10^3} = 16.533A$$

$$I_0 = I_{0\%} * I_{1n} = \frac{1.8}{100} * 16.533 = 0.298A$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{\Delta P_{fe}}{\sqrt{3} * U_{1n} * I_0} = \frac{1.8 * 10^3}{\sqrt{3} * 22 * 10^3 * 0.298} = 0.159$$

$$Q_{fe} = \Delta P_{fe} * \tan \varphi_0 = 1.8 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.159) = 11.177KVar$$

$$U_k = U_{k\%} * U_{1n} = \frac{6.3}{100} * 22 * 10^3 = 1.386KV$$

$$\cos \varphi_k = \frac{\Delta P_{cun}}{\sqrt{3} * U_k * I_{1n}} = \frac{14.7 * 10^3}{\sqrt{3} * 1.386 * 10^3 * 16.533} = 0.37$$

$$Q_{cu} = \beta^2 * \Delta P_{cun} * \tan \varphi_k = 0.937^2 * 14.7 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.37) = 32.406KVar$$

$$Q_{TR} = (Q_{fe} + Q_{cu}) = (11.177 + 32.406) * 10^3 = 43.583KVar$$

ההספקים המועברים בקו המתח הגבוה:

$$\vec{S}_L = \vec{S}_{onw} + \sum \vec{S}_{TR} =$$

$$\vec{S}_L = [1770 \angle 36.87 + 3 * (14.706 + j43.583)] * 10^3 = 1460.12 + j1192.75KVA$$

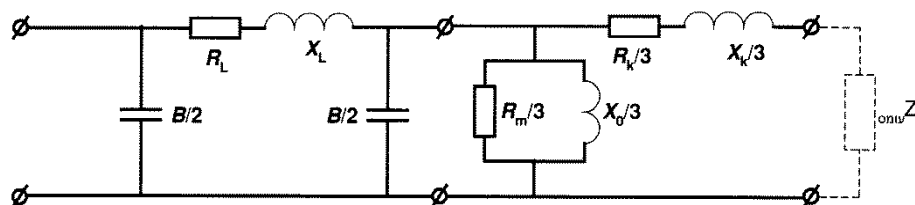
ב.

$$I_L = \frac{S_L}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{(1460.12 + j1192.75) * 10^3}{\sqrt{3} * 22 * 10^3} = 49.478A$$

$$\Delta P_L = 3 * I_L^2 * r_o * l = 3 * 49.478^2 * 0.015 * 20 = 2.2Kw$$

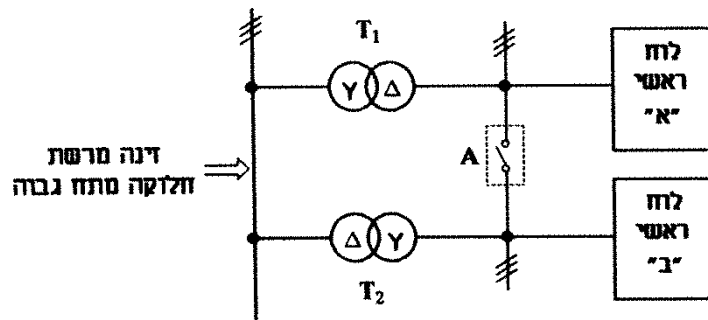
$$\Delta Q_L = 3 * I_L^2 * x_o * l = 3 * 49.478^2 * 0.35 * 20 = 51.41KVar$$

ג.



תרגיל דוגמא 3:

2 שנאים תלת מופעיים מזינים את הלוחות למתח נמוך בהתאם לאיור.
השנאים מוזנים יחד מרשת חלוקה מתח גבוה כאשר מפסק A במצב מנותק.



שנאי T₁
 הספק נקוב: $S_n = 630 \text{ KVA}$
 יחס השנאה: $22 \text{ KV} / 0.4 \text{ KV}$
 קבוצת חיבורים: $\Delta/Y-1$
 $u_k = 6.5\%$

שנאי T₂
 הספק נקוב: $S_n = 1000 \text{ KVA}$
 יחס השנאה: $22 \text{ KV} / 0.4 \text{ KV}$
 קבוצת חיבורים: $\Delta/Y-1$
 $u_k = 7\%$

- א. ציין את התנאים המאפשרים הפעלה תקינה במקביל של שנאי הספק תלת מופעיים.
- ב. האם מותר "לסגור" את מפסק A לצורך חיבור השנאים במקביל, הסבר.

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

- א.
- התנאים לחיבור שנאים תלת מופעים במקביל הם:
 1. המתחים הנקובים צריכים להיות זהים בכל השנאים.
 2. מספר קבוצת החיבורים של השנאים זהה.
 3. מתחי הקצר של השנאים רצוי שיהיו שווים או לפחות שההפרש בין מתחי הקצר לא יעלה על 10% מהערך הממוצע שלהם.

לכאורה על פני התנאים הנ"ל ניתן לחבר 2 שנאים אלו במקביל:

1. המתחים הנקובים זהים $22/0.4 \text{ KV}$.
2. מספר קבוצת החיבורים זהה.
3. ההפרש בין מתחי הקצר קטן מ-10%.

$$U_{k\%} = \frac{U_{k1} - U_{k2}}{U_{k(av)}} * 100 = \frac{7 - 6.5}{\frac{7 + 6.5}{2}} * 100 = 7.4\%$$

אבל הסליל השניוני של שנאי T1 מחובר בצורת משולש ובחיבור שנאי זה ללוח למתח נמוך המשמעות היא שאין את מוליך ה"אפס" זאת אומרת שלא ניתן לחבר צרכנים חד פאזיים או צרכנים תלת פאזיים לא סימטריים שזו מגבלה מהותית בהזנת לוח למתח נמוך.
ובנוסף לא ניתן לבצע הארקה שיטה לשנאי זה בהתאם לתקנות החשמל (שמבוצע בנקודת הכוכב בסליל השניוני) ומצב זה לא מאפשר את קיומה של לולאת התקלה.
לכן שנאי זה לא ניתן לחבר אפילו לבד ללוח למתח נמוך ובטח לא במקביל לשנאי נוסף.

השפעת ההספק האקטיבי והראקטיבי על תדירות ומתח הרשת

תדירות הזרם ברשת

תדירות זרם חילופין ומהירות סיבוב הגנראטור תלויות זה בזה לפי הביטוי $f = \frac{n \cdot p}{60}$

בגנראטורים בתחנות הכוח מספר זוגות הקטבים בדרך כלל 2.

גנראטור מייצר הספק אקטיבי בתהליך המרת האנרגיה המכאנית של הטורבינה בתחנת הכוח. הספק חשמלי אקטיבי של הצרכנים מעמיס את הגנראטור אשר מפעיל כוח נגדי על הטורבינה ועל ידי כך מושך ממנה את ההספק. כל שינוי פתאומי של ההספק האקטיבי יגרום לשינוי העמסת הטורבינה וכתוצאה מכך לתנודות במהירותה, אשר משפיע על תדירות הרשת.

במיתקן אשר מוזן מגנראטור בעל סדר גודל הדומה לעומס, השפעת שינוי ההספק האקטיבי של הצרכנים על התדירות היא מאוד משמעותית.

ברשת הארצית כל הגנראטורים בתחנות הכוח עובדים במקביל והספק הצרכנים מתחלק ביניהם. כאשר עומס כל הצרכנים ברשת עולה על כושר הייצור של הגנראטורים מתבצעת פעולה אוטומטית של השאלת עומסים כדי למנוע את ירידת התדירות וקריסת המערכת.

התדר הנומינאלי ברשת הארצית הוא: $f_n = 50Hz(+0.6\% - 0.5\%)$.

מפל מתח ברשת

מפל המתח ברשת מהווה סכום של מפלי המתח האקטיבי והראקטיבי, כאשר משקלו של מפל המתח האקטיבי זניח ביחס למפל המתח הראקטיבי, וזאת עקב השראות מרכיבי הרשת הגדולה בהרבה מהתנגדותה האומית.

מפל המתח הראקטיבי תלוי בהספק הראקטיבי המועבר ברשת וכן ניתן להבין כי ההספק הראקטיבי משפיע על מתח הרשת.

השפעת ההספק הראקטיבי על המתח יכולה להיות קריטית במתקן המוזן מגנראטור לאספקה חלופית כאשר הספק הקבלים גדול מצריכת ההספק הראקטיבי על ידי הצרכנים, במקרה זה מתח המערכת יכול להגיע לערכים מסוכנים.

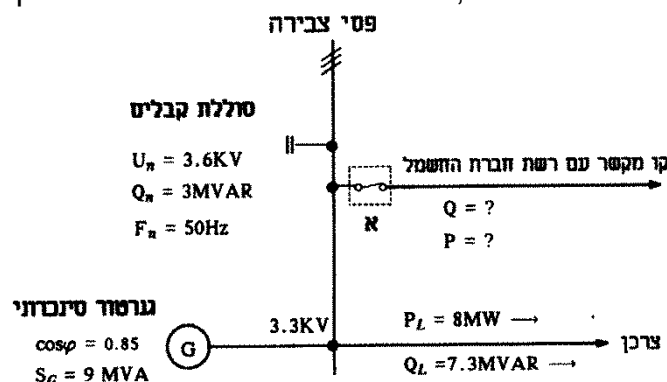
מסיבה זו במתקן המוזן מגנראטור לאספקה חלופית נהוג לנתק את הקבלים בעת חיבור לגנראטור.

המתחים הנומינאליים בהדקי לקוח מתח גבוה: $U_n = 12.6, 22, 33 KV \pm 10\%$.

המתחים הנומינאליים בהדקי לקוח מתח נמוך: $U_n = 400V \pm 10\%$.

תרגיל דוגמא 1:

גנראטור סינכרוני תלת מופעי מזין פסי צבירה של הצרכנים. הגנראטור מופעל במקביל לרשת חברת חשמל כמתואר באיור, לפסי הצבירה מחוברים גם סוללת קבלים.



- חשב את ההספק העיוור המסופק ע"י סוללת הקבלים.
- חשב את ההספקים המועברים בקו המקשר לרשת חברת חשמל, ומהו כיוון הזרימה של הספקים אלו.
- עקב הפרעה נפסק מפסק "א" של הקו המקשר עם רשת חברת חשמל, והגנראטור ממשיך להזין לבדו את הצרכנים המחוברים ללוח, איזה פרמטר בגנראטור (מתח או תדירות) משתנה באופן משמעותי מיד לאחר הפסקת הקו? הסבר.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

הספק סוללת הקבלים תלוי במתח ההזנה לקבלים ביחס ריבועי. מכיוון שהמתח בפסי הצבירה אליו מחוברים הקבלים שונה מהמתח הנקוב של סוללת הקבלים יש צורך לחשב את ההספק של סוללת הקבלים בנתונים הנוכחים:

$$Q_C = Q_{Cn} * \left(\frac{U_C}{U_{Cn}} \right)^2 = 3 * 10^6 * \left(\frac{3.3}{3.6} \right)^2 = 2.521 MVAR$$

ב.

$$S_{צרכנים} = P_L + j(Q_L - Q_C) = [8 + j(7.3 - 2.521)] * 10^6 = 8 + j4.799 MVAR$$

$$S_{גנרטור} = 9 * 10^6 \angle 31.79 = 7.649 + j4.741 MVAR$$

$$S_{ח"ח} = S_{צרכנים} - S_{גנרטור} = (8 + j4.799) - (7.649 + j4.741) = 0.351 + j0.058 MVA$$

להספק זה אופי השראי ולכן זרימת ההספק היא מרשת חברת חשמל אל פסי הצבירה.

ג.

לאחר הפסקת מפסק "א" הגנראטור מספק את כל הצריכה:

לפני הפסקת המפסק:

$$S_{גנרטור} = 7.649 + j4.741 = 9 \angle 31.79 MVAR$$

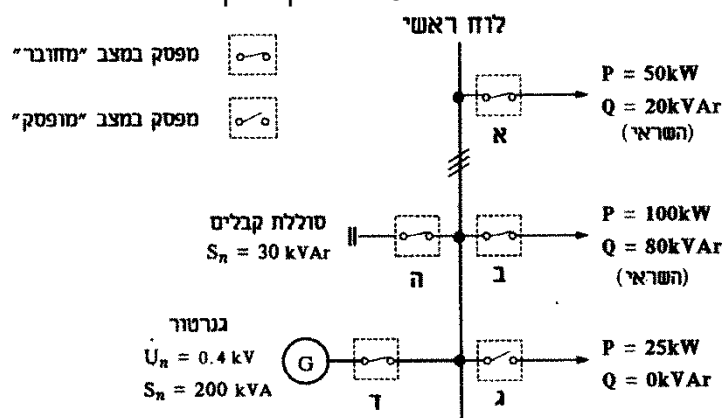
לאחר הפסקת המפסק:

$$S_{גנרטור} = 8 + j4.799 = 9.33 \angle 30.96 MVAR$$

וניתן לראות כי כמעט אין שינוי בהספקים לכן המתח והתדירות אינם משתנים באופן משמעותי. כל זאת בהנחה שהגנראטור יכול לספק הספק זה (לא נתון ההספק הנקוב של הגנראטור).

תרגיל דוגמא 2:

גנראטור מזין לוח ראשי של מתקן. צרכני המתקן מוזנים באמצעות מפסקי זרם "א" ו-"ב" כמתואר באיור. ללוח הראשי מחוברת גם סוללת קבלים לשיפור גורם ההספק של העומס. הספק הקצר המרבי של הגנראטור הוא פי 5 מהספקו הנקוב.



- מפסקים את סוללת הקבלים איזה פרמטר מתח או תדירות מושפע משמעותית בעקבות הפסקת סוללת הקבלים.
- מחברים עומס נוסף באמצעות מפסק "ג" איזה פרמטר מתח או תדירות מושפע משמעותית בעקבות חיבור עומס זה.
- חשב והגדר פרמטרים בסיסיים המאפיינים את מפסק הגנראטור "ד".

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

- עם ניתוק סוללת הקבלים מתרחש שינוי משמעותי בהספק הראקטיבי הנצרך מהרשת לכן במצב זה הפרמטר מתח יושפע בצורה משמעותית כלפי מטה.
- עם חיבור עומס אקטיבי נוסף מתרחש שינוי משמעותי בהספק האקטיבי הנצרך מהגנראטור והוא מהווה גידול בעומס המכאני על מנוע הדיזל של הגנראטור וגורם להאטה במהירות הסיבוב ובכך משפיע בצורה משמעותית על תדירות הזרם בצרכנים כלפי מטה.

ג.

$$U_{\text{ג}} = U_n = 400 \text{ V}$$

$$I_{\text{צרכנים}} = \frac{S_{\text{צרכנים}}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{(50 + j20 + 100 + j80 + 25 - j30) * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 272 \text{ A}$$

$$I_{Gn} = \frac{S_{Gn}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{200 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 289 \text{ A}$$

$$I_{Gn} \geq I_{\text{צרכנים}} = 285 \text{ A}$$

$$I_k = \frac{S_k}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{5 * S_{Gn}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{5 * 200 * 10^3}{\sqrt{3} * 400} = 1.443 \text{ KA}$$

$$I_{cu} \geq I_k = 1.443 \text{ KA}$$

עמידות תרמית ומגנטית

בין הפרמטרים החשובים של ציוד חשמלי למתח גבוה הוא עמידותו התרמית ועמידות הדינמית בזרם קצר.

עמידות תרמית

עמידות תרמית מסומנת ב- I_{th} והיא מגדירה את זרם הקצר המרבי אשר הציוד מסוגל לספוג במשך שנייה אחת מבחינת הלם החום הנוצר מבלי להיפגע. הביטוי $I_k^2 * t [KA^2 * sec]$ מבטא את כמות החום הנוצר בזמן הקצר. עמידות התרמית של ציוד חשמלי יכולה להיות קטנה מזרם הקצר הצפוי בתנאי שכמות החום הנוצרת עד להפסקת הקצר לא תעלה מעל לערך $I_{th}^2 * 1sec$ ולכן:

$$I_k^2 * t \leq I_{th}^2 * 1sec$$

עמידות דינמית

עמידות דינמית מסומנת ב- I_{dyn} והיא מגדירה את זרם ההלם המרבי אשר הציוד מסוגל לספוג מבחינת חוזקו המכאני. עמידות הדינמית של ציוד חייבת להיות גדולה מזרם ההלם הצפוי במקום התקנת הציוד. ולכן:

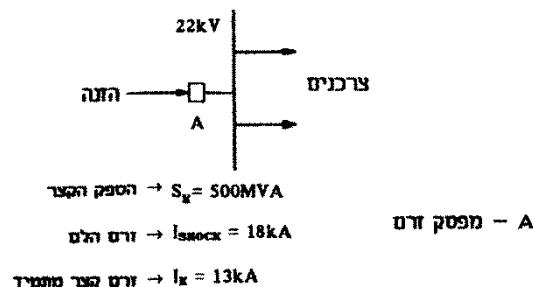
$$I_{dyn} \geq I_{shok}$$

תרגיל דוגמא 1:

על מפסק זרם רשומים הנתונים הבאים:

$$U_n = 22KV ; I_{dyn} = 15KA ; I_{th} = 5KA$$

המפסק מותקן כמתואר באיור והוא מצויד באמצעי ההגנה הבאים:
הגנה מושהת בפני זרמי יתר.
הגנה מושהת בפני זרמי קצר.



- מה הערך המותר של זמן הכיול בהגנה המושהת.
- על בסיס הנתונים הרשומים באיור האם המפסק מתאים לעמוד בפני הכוחות האלקטרודינמיים המתפתחים בזמן קצר.

פתרון לתרגיל דוגמא 1:

א.

$$t = \left(\frac{I_{th}}{I_k} \right)^2 * 1sec = \left(\frac{5}{13} \right)^2 * 1sec = 0.148sec$$

ב.

$$I_{dyn} \geq I_{shok}$$

$$15kA < 18kA$$

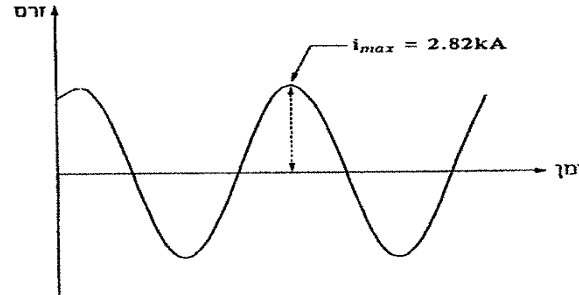
ניתן לראות כי העמידות הדינמית של המפסק נמוכה מזרם ההלם הצפוי לעבור לכן מפסק זה אינו מתאים למקום ההתקנה .

תרגיל דוגמא 2:

הזרם התרמי הנקוב הרשום על מפסק זרם למתח גבוה הוא:

$$I_{th}/1sec = 1200A/1sec$$

חשב את פרק הזמן לפיו מותר להתקיים במפסק הנ"ל זרם סינוסואדלי בעל אופיין כמתואר באיור הבא:



פתרון לתרגיל דוגמא 2:

$$I_{keff} = \frac{I_{kmax}}{\sqrt{2}} = \frac{2.82 * 10^3}{\sqrt{2}} = 2KA$$

$$t = \left(\frac{I_{th}}{I_k}\right)^2 * 1sec = \left(\frac{1200}{2000}\right)^2 * 1sec = 0.36sec$$

עמידות הציווד בפני מתחי יתר

מתח יתר מוגדר כמתח שערכו עולה על 110% מעל המתח הנומינאלי של הרשת.
מבדילים ב-2 סוגי מתחי יתר:

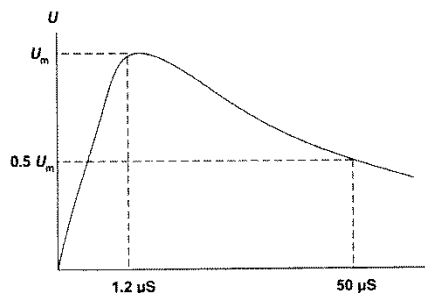
א. מתחי יתר פנימיים-הנגרמים כתוצאה מתופעות מעבר קצרים, מיתוג קווי הזנה או שנאים וניתוק עומסים גדולים.

ב. מתחי יתר חיצוניים- הנגרמים ע"י פגיעות ברק ישירות.

כל ציוד במתח גבוה שמחובר לרשת חברת חשמל חייב לעבוד בבדיקות הבאות:

בדיקת P.W.F - בדיקת מתח יתר בתדר הרשת במשך דקה אחת, בדיקה זו קובעת את עמידות הציווד בפני מתחי יתר פנימיים.

בדיקת BIL – לפי התקן הבינלאומי IEC בודקים את הציווד ע"י גל מתח הולם שצורתו היא 5 פעמים המתח המרבי במשך $1\mu sec$ ודיעכת המתח ל-50% ממתח הבדיקה תוך $50\mu sec$.



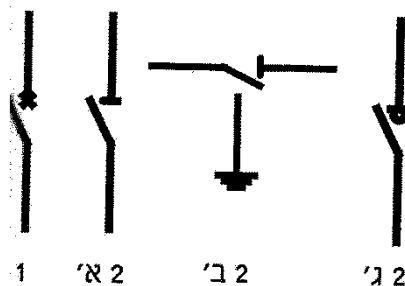
דוגמאות לבדיקות בפני מתחי יתר:

מתח נקוב, kV	מתח מרבי, kV	בדיקת P.W.F, kV	בדיקת BIL (1.2/50), kV
12.6	13.8	38	90
22	24	50	125
33	36	70	170

ציוד הפעלה והגנה

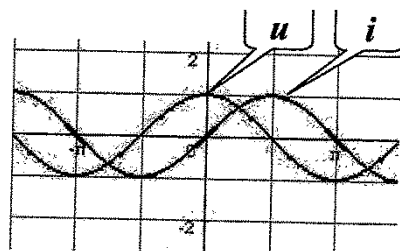
1. מפסק זרם (circuit breaker)
אביזר מיתוג המיועד לחבר או להפסיק זרמי עומס או זרמי קצר-אם כתוצאה מפעולה ידנית או מפקודה אוטומטית.
2. מנתק (disconnect , load disconnect)
אביזר מיתוג תפקידו להפריד בין 2 קטעים באופן ידני של מערכת תוך אפשרות ביקורת חזותית על מצב המגעים.
סוגי המתנקים:
א. מנתק ללא עומס בעל 2 מצבים (מצב סגור ומצב פתוח)
ב. מנתק ללא עומס בעל 3 מצבים (מצב סגור, מצב פתוח ומצב מקוצר לאדמה)
ג. מנתק בעומס- מצויד בתאי כיבוי המאפשרים למתג זרמים בתחום העומס.

הסמלים הגרפיים של ציוד המיתוג:



שיטות לכיבוי קשת חשמלית

בכל ניתוק זרם מתפתחת קשת חשמלית בין מגעי המפסק.
קשת חשמלית היא מעבר יונים חופשיים בין אלקטרודות בסביבה מבודדת. כתוצאה מתופעה זו, זרם במעגל זרם חילופין נפסק לא ברגע פתיחת המגעים של המפסק או המנתק, אלא ברגע שהזרם באופן טבעי עובר דרך נקודת האפס.
הפסק זרם מיידי שאינה מלווה בקשת, יכולה לגרום לתופעות מתח יתר מסוכנים בציוד. אבל קשת חשמלית מלווה התופעות לחץ גזים וטמפרטורות גבוהות עד ל-10000 מעלות סלציוס, אינן תופעות רצויות במעגל, לכן יש חובה לכבות את הקשת החשמלית במהירות האפשרית.
בניתוק זרמים גבוהים כמו זרם קצר, עוצמת הקשת גורמת לכך, שבזמן מעבר הזרם דרך נקודת האפס נשארת בין מגעי המפסק כמות גדולה של יונים חופשיים. בנוסף, כאשר מקדם ההספק של מעגל הקצר קרוב לאפס (למעגל קצר אופי אשראי ברובו), הפרש המופע רוב ל-90 מעלות ולמתח ערך מרבי ברגע מעבר הזרם דרך נקודת האפס. סביבה עשירה ביונים חופשיים ומתח בין מגעי המפסק גורמים להתפתחות מחודשת של הקשת במחצית המחזור הבאה.



מהירות כיבוי הקשת קובעת למעשה את כושר ההפסקה, אשר מוגדר כזרם מרבי שהוא המפסק מסוגל להפסיק, מבלי לגרום נזק לעצמו או לסביבה.

הדרכים לכיבוי קשת חשמלית הם:

א. הארכת מסלול הקשת באוויר (תאי כיבוי או לחץ אוויר)

ב. קירור קשת על ידי סביבת מילוי (חול).

ג. כיבוי קשת בסביבת שמן.

ד. כיבוי קשת בסביבת גז SF6.

ה. יצור מסלול קשת בתוך ואקום.

סוגי מפסקי זרם

מפסק זרם באוויר

מפסק זרם אוויר מצויד בתא כיבוי אשר כולל לוחיות מתכת.

הקשת מתארכת ומתמשכת אל תוך תא הכיבוי בעזרת הפרש לחץ אוויר או בעזרת נישוף

מגנטי. לוחיות המתכת מחלקים את הקשת לחלקים קטנים ומקררים אותה, וכך נוצרים

תנאים לכיבוי הקשת החשמלית.

מפסק זרם בשמן (מזב"ש)

במפסקים מסוג זה לשמן תפקיד כיבוי קשת בלבד, כאשר תפקיד הבידוד ממלאים חומרים

מוצקים אחרים. מהלך כיבוי הקשת מתרחש בתוך תא הכיבוי בטמפרטורה ובלחץ גבוהים

והוא מלווה בסחרור ובהכנסת שמן חדש בין המגעים של המפסק, עקב כושר ניתוק גבוה,

מחיר זול ומבנה פשוט, מפסקים מסוג זה נפוצים מאוד.

מפסקי זרם בגז (מזב"ג)

לגז SF6 תכונות בידוד וכיבוי קשת חשמלית טובים, הוא אינו רעיל, אינו דליק ולא יוצר

קורוזיה. בדרך כלל במפסקים מסוג זה מגעים ותאי כיבוי של כל 3 הפאזות נמצאים בתוך

מיכל אטום וממולא בגז. על מנת ליצור תנאים טובים לכיבוי הקשת החשמלית, לחץ הגז

בתוך המיכל חייב להיות שווה ל- 2.5 Atm.

משקלו הסגולי של הגז FS6 כבד ממשקלו הסגולי של האוויר והוא שוקע מעל הרצפה אם

קיימת דליפה. כדי למנוע סכנת חנק יש צורך באוורור חדרים ואזורים הכוללים ציוד שמכיל גז

זה.

מפסק זרם בואקום

קשת חשמלית בואקום מתפתחת באמצעות יונים של מתכת (טונגסטן בד"כ), שכבת ציפוי

מגעי המפסק. צורה מיוחדת של המגעים גורמת ליצירת מספק קשתות חשמליות קטנות

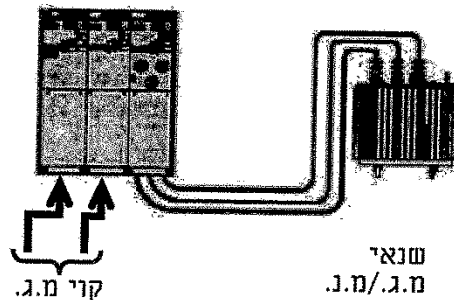
ומסתובבות, וזה כדי לא לגרום לבלאי מואץ של אזורים מסוימים על משטחי המגעים.

בתנאים אלו הקשת נכבית במעבר הראשון של הזרם בנקודת האפס. כושר ההפסקה של

מפסקי ואקום גבוהה ביותר, זמן כיבוי הקשת קצר מאוד, אורך חיים גבוה.

לוחות במתח גבוה

לוח חשמל במתח גבוה נמצא בתחנת טרנספורמציה, תפקידו לקבל הזנה מקו מ.ג. ולספק הזנה לשנאי חלוקה מ.ג./ מ.ב.
מכיוון שקווי מתח גבוה מחוברים ב"כ ברשת טבעתית, ללוח חשמל אופייני במקרה של שנאי אחד, 3 כניסות (תאים) - 2 עבור חיבור כבלי מתח הגבוה ו-1 עבור הזנת השנאי כמתואר באיור הבא. לוח זה נקרא RMU (Ring Main Unit).



בידוד לוח מתח גבוה

מבחינת חומרי הבידוד, ישנם 2 סוגים של לוחות קומפקטיים למתח גבוה:
1. לוח בגז SF6
2. לוח באויר



תצורות לוח מתח גבוה

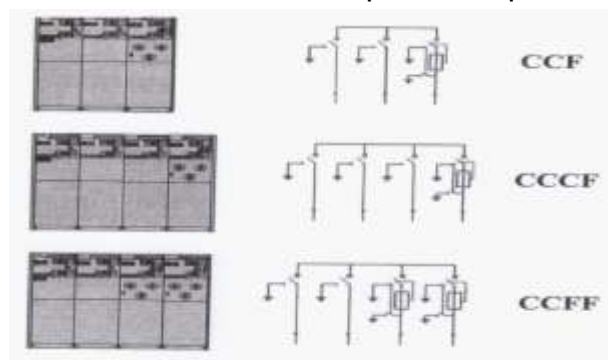
במתח גבוה אין חובה להתקין מאבטח בעל הגנות בתחילת המעגל. לכן בלוחות RMU נהוג לחבר קו לפסי צבירה ע"י מנתק בעל 3 מצבים: מחובר-מנותק-מקוצר לאדמה.
תאי יציאה לשנאי, לעומת זאת חייב בהגנת נגד זרם יתר בשנאי. לצורך זה, ניתן להשתמש בנתיכים או במפסקי זרם עם ממסר הגנה.

הסימנים התקנייים הם:

C- מנתק עומס לכבל.

F- מנתק נתיכים.

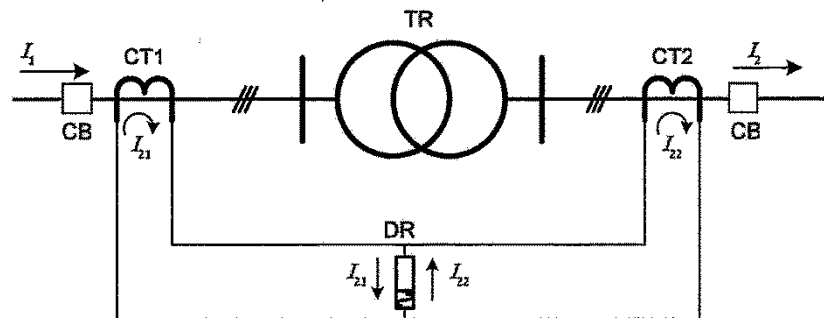
V- מפסקי זרם בוואקום



הגנות שנאים

1. הגנה דיפרנציאלית

עקרון הפעולה מבוסס על השוואה ווקטורית של הזרמים בכניסה וביציאה של השנאי. בשנאי תקין, הפרש הזרמים הנמדדים באמצעות משני הזרם CT1 ו- CT2 בראשוני ובמשני של השנאי שווה ל-0. אי שוויון הזרמים מצביע על תקלה פנימית בתוך השנאי. התחום בין משני הזרם הוא אזור ההגנה. הזרמים המשניים של משני הזרם נפגשים בסליל של הממסר הדיפרנציאלי DR. במקרה ואין תקלה או התקלה נמצאת מחוץ לתחום המוגן, ההפרש הווקטורי של הזרמים $I_{21} - I_{22}$ בתוך הממסר שווה ל-0. במידה וקיימת תקלה באזור המוגן, זרם התקלה מפר את האיזון ומופיע זרם בסליל. הממסר נותן פקודה למפסקי הזרם CB להפסיק את השנאי משני צדדיו.



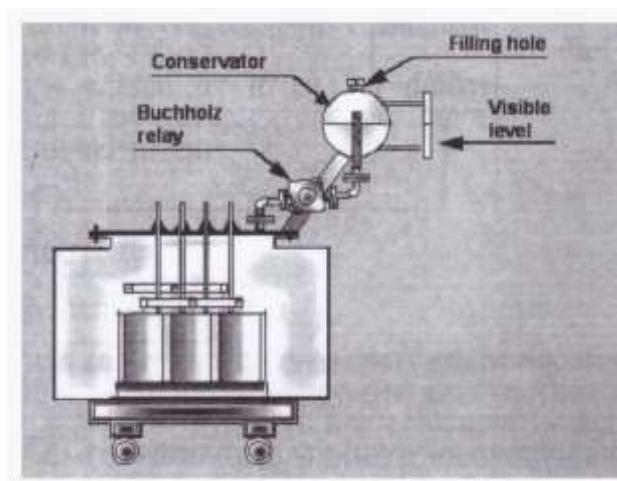
2. הגנה יתרת זרם

הגנה בפני זרמי יתר מותקנת הצד ההזנה של השנאי ויש לה 2 דרגות:

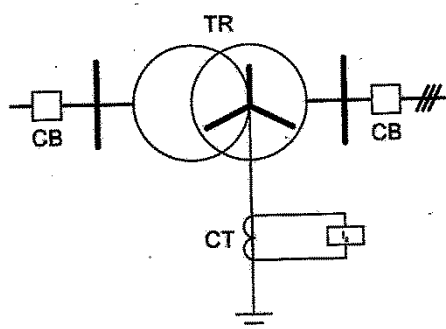
- דרגה מהירה- פועלת במקרה של קצר פנימי בשנאי.
- דרגה מושהית- פועלת במקרה של עומס יתר.

3. הגנת גזים (בוכהולץ)

תקלה בבידוד הסלילים בשנאי יכולה לגרום לקצר בין הכריכות ולקשת חשמלית בתוך השמן. כתוצאה מפרוק כימי של השמן, נוצרים בתוך השנאי גזים, אשר מצביעים על תקלה בבידוד הפנימי של השנאי. ממסר הגזים (בוכהולץ) מורכב על הצינור המקשר בין מיכל השנאי לבין מיכל ההתפשטות (קונסרבטור). הגזים הנוצרים כתוצאה מקצר בין הכריכות, בדרכם למעלה עוברים דרך ממסר הגזים. בממסר הגזים קיימים 2 מצופים עם מגע כספית: א. המצוף העליון- סוגר מגע להפעלת התראה בלבד. ב. המצוף התחתון- סוגר מגע להפסקת השנאי מהמתח משני צדדיו.

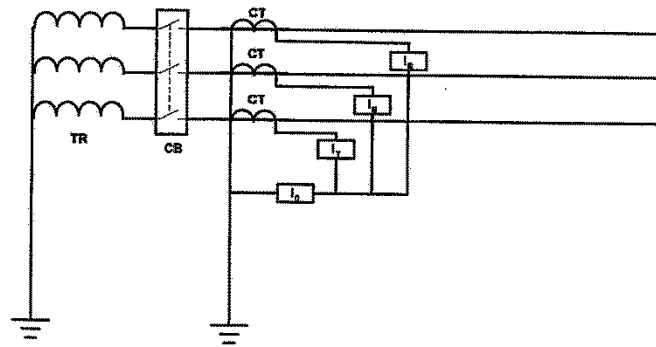


4. הגנת לחץ
בשנאי אטום, ללא מיכל התפשטות, היווצרות הגזים גורמת לעליית לחץ בתוך המיכל. במקום ממסר בוכהולץ, מצוידים שנאים אטומים בממסר לחץ, אשר מותקן בדופן העליון של המיכל. לחץ ההפעלה של הממסר מכויל לערך המתאים כדי למנוע נזק לשנאי.
5. הגנת טמפרטורה
שנאי ההספק מצויד במכשור למדידה והתראה במקרה של עליית טמפרטורה בשמן או בליפופים, עקב תקלות במערכת הקירור, עומס יתר, או עליית הפסדי הברזל.
6. הגנה מושהית בפני עומס יתר
העמסת השנאי מעל הספקו הנקוב היא משטר עבודה מסוכן לשנאי, היא גורמת לבלאי מואץ ולקיצור אורך החיים של השנאי.
העמסת יתר אסורה לשנאי בעל בידוד אפוקסי יצוק, אך לשנאי שמן היא מותרת בתנאים מסוימים וגם זאת עד 10%.
- הגנה בפני העמסת יתר מיושמת ע"י ממסרים ליתרת זרם מושהים, בעלי 2 סוגי אופייניים:
א. ממסרים בעלי אופיין הפעלה "זמן קבוע", אשר פועלים למי השהית זמן קבועה.
ב. ממסרים בעלי אופיין הפעלה "זמן הפוך", בעלי השהיה משתנה- ככל שזרם היתר גדול יותר, כך זמן הפעלת הממסר קצר יותר.
7. הגנה בפני זרם פחת (זליגה)
כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת ישירות או דרך נגד, ניתן ליישם הגנה מסוג זמן. היא מבוססת על מדידת זרם מנקודת הכוכב של השנאי לאדמה, אשר מופיע בזרם קצר חד מופעי.



הגנות קווים

1. הגנות בפני זרמי יתר
הגנה בפני זרם אמורה לפעול במקרה של העמסת יתר או קצר בין הפאזות. ממסר יתרת זרם מותקן בכל פאזה של הקו, ויש לו 2 דרגות הפעלה:
א. דרגה מיידית בעלת אופיין "זמו קבוע" פועלת במקרה של קצר בין מופעים.
ב. דרגה מושהית בעלת אופיין "זמן הפוך" פועלת במקרה של עומס יתר.
2. הגנות בפני זרמי קצר לאדמה
מאחר ורוב הקצרים ברשת הם מ סוג קצר חד פאזי לאדמה, חשיבות רבה יש להגנה נגד מצב זה. סוג ההגנה המיושמת תלוי בשיטת הארקה נקודת האפס בשנאי.
א. הגנה בפני זרם פחת:
בהגנה לזרם פחת משתמשים כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת ישירות או דרך נגד. מאחר וממסר הפחת מכויל לזרם הפעלה בעל ערך נמוך בהרבה מזה של ממסר ליתרת הזרם (כמה עשרות אמפרים בלבד), למערך ההגנות יש רגישות גבוהה מאוד לקצרים לאדמה.



TR- שנאי רשת בתחמ"ש (בסלילים המשניים).

CB- מפסקי זרם קווי.

CT- משנה זרם.

I_R, I_S, I_T -ממסרי יתרת זרם

I_0 -ממסר פחת.

ב. הגנה ווטמטרית:

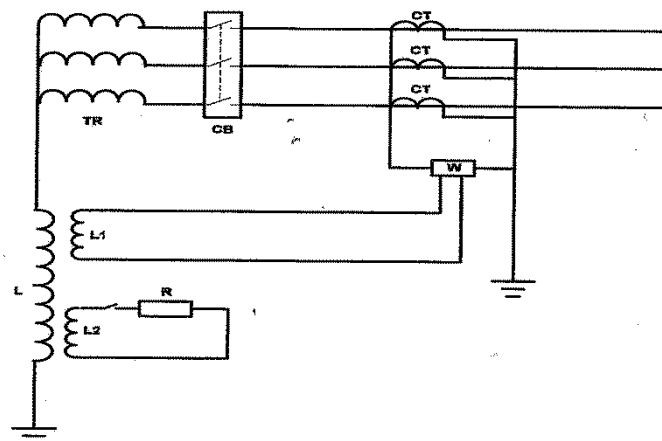
בהגנה ווטמטרית משתמשים כאשר נקודת האפס של השנאי מוארקת דרך סליל כיבוי. עיקרון הפעולה של הגנה זו מבוסס על מדידת הספק אקטיבי, מכיוון הקו הנפגע אל תוך השנאי, ז"א הפוך לכיוון הרגיל של הספקי העומס ביחס לשנאי. לממסר ווטמטרי 2 סלילים: סליל מתח וסליל זרם, והוא פועל לאחר קיום 2 תנאים:

1. הופעת מתח על סליל המתח.

2. זרימת רם אקטיבי בכיוון המנוגד לכיוון זרם העומס.

בזמן קצר חד מופעי לאדמה, נותר מתח על סליל הכיבוי L שווה בערכו למתח פאזי של הרשת. מתח זה גורם להופעת מתחים בליפופים המשניים של סליל הכיבוי L1 ו- L2. מתח 110V בליפוף L1, מפעיל את סליל המתח של הממסר הוטמטרי W. על מנת לאפשר זיהוי הקו הנפגע, כעבור השהית זמן קצר, מתחבר נגד R לליפוף L2. זרם אקטיבי שנוצר כתוצאה מכך, זורם במעגל הקצר דרך סליל הכיבוי לאדמה, למקום הקצר, ומשם דרך מוליכי הרשת חזרה לשנאי. משנה הזרם CT של פאזה הפגועה מזהה את זרימת ההספק האקטיבית המכוונת מהקו אל תוך השנאי.

כך מתמלאים 2 התנאים הנ"ל והממסר נותן פקודה להפסיק את הקו באמצעות מפסק CB.



TR- שנאי רשת בתחמ"ש (בסלילים המשניים).

CB- מפסקי זרם קווי.

CT- משנה זרם.

W- ממסר ווטמטרי.

L- סליל כיבוי.

L1- ליפוף משני 110V.

L2- ליפוף משני 500V.

R- נגד.

חיבור חוזר אוטומטי

לרוב הפרעות ברשת אופי חולף, כמו קשת חשמלית על פני מבודדים או גופים זרים הנוגעים במוליכי הרשת. תפקידה של מערכת לחיבור חוזר אוטומטי, לנסות לחדש את אספקת החשמל לקו המופסק עקב התקלה. למערכת עיקרון פעולה הבא:

לאחר הפסקת המעגל ע"י הגנות כתוצאה מקצר, מופעלת השהיית זמן קצר, האמורה לאפשר כיבוי קשת חשמלית במקום התקלה, ואחר כך המערכת מחדשת את אספקת החשמל. אם התקלה סולקה, אספקת החשמל מתחדשת באופן סדיר, אם גורם ההפרעה עדין קיים, הגנות שוב מפסיקות את אספקת החשמל.

הרשתות עיליות למתח גבוה, למערכת חיבור חוזר אוטומטי 2 מחזורים:

1. מחזור הראשון- מופעל בהשהיית זמן של כ- 0.3-0.5 sec.
2. מחזור השני- מופעל בהשהיית זמן של כ- 1 sec.

השלת עומסים

במערכת הארצית, בכל רגע נתון, חייב להישמר שוויון בין האנרגיה החשמלית המופקת בתחנות הכוח לבין האנרגיה הנצרכת. כאשר עולה צריכת האנרגיה חייבת לעלות גם האנרגיה המופקת, כי אחרת הדבר ישפיע על מהירות סיבוב המחוללים ובכך תדר הרשת ירד מתחת ל- 50Hz. תחום השינוי המותר הוא: $\pm 0.2 \text{ Hz}$.

במצב ירידת התדירות הרשת הארצית ווסתים אוטומטים מוסרים אותות להעמסת יחידות נוספות של מחוללים להפקת אנרגיה חשמלית. במידה ואין זמינות קיימת לתוספת ההספק הנדרשת ועל מנת לא להיות במצב של תת הספק, מתוכנן מערך של השלת עומסים לצורך שמירת נתוני המערכת במצב התקין.

פרק 9-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. $\eta E = \frac{\phi}{P} \left[\frac{lm}{w} \right]$

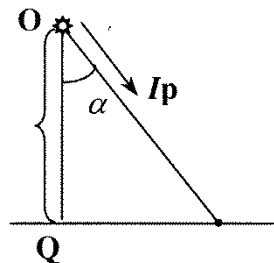
ג. רמת הארה-לוקס

שטף אור המאיר יחידת שטח. $E = \frac{\phi}{A} [lux]$

רמת ההארה בנקודה P הנמצאת בזווית α ממקור האור O וגובה h:

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

כאשר I_p הוא עוצמת האור בכיוון הנקודה P.



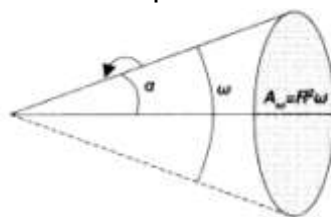
ד. אחידות ההארה-

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

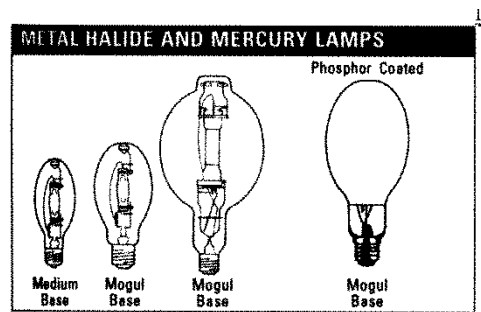
שטף המוקרן ממקור אור בזווית מרחבית ω בכיוון נתון.

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

- 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 –קלווין
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

- ניתן לחלק את מקורות האור החשמליים ל-4 קבוצות:
- נורות להט: הכוללות את נורת הליבון ונורת ההלוגן.
 - נורות פריקה בגז-HID: הכוללת את נורת הכספית, נורת כספית בתוספת האלידים ונורת נתרן.
 - נורה פלורוסנטית.
 - דיודות פולטות אור- LED.
- א. נורת ליבון-
מבנה: תיל טונגסטן.
מילוי: גז אציל ארגון בתוספת 7% חנקן.
טמפ' עבודה: $2650^\circ C - 3150^\circ C$.
- 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 הנפלטת מתיל הלהט ובחזרה אליו. הודות לכך אורך החיים והנצילות האורית של נורת הלוגן גדולים יותר בהשוואה לנורה הרגילה.
- ג. נורות כספית בלחץ גבוה-
מבנה: שפופרת קוורץ בתוך אגס זכוכית
מילוי: כספית וגז ארגון.
לחץ: 1-10 ATMs.
עקרון פעולה: פריקת זרם דרך אידי כספית.
הצתה: באמצעות אלקטרודת עזר.

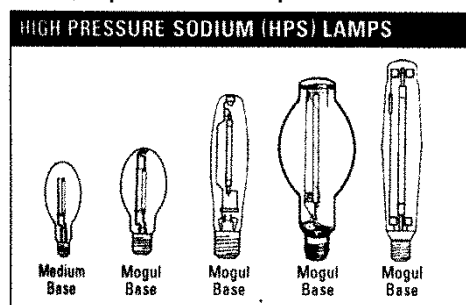


ד. נורות כספית עם האלידים – Metal-Halide

מבנה: תוספת תרכובת של יוד עם מתכת לתוך שפופרת קוורץ.
 הצתה: ב-2 שיטות: 1. באמצעות אלקטרודת עזר זמן, הצתה 3-4 דקות, הצתה מחודשת 10-20 דקות.
 2. באמצעות פולסי מתח גבוה, זמן הצתה 2 דקות, הצתה מחודשת 3-4 דקות.

ה. נורות נתרן לחץ גבוה-נל"ג-

מבנה: שפופרת קראמית עם תערובת כספית ונתרן בתוך מעטה זכוכית.
 לחץ: 1-1.5 ATMs.
 עקרון פעולה: פריקת זרם דרך אדי נתרן.
 הצתה: בעזרת פולסי ממתח גבוה. זמן הצתה 3-4 דקות, הצתה מחודשת 1 דקה.

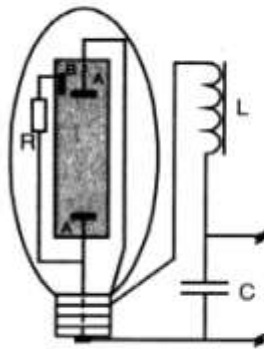


ו. נורות נתרן לחץ נמוך-נל"מ-

מבנה: שפופרת פריקה המכילה נתרן מוצק ותערובת גז ניאון וארגון.
 לחץ: $1 \cdot 10^{-5}$ ATMs.
 זמן הצתה: 7-10 דקות, הצתה מחודשת 3-12 שניות.

שיטות הצתה נורות HID:

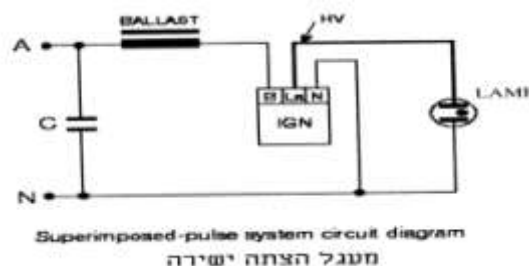
בשיטת הצתה ע"י אלקטרודת עזר- בתוך שפופרת פריקה מותקנת אלקטרודת עזר המחוברת למעגל חשמלי של הנורה באמצעות נגד הצתה. לאחר חיבור המתח טמפ' הנורה נמוכה, התנגדותה גבוהה ואין תנאים לפריקת המטען בגז בין האלקטרודות הראשיות. הפריקה הראשונית מתחילה בין האלקטרודה הראשית לבין אלקטרודת העזר הודות למרחק הקטן בניהם. הקשת החשמלית מחממת את הנורה וגורמת לריבוי נושא מטען בתוך השפופרת. כתוצאה מכך התנגדות הגז בין 2 האלקטרודות הראשיות קטנה והפריקה עוברת מסלול הרגיל שביניהן.



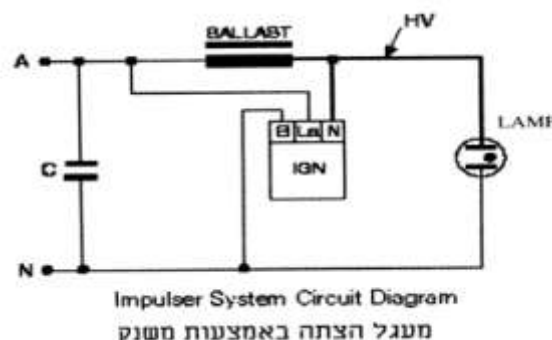
- A – אלקטרודות ראשיות. תפקידן להעביר זרם פריקה בתוך הנורה.
 B – אלקטרודת עזר. תפקידה ליצור קשת פריקה ואשונית בזמן הצתת הנורה כאשר התנגדותה גבוהה.
 R – נגד הצתה. תפקידו להגביל את זרם ההצתה ולהפסיק את מעגל ההצתה כאשר הנורה נדלקת והתנגדותה ירדה.
 L – נטל השראי. תפקידו לייצב את זרם העבודה.
 C – קבל לשיפור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

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:

1. 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.



2. 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.

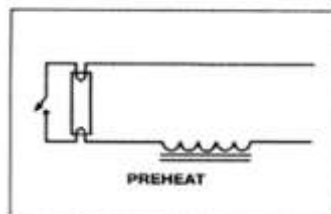


ז. נורת פלורוסנטית-

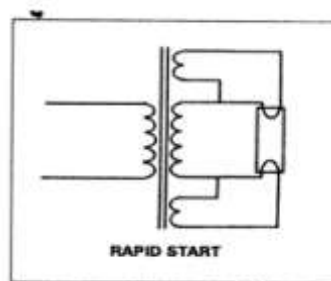
מבנה: שפרפרת זכוכית עם ציפוי פלורוסנטי
מילוי: גז אציל בתוספת כספית.
אלקטרודות: טונגסטן עם ציפוי חומר פולט אלקטרונים.
לחץ גז: כ- 10^{-5} ATMs .
אורך חיים: תלוי במספר שעות ההפעלה לכל הצתה.

שיטות הצתה נורות פלורוסנטיות:

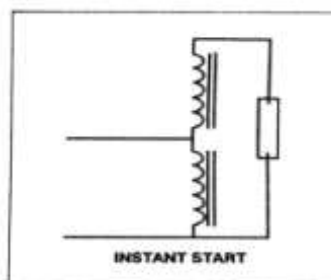
1. הצתה עם חימום מוקדם Preheat Start - בשיטה זו לסטרטר תפקיד כפול:
חימום מוקדם של אלקטרודות הנורה ואחר כך יצירת מתח יתר להצתת הנורה.
פולס מתח היתר נוצר ע"י פתיחת מגע תרמי של הסטרטר אשר מפסיק את
הזרם הזורם דרך המשנק. פתיחת המגע נמשכת כשנייה והזרם בזמן זה הוא כ-
פי 2 מהזרם הרגיל של הנורה.
כל הצתה גורמת 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 חיייה של הנורה המופעלת בשיטה זו גדול בהרבה.

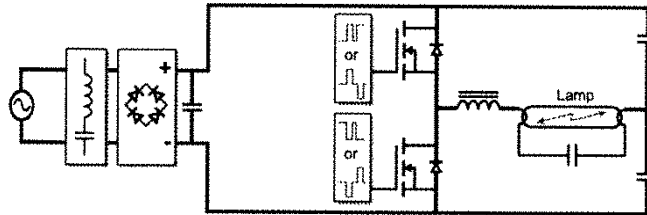


3. הצתה Instant Start - בשיטה זו המשנק מספק פולס מתח גבוה על מנת להצית
את הנורה תוך זמן פחות מ- 0.05s, ללא חימום מוקדם של האלקטרודות. פליטת
האלקטרונים בנורה חד פינית היא "פליטה קרה" אשר נגרמת ע"י שדה
אלקטרומגנטי ולא ע"י טמפ' גבוהה של האלקטרודות.



לזרם בנורה ובמשנק אופי השראי, מקדם ההספק מאוד נמוך במוצע $\cos\phi=0.4-0.5$ 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-5-10%, והגדלת הנצילות האורית של הנורה ב-10% ויותר והארכת חיי הנורה באופן ניכר. שיטה זו מאפשרת שימוש בדימרים לוויסות עוצמת האור ומונעת את תופעת הסטרובוסקופית. כמו כן אין צורך בקבל לשיפור מקדם ההספק.



ח. דיודה פולטת אור-LED

מבנה: התקן עשוי ממוליך למחצה הפולט אור כתוצאה מזרם חשמלי העובר דרכו.

ניתן לסכם את הנתונים העיקריים של הנורות השונות בטבלה הבאה:

סוג נורה	נצילות אורית (lm/W)	אורך חיים (שעות)	תחום הספקים (W)	CCT (°K)	CRI (%)
ליבון	10 – 15	1000 – 2000	3 – 1000	2900 – 3000	100
הלוגן	15 – 25	2000 – 4000	5 – 500	2900 – 3000	100
פלורסנט טובולרי	50 – 100	7500 – 24000	10 – 105	2700 – 6500	50 -95
פלורסנט קומפקטי	50 – 80	10000 – 20000	4 – 55	2700 – 6500	70-90
כספית (Mercury)	25 – 55	16000 – 24000	40 – 1000	3500 – 4000	42 -52
כספית עם האלידים (MH)	50 – 115	6000 – 20000	35 – 2000	3000 – 6000	65 -93
נתרן – נל"ג (HPS)	60 – 140	16000 – 24000	35 – 1000	2000	25 -60
נתרן – נל"נ (LPS)	100-185	14000 – 18000	35 – 180	1800	10 - 20
LED	10 – 30	40000-100000	0.05 – 0.1	—	—

תופעת הסטרובוסקופית

כל נורת פריקה המופעלת בתדירות הרשת, נכבית פעמיים במשך מחזור של זרם חילופין, כאשר גל הזרם עובר דרך נקודת האפס. כיבוי רגעי זה יכול ליצור אשליה אופטית המתבטאת בכך שאובייקט מסתובב נראה ללא תנועה ודבר זה יכול לגרום לתאונת עבודה. כדי למנוע סכנה זו, מומלץ לחבר נורות פלורוסנטיות ונורות HID למעגל תלת פאזי ולחלק את גופי התאורה בין 3 הפאזות.

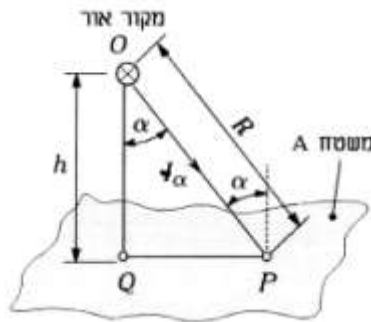
תכנון תאורה בשיטה נקודתית-תאורת חוץ

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:

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} [lux]$$

שיטות חישוב עוצמת האור בכיוון זווית α

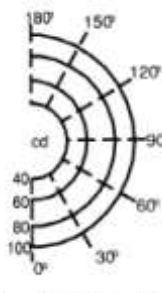
א. כאשר נתון מקור אור בעל עוצמת אור אחידה ניתן לחשב את עוצמת האור בכל כיוון לפי

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

כאשר: $\phi [lm]$ - שטף הנורה.

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

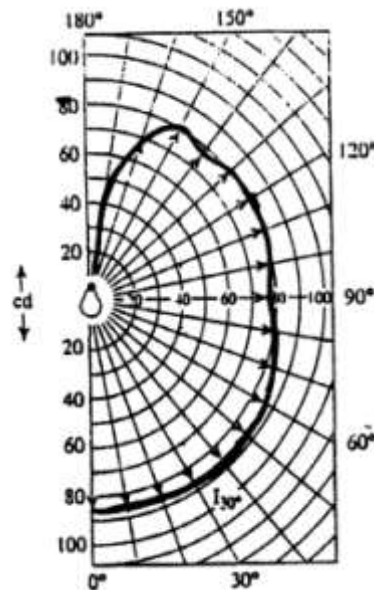
ו- $\omega = 2\pi$ עבור חצי כדור וכו').



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

ב. באמצעות עקום פולארי הנתון ע"י יצרן 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:

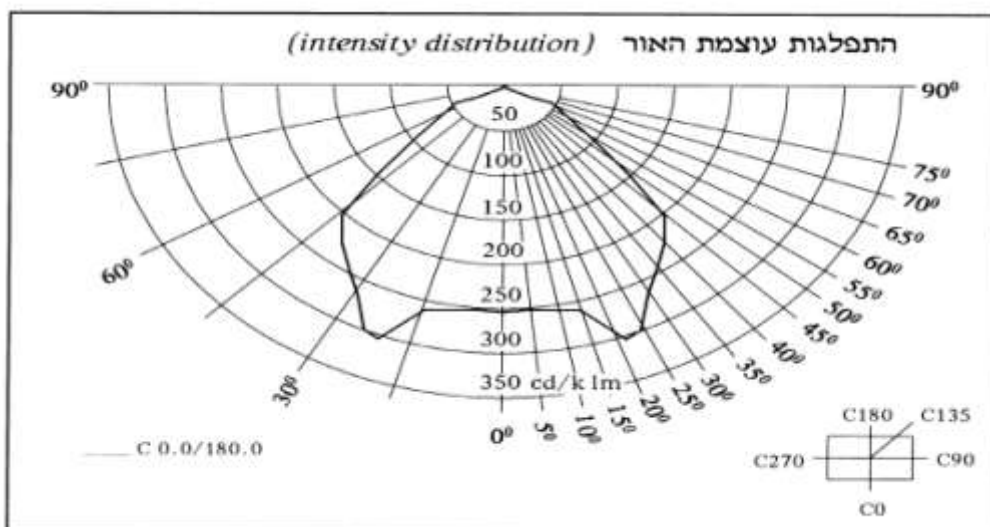
$$I_\alpha = I_{\alpha/1000lm} * \frac{\phi}{1000}$$



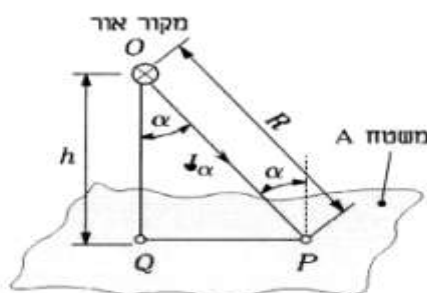
בעקום פולארי זה בזווית 0° עוצמת האור היא 90 cd.
 בזווית 30° עוצמת האור היא 95 cd.
 בזווית 80° עוצמת האור היא 80 cd.
 בזווית 170° עוצמת האור היא 50 cd.
 בזווית 180° עוצמת האור היא 0 cd.
 יש לזכור כי נתוני עוצמת האור בעקום הפולארי הוא לכל 1000 lm של מקור האור.
 וזאת הסיבה מדוע יש לחלק את השטף האורי של הנורה ב-1000.

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:



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

לפי העקום הפולארי זווית האור ל-1000lm עובר זווית 21.8° הוא $I_\alpha = 300 \frac{cd}{1000lm}$ ולכן-

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

ולכן עבור נורה בעלת שטף של 20000 lm

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

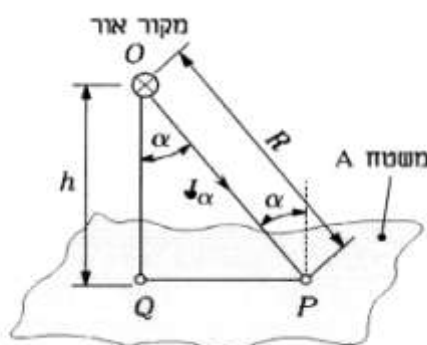
תרגיל דוגמא 2:

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-(cd)	36	40	45	51	62	86	86	83	78	63

פתרון לתרגיל דוגמא 2:



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

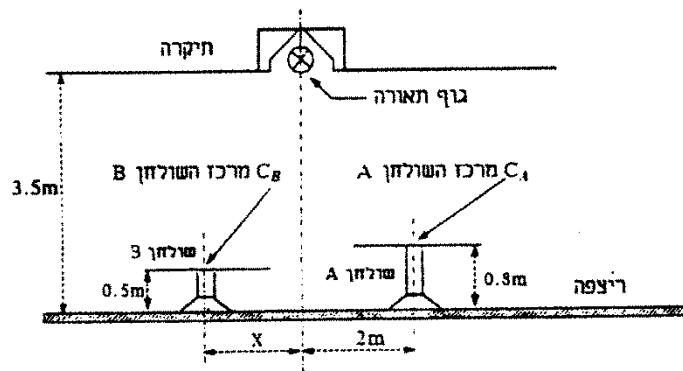
לפי טבלת נתוני עוצמת האור, עבור זווית 51.34° הוא $I_\alpha = 86 cd$ ולכן-

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

תרגיל דוגמא 3:

בגוף תאורה מורכבת נורת ליבון המוזנת במתח $230V$. הזרם הנצרך ע"י הנורה הוא $0.87A$. גוף התאורה מורכב בצמוד לתקרת החדר שגובהו 3.5 מ'. הנצילות האורית של הנורה היא 10 lm/w . ההתפלגות הפולארית של גוף התאורה אחידה בכל הזוויות ועוצמת האור היא 90cd .

- חשב את שטף האור של הנורה.
- על רצפת החדר מונח שולחן A כמתואר באיור חשב את רמת ההארה במרכז השולחן.
- חשב את המרחק X של מרכז שולחן B מאנך הנורה כך שרמת ההארה במרכזו תהיה זהה לרמת ההארה במרכזו של שולחן A.



פתרון לתרגיל דוגמא 3:

א.

$$P = U * I = 230 * 0.87 = 200W$$

$$\eta E = \frac{\phi}{P} \left[\frac{\text{lm}}{\text{w}} \right]$$

$$\phi = P * \eta E = 200 * 10 = 2000 \text{ lm}$$

ב.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{h'} = \tan^{-1} \frac{2}{(3.5 - 0.8)} = 36.53^\circ$$

$$Ep = \frac{I\alpha * \cos^3 \alpha}{h'^2} = \frac{90 * \cos^3 36.53}{(3.5 - 0.8)^2} = 6.4 \text{ [lux]}$$

ג.

$$\cos^3 \alpha = \frac{Ep * h'^2}{I\alpha} = \frac{6.4 * (3.5 - 0.5)^2}{90} = 0.64$$

$$\cos \alpha = \sqrt[3]{0.64} = 0.64^{\left(\frac{1}{3}\right)} = 0.861774$$

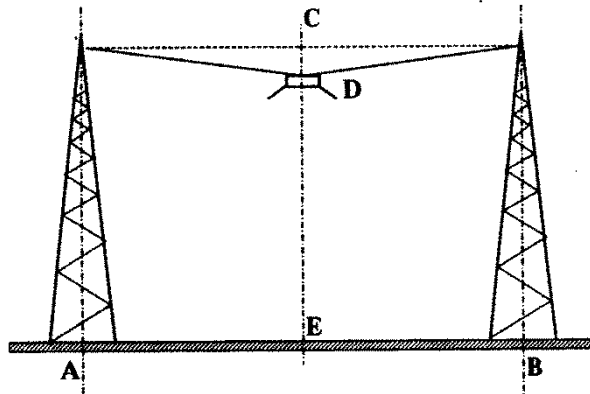
$$\alpha = \cos^{-1} 0.861774 = 30.48^\circ$$

$$\tan \alpha = \frac{x}{h'}$$

$$x = h' * \tan \alpha = (3.5 - 0.5) * \tan 30.48 = 1.766 \text{ m}$$

תרגיל דוגמא 4:

גוף לתאורה חיצונית תלוי על תיל בין 2 עמודים כמתואר באיור



צריך להבטיח רמת הארה של 400 lux בנקודה "E" על פני הקרקע.
הנורה בעלת שטף אור של 18000 lm ועוצמת האור שלה $250 \text{ cd}/1000 \text{ lm}$.
עוצמת האור היא אחידה בכל הכיוונים.
גובה העמוד הוא 4 m ואורך התיל 13 m .
עקב המשקל העצמי שלו, גוף התאורה יורד לנקודה "D" מהנקודה "C" הנמצאת בגובה העמוד.
חשב את המרחק "AB" בין 2 העמודים.

פתרון לתרגיל דוגמא 4:

$$I_\alpha = \frac{I_\alpha}{1000 \text{ lm}} * \frac{\phi}{1000} = 250 * \frac{18000}{1000} = 4500 \text{ cd}$$

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

$$E_E = \frac{I_\alpha * \cos^3 0}{(4 - CD)^2} =$$

$$(4 - CD)^2 = \frac{I_\alpha * \cos^3 0}{E_E} =$$

$$4 - CD = \sqrt{\frac{I_\alpha * \cos^3 0}{E_E}} =$$

$$CD = 4 - \sqrt{\frac{I_\alpha * \cos^3 0}{E_E}} = 4 - \sqrt{\frac{4500 * 1}{400}} = 0.646 \text{ m}$$

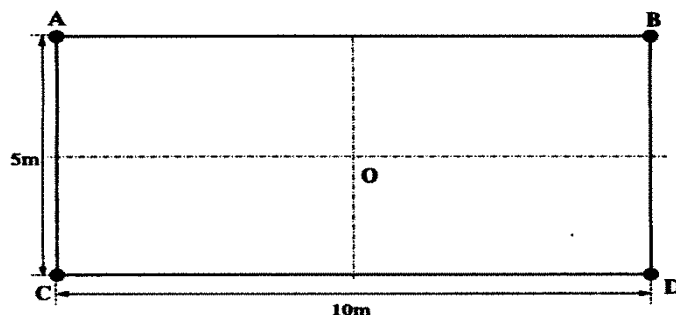
$$DB = \frac{ADB}{2} = \frac{13}{2} = 6.5 \text{ m}$$

$$CA = CB = \sqrt{(DB)^2 - (CD)^2} = \sqrt{6.5^2 - 0.646^2} = 6.45 \text{ m}$$

$$AB = CA = CB = 2 * 6.45 = 12.9 \text{ m}$$

תרגיל דוגמא 5:

מגרש מלבני בעל ממדים כמתואר באיור, מואר באמצעות 4 גופי תאורה המורכבים על העמודים A,B,C,D. גובה העמודים 5m ושטף באור של כל נורה הוא 30000 lm.



עקומת ההתפלגות הפולארית של גוף התאורה כמתואר בטבלה:

α°	0	10	20	34	45	55	62	69	76	83
$I \left[\frac{cd}{1000lm} \right]$	150	200	220	260	280	230	190	115	72	0

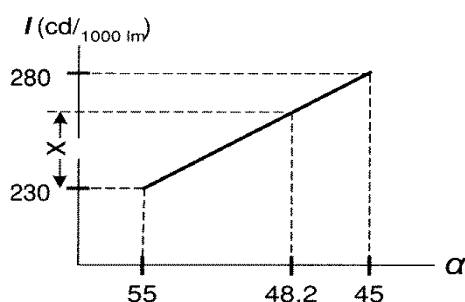
חשב את רמת הארה במרכז המגרש.

פתרון לתרגיל דוגמא 5:

$$AO = \sqrt{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 + \left(\frac{AC}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{10}{2}\right)^2 + \left(\frac{5}{2}\right)^2} = 5.59 \text{ m}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{AO}{h}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5.59}{5}\right) = 48.2^\circ$$

לפי ההתפלגות הפולארית: הזווית 48.2 נמצאת בין הזווית 45 לבין הזווית 55. בהנחה שהעקום הפולארי הוא ליניארי נחשב את עוצמת האור בזווית 48.2 בשיטת האינטרפולציה:



$$\frac{X}{55 - 48.2} = \frac{280 - 230}{55 - 45}$$

$$X = \frac{280 - 230}{55 - 45} * (55 - 48.2) = \frac{50}{10} * 6.8 = 34$$

$$I_{48.2^\circ} = 230 + 34 = 264 \frac{cd}{1000lm}$$

$$I_\alpha = \frac{I_{48.2^\circ}}{1000lm} * \frac{\phi}{1000} = 264 * \frac{30000}{1000} = 7920cd$$

$$E_A = \frac{I_\alpha * \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{7920 * \cos^3 48.2}{5^2} = 93.81 \text{ lux}$$

$$E_O = 4 * E_A = 4 * 93.81 = 375.24 \text{ lux}$$

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.

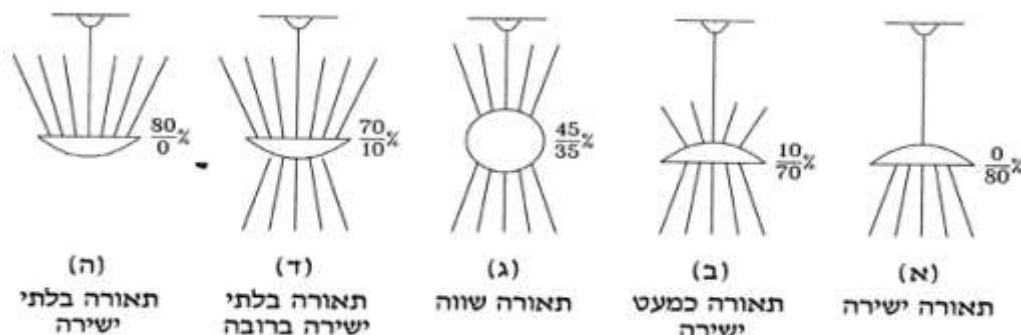
אין תקנים רשמיים לגבי רמת ההארה הנדרשת ולכן ניתן להשתמש בתקנים של ארגונים לאומיים ובין לאומיים שונים כמו CIE- הנציבות הבין-לאומית לתאורה. בטבלה מובאות המלצות מ- LESNA LIGHTING HANDBOOK לגבי רמת ההארה הממוצעות של תאורת פנים עבור מתקני תאורה שונים:

רמת ההארה Ix	יעוד	רמת ההארה Ix	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

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

סוגי תאורה:



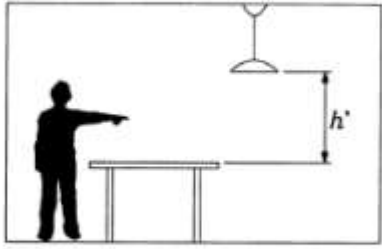
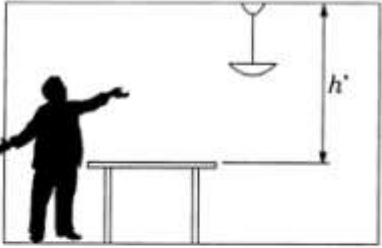
בחירת סוג נורה וסוג גוף תאורה לתאורת פנים:

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  $R_c = \frac{2W + L}{6h'}$	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]
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 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	(נ"ר)

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.

טבלת מקדמי הפחתה k

מקדמי הפחתה K

סוג התאורה		תאורת ליבון		תאורת כספית		תאורה פלואורסצנטית	
מצב האבק		מועט	מרוכה	מועט	מרוכה	מועט	מרוכה
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 גוף 100%)	חלוקת עוצמת האור	המרחק המקסימלי s בין יחידות התאורה המרחק	קטג									
				75			50			30			
				קטג	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	
				0.7									
				ההפחתה גורם									
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	
				0.7									
				ההפחתה גורם									

קורס - מתקני תשל -הנדסאי תשל

מס'	סוג גוף תאורה (עוצמת האור של נורה 100%)	חלוקת עוצמת האור	הסרתם המסימלי בין יחידות התאורה המרחק	מקדם הנצילות CU%								
				75			50			30		
				קוקר	50	30	10	50	30	10	30	10
				R_c								
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	הסרתם המסימלי בין יחידות 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	18	15	16	14
				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	10	9	7	6
				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 1:

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 1:

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: $15 - 6 = 9m$.

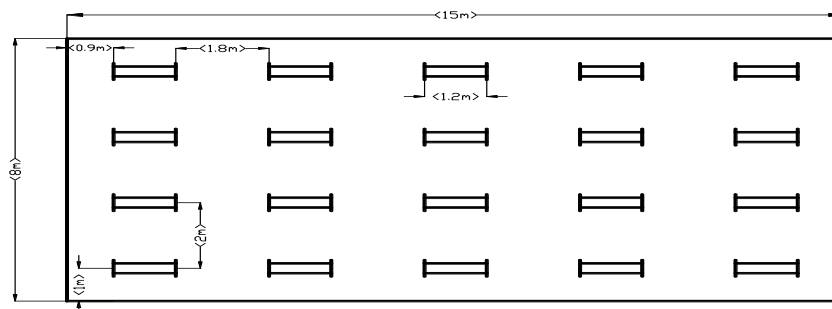
ולכן לקביעת המרחק בין הגופים נחשב באמצעות הביטוי:

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

קביעת המרחק בין השורות (y)-

את המרחק בין השורות נחשב באמצעות הביטוי:

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



תרגיל דוגמא 2:

רמת ההארה הדרושה במטבח היא 300 lux כמות האבק היא מעטה וגוף התאורה מאיר בצורה ישירה. מקדם הניצול התאורה הוא 75% אורכו של המטבח 5 מ' ורוחבו 4 מ'.
חשב וקבע את סוג מקור האור העונה לדרישות אלו. העזר בנתוני הטבלאות הבאות:
טבלה א' מקדם הפחתה K-

סוג תאורה		תאורת ליבון		תאורת הלוגן		תאורה פלורוסנטית	
כמות אבק		מועטה	רבה	מועטה	רבה	מועטה	רבה
גופי תאורה		0.85	0.6	0.8	0.6	0.75	0.55
		0.75	0.4	0.7	0.4	0.7	0.37
		0.7	0.35	0.65	0.35	0.6	0.3

טבלה ב'-

750	500	300	250	200	150	100	75	60	40	20	הספק P(W)	
	17	17		16	15	14	13	12	11	9	נורת ליבון	נצילות אורית η
22	19	17	16		16	14	13				נורת הלוגן	
								89	78	69	נורה פלורוסנטית	

פתרון לתרגיל דוגמא 2:

עבור נורת ליבון-

$$\Phi = \frac{E * A * 100}{k * CU} = \frac{300 * 5 * 4 * 100}{0.85 * 75} = 9411.76lm$$

$$\Phi = P * \eta E = 3 * (200 * 16) = 9600 lm$$

בשימוש בנורות ליבון יהיה צורך להשתמש ב-3 נורות של-200W כל אחת.

עבור נורת הלוגן-

$$\Phi = \frac{E * A * 100}{k * CU} = \frac{300 * 5 * 4 * 100}{0.8 * 75} = 10000lm$$

$$\Phi = P * \eta E = 2 * (300 * 17) = 10200 lm$$

בשימוש בנורות הלוגן יהיה צורך להשתמש ב-2 נורות של-300W כל אחת.

עבור נורה פלורוסנט-

$$\Phi = \frac{E * A * 100}{k * CU} = \frac{300 * 5 * 4 * 100}{0.75 * 75} = 10667lm$$

$$\Phi = P * \eta E = 2 * (60 * 86) = 10680lm$$

בשימוש בנורות פלורוסנט יהיה צורך להשתמש ב-2 נורות של-60W כל אחת.

תרגיל דוגמא 3:

יש לתכנן מערכת תאורה לחדר עבודה בעל גובה 3m אורך החדר 8m ורוחבו 6m. מקורות האור הם נורות פלורוסנטיות ושטף האור של כל נורה 2000lm הנורות מותקנות במרחק של 10cm מהתקרה. גובה שולחן העבודה הוא 85cm מהרצפה וזקוקים לרמת הארה של 300lux על פני השולחן. מקדם ההפחתה הכללי של החדר הוא 0.7. בטבלה הבאה נתונים ערכי נצילות אורית כפונקציה של מקדם החדר (המתחשב בכל מקדמי ההחזרה תקרה+קירות).

מקדם הנצילות האורית	מקדם החדר
41	1
46	1.25
50	1.5
55	2

פתרון לתרגיל דוגמא 3:

$$Rc = \frac{2W + L}{6h'} = \frac{2 * 6 + 8}{6 * (3 - 0.88 - 0.1)} = 1.65$$

נחשב את נצילות התקן התאורה באמצעות אינטרפולציה:

$$\frac{X}{2 - 1.65} = \frac{55 - 50}{2 - 1.5}$$

$$X = \frac{55 - 50}{2 - 1.5} * (2 - 1.65) = \frac{5}{0.5} * 0.35 = 3.5$$

$$CU = 55 - 3.5 = 51.5$$

$$n = \frac{E * A * 100}{k * CU * \phi} = \frac{300 * 8 * 6 * 100}{0.7 * 51.5 * 2000} = 19.97 \text{ נורות}$$

מכאן שמספר הנורות הוא 20 יח'

תרגיל דוגמא 4:

דרושה רמת הארה של 300lux על פני שולחן שגובהו 85cm. השולחן נמצא באולם שאורכו 12m ורוחבו 7m וגובהו 4.35m.

השולחן עשוי מחומר בגוון מט ומקדם ההזרה שלו הוא 25%. הנצילות האורית המתאימה למקדם החדר הוא 52%. ומקדם ההפחתה הכללי הוא 78%. משתמשים בנורות בעלות שטף אורי של 2450 lm כ"א, ונצילות אורית של 14.6 lm/w. הנורות מורכבות בגופי תאורה והמרחק שלהם מהתקרה הוא 15 cm.

- א. חשב את מקדם החדר יחסית לשולחן העבודה.
- ב. חשב את מספר המנורות הדרושות להשגת רמת ההארה הרצויה וכן חשב את ההספק החשמלי הנצרך מהקשת ע"י מערכת התאורה.
- ג. חשב את בהיקות שטח השולחן.

פתרון לתרגיל דוגמא 4:

א.

$$Rc = \frac{2W + L}{6h'} = \frac{2 * 7 + 12}{6 * (4.35 - 0.85 - 0.15)} = 1.29$$

ב.

$$n = \frac{E * A * 100}{k * CU * \phi} = \frac{300 * 7 * 12 * 100}{0.78 * 52 * 2450} = 25.36 \text{ נורות}$$

כמות הנורות הוא 26 יח'

$$\eta E = \frac{\phi}{P} \left[\frac{lm}{w} \right]$$

$$P = \frac{\phi}{\eta E} = \frac{2450}{14.6} = 167.8W$$

$$P_T = P * n = 167.8 * 26 = 4.36KW$$

ג.

$$L = \frac{I(cd)}{A(m^2)} = \frac{\rho * E}{\pi} = \frac{0.25 * 300}{\pi} = 23.873 \left[\frac{cd}{m^2} \right]$$

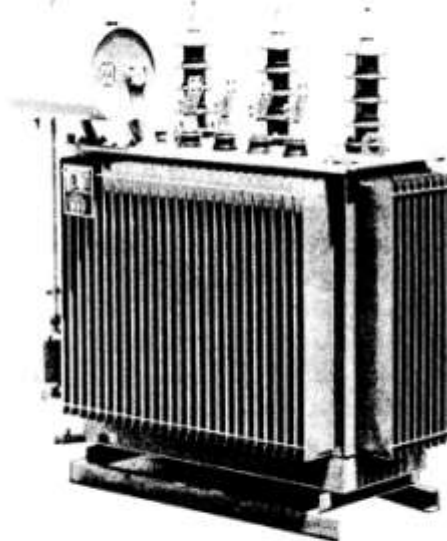
פרק 10- נספחים

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		Io %
	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

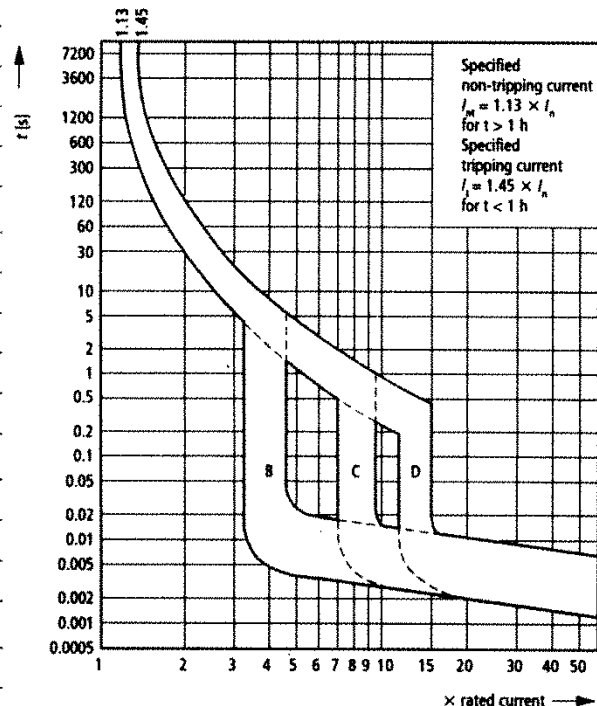
מפסק אוטומטי זעיר (מא"ז) (באדיבות חב' Moeller)

אופייני B, C 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 pole	
	Rated current	Type	Price	Std. pack	Type	Price	Type	
	I_n A	Article no.	See Price List		Article no.	See Price List	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

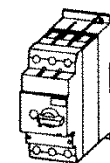


מפסק אוטומטי מגנטי תרמי (מאמ"ת) להגנה על מנועים עד 63 A
הגנה תרמית מתכווננת

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

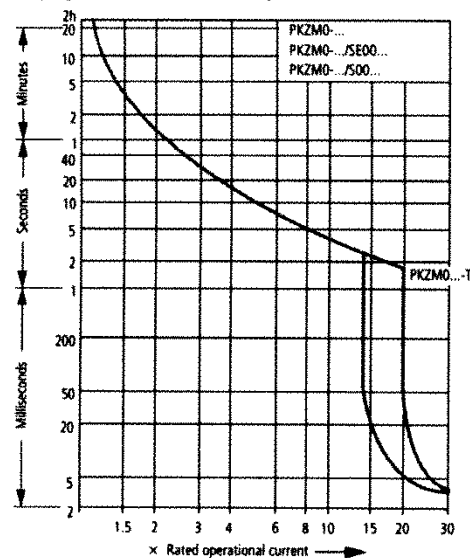
Max. AC-3 motor rating						Rated uninter- rupted current I_n A	Setting range	
220 V	380 V	440 V	500 V	660 V	690 V		Overload release I_r A	Short-circuit release I_m A
230 V	400 V							
240 V	415 V							
kW	kW	kW	kW	kW	kW			
Motor-protective circuit-breakers ¹⁾ , Type "1" and Type "2" coordination								
—	—	—	—	0.06	0.16	0.16	0.1 – 0.16	2.2
—	0.06	0.06	0.06	0.12	0.25	0.25	0.16 – 0.25	3.5
0.06	0.09	0.12	0.12	0.18	0.4	0.4	0.25 – 0.4	5.6
0.09	0.12	0.18	0.25	0.25	0.63	0.63	0.4 – 0.63	8.8
0.12	0.25	0.25	0.37	0.55	1	1	0.63 – 1	14
0.25	0.55	0.55	0.75	1.1	1.6	1.6	1 – 1.6	22
0.37	0.75	1.1	1.1	1.5	2.5	2.5	1.6 – 2.5	35
0.75	1.5	1.5	2.2	3	4	4	2.5 – 4	56
1.1	2.2	3	3	4	6.3	6.3	4 – 6.3	88
2.2	4	4	4	7.5	10	10	6.3 – 10	140
4	7.5	9	9	12.5	16	16	10 – 16	224
5.5	9	11	12.5	15	20	20	16 – 20	280
5.5	12.5	12.5	15	22	25	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
58	50 – 58	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

AC-3	Rated current		Setting ranges	
380 V 400 V 415 V	Opera- tional	Uninter- rupted	Overload releases	Short-circuit releases, non-delayed
P kW	I_n A	I_u A	I_L A 	I_{ms} A 

Circuit-breakers for motor protection, 3-pole

With phase-failure sensitivity¹⁾

Adjustable overload releases

Adjustable non-delayed short-circuit releases

With terminals

15	29.3	40	25 - 40	9 - 14 × I_n
18.5	36	40	25 - 40	
22	41	63	40 - 63	6 - 14 × I_n
30	55	63	40 - 63	
37	68	80	63 - 80	
45	81	100	80 - 100	
55	99	125	80 - 125	
75	139	160	125 - 160	
90	161	200	160 - 200	6 - 12 × I_n
110	196	200	160 - 200	

NZM7-40N-M 049032
NZM7-40N-M 049032
NZM7-63N-M 049033
NZM7-63N-M 049033
NZM7-80N-M 049034
NZM7-100N-M 049035
NZM7-125N-M 049036
NZM7-160N-M 049037

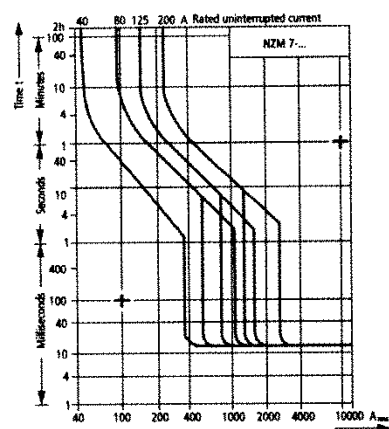
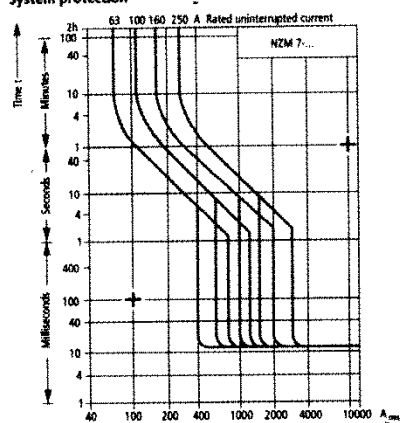
With M8 bolt connection and
cable lug cover

15	29.3	40	25 - 40	9 - 14 × I_n
18.5	36	40	25 - 40	
22	41	63	40 - 63	6 - 14 × I_n
30	55	63	40 - 63	
37	68	80	63 - 80	
45	81	100	80 - 100	
55	99	125	80 - 125	
75	134	160	125 - 160	
90	161	200	160 - 200	6 - 12 × I_n
110	196	200	160 - 200	

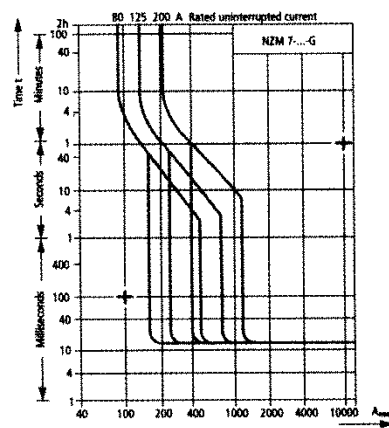
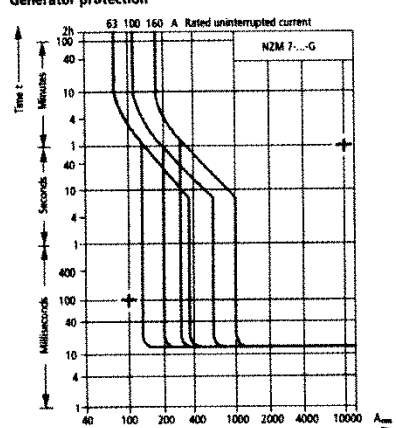
NZM7-40N-M-M8 065820
NZM7-40N-M-M8 065820
NZM7-63N-M-M8 065821
NZM7-63N-M-M8 065821
NZM7-80N-M-M8 065822
NZM7-100N-M-M8 065823
NZM7-125N-M-M8 065824
NZM7-160N-M-M8 065825
NZM7-200N-M-M8 065826
NZM7-200N-M-M8 065826

NZM7 Circuit-Breakers Tripping Characteristics

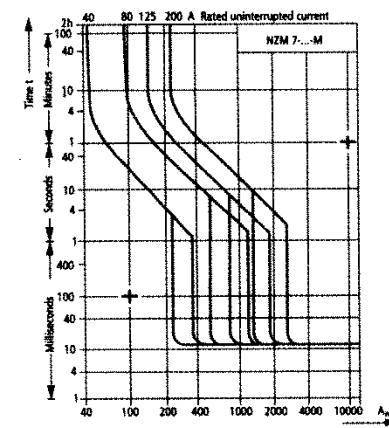
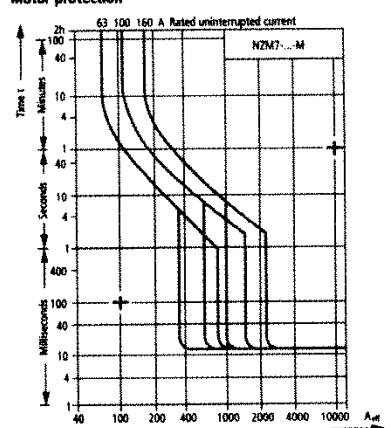
System protection



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

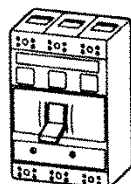
NZM10 Circuit-Breakers, 3-pole
 System, Generator and Motor Protection

Rating data				Normal switching capacity 45 kA at 400 V 50/60 Hz	
Motor data		Setting ranges:		Type	Article no.
Rated uninterrupted current	AC-3	Overload- releases	Short-circuit releases	Delayed	Non-delayed
	380 V 400 V 415 V				
I_n A	P kW	I_r A	I_{mv} A	I_m A	
					

Circuit-breakers for system and generator protection

Adjustable overload releases

Adjustable non-delayed short-circuit releases



250	—	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_r$	NZM10-400N/ZM-250 047818
400	—	200 – 400	—		NZM10-400N/ZM-400 034730
630	—	300 – 630	—		NZM10-630N/ZM-630 034731

Circuit-breakers with time selectivity

Adjustable overload releases

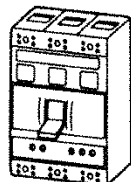
Time delay setting to overcome current peaks ($t_r = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 17, 20$ s).

Overload release can be de-activated ($t_r = \infty$).

Adjustable delayed short-circuit releases

($t_s = (0, 10, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 750, 1000$ ms) ~ 20%)

Adjustable non-delayed short-circuit releases



250	—	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_r$	1000 – 6000	NZM10-400N/ZMV-250 047823
400	—	200 – 400	—		1000 – 9000	NZM10-400N/ZMV-400 034738
630	—	300 – 630	—		1000 – 9000	NZM10-630N/ZMV-630 034739

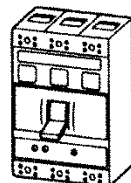
Circuit-breakers for motor protection

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 ($t_r = \infty$)

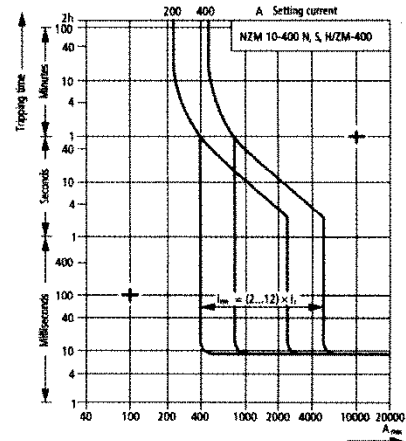
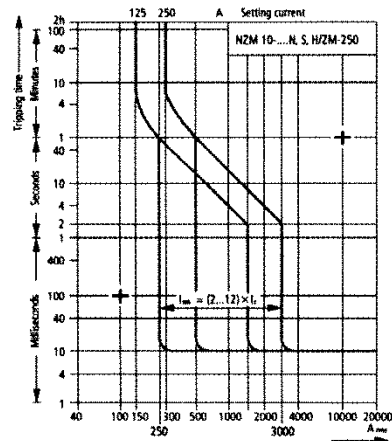
Adjustable short-circuit releases



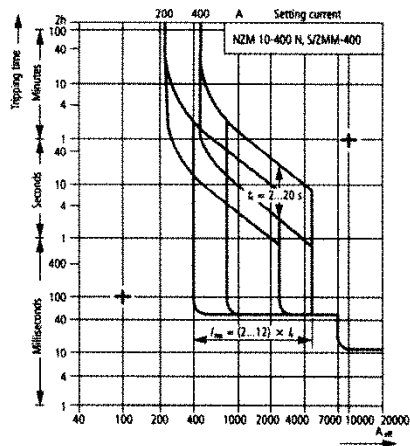
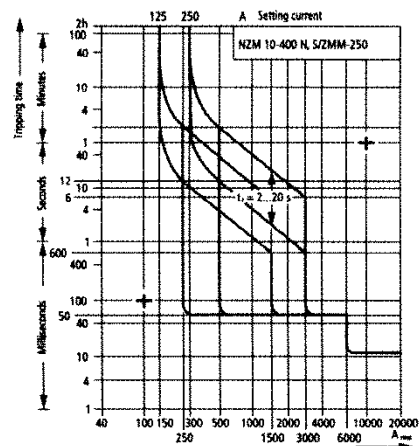
250	110	125 – 250	—	$2 - 12 \times I_r$	NZM10-400N/ZMM-250 047821
250	132	125 – 250	—		NZM10-400N/ZMM-250 047821
400	160	200 – 400	—		NZM10-400N/ZMM-400 034732
400	200	200 – 400	—		NZM10-400N/ZMM-400 034732
630	250	300 – 630	—		NZM10-630N/ZMM-630 034733
630	315	300 – 630	—		NZM10-630N/ZMM-630 034733

NZM10 Circuit-Breakers Tripping Characteristics

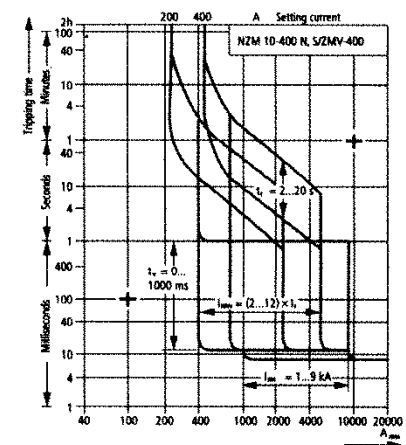
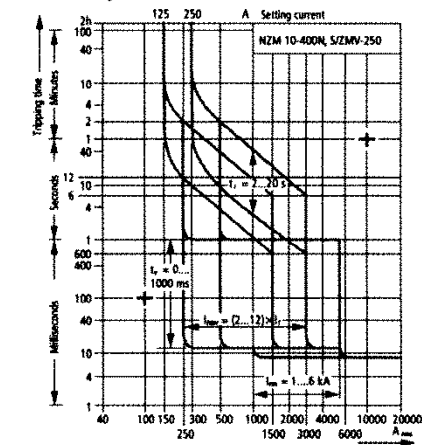
System protection, generator protection



Motor protection



Time selectivity



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

קבלים תלת פאזיים גליליים



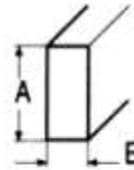
מק"ט	דגם	הספק ב- 400V 50Hz KVAR	הספק ב- 440V 50Hz KVAR	גודל פריקה נא	מידות (מ"מ) גובהXקוטר
26-1057	MKPg-5	5	6.25	300	75X176
26-1073	MKPg-7.5	7.5	9.1	300	75X176
26-1099	MKPg-10	10	12.5	300	75X230
26-1108	MKPg-12.5	12.5	15	300	85X230
26-1115	MKPg-15	15	18.3	180	95X230
26-1339	MKPg-20	20	25	180	100X230
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 נא	מידות (מ"מ) עגגור
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
26-1248	MKPg - BOX -12.5 KVAR	12.5	15	300	180X430X160
26-1255	MKPg - BOX -15 KVAR	15	18.3	180	180X430X160
26-1263	MKPg - BOX -20 KVAR	20	25	180	180X430X160
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 -הנדסאי חשמל

פסי צבירה ללוחות חשמל (באדיבות חב' יקיר תעשיות)



הזרם המתמיד המרבי $I_z(A)$

כיצד לבחור פס נחושת אלקטרוניטית

זרם עבודה								מפתח מריט	AxEx מ"מ
מספריות עבודה 85°C				מספריות עבודה 85°C					
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
			160				212		12x4
			183				241		12x5
			274				363	70090-2	20x5
		586	327			776	433		25x5
1003	896	672	379	1329	1187	890	502	70090-3	30x5
1220	1090	836	482	1617	1444	1108	639	70090-4	40x5
1411	1260	994	583	1870	1670	1317	772	70090-5	50x5
1613	1440	1150	688	2137	1908	1524	912	70090-6	60x5
1673	1494	1197	718	2217	1980	1586	951		63x5
1960	1750	1450	885	2597	2319	1921	1173	70090-7	80x5
2296	2050	1730	1080	3042	2716	2292	1431		100x5
2666	2381	2022	1300	3532	3155	2679	1723		125x5
1547	1289	986	573	2041	1701	1300	756	70095-1	30x10
1931	1609	1230	715	2549	2124	1624	944	70095-2	40x10
	2040	1510	852		2703	2001	1129	70095-3	50x10
	2300	1720	985		3048	2279	1305	70095-4	60x10
	2790	2110	1240		3697	2796	1643	70095-5	80x10
	3260	2480	1490		4320	3286	1974	70095-6	100x10
	3740	2860	1740		4956	3790	2306	70095-7	120x10
	4680	3590	2220		6201	4757	2942		160x10
	5610	4310	2690		7433	5711	3564		200x10

קורס- מתקני חשמל -הנדסאי חשמל

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
	KW	HP										
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 ⁽²⁾	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 ⁽¹⁾	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 - 230VΔ / 400 VY above 3 HP - 6 terminals - 400VΔ / 690V Y												

נספחים - נורות										
נורות פלואורסנט וקומפקט										
תאריך	סל' להחמנה	סימון בינ"ל	הספק P(W)	כית נורה	שטח אור φ(m)	מקדם מסירת צבע Ra	נאום' צבע צ'	קוטר D(mm)	אורך L(mm)	אורך חיים t(h)
פלואורסנט לבן חם	INT	001938	14 *	G5	1,350	85	2,700	16	549	20,000
		001940	28 *	G5	2,800	85	2,700	16	1,149	20,000
		001950	35 *	G5	3,550	85	2,700	16	1,449	20,000
פלואורסנט לבן חם	WW	001928	14 *	G5	1,350	80	3,000	16	549	20,000
		001912	21 *	G5	2,100	80	3,000	16	849	20,000
		001929	28 *	G5	2,900	80	3,000	16	1,149	20,000
		001914	35 *	G5	3,500	80	3,000	16	1,449	20,000
		001909	24 **	G5	2,000	80	3,000	16	549	20,000
		001910	39 **	G5	3,500	80	3,000	16	849	20,000
		001915	49 **	G5	4,850	80	3,000	16	1,449	20,000
		001911	54 **	G5	5,000	80	3,000	16	1,149	20,000
		001913	80 **	G5	6,900	80	3,000	16	1,449	20,000
		002064	18	G13	1,150	50	2,900	26	590	12,000
		002055	36	G13	2,850	50	2,900	26	1,200	12,000
		002066	58	G13	4,600	50	2,900	26	1,500	12,000
פלואורסנט לבן קר	CW	002086	8	G5	240	80	4,000	16	212	12,000
		002085	8	G5	450	80	4,000	16	288	12,000
		002071	13	G5	950	80	4,000	16	517	12,000
		001921	14 *	G6	1,350	85	4,000	16	549	20,000
		001922	21 *	G5	2,100	85	4,000	16	849	20,000
		001923	28 *	G5	2,900	85	4,000	16	1,149	20,000
		001924	35 *	G5	3,550	85	4,000	16	1,449	20,000
		001925	24 **	G5	2,000	85	4,000	16	549	20,000
		001926	39 **	G5	3,500	85	4,000	16	849	20,000
		002116	49 **	G5	4,850	85	4,000	16	1,449	20,000
		001927	54 **	G5	5,000	85	4,000	16	1,149	20,000
		002111	80 **	G5	6,900	85	4,000	16	1,449	20,000
		002089	18	G13	1,150	65	4,100	26	590	12,000
		002039	36	G13	2,850	65	4,100	26	1,200	12,000
		002058	58	G13	4,600	65	4,100	26	1,500	12,000
פלואורסנט אור יום	DL	001901	14 *	G5	1,300	85	6,200	16	549	20,000
		001902	21 *	G5	2,000	85	6,200	16	849	20,000
		001903	28 *	G5	2,750	85	6,200	16	1,149	20,000
		001904	35 **	G5	3,500	85	6,200	16	1,449	20,000
		001905	24 **	G5	1,900	85	6,200	16	549	20,000
		001906	39 **	G5	3,400	85	6,200	16	849	20,000
		002117	49 **	G5	4,850	85	6,200	16	1,449	20,000
		001907	54 **	G5	4,900	85	6,200	16	1,149	20,000
		002112	80 **	G5	6,400	85	6,000	16	1,449	20,000
		002018	18	G13	1,050	70	6,200	26	590	12,000
		002036	36	G13	2,500	70	6,200	26	1,200	12,000
		002059	58	G13	4,000	70	6,200	26	1,500	12,000
פלואורסנט לבן חם RAMB TRIPHOSPHOR	WW	001960	18	G13	1,350	85	3,000	26	590	15,000
		001961	36	G13	3,350	85	3,000	26	1,200	15,000
		001962	58	G13	5,200	85	3,000	26	1,500	15,000
פלואורסנט לבן קר RAMB TRIPHOSPHOR	CW	002065	18	G13	1,350	85	4,000	26	590	15,000
		002037	36	G13	3,350	85	4,000	26	1,200	15,000
		002068	58	G13	5,200	85	4,000	26	1,500	15,000

HE = High Efficiency *

HO = High Output **

הנתונים שולחו גם לרשימה הנפרדת

* נא לשלם לפחות 25 - בעדו ב-30%

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 t(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 אוטו 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	6,000
MASTER COLOR	70	G12	6,600	80	3,000	20	90	6,000
	150	G12	14,000	80	3,000	20	100	6,000
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	12,500	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	285	8,000
נ.ל.ג 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
נ.ל.ג 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